



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA. Ingeniería

Volumen 27 • Número 3 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2022

REVISTA Ingeniería

Volumen 27 · Número 3 · Año 2022 · 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.

EDITORES

Oscar Danilo Montoya Giraldo, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

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

COMITÉ EDITORIAL

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

Alonso Salvador Sanchez, PhD.
Universidad de Alcalá,
España

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

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

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

Josep M. Guerrero, PhD.
Aalborg University, Dinamarca

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

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

Carlos Eduardo Moreno, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Víctor Hugo Grisales, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

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

COMITÉ CIENTÍFICO

Germán Jairo Hernández, PhD.
Universidad Nacional
de Colombia

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

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

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

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

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

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

DIRECTIVAS

Giovanny Tarazona Bermúdez, PhD.
Rector

Ángela Parrado Rosselli, PhD.
Directora Centro de Investigación
y Desarrollo Científico

Luz Esperanza Bohórquez, PhD.
Decana de la Facultad de Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Ingrí Gisela Camacho, BSc.
Gestor Editorial

Pablo Estrada Suarez
Corrección de Estilo

José Daniel Gutierrez Mendoza
Corrección de Estilo

Julian Arcila-Forero, MSc.
Diseñador *L^AT_EX*

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

Alexander Garrido

Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

Andrés Eduardo Ortíz-Ardila

Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

Carlos J. Renedo Estébanez

Universidad de Cantabria, España

Cecilia Sandoval-Ruiz

Universidad de Carabobo, Venezuela

Elkin Flórez

Universidad de Pamplona, Colombia

Fredys Simanca

Universidad Libre, Colombia

Gerardo Abel Laguna-Sánchez

Universidad Autónoma Metropolitana-Lerma, México

Ixbalank Torres

Universidad de Guanajuato, México

Jairo Rafael Montoya-Torres

Universidad de La Sabana, Colombia

Jesús María López Lezama

Universidad de Antioquía, Colombia

Joaquín Guillermo Ramírez-Gil

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Jorge Vargas Flórez

Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú

José Cataldo

Universidad de la República, Uruguay

Juan Antonio Guerrero-Ibáñez

Centro Médico de Colima, México

Luis Fernando Grisales Norena

Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

Mirco Daniel Chapetti

Universidad Mar Del Plata. INTEMA, CONICET, Argentina

Rafael Cortés

Instituto Politécnico Nacional, México

Raúl Marticorena-Sánchez

Universidad de Burgos, España

Alexander Molina-Cabrera

Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

Brian Meneses-Claudio

Universidad de Ciencias y Humanidades, Perú

Carmen-Pilar Martí-Ballester

Universitat Autònoma de Barcelona, España

Edwin Lenin Chica Arrieta

Universidad de Antioquia, Colombia

Ernesto López-Morales

Universidad de Chile, Chile

Gabriel Enrique De la Torre

Universidad San Ignacio de Loyola, Perú

Germán Cuevas-Rodríguez

Universidad de Guanajuato, México

J. Hidalgo-Crespo

Universidad de Guayaquil, Ecuador

Jesús Manuel Quiroz-Castillo

Universidad de Sonora, México

Jhonn Pablo Rodríguez

Universidad del Cauca, Colombia

Jorge R. Vega

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

José Ángel Sánchez-Fernández

Universidad Politécnica de Madrid, España

José María Caridad Y Ocerín

Universidad de Córdoba, España

Julio Terrados-Cepeda

Universidad de Jaén, España

María Cristina Quijano-Martínez

Pontificia Universidad Javeriana, Cali

Pablo Marcelo Stefani

Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina

Ramiro Velázquez

Universidad Panamericana, México

Walter Julián Gil González

Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

TABLA DE CONTENIDOS

Editorial

A Possible Classification for Metaheuristic Optimization Algorithms in Engineering and Science

Una posible clasificación de los algoritmos de optimización metaheurística en ingeniería y ciencia

Oscar Danilo Montoya, Alexander Molina-Cabrera, Walter Gil-González

Electrical and Electronic Engineering

Power Flow in Unbalanced Three-Phase Power Distribution Networks Using Matlab: Theory, analysis, and quasi-dynamic simulation

Flujo de potencia en redes de distribución eléctrica trifásicas no equilibradas utilizando Matlab: Teoría, análisis y simulación cuasi-dinámica

Alejandro Garcés-Ruiz

Optimal Selection of Conductors in Three-Phase Distribution Networks using the Newton Metaheuristic Algorithm

Selección óptima de conductores en redes de distribución trifásicas utilizando el algoritmo metaheurístico de Newton

Daniel Julián Nivia-Torres, Guillermo Alejandro Salazar-Alarcón, Oscar Danilo Montoya

Methodology for Predictive Maintenance of Distribution Transformers based on Machine Learning

Metodología para el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución basada en aprendizaje automático

Laura I Alvarez Q, Carlos A Lozano M, Diego A Bravo M

Industrial Engineering

Energy Projects in Healthcare: An Opportunity for Continuous Improvement

Proyectos energéticos en salud: una oportunidad para la mejora continua

Hugo Gaspar Hernández Palma, Daniel Mendoza Casseres, Javier Durán Ravelo

Improvement Opportunities for the Reception, Manufacturing, and Dispatch Processes of Coffee Pulping Machines

Oportunidades de mejora para los procesos de recepción, fabricación y despacho de máquinas despulpadoras de café

Jairo Roberto Pérez-González, Xiomy Carolina Cárdenas-Cortés, Daniela Ocampo-Arias, Yony Fernando Ceballos

Environmental Engineering

Alternatives to Treat Sludge from Sewage Treatment Plants: A Review

Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión

Geraldine Cárdenas Torrado, Francisco José Molina Pérez

Household Waste Generation and Composition in Honduras during the Covid-19 Pandemic

Generación y composición de residuos sólidos domiciliarios en Honduras durante la pandemia Covid-19

Norvin Requena Sánchez, Dalia Carbonel Ramos, Rómulo Romero Centeno

Mechanical Engineering

On Determining the Stress Intensity Factor Range Threshold and the Factors that Affect It

Sobre la determinación del umbral del rango del factor de intensidad de tensiones y los factores que lo afectan

Kebin Alberto Medina-Bernal, Libardo Vicente Vanegas-Useche

Evaluation of Reflective Surfaces for Bifacial Solar Panels using the Response Surface Methodology

Evaluación de superficies reflectantes para paneles solares bifaciales mediante la metodología de superficie respuesta

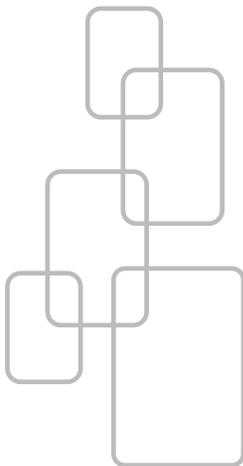
Juan Pablo Castaño Serna, Ainhoa Rubio-Clemente, Edwin Chica Arrieta

Methodology for the Collection and Analysis of Real Estate Data Using Alternative Sources: Case Study in Three Medium-Sized Cities of Colombia

Metodología para obtención y análisis de datos inmobiliarios usando fuentes alternativas: estudio de caso en tres ciudades intermedias de Colombia

Andrés E. Rosso-Mateus, Yeimy. M. Montilla-Montilla, Sonia. C. Garzón-Martínez

Instructions for Authors



A Possible Classification for Metaheuristic Optimization Algorithms in Engineering and Science

The area of optimization in engineering and science evolves because of the human need to solve real-life problems efficiently and in structured way [1]. The optimization model that represents said real-life problems can have different shapes: from linear programming to mixed-integer nonlinear programming models [2]. In addition, mathematical models in optimization can have a single objective function or multiple objectives in conflict. Due to the complexity of some optimization problems in engineering and science, exact optimization methods are inefficient for several reasons [3]: (i) due to the large dimensions of the solution spaces, (ii) non-linearities and non-convexities in objective functions and/or constraints, and (iii) failure to guarantee that the global optimum is reached. Moreover, for most of these optimization problems, processing times increase with non-polynomial forms, which is why most optimization problems belong to the NP-hard family. These complications make it necessary to employ alternative solution methods for addressing multiple programming models, with the aim of finding suitable solutions (local optima) that require low computational effort and are implementable in any programming environment [4]. These optimization algorithms are known as metaheuristic or combinatorial optimization methods. The main characteristic of these algorithms is that they begin the exploration of the solution space from an initial solution (a single solution or a group of solutions), which advances during the iteration process using different evolution rules. Algorithms which use a single solution are known as trajectory-based optimization algorithms [5], while the methods that work with a group of solutions are known as population-based optimizers [6].

Metaheuristic optimization methodologies are well accepted in science and engineering, as these work directly with the exact problem formulation by using penalty factors in order to explore and exploit the solution space, with the main advantage that infeasible solutions can be used during the evolution process in order to find promissory solution regions with excellent objective function values [7].

Open access



Citación/How to cite: O. D. Montoya, A. Molina-Cabrera, and W. Gil-González, "A Possible Classification for Metaheuristic Optimization Algorithms in Engineering and Science", *Ingeniería*, vol. 27, no. 3, 2022, e19815.
 © The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
 DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.19815>

Depending on the philosophy that inspires metaheuristic optimizers, these can be grouped into many different families. Here, we present a possible classification of the most common combinatorial optimization methods applied in science and engineering.

Bio-inspired algorithms

These algorithms are inspired by the biological processes and behaviors of living beings in nature. Genetic algorithms, inspired by Darwin's evolution theory, are the most classical examples of their kind. They work with an initial population of parents that evolves during the iteration process by applying three main concepts: (i) selection, (ii) recombination, and (iii) mutation. They yield a set of offspring that will be part of the population if they improve the worst objective function values of some parents and are different from them. In the current literature, the most implemented version of genetic algorithms corresponds to the Chu and Beasley algorithm given its computational efficiency in terms of processing times, as it only replaces one individual in the population at each iteration [8].

Bio-inspired algorithms may also be based on the behavior of groups of living beings searching for food. Some of the most recognized methodologies are (i) particle swarm optimization (flocks of birds and fish), (ii) the crow search algorithm (flocks of crows), (iii) the salp swarm algorithm (flocks of salps), (iv) the whale optimization algorithm (flocks of whales), and (v) the ant lion and ant colony optimizers (flocks of ants).

Mathematics-inspired algorithms

These optimization algorithms correspond to approaches that are based on nonlinear functions, numerical methods, statistical behaviors, or distributed permutation flow [9], [10]. These algorithms exploit the properties of some well-known functions and statistical distributions in order to model different behaviors present in nature. The most common methods are: (i) the sine-cosine algorithm, (ii) the gradient-based metaheuristic optimizer, (iii) the Newton-metaheuristic algorithm, (iv) the generalized normal distribution algorithm, and (v) Tabu search, among others.

Physics-inspired algorithms

This family of algorithms is based on the behaviors observed in nature that are not related to biological processes. In general, they are based on physical observation and experimentation [11]. Some of the most recognized and widely used physics-inspired optimization algorithms are (i) the gravitational search algorithm, (ii) the black hole optimizer, (iii) the supernova optimizer, (iv) the vortex search algorithm, (v) the charged system search algorithm, (vi) the galaxy-based search algorithm, (vii) the multiverse optimization algorithm, and (viii) the simulated annealing algorithm.

Socially inspired algorithms

Socially inspired algorithms are search optimization methodologies that emulate human interactions in different environments [12]. These algorithms exploit the behavior of humans in groups in order to solve real-life problems and learn new skills. Some of the most common socially in-

spired algorithms are (i) the nomadic people optimizer, (ii) teaching-learning-based optimization, (iii) the socio-evolution and learning optimization algorithm, (iv) artificial memory optimization, (v) human mental search, and (vi) the cultural evolution algorithm.

Remark 1 *In general, the use of metaheuristic optimization algorithms in science and engineering offers hundreds of possibilities regarding algorithms from different families. Furthermore, their research is also under continuous development, i.e., several papers and many literature every year provide multiple new optimizers trying to emulate situations and processes observed in nature in order to reach optimal solutions for engineering and real-life problems.*

Oscar Danilo Montoya 

Compatibility and Electromagnetic Interference group, Department of Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Electrical Engineer, Master's in Electrical Engineering, and PhD in Engineering.

Grupo de Compatibilidad e Interferencia Electromagnética, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería

odmontoyag@udistrital.edu.co

Alexander Molina-Cabrera 

Electromagnetic Fields and Energy Phenomena group, Department of Engineering, Universidad Tecnológica de Pereira; Electrical Engineer, Master's in Electrical Engineering, and PhD in Engineering.

Grupo de Campos Electromagnéticos y Fenómenos Energéticos, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira, Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería

almo@utp.edu.co

Walter Gil-González 

Electromagnetic Fields and Energy Phenomena group, Department of Engineering, Universidad Tecnológica de Pereira; Electrical Engineer, Master's in Electrical Engineering, and PhD in Engineering.

Grupo de Campos Electromagnéticos y Fenómenos Energéticos, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira, Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería.

wjgil@utp.edu.co

References

- [1] L. Abualigah, M. A. Elaziz, A. M. Khasawneh, M. Alshinwan, R. A. Ibrahim, M. A. A. Al-qaness, S. Mirjalili, P. Sumari, and A. H. Gandomi, "Meta-heuristic optimization algorithms for solving real-world mechanical engineering design problems: a comprehensive survey, applications, comparative analysis,

- and results,” *Neur. Comp. App.*, vol. 34, no. 6, pp. 4081–4110, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06747-4> 1
- [2] R. Sioshansi and A. J. Conejo, *Optimization in engineering*. Ney York, NY, USA: Springer, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56769-3> 1
- [3] A. Kumar, G. Wu, M. Z. Ali, R. Mallipeddi, P. N. Suganthan, and S. Das, “A test-suite of non-convex constrained optimization problems from the real-world and some baseline results,” *Swarm Evol. Comp.*, vol. 56, p. 100693, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100693> 1
- [4] M. Abdel-Basset, L. Abdel-Fatah, and A. K. Sangaiyah, “Metaheuristic algorithms: A comprehensive review,” in *Computational intelligence for multimedia big data on the cloud with engineering applications*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018, pp. 185–231. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813314-9.00010-4> 1
- [5] C. Venkateswarlu, “A metaheuristic tabu search optimization algorithm: Applications to chemical and environmental processes,” in *Optimization Problems in Engineering [Working Title]*. IntechOpen, jun 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/intechopen.98240> 1
- [6] J. O. Agushaka and A. E. Ezugwu, “Initialisation Approaches for Population-Based Metaheuristic Algorithms: A Comprehensive Review,” *App. Sci.*, vol. 12, no. 2, p. 896, jan 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app12020896> 1
- [7] K. Dahal, S. Remde, P. Cowling, and N. Colledge, “Improving metaheuristic performance by evolving a variable fitness function,” in *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 170–181. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-540-78604-7_15 1
- [8] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, “A review on genetic algorithm: past, present, and future,” *Multimed. Tools. Appl.*, vol. 80, no. 5, pp. 8091–8126, oct 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6> 2
- [9] A. B. Gabis, Y. Meraihi, S. Mirjalili, and A. Ramdane-Cherif, “A comprehensive survey of sine cosine algorithm: variants and applications,” *Artif Intell Rev*, vol. 54, no. 7, pp. 5469–5540, jun 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10026-y> 2
- [10] Y. Zhang, Z. Jin, and S. Mirjalili, “Generalized normal distribution optimization and its applications in parameter extraction of photovoltaic models,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 224, p. 113301, nov 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113301> 2
- [11] A. Biswas, K. K. Mishra, S. Tiwari, and A. K. Misra, “Physics-inspired optimization algorithms: A survey,” *Optim. Lett.*, vol. 2013, pp. 1–16, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2013/438152> 2
- [12] S. Q. Salih and A. A. Alsewari, “A new algorithm for normal and large-scale optimization problems: Nomadic people optimizer,” *Neural. Comput. Appl.*, vol. 32, no. 14, pp. 10 359–10 386, oct 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04575-1> 2

Power Flow in Unbalanced Three-Phase Power Distribution Networks Using Matlab: Theory, analysis, and quasi-dynamic simulation

Flujo de potencia en redes de distribución eléctrica trifásicas no equilibradas utilizando Matlab: Teoría, análisis y simulación cuasi-dinámica

Alejandro Garcés-Ruiz ¹

¹Universidad Tecnológica de Pereira. Department of Electric Power Engineering.

Received: 2nd-April-2022. Modified: 28th-April-2022. Accepted: 23th-May-2022

Abstract

Context: The power flow is a classical problem for analyzing and operating power distribution networks. It is a challenging problem due to a large number of nodes, the high r/x ratio -typical in low voltage networks- and the unbalanced nature of the load.

Method: This paper review four methods for power flow analysis, namely: the conventional Newton's method, Newton's method in a complex domain, the fixed-point algorithm using Y_{bus} representation, and the backward-forward sweep algorithm. It is well-known that Newton's method has quadratic convergence, whereas the backward-forward sweep algorithm has linear convergence. However, the formal analysis of this convergence rate is less known in the engineering literature. Thus, the convergence of these methods is presented in theory and practice.

Results: A set of simulations in the IEEE 900 node test system is presented. This system is large enough to demonstrate the performance of each algorithm. In addition, a Matlab toolbox is presented for making numerical simulations both for the static case and for quasi-dynamic simulations.

Conclusions: Fixed point algorithms were faster than Newton's methods. However, the latter required less number of iterations.

Keywords: load flow, Newton's method, Backward-forward algorithm, power flow, quasi-dynamic simulation.

Acknowledgements: This work was founded by the vicerrectoria de investigaciones y innovacion y extension, Universidad Tecnologica de Pereira. Proyecto ODiN (Optimal Operation of Distribution Networks).

Language: English.

Open access



Cite as: A. Garcés-Ruiz. "Power Flow in Unbalanced Three-Phase Power Distribution Networks Using Matlab: Theory, analysis, and quasi-dynamic simulation". *Ing.*, vol. 27, no. 3, 2022. e19252.

<https://doi.org/10.14483/23448393.19252>

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

Resumen

Contexto: El flujo de potencia es un problema clásico para la operación de redes de distribución de energía. Es un problema desafiante debido a la gran cantidad de nodos, la alta relación r/x típica de las redes de baja tensión y la naturaleza desequilibrada de la carga.

Métodos: Este documento revisa cuatro métodos para el análisis de flujo de potencia, a saber: el método de Newton convencional, el método de Newton en un dominio complejo, el algoritmo de punto fijo que utiliza la representación de admitancia nodal (Y_{bus}) y el algoritmo de barrido hacia atrás y hacia adelante. Se presenta la convergencia de estos métodos en teoría y práctica. Es bien sabido que el método de Newton tiene convergencia cuadrática, mientras que el algoritmo de barrido hacia atrás y adelante tiene convergencia lineal. Sin embargo, el análisis formal de esta tasa de convergencia es menos conocido en la literatura de ingeniería.

Resultados: se desarrolla una caja de herramientas de Matlab para realizar simulaciones numéricas tanto en el caso estático como en una simulación cuasi-dinámica usando el sistema de prueba IEEE de 900 nodos.

Conclusiones: Los algoritmos de punto fijo resultaron más rápidos. No obstante, los algoritmos basados en Newton requirieron menor número de iteraciones.

Palabras clave: flujo de carga, método de Newton, algoritmo de barrido iterativo, flujo de potencia, simulación cuasi-dinámica.

Agradecimientos: este trabajo es patrocinado por la vicerrectoría de investigaciones y innovación y extensión, Universidad Tecnológica de Pereira. Proyecto ODIN (Optimal Operation of Distribution Networks)

Idioma: Español.

1. Introduction

Power flow is a standard method for analyzing and operating power systems both at high voltage levels and in power distribution networks. It takes nodal power information and returns the system's state, which is usually represented by nodal voltages. The problem consists of a large set of highly nonlinear algebraic equations that requires efficient numerical methods to be solved in practice [1]. Newton's method is undoubtedly the most common approach for high power applications. It searches for the solution using successive linear approximations via Taylor's expansions. These approximations require calculating a Jacobian matrix in each iteration. However, calculating this Jacobian matrix and solving the corresponding linear system may be computationally expensive. Therefore, particular approximations have been proposed according to the type of network. For example, in high-voltage power transmission networks, the resistance value tends to be lower than the inductance of transmission lines, so the Jacobian matrix can be reduced to a constant matrix directly related to the imaginary part of the nodal admittance matrix. This matrix can be efficiently factorized using lower-upper decomposition or Cholesky's factorization in order to solve the linear system quickly ([2] for a complete review of these methods). These quasi-Newton methods are known as *decoupled* and *fast-decoupled* Newton's methods [3]. The most simplified version of the problem consists of a linear system that neglects voltage variations. This method is called *DC-load flow* due to the analogy to the problem of finding voltages in a DC network [4]. Unfortunately, that kind of approximation is not valid in power distribution networks, and the entire Jacobian must therefore be constructed in each iteration [4].

Newton's method (without any approximation of the Jacobian matrix) has quadratic convergence, –even in power distribution networks– when initialized close to the solution. This property has been analyzed mainly in the context of DC grids [5], although it can be extended to AC networks. This method can also be defined in the complex domain using Wirtinger's derivatives [6]. However, the algorithm is still time-consuming in both cases due to the construction and inversion of the Jacobian matrix, which is why Jacobian-free algorithms are used in power distribution networks. These *ad-hoc* algorithms include the backward-forward sweep method and the current injection method [7].

The backward/forward sweep algorithm is the standard in power distribution networks¹. This algorithm considers power distribution networks as radial, and it executes a two-step iteration based on Kirchhoff's laws: first, line currents are calculated in a backward sweep, *i.e.*, starting from the last node in the direction to the substation; then, voltages are calculated in a forward sweep, *i.e.*, from the substation to the final user. This simple method has been used in academic and commercial software due to its flexibility and efficiency [9]. It allows solving single-phase and three-phase unbalanced systems. Moreover, it may be easily modified to include voltage regulators and other compensation components [10].

A less known aspect of the backward/forward sweep algorithm is its theoretical analysis [11]. The algorithm is, in essence, a fixed-point iteration that guarantees a linear convergence (in contradistinction to the quadratic convergence of Newton's method). This algorithm can be represented in matrix form, thus allowing for a simple implementation in interpreted languages such as Matlab or Python. Moreover, a matrix representation allows for a straightforward analysis [12].

On the other hand, modern analysis in power distribution networks requires simulations in a time window while considering variations in generation and load. This type of simulation, known as quasi-dynamic time series analysis, requires the evaluation of thousands of power flow scenarios, so efficient algorithms are required today more than ever [13].

Despite being a classic problem, power flow is still under research [14], where neural networks [15] and distributed implementations are two areas of constant development [16], [17]. Its implementation in large power systems is also a challenge that is constantly studied [18], as well as its practical implementation [18]. Although using artificial intelligence techniques can be justified in some specific contexts, the scientific community has heavily criticized its abuse [19]. A classic approach is always preferable since it starts from understanding the physical phenomenon and ensures general mathematical properties that cannot be assured by means of artificial intelligence. Therefore, it is important to review and analyze classic problems and their solutions.

This paper analyzes four power flow algorithms for power distribution networks, namely the conventional Newton's method, the Newton's method in a complex domain, the fixed-point algorithm using Y_{bus} representation, and, the backward-forward sweep algorithm. Contributions are twofold: first, the algorithms are presented in general form, and their convergence is analyzed in theory and practice; and second, a toolbox in Matlab is developed to compare each formulations. To the best

¹See [8] for one seminal work in this field, proposed by Prof. Céspedes from Colombia National University.

of the author's knowledge, there is no other toolbox in Matlab that deals with unbalanced power distribution networks as presented herein.

The rest of this paper is organized as follows: Section 2 presents the basic formulation of the power flow problem for three-phase unbalanced systems; Section 3 presents Newton's method, both in its real formulation and in the complex domain; after that, the fixed-point algorithm and the backward-forward sweep method are presented in Section 4; Section 5 provides a review of the fundamental theoretical analysis of these algorithms; and Section 6 shows numerical experiments using the IEEE 900-node test system. The paper ends with conclusions in Section 7 and a brief appendix about the Matlab implementation.

2. Problem formulation

A power distribution network is represented by an oriented graph $\mathcal{G} = \{\mathcal{N}, \mathcal{E}\}$, with \mathcal{N} being the set of nodes and $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{N} \times \mathcal{N}$ the set of branches. The size of \mathcal{N} is $n = |\mathcal{N}|$. Uppercase letters represent vectors and matrices, while lowercase letters represent single variables or vector/matrix entries. Thus, the nodal voltage is given by $V_{\mathcal{N}} = [v_k] \in \mathbb{C}^n$ and the nodal power is given by $S_{\mathcal{N}} = [s_k] \in \mathbb{C}^n$. All variables are considered to be complex hereafter unless otherwise specified. The complex conjugate of x is represented by x^* . This operation is only the conjugate without transposing when applied to a matrix². With a slight abuse of notation, X/Y represents the element-wise array division between vectors X and Y of the same size.

Nodal voltages and nodal currents are related by the following matrix equation:

$$I_{\mathcal{N}} = YV_{\mathcal{N}}, \quad (1)$$

where Y is the nodal admittance matrix $Y = [y_{km}] \in \mathbb{C}^{n \times n}$. Each entry of this matrix is constructed as follows:

$$y_{km} = \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{l \in \mathcal{E}} y_l & \text{for } k = m \\ -y_l & \text{for } k \neq m \text{ and, } l = (k, m) \end{array} \right\}. \quad (2)$$

This equation indicates, in simple terms, that the entries in the diagonal collect the admittance of all the lines connected to a node, and that the off-diagonal terms collect the negative of the corresponding line admittance. Another way to construct the nodal admittance matrix is presented below:

$$Y = A^{\top} Y_{\mathcal{E}} A, \quad (3)$$

where A is the node-to-branch incidence matrix associated to \mathcal{G} and $Y_{\mathcal{E}} = \text{diag}(y_l) \forall l \in \mathcal{E}$. The nodal power is represented in terms of the nodal current, as given in Eq. (4):

$$s_k^* = \sum_{m=1}^n y_{km} v_k^* v_m, \quad (4)$$

²Note that x^* is different from the operation x' in Matlab, since, in the latter, this operation returns the conjugate-transpose.

where s_k^* indicates the complex conjugate of s_k . This equation can be split into real and imaginary parts, as given below:

$$p_k = \sum_{m=1}^n g_{km} u_k u_m \cos(\theta_{km}) + b_{km} u_k u_m \sin(\theta_{km}), \quad (5)$$

$$q_k = \sum_{m=1}^n g_{km} u_k u_m \sin(\theta_{km}) - b_{km} u_k u_m \cos(\theta_{km}), \quad (6)$$

where $y_{km} = g_{km} + jb_{km}$, $s_k = p_k + q_k j$ and $v_k = u_k e^{j\theta}$, with p_k , q_k , u_k and θ_k being real variables. The power flow consists of finding v_k given the value of s_k at all nodes except the substation, as the voltage of that node is already known. The problem is clearly nonlinear and highly complex, so numerical methods are required to find a solution. Note that Eqs. (5) and (6) are completely equivalent to (4), although the latter is undoubtedly a more compact representation. Eq. (4) is known as the complex representation of the power flow, whereas (5)-(6) is a real representation thereof.

On the other hand, power distribution networks are unbalanced, and hence this model must be extended accordingly. Thus, each node in the graph represents three nodes in the system, which are labeled as A, B, and C, as depicted in Fig. 1. Likewise, each branch represents a three-phase line section with its corresponding 3×3 impedance matrix. The algebraic structure of the problem is the same for three-phase systems; only the size is increased.

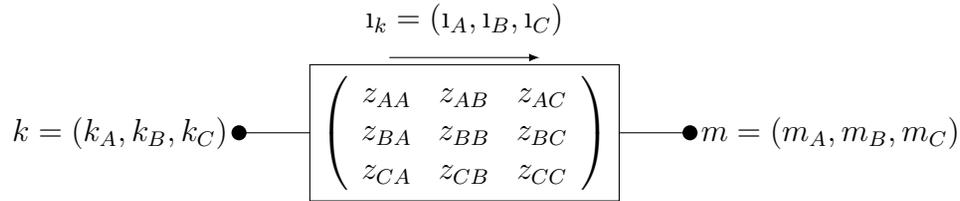


Figure 1. Example of a three-phase line for modeling three-phase unbalanced power distribution networks

The three-phase nodal admittance matrix $Y \in \mathbb{C}^{3n \times 3n}$ is constructed in the same way as in Eq. (2), but, in this case, y_l is a 3×3 block matrix. There is also an equivalent formulation using the node-to-branch incidence matrix, as given in Eq. (7).

$$Y = (A \otimes \mathbb{I}_3)^\top Y_{\mathcal{E}} (A \otimes \mathbb{I}_3), \quad (7)$$

where \mathbb{I}_3 represents the identity matrix of size 3, and \otimes is the Kronecker's product. Both formulations return a matrix in which entries 1 to n correspond to phase A, entries $n + 1$ to $2n$ correspond to phase B, and entries $2n + 1$ to $3n$ correspond to phase C. From now on, the three-phase case is considered in this article since it is the most general.

The substation consists of three nodes corresponding to each phase. These nodes are represented by the set $\mathcal{S} \in \mathcal{N}$. The remaining nodes are $\mathcal{R} = \mathcal{N} - \mathcal{S}$. Then, the nodal voltages are divided into two sets, namely $V_{\mathcal{S}} = [v_k] \forall k \in \mathcal{S}$, and $V_{\mathcal{R}} = [v_k] \forall k \in \mathcal{R}$. The same applies to currents $I_{\mathcal{S}}$, $I_{\mathcal{R}}$, nodal powers $S_{\mathcal{S}}$, $S_{\mathcal{R}}$, and nodal admittance matrix $Y_{\mathcal{S}\mathcal{R}}$, $Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}}$.

Power distribution networks are usually radial. Therefore, their graphs have a particular structure known as *tree*, in which any two vertices are connected by exactly one path. As a consequence of that, each branch has a unique arriving node, as exemplified in Fig. 2.

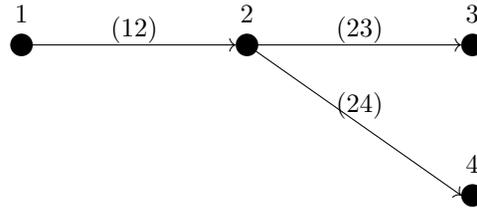


Figure 2. Example of a tree. Note that there is only one arriving node for each branch: (12) \rightarrow 2, (23) \rightarrow 3, and (24) \rightarrow 4

A tree structure is vital for the backward-forward sweep algorithm, as presented in Section ???. This property allows for the creation of an unambiguous map between branch currents and the set of nodal voltages. This map has two consequences, one theoretical and one practical. From a theoretical point of view, the submatrix Y is non-singular if the graph is connected. This property is used by the fixed-point algorithm. From a practical standpoint, this map allows for efficient storage in the same array in the backward-forward sweep algorithm. Along this paper, it is supposed that the branches are sorted from the substation to the final user and the currents in the graph are oriented accordingly ([20] for a graph ordering method).

3. Newton's methods

3.1. Conventional Newton's method in the real domain

Newton's method is a classic algorithm for solving optimization problems and systems of non-linear algebraic equations such as the power flow problem. It approaches the solution by successive linear approximations of the non-linear equations, as depicted in Fig. 3. The method departs from an initial guess x_0 , where the non-linear equation is approximated linearly. A new point x_1 is calculated, and the function is again approximated to a linear form. The process continues until an acceptable solution is found [21].

Each iteration of Newton's method has two key steps: first, the derivative of the function is calculated, and then, the new operation point is evaluated. The following expressions show the process:

$$[D_f(x)]\Delta x = \Delta f(x) \quad (8)$$

$$x \leftarrow x + \Delta x \quad (9)$$

In the power flow problem, the function f is usually defined by separating the power flow equations into real and imaginary parts, *i.e.*, (5)-(6). The vector of state variable is $x = (\theta, u)$, and $D_f(x)$ is the Jacobian matrix given by Eq. (10),

$$D_f(x) = \begin{pmatrix} \partial p / \partial \theta & \partial p / \partial u \\ \partial q / \partial \theta & \partial q / \partial u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J^{p\theta} & J^{pu} \\ J^{q\theta} & J^{qu} \end{pmatrix} \quad (10)$$

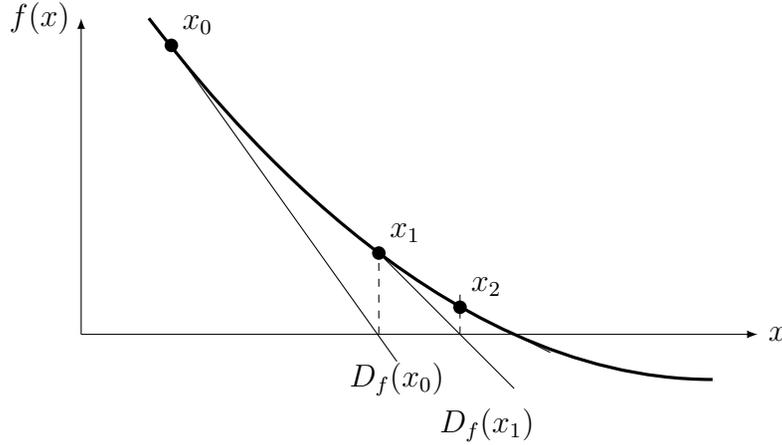


Figure 3. Simple representation of Newton's method

The Jacobian is a block matrix that requires separately considering diagonal and off-diagonal entries. The diagonal entries are given below:

$$J_{kk}^{p\theta} = -b_{kk}v_k^2 - q_k \quad (11)$$

$$J_{kk}^{pu} = g_{kk}v_k + \frac{p_k}{v_k} \quad (12)$$

$$J_{kk}^{q\theta} = -g_{kk}v_k^2 + p_k \quad (13)$$

$$J_{kk}^{qu} = -b_{kk}v_k + \frac{q_k}{v_k}; \quad (14)$$

and the non-diagonal terms are given by the following expressions:

$$J_{km}^{pu} = g_{km}v_k \cos(\theta_{km}) + b_{km}v_k \sin(\theta_{km}) \quad (15)$$

$$J_{km}^{qu} = g_{km}v_k \sin(\theta_{km}) - b_{km}v_k \cos(\theta_{km}) \quad (16)$$

$$J_{km}^{p\theta} = J_{km}^{qu} v_m \quad (17)$$

$$J_{km}^{q\theta} = -J_{km}^{pu} v_m. \quad (18)$$

Algorithm 1 summarizes the main steps of the conventional Newton's method applied to power distribution networks.

Newton's method is computationally expensive since $D_f(x)$ has to be calculated in each iteration. In addition, it is necessary to calculate the step either by inverting $D_f(x)$ or by solving the linear system (8). Both options are time-consuming. In high-voltage power systems, it is possible to simplify the problem by making two main approximations: first, the $p\theta$ problem is separated from that of qu based on the fact that $J^{pu} \rightarrow 0$ and $J^{q\theta} \rightarrow 0$; second, the sub-matrices $J^{p\theta}$ and J^{qu} are considered to be constant since $r/x \ll 1$, $v \approx 1$, and $\theta \ll 1$. Unfortunately, these approximations are not valid in power distribution networks, and this method is therefore rarely used in this type of networks.

The method can be easily extended to three-phase unbalanced systems, considering initializing the voltages to 1 pu with the proper phase θ (*i.e.*, 0 for phase A, $-2\pi/3$ for phase B, and $2\pi/3$ for

phase C). The mathematical properties of the algorithm are the same in the single-phase and the three-phase cases.

Algorithm 1 Conventional Newton's method

Require: Y, S

$v \leftarrow \mathbb{I}_n$

$\theta \leftarrow \theta_{\text{phase}} \mathbb{I}_n$

$\epsilon \leftarrow \infty$

while $\epsilon \geq \text{tolerance}$ **do**

 Calculate $J^{p\theta}, J^{pv}, J^{q\theta}, J^{qv}$

 Assemble D_f using (10)

 Calculate $\Delta f = (\Delta p, \Delta q)$

 Solve $[D_f(x)]\Delta x = \Delta f(x)$

$x \leftarrow x + \Delta x$

$\epsilon \leftarrow \|\Delta x\|$

end while

Return x

3.2. Newton's method in the complex domain

The complex representation of the power flow is undoubtedly more compact than the real representation. Therefore, Newton's method is expected to be equally compact in the complex domain. The following definition is required to obtain the linearization:

Definition 3.1. Given a complex function $f = u + jv$ with $u = u(x, y), v = v(x, y)$, the Wirtinger's derivative and its conjugate are defined as follows:

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{j}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (19)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z^*} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{j}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (20)$$

Definition 3.2. A function $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ is holomorphic if its Wirtinger derivatives exist and $\partial f / \partial z^* = 0$.

Holomorphic functions are complex and differentiable. This one infinitely differentiable and locally equal to its own Taylor series. This also means that the following limit can be taken from any direction (see Fig. 4):

$$f'(z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(z + \Delta z) - f(z)}{\Delta z} \quad (21)$$

Another way to identify holomorphic functions is via the Cauchy–Riemann equations presented below:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x} \quad (23)$$

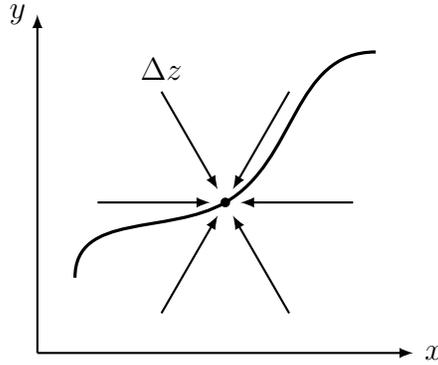


Figure 4. Possible directions in which limit (21) can be taken in the complex domain

Thus, if f is holomorphic, then Wirtinger’s derivative is equal to the standard complex derivative. Unfortunately, the power flow equations are non-holomorphic, so a linearization must consider the effect of both the variable and its conjugate.

In general, Wirtinger’s derivatives apply the common rules of differentiation known from real-valued analysis concerning the sum, product, and composition of functions, namely:

$$\frac{\partial(f + g)}{\partial z} = \frac{\partial f}{\partial z} + \frac{\partial g}{\partial z} \tag{24}$$

$$\frac{\partial(f + g)}{\partial z^*} = \frac{\partial f}{\partial z^*} + \frac{\partial g}{\partial z^*} \tag{25}$$

$$\frac{\partial(f \cdot g)}{\partial z} = f \frac{\partial g}{\partial z} + g \frac{\partial f}{\partial z} \tag{26}$$

$$\frac{\partial(f \cdot g)}{\partial z^*} = f \frac{\partial g}{\partial z^*} + g \frac{\partial f}{\partial z^*} \tag{27}$$

Operations are similar to those in partial derivatives, so z^* can be regarded as a constant when computing the derivative with respect to z and *vice versa*:

$$\frac{\partial}{\partial z} z^* = \frac{\partial}{\partial z^*} z = 0 \tag{28}$$

A complex linear approximation of f can be obtained using these simple definitions, as shown below:

$$\Delta f(z, z^*) = \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right) \Delta z + \left(\frac{\partial f}{\partial z^*} \right) \Delta z^* \tag{29}$$

This approximation behaves like the Jacobian matrix when $f : \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^n$, and it can be applied sequentially by using the iteration $z \leftarrow z + \Delta z$. The complex linearization of Eq. (4) is presented below:

$$\Delta s_k^* = \sum_{m \in \mathcal{S}} y_{km} v_m \Delta v_k + \sum_{m \in \mathcal{R}} y_{km} v_m \Delta v_k^* + y_{km} v_k^* \Delta v_m \tag{30}$$

This equation can be written in matrix form, thus obtaining the following affine equation:

$$J_A \Delta V_{\mathcal{R}} + J_B \Delta V_{\mathcal{R}}^* + \Delta S_{\mathcal{R}}^* = 0, \tag{31}$$

where J_A and J_B are the complex square matrices defined below:

$$J_A = \text{diag}(V_{\mathcal{R}}^*) Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}} \quad (32)$$

$$J_B = \text{diag}(Y_{\mathcal{N}\mathcal{R}} V_S) + \text{diag}(Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}} V_{\mathcal{R}}) \quad (33)$$

Note that Eq. (31) depends of $\Delta V_{\mathcal{R}}$ and $\Delta V_{\mathcal{R}}^*$. Therefore, it is not as simple as a conventional linear system. First, the complex conjugate is calculated:

$$J_A^* \Delta V_{\mathcal{R}}^* + J_B^* \Delta V_{\mathcal{R}} + \Delta S_{\mathcal{R}} = 0 \quad (34)$$

Then, $\Delta V_{\mathcal{R}}$ is represented as function of $\Delta V_{\mathcal{R}}^*$:

$$\Delta V_{\mathcal{R}} = J_A^{-1} (-J_B V_{\mathcal{R}}^* - \Delta S_{\mathcal{R}}) \quad (35)$$

Finally, (35) is replaced into (34), and $\Delta V_{\mathcal{R}}^*$ is cleared:

$$\Delta V_{\mathcal{R}} = (J_A^* - J_B^* J_A^{-1} J_B)^{-1} (J_B^* J_A^{-1} \Delta S_{\mathcal{R}} - \Delta S_{\mathcal{R}}^*) \quad (36)$$

This equation may be efficiently solved by defining auxiliary matrices M_1 and M_2 , as follows:

$$Z_{\mathcal{R}\mathcal{R}} = Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}}^{-1} \quad (37)$$

$$M_1 = J_B^* Z_{\mathcal{R}\mathcal{R}} \text{diag}(1/V_{\mathcal{R}}^*) \quad (38)$$

$$M_2 = J_A^* - M_1 J_B \quad (39)$$

$$M_2 \Delta V_{\mathcal{R}}^* = M_1 \Delta S_{\mathcal{R}} - \Delta S_{\mathcal{R}}^* \quad (40)$$

In this way, only one inverse is directly calculated (*i.e.*, the inverse of $Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}}$), and this inverse is constant. Newton's method in the complex domain is presented in Algorithm 2. The method can be extended to three-phase unbalanced systems by considering the three-phase admittance matrix and a proper initialization of the nodal voltages, taking the corresponding phase into account. Note that the method has a simple and clean code that enables to adapt the script to new problems. This is the main advantage of complex representation.

Algorithm 2 Newton's method in complex domain

Require: $Y_{S\mathcal{R}}, Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}}, S_{\mathcal{R}}$

Calculate $Z_{\mathcal{R}\mathcal{R}}$ with (37)

$V_{\mathcal{R}} \leftarrow 1e^{j\theta_{\text{phase}}} \mathbb{I}_n$

$\epsilon \leftarrow \infty$

while $\epsilon \geq \text{tolerance}$ **do**

 Calculate J_A and J_B with (32) and (33)

 Calculate $\Delta S_{\mathcal{R}}$

 Calculate $\Delta V_{\mathcal{R}}$ with (38) to (40)

$V_{\mathcal{R}} \leftarrow V_{\mathcal{R}} + \Delta V_{\mathcal{R}}$

$\epsilon \leftarrow \|\Delta V_{\mathcal{R}}\|$

end while

Return $V_{\mathcal{R}}$

4. Fixed-point methods

4.1. Direct formulation

Another widely used method for solving nonlinear equation systems is transforming the problem into a fixed point. The Gauss-Seidel method is an excellent example of this approach. This method is widely used for solving systems of linear equations, and it has also been used for solving power flow equations by employing the following iteration:

$$v_k \leftarrow \frac{1}{y_{kk}} \left(\frac{s_k^*}{v_k^*} - \sum_{m \neq k} y_{km} v_m \right) \quad (41)$$

This method is important for historical reasons, as it was one of the first approaches for solving the power flow problem. However, it suffers from convergence issues, and hence it is rarely used in practice. Nevertheless, it is the origin of other fixed-point algorithms that are more useful in practice. Before presenting these algorithms, the concept of fixed point should be formally defined.

Definition 4.1 (Fixed point). Let \mathbb{F} be any space and T a map of \mathbb{F} into \mathbb{F} . A point $v \in \mathbb{F}$ is called a *fixed point* for T if $v = T(v)$.

Fixed point-theory allows solving the equation $f(v) = 0$ by searching for a fixed point of $T(v) = v - f(v)$. In some cases, this fixed point can be calculated by iteratively applying $v \leftarrow T(v)$. The method converges if the map T is a contraction as explained in Section 5.

It is straightforward to find a map T in power distribution networks. First, the nodal power is represented in matrix form, separating the current in the slack from the remaining nodes, as given below:

$$\begin{pmatrix} S_{\mathcal{R}} \\ V_{\mathcal{R}} \end{pmatrix}^* = Y_{\mathcal{R}\mathcal{S}} V_{\mathcal{S}} + Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}} V_{\mathcal{R}}. \quad (42)$$

Second, the nodal voltage is cleared as follows:

$$V_{\mathcal{R}} = Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}}^{-1} \left(\begin{pmatrix} S_{\mathcal{R}} \\ V_{\mathcal{R}} \end{pmatrix}^* - Y_{\mathcal{R}\mathcal{S}} V_{\mathcal{S}} \right). \quad (43)$$

Finally, a map T is obtained³:

$$T(V_{\mathcal{R}}) = Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}}^{-1} \left(\begin{pmatrix} S_{\mathcal{R}} \\ V_{\mathcal{R}} \end{pmatrix}^* - Y_{\mathcal{R}\mathcal{S}} V_{\mathcal{S}} \right) \quad (44)$$

Note that the inverse of $Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}}$ only needs to be calculated once. Another option is to calculate the result of the map without explicitly calculating this inverse. The matrix $Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}}$ is sparse, so this option may be more efficient. Algorithm 3 summarizes the main steps of this fixed-point method. Note the simplicity of the algorithm.

³Note that this fixed point iteration is different from the Gauss-Seidel method presented in Eq. (41). The first term in the Gauss-Seidel method is a scalar, whereas here it is a matrix. This is not a minor difference, since the convergence of the algorithm is radically different.

Algorithm 3 Fixed-point method with Y_{bus} representation

Require: $Y_{SR}, Y_{RR}, S_{\mathcal{R}}$

$$V_{\mathcal{R}} \leftarrow 1e^{j\theta_{\text{phase}}} \mathbb{I}_n$$

$$U \rightarrow V_{\mathcal{R}}$$

$$\epsilon \leftarrow \infty$$

while $\epsilon \geq \text{tolerance}$ **do**

$$V_{\mathcal{R}} \leftarrow T(V_{\mathcal{R}})$$

$$\epsilon \leftarrow \|U - V_{\mathcal{R}}\|$$

$$U \rightarrow V_{\mathcal{R}}$$

end while**Return** $V_{\mathcal{R}}$

The method is the same for single and three-phase networks. As in the previous cases, the admittance matrix is three-phase, and the voltages' angles need to be initialized properly. Note that the method does not impose any constraint related to the radiality of the grid. The method can be easily extended to consider ZIP loads and renewable power (this aspect is beyond the objectives of this review).

4.2. Backward-forward sweep algorithm

Another fixed-point algorithm can be obtained by using some particular characteristics of power distribution networks. The strategy consists of making use of the tree structures of the graph associated with this type of network. This structure allows solving the power flow problem by applying Kirchoff's circuit laws in three steps: first, the nodal current is calculated from the nodal power and voltage; second, Kirchoff's current law is applied from the last user back to the main substation in a backward sweep; third, Kirchoff's voltage law is applied from the substation to the last user in a forward sweep iteration. The method is known as the backward/forward sweep algorithm for obvious reasons. Algorithm 4 represents the pseudo-code for this method. All nodes are expected to be ordered from the substation to the final users.

Algorithm 4 Backward-forward sweep algorithm

Require: $Y_{SR}, Y_{RR}, S_{\mathcal{R}}$

$$V_{\mathcal{R}} \leftarrow 1e^{j\theta_{\text{phase}}} \mathbb{I}_n$$

$$U \rightarrow V_{\mathcal{R}}$$

$$\epsilon \leftarrow \infty$$

while $\epsilon \geq \text{tolerance}$ **do**

$$I_{\mathcal{R}} \leftarrow \text{nodal current calculation}(S_{\mathcal{R}}, V_{\mathcal{R}})$$

$$I_{\mathcal{E}} \leftarrow \text{Backward sweep}(I_{\mathcal{R}})$$

$$V_{\mathcal{R}} \leftarrow \text{Forward sweep}(V_{\mathcal{R}}, I_{\mathcal{R}})$$

$$\epsilon \leftarrow \|U - V_{\mathcal{R}}\|$$

$$U \rightarrow V_{\mathcal{R}}$$

end while**Return** $V_{\mathcal{R}}$

Each of the steps are explained below with the help of the graph given in Fig. 2. First, the nodal current is calculated for each node except the slack node. The following expression is used:

$$i_k = \left(\frac{s_k}{v_k} \right)^*, \quad \forall k \in \mathcal{R} = \{2, 3, 4\} \quad (45)$$

Then, the branch currents $I_{\mathcal{E}}$ are calculated using nodal currents $I_{\mathcal{R}}$. This step is known as *backward sweep*. The calculations for the graph depicted in Fig. 2 are given below:

$$i_2 \leftarrow i_2 + i_4 \quad (46)$$

$$i_2 \leftarrow i_2 + i_3 \quad (47)$$

$$i_1 \leftarrow i_1 + i_2 \quad (48)$$

An important detail of implementation: branch currents are stored in the same array as nodal currents since there is only one receiving node for each branch. Thus, i_4 now stores i_{24} , i_3 stores i_{23} and i_2 stores i_{12} . Finally, the new voltages are calculated in a forward sweep, namely:

$$v_2 \leftarrow v_1 - z_{12}i_2 \quad (49)$$

$$v_3 \leftarrow v_2 - z_{23}i_3 \quad (50)$$

$$v_4 \leftarrow v_2 - z_{24}i_4 \quad (51)$$

The main advantage of this method is that no matrix needs to be inverted –not even the nodal admittance matrix. In addition, the method can be easily extended to the three-phase case, and it constitutes a fixed point since the nodal voltage is calculated from the nodal voltages in each iteration [22]. The only difference is that the map is not explicitly defined [23]. The next section presents a formal analysis of this and the previous methods.

5. Equivalences, convergence, and analysis

This section analyzes the equivalence between the two pairs of algorithms presented in the last section. It also presents results related to the convergence as well as insights about its practical implementation. Four methods have been presented at this point: Newton's method, complex sequential linearization, the fixed-point method with Y_{bus} representation, and the backward-forward sweep algorithm. The first two algorithms are based on linear approximations of the non-linear equations, whereas the last algorithms are based on fixed-point theory. Although each algorithm requires a different implementation, they have some equivalences from the theoretical point of view.

Definition 5.1. Consider two power flow algorithms A and B , where the voltage in iteration k of A is v_k^A and the voltage in iteration k of B is v_k^B . A and B are behaviorally equivalent if $\|v_k^A - v_k^B\| \leq \epsilon$, where ϵ is a rounding error.

It is easy to obtain the equivalence between the conventional Newton's method and Newton's method in complex domain by using the following result:

Lemma 1. *Sequential complex linearization is behaviorally equivalent to the linearization used by Newton's method.*

Proof. Replace $z = x + jy$ and $f = (u, v)$ in Eq. (29) and note that it is equivalent to the following linearization's real and imaginary parts:

$$\Delta u = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \Delta y \quad (52)$$

$$\Delta v = \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \Delta y. \quad (53)$$

This is clearly the same linearization obtained for Newton's method applied to the vector function $f = (u, v)$. \square

Algorithms 1 and 2 are just two representations of the same linearization. Hence, their convergence properties are the same. However, the convergence of two equivalent power flow algorithms does not imply the same time calculation. Two algorithms can have the same convergence plot but different time calculations. Simple aspects such as the programming language and the way the information is stored may drastically change the performance of the algorithm. This aspect is analyzed in the results section.

On the other hand, Newton's method has a well-defined convergence behavior, which is given by the Kantorovich theorem [24]:

Theorem 1. (*Kantorovich theorem in \mathbb{R}^n*) Let v_0 be a point in \mathbb{R}^n and $F : \mathcal{B}_0 \rightarrow \mathbb{R}^n$ a differentiable map with an invertible derivative $[D_f(v)]$. Define

$$\Delta v_0 = [D_f(v_0)]^{-1} F(v_0) \quad (54)$$

$$v_1 = v_0 + \Delta v_0 \quad (55)$$

$$\mathcal{B}_0 = \{v : \|v - v_1\| \leq \|\Delta v_0\|\} \quad (56)$$

if the derivative $[D_f(v)]$ satisfies the Lipschitz condition,

$$\|D_f(v) - D_f(u)\| \leq K \|v - u\|, \forall v, u \in \mathcal{B}, \quad (57)$$

and if the inequality

$$h = \|F(v_0)\| \|D_f(v_0)^{-1}\|^2 K \leq \frac{1}{2} \quad (58)$$

is satisfied, then the equation $F(v) = 0$ has a unique solution in \mathcal{B}_0 , and Newton's methods converges to it with Newton's step 9 and an initial condition v_0 . Moreover, if $h < \frac{1}{2}$, the order of convergence is at least quadratic.

This result is well-known in the scientific literature [25]. However, for the sake of completeness, a sketch of proof is presented below. This proof is built upon the work of [26].

Proof. Let us define $A = I - D_f(v_0)^{-1} D_f(v_1)$. Then, by replacing $I = D_f(v_0)^{-1} D_f(v_0)$ and by the Lipschitz condition of $D_f(v)$, following is obtained:

$$\|A\| \leq \|D_f(v_0)^{-1}\| K \|v_0 - v_1\| \quad (59)$$

but $\|v_0 - v_1\| = \|\Delta v_0\| \leq \|D_f(v_0)^{-1}\| \|F(v_0)\|$, and, due to condition (58), $\|A\| \leq 1/2$. Therefore, the Banach Lemma can be used, which guarantees the existence of the inverse of $(I - A)$ and gives boundaries as follows:

$$\|D_f(v_1)^{-1}\| \leq \|D_f(v_0)^{-1}\| \|(I - A)^{-1}\| \leq 2 \|D_f(v_0)^{-1}\|. \quad (60)$$

On the other hand, let us define a function $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ as $g(t) = F(v + t\Delta v)$. Then, $g'(t) = [D_f(v + t\Delta v)]\Delta v$, and hence

$$F(v + \Delta v) - F(v) = g(1) - g(0) = \int_0^1 g'(t) dt, \quad (61)$$

that is,

$$F(v + \Delta v) - F(v) = D_f(v)\Delta v + \int_0^1 D_f(v + t\Delta v)\Delta v - D_f(v)\Delta v dt. \quad (62)$$

By the Lipschitz condition of D_f , the following is obtained:

$$\|F(v + \Delta v) - F(v) - D_f(v)\Delta v\| \leq \int_0^1 K \|v + t\Delta v - v\| \|\Delta v\| dt \quad (63)$$

$$\leq \frac{K}{2} \|\Delta v\|^2 \quad (64)$$

since $\Delta v_k = D_f(v_k)^{-1} F(v_k)$ in each iteration. Then,

$$\|F(v_{k+1})\| \leq \frac{K}{2} \|\Delta v_k\|^2. \quad (65)$$

Finally, let us analyze the step $\Delta v_1 = -D_f(v_1)F(v_1)$, which, by applying (60), (65), and (58), yields the following:

$$\|\Delta v_1\| \leq \|D_f(v_1)\| \|F(v_1)\| \quad (66)$$

$$\leq (2 \|D_f(v_0)\|) (K/2 \|\Delta v_0\|^2) \quad (67)$$

$$\leq 1/2 \|\Delta v_0\| \quad (68)$$

By applying the same argument to the next iterations, it can be concluded that there is a contraction of Δv and $F(v)$. \square

The Kantorovich theorem ensures quadratic convergence when the initial approximations are such that conditions (54) to (56) hold. However, these conditions are quite severe and may not be fulfilled by a given scenario. Therefore, it is very important to select a suitable initial condition. In the case of three-phase unbalanced systems, the initial conditions are $v = 1$ and $\theta = \theta_{\text{phase}}$ according to the phase. When all conditions are fulfilled, the algorithm converges to the power flow solution, and this solution is unique.

The uniqueness of the solution is an essential aspect of this type of analysis. The convergence of an algorithm may be evaluated through a sequence of numerical simulations. However, there can always be doubt about whether this is the only possible solution. Theorems like Theorem 1 ensure that there are no other possible solutions in the region \mathcal{B}_0 . There might be other solutions in other regions, but the solution in \mathcal{B}_0 is unique. It is usual that this other solution lacks physical meaning by considering, for example, voltages with negative magnitude and angles higher than 2π . Understanding the physics of the problem is important to use theoretical results correctly.

There are also convergence and uniqueness conditions for fixed-point algorithms, which are analyzed below:

Lemma 2. *The fixed-point method with Y_{bus} representation is behaviorally equivalent to the backward-forward sweep algorithm.*

Proof. The first step of the backward-forward sweep algorithm consists of calculating nodal currents. This step is represented in matrix form as given below:

$$I_{\mathcal{R}} = (S_{\mathcal{R}}/V_{\mathcal{R}})^*. \quad (69)$$

Nodal currents are related to branch currents by the incidence matrix given below:

$$\begin{pmatrix} I_S \\ I_{\mathcal{R}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_0 \\ A_{\mathcal{N}} \end{pmatrix}^{\top} I_{\mathcal{E}}. \quad (70)$$

The sub-matrix $A_{\mathcal{R}}$ is non-singular, since the grid is radial (*i.e.*, the graph is a connected tree). Therefore, it is possible to obtain branch currents from nodal currents as $I_{\mathcal{E}} = A_{\mathcal{R}}^{-1} I_{\mathcal{R}}$. This step corresponds to the backward current sweep.

On the other hand, branch voltages are related to nodal voltages as follows:

$$V_{\mathcal{E}} = A_S V_S + A_{\mathcal{R}} V_{\mathcal{R}} \quad (71)$$

and to branch currents by the Ohm's law, namely

$$V_{\mathcal{E}} = Z_{\mathcal{E}} I_{\mathcal{E}}. \quad (72)$$

This calculation corresponds to the forward voltage sweep. By collecting all the previous expressions, the following fixed-point is obtained:

$$V_{\mathcal{R}} = A_{\mathcal{R}}^{-1} Z_{\mathcal{E}} A_{\mathcal{R}}^{-1\top} \left(\frac{S_{\mathcal{R}}}{V_{\mathcal{R}}} \right)^* - A_{\mathcal{R}}^{-1} A_S V_S. \quad (73)$$

It is straightforward to demonstrate the following equivalences:

$$Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}}^{-1} = A_{\mathcal{R}}^{-1} Z_{\mathcal{E}} A_{\mathcal{R}}^{-1\top} \quad (74)$$

$$Y_{\mathcal{R}\mathcal{R}}^{-1} Y_{\mathcal{R}S} V_S = A_{\mathcal{R}}^{-1} Z_{\mathcal{E}} A_{\mathcal{R}}^{-1\top} A_{\mathcal{R}}^{-1} A_S V_S. \quad (75)$$

Hence, Eq. (73) is equivalent to Eq. (43). \square

Considering that Algorithms 3 and 4 are equivalent, their convergence can be analyzed.

Definition 5.2. Let $\mathcal{B} = \{v : \|v - v_0\| \leq \delta\}$ be a closed ball of \mathbb{F}^n , and let $T : \mathcal{B} \rightarrow \mathbb{F}^n$. Then, T is said to be a contraction mapping if there is a β such that $\|T(v) - T(u)\| \leq \beta \|v - u\|$, with $0 \leq \beta < 1$, $\forall v, u \in \mathcal{B}$.

Theorem 2. *If T is a contraction mapping, then there is a unique $v \in \mathcal{B}$ satisfying $v = T(v)$, which can be obtained by applying iteration $v \leftarrow T(v)$ starting from an initial point in \mathcal{B} .*

Proof. The contraction mapping theorem is general for any Banach space, but we are interested in \mathbb{C}^n . Let $T : \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{B}$ be a contraction mapping in a closed ball $\mathcal{B} \in \mathbb{C}^n$. Considering two points $u, v \in \mathcal{B}$, the following is obtained:

$$\|u - v\| = \|u - v + T(u) - T(v) - T(u) + T(v)\| \quad (76)$$

$$\leq \|u - T(u)\| + \|v - T(v)\| + \|T(u) - T(v)\| \quad (77)$$

$$\leq \|u - T(u)\| + \|v - T(v)\| + \alpha \|u - v\|. \quad (78)$$

Rearranging the expression yields the following result:

$$\|u - v\| \leq \frac{1}{1 - \alpha} (\|u - T(u)\| + \|v - T(v)\|). \quad (79)$$

Clearly, if $u = T(u)$ and $v = T(v)$, then $\|u - v\| \leq 0$. Since a norm is always positive except in zero, then necessarily $u = v$, which means that the fixed point is unique.

Now, let us define a sequence $\{v_k\}_0^\infty$ by the iteration $v_{k+1} \leftarrow T(v_k)$. Then, it follows that

$$\|v_{k+n} - v_k\| \leq \left(\alpha^{k-1} \sum_{m=0}^{\infty} \alpha^m \right) \|v_2 - v_1\| = \frac{\alpha^{k-1}}{1 - \alpha} \|v_2 - v_1\|. \quad (80)$$

Therefore, $\{v_k\}_0^\infty$ is a Cauchy sequence. Since \mathbb{R}^n is complete, then $\{v_k\}_0^\infty$ converges to a fixed $v \in \mathbb{R}^n$. More details about this theorem can be found in [27] and [28]. \square

Contraction mapping theory is important because it guarantees the convergence of the fixed-point algorithm. In addition, it ensures the uniqueness of the solution, just as in Newton's method. However, the convergence rate given by Eq. (80) is linear, while the convergence rate of Newton's method is quadratic. These convergence properties are numerically evaluated in the next section.

6. Results

The four algorithms mentioned above were implemented in Matlab for the three-phase unbalanced case. The European Low Voltage Test Feeder was used as a reference [29]. This feeder was proposed by the IEEE Working Group of the Distribution System Analysis Subcommittee. It is a real low-voltage feeder that operates at 416 V and has 906 nodes. It has load shapes with a one-minute time resolution over 24 h for time-series simulation. Despite being a test system with typical European voltages, its size and details make it ideal for studying the behavior of the studied algorithms. Fig. 5 shows the single-line diagram. All algorithms were implemented in Matlab 2019. The code is available for download in [30]. Appendix A shows the use of the toolbox.

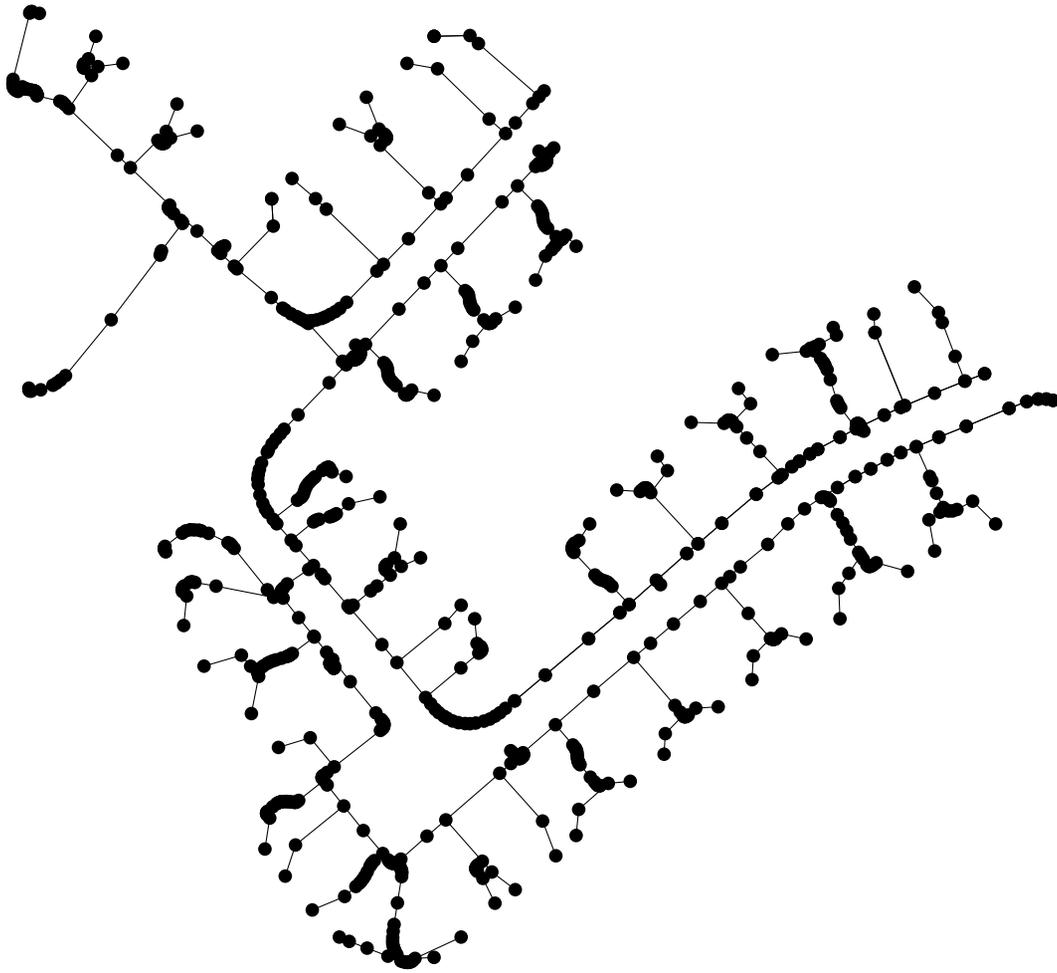


Figure 5. Single-line diagram for the IEEE European low-voltage test feeder

First, a quasi-dynamic simulation was executed in order to evaluate the performance of the algorithms and their precision with respect to the values reported in [31]. Fig. 6 shows the active and reactive power at the main substation for the 1.400 scenarios. The four algorithms returned similar results in terms of nodal voltage despite a significant difference in time calculation.

The voltages in each scenario may be initialized at 1 pu or in the voltage of the previous minute. Fig. 7 shows a comparison between the histograms associated with the iterations of these two approaches. As expected, the initialization in the previous scenario reduces the number of iterations since the initial point is close to the final solution. This, however, is not a significant improvement.

Next, each of the power flow algorithms was evaluated for the scenario $t = 566\text{min}$, which corresponds to the maximum load. The convergence plot is depicted in Fig. 8. As expected, the fixed-point method and backward-forward sweep algorithm exhibit exactly the same behavior. The same can be said for Newton's method in the conventional real and complex domains. There are minor differences in the last iteration, which are related to rounding errors, considering the large set of matrices that require inverse calculation in Newton's method.

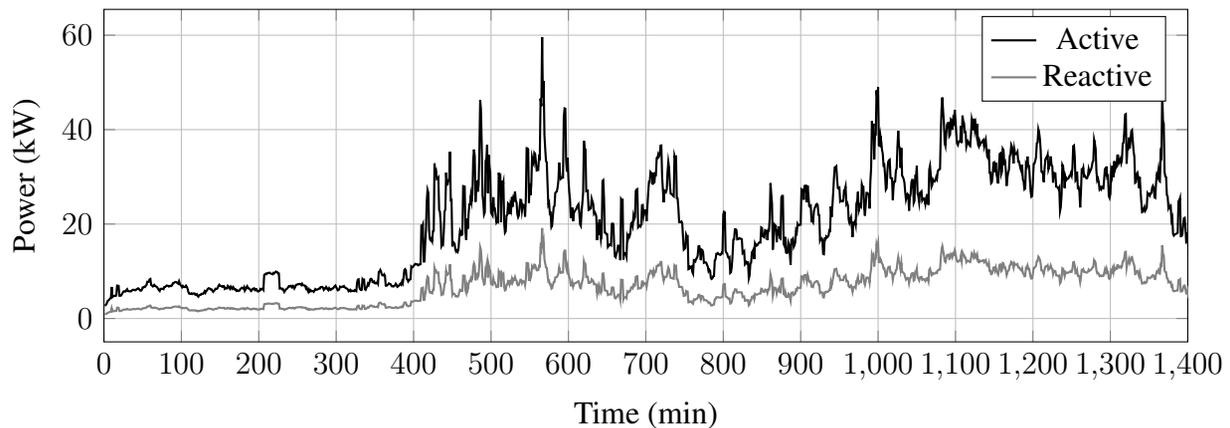


Figure 6. Active and reactive power in the substation for the IEEE 900-node test system using quasi-dynamic simulation

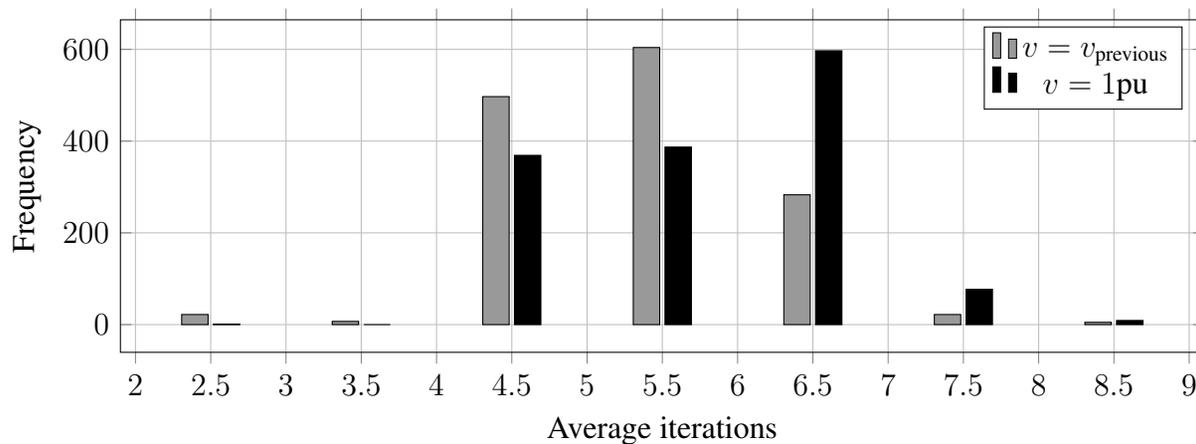


Figure 7. Histogram of the number of iterations with initialization at 1 pu and initialization in the last scenario

While convergence in the fixed-point methods is linear, convergence in Newton's methods is quadratic. Therefore, Newton's methods have a faster convergence in terms of iterations. However, the proposed algorithms have very different calculation time. The backward-forward sweep method has the fastest time, followed by its equivalent, the fixed-point method with the Y_{bus} formulation. Newton's method has the highest time, especially in the complex domain formulation. Table I shows the calculation times for each algorithm. This time was obtained using Matlab's online application.

Table I. Comparisons between different power flow methods for IEEE European Low-Voltage System

Method	Total time (s)
Fixed-point method with Y_{bus} formulation	0.062034
Backward-forward sweep algorithm	0.035090
Conventional Newton's method	10.986928
Newton's method in the complex domain	41.662216

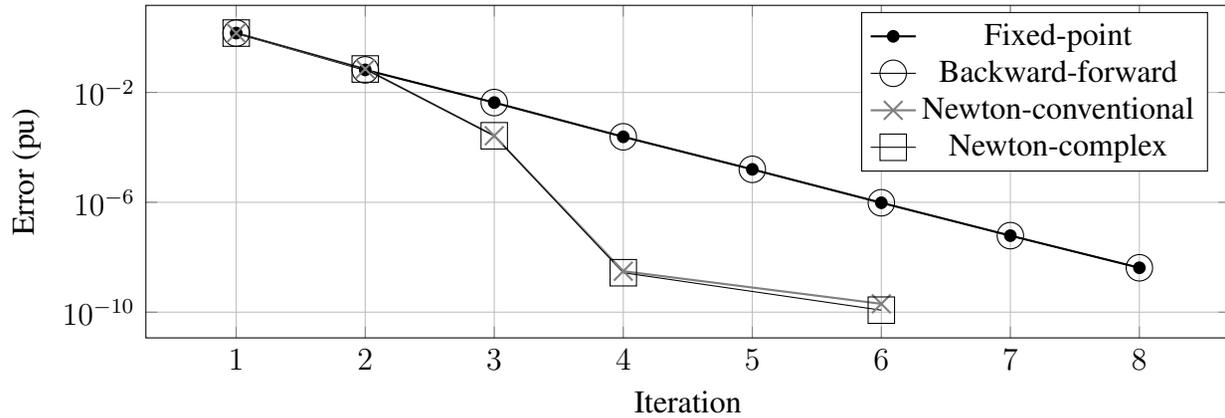


Figure 8. Convergence plot for different power flow algorithms

The fixed-point algorithm with Y_{bus} requires slightly more time. However, it deals directly with meshed grids, and it may be a good option in practice.

7. Conclusions

This paper revisited the power flow problem in power distribution networks while including theoretical and practical aspects. Four power flow methods for three-phase unbalanced power distribution networks were evaluated, namely the conventional Newton's method, Newton's method in the complex domain, the fixed-point method with Y_{bus} representation, and the backward-forward sweep algorithm. It was demonstrated that both Newton's methods were equivalent. In addition, quadratic convergence and uniqueness of the solution may be ensured by these methods. Likewise, it was demonstrated that the fixed-point method and the backward-forward algorithm are equivalent. Linear convergence of these algorithms was demonstrated both theoretically and numerically.

Newton's methods require less iterations than the fixed-point methods. However, each iteration in the fixed-point methods is faster. Therefore, fixed-point methods are preferred in practice for power distribution networks.

A Matlab toolbox was also developed. This toolbox may be used for teaching and research. Its functions allow the calculation of three-phase unbalanced power distribution networks with different load profiles. It is easy to modify the functions in order to include renewable power generation, voltage regulators, electric vehicles, and any other new distributed component.

Acknowledgment

This work was partially funded by the project project Integra2023, code 111085271060, contract 80740-774-2020, by the Ministry of Science, Technology, and Innovation (Minciencias), and the project ODIN (Optimal Operation of Distribution Networks).

References

- [1] F. Milano, *Power system modelling and scripting*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-13669-6_4 2
- [2] G. W. Stagg and A. H. El-Abiad, *Computer methods in power systems analysis*. Deli, India: McGraw Hill, 1988, vol. 4. 2
- [3] B. Stott and O. Alsac, “Fast decoupled load flow,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-93, no. 3, pp. 859–869, May 1974. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1974.293985> 2
- [4] R. K. Portelinha, C. C. Durce, O. L. Tortelli, and E. M. Lourenço, “Fast-decoupled power flow method for integrated analysis of transmission and distribution systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 196, p. 107215, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107215> 2
- [5] A. Garcés, “On the Convergence of Newton’s Method in Power Flow Studies for DC Microgrids,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 5, pp. 5770–5777, Sept 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2820430> 3
- [6] A. Garcés, “A linear three-phase load flow for power distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 827–828, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2394296> 3
- [7] U. Ghatak and V. Mukherjee, “An improved load flow technique based on load current injection for modern distribution system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 84, pp. 168–181, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.05.008> 3
- [8] R. Cespedes, “New method for the analysis of distribution networks,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 1, pp. 391–396, 1990. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/61.107303> 3
- [9] G. Díaz, J. Gómez-Aleixandre, and J. Coto, “Direct backward/forward sweep algorithm for solving load power flows in ac droop-regulated microgrids,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 5, pp. 2208–2217, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2478278> 3
- [10] D. M. Fobes, S. Claeys, F. Geth, and C. Coffrin, “Power models distribution.jl: An open-source framework for exploring distribution power flow formulations,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 189, p. 106664, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106664> 3
- [11] A. Garcés, “Uniqueness of the power flow solutions in low voltage direct current grids,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 151, no. Supplement C, pp. 149 – 153, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.05.031> 3
- [12] A. Garcés, “Mathematical programming for power systems operation: From theory to applications in python,” pp. 171–193, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9781119747291.ch10> 3
- [13] A. Keane, L. F. Ochoa, C. L. T. Borges, G. W. Ault, A. D. Alarcon-Rodriguez, R. A. F. Currie, F. Pilo, C. Dent, and G. P. Harrison, “State-of-the-art techniques and challenges ahead for distributed generation planning and optimization,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1493–1502, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2214406> 3
- [14] P. Arbolea, C. González-Morán, and M. Coto, “Unbalanced power flow in distribution systems with embedded transformers using the complex theory in $\alpha\beta 0$ stationary reference frame,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 1012–1022, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2292112> 3
- [15] B. Donon, R. Clément, B. Donnot, A. Marot, I. Guyon, and M. Schoenauer, “Neural networks for power flow: Graph neural solver,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 189, p. 106547, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106547> 3
- [16] T.-L. Nguyen, Q.-T. Tran, R. Caire, Y. Wang, Y. Besanger, and N.-A. Luu, “Distributed optimal power flow and the multi-agent system for the realization in cyber-physical system,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 192, p. 107007, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.107007> 3
- [17] D. K. Molzahn, F. Dörfler, H. Sandberg, S. H. Low, S. Chakrabarti, R. Baldick, and J. Lavaei, “A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2941–2962, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2720471> 3
- [18] A. S. Nair, S. Abhyankar, S. Peles, and P. Ranganathan, “Computational and numerical analysis of ac optimal power flow formulations on large-scale power grids,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 202, p. 107594, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107594> 3
- [19] S. Pineda and J. Morales, “Is learning for the unit commitment problem a low-hanging fruit?” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 207, p. 107851, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107851> 3

- [20] R. Akiyoshi and N. Yamaguchi, "Algorithms for renumbering nodes in distribution systems for fast computation of power flow," in *2017 IEEE-PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2017, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2017.8260314> 6
- [21] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer, J.-H. Menke, J. Dollichon, F. Meier, S. Meinecke, and M. Braun, "Pandapower—an open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 6510–6521, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2829021> 6
- [22] M. F. AlHajri and M. E. El-Hawary, "Exploiting the radial distribution structure in developing a fast and flexible radial power flow for unbalanced three-phase networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 1, pp. 378–389, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2021039> 13
- [23] Y. Wang, N. Zhang, H. Li, J. Yang, and C. Kang, "Linear three-phase power flow for unbalanced active distribution networks with PV nodes," *CSEE J. Power. Energy. Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 321–324, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2017.00240> 13
- [24] J. M. Ortega, "The newton-kantorovich theorem," *Amer. Math. Monthly*, vol. 75, no. 6, pp. 658–660, 1968. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/2313800> 14
- [25] U. Sur and G. Sarkar, "Existence of explicit and unique necessary conditions for power flow insolvability in power distribution systems," *IEEE Syst J*, vol. 13, no. 1, pp. 702–709, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2870178> 14
- [26] J. H. Hubbard and B. B. Hubbard, *Vector calculus, linear algebra, and differential forms: A unified approach*. Prentice Hall, 1999. 14
- [27] L. H. Loomis and S. Sternberg, *Advanced calculus*. World Scientific, 2014. 17
- [28] A. Granas and J. Dugundji, *Fixed point theory*. Springer, New York, NY, 2003. 17
- [29] K. P. Schneider, B. A. Mather, B. C. Pal, C.-W. Ten, G. J. Shirek, H. Zhu, J. C. Fuller, J. L. R. Pereira, L. F. Ochoa, L. R. de Araujo, R. C. Dugan, S. Matthias, S. Paudyal, T. E. McDermott, and W. Kersting, "Analytic considerations and design basis for the IEEE distribution test feeders," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 3181–3188, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2760011> 17
- [30] A. Garcés, "Matlab central file exchange," <https://la.mathworks.com/matlabcentral/profile/authors/3009175>, accessed: 2022-03-28. 17, 23
- [31] "IEEE-PES distribution systems analysis subcommittee radial test feeders," <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>, accessed: 2022-03-28. 18

Prof. Dr. Ing. Alejandro Garcés Ruiz



He received his Bachelor's degree in Electrical Engineering (2004) and a Master's degree in Power Systems from Universidad Tecnológica de Pereira (Pereira, Colombia). After that, he received his PhD in Electrical Engineering from Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) in Trondheim, Norway, where he developed a new control for HVDC integration of offshore wind farms with a reduced-matrix converter. He is currently an associate professor at the Department of Electric Power Engineering of Universidad Tecnológica de Pereira. He participated in the study *Smart Grids Colombia Visión 2030*, which defined the road map for implementing Smart Grids in Colombia. He is a senior member of IEEE and a Senior researcher of the National Research System in Colombia. In addition, he is an associate editor in IEEE Transactions on Industrial Electronics and IET-Renewable Power Generation. He participates in several groups of CIGRE-Colombia related to microgrids and power electronics. He is also a member of the Colombian chapter of the Society for Industrial and Applied Mathematics (CoSIAM). His current research interests include mathematical optimization and control for power systems applications, dynamics in electric grids, renewable energy, energy storage devices, microgrids, and HVDC transmission. In 2020 he was awarded the Georg Forster Research Fellowship for Experienced Researchers from the Alexander Von Humboldt Foundation in Germany to continue his research on mathematical optimization in active distribution systems.

Appendix

A. Matlab functions

A toolbox of Matlab functions was created to evaluate the power flow methods. The code of these functions is open-source, so that it may be helpful for future research. The code can be downloaded at [30]. It uses only the standard Matlab function as well as the functions `xlsread()` for reading Excel files and `sparse()` for creating sparse matrices. This toolbox may also be used to evaluate other three-phase unbalanced systems if the input information is stored correctly. The input file is an Excel workbook with six worksheets. The information required in each worksheet is presented below:

- Worksheet name: general. It contains general information of the test system. At least, the following information is required:
 1. Nominal line-to-line voltage in kV
 2. Nominal power in MW
- Worksheet name: lines. It contains the connection of the feeder with the following columns:
 1. Bus 1
 2. Bus 2
 3. Length (m)
 4. Line code (a number referring to the worksheet line_codes)
- Worksheet name: line_codes
 1. Identification number
 2. R1 (Ohm/km)
 3. X1(Ohm/km)
 4. R0(Ohm/km)
 5. X0(Ohm/km)
- Worksheet name: loads.
 1. Bus
 2. phase (1 for A, 2 for B and 3 for C)
 3. power factor
 4. Profile (a number referring to the worksheet profiles)
- Worksheet name: profiles. Each column of this worksheet contains a set of active power for the corresponding load.
- Worksheet name: coordinates. It contains the coordinates for piloting the system's graph. It contains the following information:

1. Bus
2. x coordinate
3. y coordinate

The toolbox contains the following basic functions:

- `load_feeder.m`: It reads the excel file, organizes the information, and calculates per-unit equivalents

Input : a string with the name and address of the workbook

Output : a struct with the following fields:

1. `graph`: coordinates of the nodes
 2. `z_line` $3 \times 3 \times n$ tensor with the equivalent impedance of each line in per unit
 3. `ybus`: $n \times n$ three-phase nodal admittance matrix
 4. `yns`: sub-matrix Y_{RS}
 5. `ynn`: sub-matrix Y_{RR}
 6. `znn`: inverse of Y_{RR}
 7. `loads`: table of loads
 8. `profiles`: table of profiles
 9. `xy`: node coordinates
 10. `vs_initial`: initial voltages for the slack node
 11. `vn_initial`: initial voltages for the remaining voltages
 12. `p_base`: nominal phase power
 13. `v_base`: nominal line-to-neutral voltage
 14. `n_slack`: slack nodes for each phase
 15. `n_other`: list of remaining nodes
 16. `num_n`: number of nodes
 17. `num_l`: number of lines
 18. `num_d`: number of loads
 19. `num_e`: number of profile scenarios
- `load_flow_newton.m` : It solves the power flow using conventional Newton's method

Input : struct generated by `load_feeder.m` and profile scenario

Output : struct with the following information:

1. `v_node`: vector of nodal voltages
2. `s_node`: vector of nodal powers
3. `error`: error in each iteration
4. `iter`: total iterations
5. `scenario`: scenario number

- `load_flow_sweep.m`: load flow using the backward-forward sweep method. Same input and output information as `load_flow_newton.m`.
- `load_flow_scl.m`: load flow using Newton's method in the complex domain. Same input and output information as `load_flow_newton.m`.
- `load_flow_ybus.m`: load flow using the fixed-point method with Y_{bus} representation. Same input and output information as `load_flow_newton.m`.
- `show_results.m`: it shows a table with nodal voltages and powers, and it plot the feeder's graph.

Research

Selección óptima de conductores en redes de distribución trifásicas utilizando el algoritmo metaheurístico de Newton*Optimal Selection of Conductors in Three-Phase Distribution Networks using the Newton Metaheuristic Algorithm***Daniel Julián Nivia-Torres**^{ID}¹, **Guillermo Alejandro Salazar-Alarcón**^{ID}¹,
Oscar Danilo Montoya^{ID}^{*,2}¹Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, ²Grupo de Compatibilidad e Interferencia Electromagnética, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia*Correspondence E-mail: odmontoyag@udistrital.edu.co

Received: 21th-April-2022. Accepted: 16-May-2022

Abstract

Context: The accelerated growth of cities and rural areas requires the adequate expansion of electrical distribution systems in order to meet the electrical energy requirements with efficiency, reliability, and safety for commercial, residential, and industrial users. To serve the different users of the electrical network, a typical methodology used by network operators corresponds to the optimal assignment of the calibers of the conductors associated with the distribution routes. This selection is made while considering its cost of investment and operation for a determined planning horizon.

Method: To solve the problem regarding optimal selection in three-phase distribution networks, the application of an optimization algorithm of the family of combinatorial techniques known as Newton's metaheuristic algorithm (NMA) is proposed. The main advantage of the NMA is that it uses evolution rules based on the first and second derivatives of the objective function, which are applied to each individual in the population. In addition, the evolution rules of the NMA cause this algorithm to have a proper balance between the exploration and exploitation of the solution space as the iterative process advances.

Results: Numerical validations in two three-phase distribution systems composed of 8 and 27 nodes with balanced and unbalanced operation scenarios show that the NMA reaches the optimal solution reported in the literature for the 8-node system and improves the scientific reports for the 27-node test system in both test scenarios.

Conclusions: The results obtained through the application of the NMA to the problem regarding the optimal selection of conductors in distribution systems demonstrate the effectiveness of the proposed solution methodology for mixed integer nonlinear programming problems in electrical engineering with exponential sizes of the solution space. Furthermore, the reported results for the 8-node and 27-node test systems constitute a benchmark for further research.

Keywords: Newton's metaheuristic algorithm, three-phase distribution networks, unbalanced electrical systems, three-phase power flow, optimal selection of conductors, combinatorial optimization.

Language: Spanish.

Open accessCite as: D. Nivia-Torres, G. Salazar-Alarcón, and O. Montoya. "Optimal Selection of Conductors in Three-Phase Distribution Networks using the Newton Metaheuristic Algorithm". *Ing*, vol. 27, no. 3, 2022. e19303.<https://doi.org/10.14483/23448393.19303>

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

Resumen

Contexto: El crecimiento acelerado de las ciudades y áreas rurales requiere de la adecuada expansión del sistema eléctrico de distribución para atender de manera eficiente, confiable y segura los requerimientos de energía eléctrica de usuarios comerciales, residenciales e industriales. Para atender a los diferentes usuarios de la red eléctrica, una metodología típica empleada por los operadores de red corresponde a la asignación óptima de los calibres de los conductores asociados a las rutas de distribución, teniendo en cuenta su costo de inversión y operación para un horizonte de planeación determinando.

Método: Para resolver el problema de selección óptima en redes de distribución trifásicas, se propone la aplicación de un algoritmo de optimización de la familia de las técnicas combinatoriales conocido como algoritmo metaheurístico de Newton (AMN). La principal ventaja del AMN es que emplea reglas de evolución basadas en la primera y segunda derivadas de la función objetivo, las cuales se aplican a cada individuo de la población. Además, las reglas de evolución del AMN hacen que este algoritmo tenga un balance adecuando entre la exploración y la explotación del espacio de soluciones a medida que avanza proceso iterativo.

Resultados: Validaciones numéricas en dos sistemas de distribución trifásicos compuestos de 8 y 27 nodos con escenarios de operación balanceada y desbalanceada demuestran que el AMN alcanza la solución óptima reportada en la literatura para el sistema de 8 nodos y mejora los reportes científicos para el sistema de prueba de 27 nodos en ambos escenarios de prueba.

Conclusiones: Los resultados obtenidos mediante la aplicación del AMN al problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución demuestran la eficacia de la metodología de solución propuesta para problemas de programación no lineal entera mixta en ingeniería eléctrica con tamaños exponenciales del espacio de soluciones. Además, los resultados reportados para los sistemas de prueba de 8 y 27 nodos constituyen un punto de referencia para futuras investigaciones.

Palabras clave: algoritmo metaheurístico de Newton, redes de distribución trifásicas, sistemas eléctricos desbalanceados, flujo de potencia trifásico, selección óptima de conductores, optimización combinatorial.

1. Introducción

1.1. Contexto general

Al sistema eléctrico de potencia lo componen las etapas de generación, transmisión, distribución y comercialización, cuya función esencial es llevar energía desde las distintas centrales de generación hasta el usuario final en forma segura, cumpliendo los parámetros de calidad de energía, potencia y servicio. Aproximadamente dos terceras partes de la inversión total del sistema de potencia están dedicadas exclusivamente a la etapa de distribución, lo que conlleva a un gran esfuerzo por parte de todos los implicados en el planeamiento, el diseño, la construcción y la operación del sistema de distribución [1], [2]. En sistemas de distribución para simplificar el análisis se suele trabajar con equivalentes monofásicos; sin embargo, la realidad operativa de los sistemas de distribución es trifásica y desequilibrada [3]. Esta naturaleza operativa de la red, es decir, operación desbalanceada, puede causar corrientes de secuencia negativa provocando problemas en motores, que a su vez provocan corrientes de secuencia cero que pueden causar aumento de las pérdidas del sistema y mal funcionamiento en las protecciones asociadas [4], [5].

Uno de los aspectos fundamentales en la planeación de sistemas de distribución en sistemas trifásicos corresponde a la selección adecuada de los conductores de la red [6], ya que esto compromete aspectos de inversión asociados con el coste de los conductores, y de operación asociados con las pérdidas de energía durante el horizonte de estudio [7]. En la actualidad algunos de los trabajos más destacados en la solución eficiente del problema de la correcta y eficaz selección de conductores se encuentran la aplicación de algoritmos heurísticos, técnicas de optimización metaheurísticas como algoritmos genéticos y diversas estrategias evolutivas [8]. También es posible encontrar aproximaciones lineales y modelos de programación no lineal para resolver el problema [6]. Estos modelos se resuelven a través de técnicas exactas disponibles en paquetes de optimización comercial [9].

El mal dimensionamiento de los conductores causa gastos innecesarios en los sistemas de distribución y el no aprovechamiento efectivo de todas las capacidades de distribución en los mismos [8]. Es decir, así como se busca la eficiencia energética, también se debe propender por el beneficio económico para los operadores de red [10]. Si bien este problema se ha intentado resolver de a través de diferentes metodologías de solución, en esta investigación se propone una nueva metodología de optimización del tipo maestro-esclavo, en la cual la etapa maestra se encarga de definir los calibres de los conductores a ser instalados, y la etapa esclava evalúa las características operativas de dicha solución.

1.2. Motivación

Durante años la energía eléctrica se ha venido expandiendo por todo el mundo; de este modo, la industria está siempre en búsqueda de métodos de optimización en diferentes aspectos que conforman las redes de distribución que permitan atender de manera oportuna toda la demanda requerida por la red, a un menor costo [11]. La importancia de las redes trifásicas en los sistemas de distribución se debe a que estas "a diferencia de las monofásicas" resultan más económicas dado a que requieren una cantidad menor de material conductor [8].

Para la planificación de sistemas de distribución se presta especial atención a la reducción de los costos a través de la selección del conductor, para lo cual se han venido utilizado varios métodos metaheurísticos [12]. Estos estudios valen la pena, dado que existen trabajos cuya implementación ofrece reducciones hasta del 30 % en el costo de la implementación del tendido eléctrico [11]. Por lo anterior, esta investigación busca aportar a la solución de un problema de la vida real, de amplio impacto para los sistemas de distribución y de interés particular para los operadores de red, que invierten de forma significativa en sus tendidos eléctricos. Para lo anterior, se propone la implementación de un nuevo algoritmo de optimización combinatoria desarrollado durante el 2020 conocido como algoritmo metaheurístico de Newton (AMN) [13], el cual no ha sido explorado para el problema investigado en este trabajo, y se constituye como una oportunidad de investigación para la literatura científica en temas de planeación de sistemas de distribución.

1.3. Revisión de la literatura

A continuación se presentan algunas de las estrategias de optimización más comúnmente empleadas en la literatura especializada para resolver el problema de selección óptima de conductores en redes

de distribución de energía eléctrica y algunas otras que servirán como punto de partida para el desarrollo del AMN.

Los autores de [14] analizan el problema de selección de conductores en sistemas de distribución, cuya función objetivo es la minimización de las pérdidas con el mínimo costo de conductores considerando la depreciación de la inversión de capital. El modelo usado para tal propósito es un modelo de programación no lineal entero mixto (PNLEM). El estudio fue realizado en un sistema de 22 nodos con 5 diferentes calibres disponibles para los conductores. En [7], los autores emplean el algoritmo de optimización de seno-coseno para la selección óptima de conductores. Esta metodología de solución se aplica en un sistema de distribución real localizado en Egipto. En el modelo matemático se tiene en cuenta una tasa de crecimiento anual de la demanda con una proyección a 10 años; además, los autores emplean un catálogo comercial con 20 opciones de conductor disponible. Los resultados numéricos fueron satisfactorios en términos de la calidad de la solución y el tiempo de procesamiento requerido. Los autores de [15] presentan una estrategia heurística para la selección óptima de conductores en sistemas de distribución a través de la aplicación de un algoritmo de flujo de potencia recursivo que evalúa múltiples flujos de potencia para cada conjunto de calibres disponibles. La metodología propuesta se valida en un sistema de 54 nodos; sin embargo, los autores no presentan comparaciones con otras estrategias de solución disponibles en la literatura. En [9], los autores presentan una metodología de solución para el problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución mediante la implementación del modelo de PNLEM en el software de modelado algebraico general conocido como GAMS. Los resultados fueron comparados con un algoritmo genético de Chu y Beasley (AGCB), teniendo un desempeño adecuado. Los autores de [16] describen una metodología de solución basada en optimización por enjambre de partículas discretas para la selección de conductor en el sistema de distribución radial. El objetivo de este trabajo corresponde a la minimización del costo de inversión y operación de la red. Para validar la eficiencia de la metodología propuesta se emplean sistemas de prueba de 26 y 32 nodos con 5 posibles conductores a instalar. Los autores de [11] presentan la aplicación del método de búsqueda tabú para seleccionar conductores en sistemas de distribución con naturaleza trifásica. Los resultados obtenidos en sistemas de prueba de 8 y 27 nodos muestran la eficiencia de la metodología propuesta cuando se compara con la solución obtenida por medio de un AGCB.

En [17] proponen un enfoque de planificación para sistemas de distribución radial no balanceados. Los autores consideran la ubicación simultánea de bancos de condensadores y la selección óptima de conductores a través de la implementación de un algoritmo de optimización conocido como evolución diferencial. Los resultados numéricos demuestran la eficiencia de la metodología propuesta en sistemas de prueba de 19 y 34 nodos. En [18], los autores presentan la aplicación del algoritmo de optimización de las salpas para seleccionar el conjunto óptimo de conductores en una red real de distribución ubicada en Egipto. La principal característica de esta propuesta es que el modelo matemático desarrollado permite cambiar el calibre de los tramos de red existentes con el fin de aumentar la capacidad de transmisión de energía. Los autores de [8] presentan la aplicación del método de optimización de búsqueda por vórtices al problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución trifásicos balanceados y desbalanceados con tamaños de 8 y 27 nodos. Los autores consideran 8 tipos de conductores disponibles. Los resultados numéricos demostraron la eficiencia del método propuesto cuando se compara el AGCB, el algoritmo de búsqueda tabú y el modelo de PNLEM resuelto en el software GAMS.

Otras metodologías de solución aplicadas al problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución son: el método de optimización por enjambre de partículas [19], [20], el algoritmo de optimización de búsqueda armónica [21], el algoritmo genético convencional [22], [23] y el algoritmo de búsqueda por cuervos [24], entre otros métodos.

1.4. Contribución y alcance

De la revisión del estado del arte anterior, es importante notar que todos los métodos de optimización, excepto la solución del modelo de PNLEM en GAMS, son de naturaleza maestro-esclavo; es decir, emplean en la etapa maestra alguna estrategia metaheurística para seleccionar los calibres de los conductores y en la etapa esclava emplean un método de flujo de potencia para evaluar las características operativas de la red (voltajes, corrientes, potencias, etc.). Por lo anterior, en este artículo se presentan las siguientes contribuciones:

- i. la aplicación del AMN para la generación de las soluciones candidatas del problema de selección óptima de conductores en sistema de distribución a través de una codificación entera en la etapa maestra.
- ii. su integración con el método de flujo de potencia trifásico basado en la matriz triangular para sistemas balanceados y desbalanceados con el fin de evaluar las características eléctricas de la solución en la etapa esclava.

Es importante mencionar que el AMN no ha sido aplicado al problema de selección óptima de conductores, con lo cual este trabajo de investigación pretende aportar en el desarrollo de nuevas metodologías de optimización para abordar el problema de planeación de sistemas de distribución. Además, los resultados numéricos en los sistemas de prueba de 8 y 27 nodos muestran que: (i) para el sistema de 8 nodos se obtiene la misma solución reportada por el método de búsqueda por vórtices reportado en [8], y (ii) para el sistema de 27 nodos se mejoran los resultados presentados por dicho método. Por otro lado, es importante tener en cuenta que en este trabajo se considera que las redes eléctricas operan con impedancias balanceadas, y las asimetrías se presentan únicamente en las cargas, las cuales pueden estar conectadas en estrella y en triángulo; además, para el caso de cargas conectadas en estrella, se considera que estas están sólidamente aterrizadas.

1.5. Estructura del documento

El resto de este documento está estructurado de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta la formulación matemática del problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución, el cual tiene como objetivo la minimización de los costos de inversión y operación para un horizonte de planeación de un año. En la sección 3 se presenta la metodología de solución propuesta, la cual consiste en la integración del AMN en la etapa maestra y el método de flujo de potencia triangular en la etapa esclava. En la sección 4 se presentan las principales características de los sistemas de prueba de 8 y 27 nodos con condiciones operativas balanceadas y desbalanceadas. En la sección 5 se presentan los principales hallazgos numéricos en los sistemas de prueba de 8 y 27 nodos, así como su análisis y discusión; además, se presentan los resultados comparativos con metodologías de optimización disponibles en [8]. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones derivadas de esta investigación, así como algunos posibles trabajos de investigación futura.

2. Formulación matemática

El problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución de energía eléctrica con estructura trifásica se presenta a través de un modelo de programación no lineal entera mixta (PNLEM) [9]. En este modelo, las variables enteras (o binarias) están asociadas con el calibre del conductor que se puede asignar a cada tramo de red, mientras que, las variables continuas están relacionadas con la solución del problema de flujo de potencia, p. ej., voltajes, corrientes, y flujos de potencia, entre otras [4]. El modelo matemático que describe el problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución se presenta a continuación.

2.1. Función objetivo

La función objetivo para el problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución con naturaleza trifásica simétrica y/o asimétrica considera un horizonte operativo de un año para minimizar los costos de inversión en conductores y los costos de las pérdidas de energía anuales. En la formulación matemática (1)-(3), la ecuación (1) representa el valor de la función objetivo, la ecuación (2) representa los costos de las pérdidas de energía para el año de estudio, y la ecuación (3) es la componente asociada con el costo de inversión en conductores.

$$z = \min (C_{\text{loss}} + C_{\text{inv}}) \quad (1)$$

$$C_{\text{loss}} = C_p T \sum_{h \in \Omega_h} \sum_{p \in \Omega_p} \sum_{q \in \Omega_p} \sum_{i \in \Omega_b} \sum_{j \in \Omega_b} V_{h,i}^p V_{h,j}^q Y_{ij}^{pq} (\lambda_{ij}^c) \cos (\phi_{h,i}^p - \phi_{h,j}^q - \phi_{h,ij}^{pq} (\lambda_{ij}^c)) \Delta h \quad (2)$$

$$C_{\text{inv}} = \sum_{c \in \Omega_c} \sum_{km \in \Omega_L} C_{km}^c L_{km} \lambda_{km}^c \quad (3)$$

donde C_{loss} es la variable asociada con los costos de las pérdidas de energía, C_p presenta el coeficiente de costo promedio de la energía; T a la longitud del período de estudio; Y_{ij}^{pq} y ϕ_{ij}^{pq} corresponden a las magnitudes de las impedancias que asocian a los nodos i y j en las fases p y q , respectivamente. Nótese que para el problema de selección óptima de conductores en sistemas eléctricos, las variables Y_{ij}^{pq} y ϕ_{ij}^{pq} son funciones de la variable binaria λ_{ij}^c . Esta variable binaria define el calibre tipo c para la ruta que une los nodos i y j . $V_{h,i}^p$ y $V_{h,j}^p$ definen las magnitudes de los voltajes en los nodos i y j para el período de tiempo h en la fase p , cuyos ángulos se denotan como $\phi_{h,i}^p$ y $\phi_{h,j}^p$, respectivamente. C_{inv} almacena el costo de inversión en conductores, siendo C_{km}^c el costo del conductor por kilómetro con calibre tipo c ; L_{km} representa la longitud del tramo de red que une los nodos k y m en kilómetros; λ_{km}^c es la variable binaria que define la instalación ($\lambda_{km}^c = 1$) o no ($\lambda_{km}^c = 0$) de un conductor con calibre tipo c en el tramo de red que une los nodos k y m . Nótese que Ω_h , Ω_p , y Ω_b son los conjuntos que definen los períodos de tiempo del horizonte de planeación, el conjunto de fases del sistema bajo estudio, y el conjunto de nodos de la red, respectivamente.

2.2. Conjunto de restricciones

El problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución con topología desbalanceada está sujeto a las restricciones clásicas de balance de potencia, las capacidades de los

conductores, y la regulación de tensión en los nodos, entre otras características. Estas restricciones de presentan desde la ecuación (4) hasta la ecuación (11).

$$P_{g_i,h}^p - P_{d_i,h}^p = \sum_{p \in \Omega_h} \sum_{q \in \Omega_p} \sum_{i \in \Omega_b} \sum_{j \in \Omega_b} V_{h,i}^p V_{h,j}^q Y_{ij}^{pq}(\lambda_{ij}^c) \cos(\phi_{h,i}^p - \phi_{h,j}^q - \phi_{h,ij}^{pq}(\lambda_{ij}^c)) \begin{matrix} \forall i \in \Omega_b \\ \forall h \in \Omega_h \\ \forall p \in \Omega_p \end{matrix} \quad (4)$$

$$Q_{g_i,h}^p - Q_{d_i,h}^p = \sum_{p \in \Omega_h} \sum_{q \in \Omega_p} \sum_{i \in \Omega_b} \sum_{j \in \Omega_b} V_{h,i}^p V_{h,j}^q Y_{ij}^{pq}(\lambda_{ij}^c) \sin(\phi_{h,i}^p - \phi_{h,j}^q - \phi_{h,ij}^{pq}(\lambda_{ij}^c)) \begin{matrix} \forall i \in \Omega_b \\ \forall h \in \Omega_h \\ \forall p \in \Omega_p \end{matrix} \quad (5)$$

$$I_{km,h}^p = f(V_{h,k}^p, V_{h,m}^p, \phi_{h,k}^p, \phi_{h,m}^p, \lambda_{km}^c, R_{km}^c, X_{km}^c), \begin{matrix} \forall \{km\} \in \Omega_L \\ \forall h \in \Omega_h \\ \forall p \in \Omega_p \end{matrix} \quad (6)$$

$$|I_{km,h}^p| \leq \sum_{c \in \Omega} \lambda_{km}^c I_c^{\max}, \begin{matrix} \forall \{km\} \in \Omega_L \\ \forall h \in \Omega_h \\ \forall p \in \Omega_p \end{matrix} \quad (7)$$

$$V_i^{\min} \leq V_{i,h}^p \leq V_i^{\max}, \begin{matrix} \forall i \in \Omega_b \\ \forall h \in \Omega_h \\ \forall p \in \Omega_p \end{matrix} \quad (8)$$

$$\sum_{c \in \Omega_c} \lambda_{km}^c = 1 \quad [\forall \{km\} \in \Omega_L] \quad (9)$$

$$\sum_{km \in \Omega_L} \sum_{c \in \Omega_c} \lambda_{km}^c = n - 1 \quad (10)$$

$$\lambda_{km}^c \in \{0, 1\} \quad [\forall \{km\} \in \Omega_L, \forall c \in \Omega_c] \quad (11)$$

donde las ecuaciones (4) y (5) definen el balance de potencia activa en cada nodo del sistema en cada una de sus fases para cada período de tiempo; siendo $P_{g_i,h}^p$ y $Q_{g_i,h}^p$ la potencia activa y reactiva proveída por el generador, y $P_{d_i,h}^p$ y $Q_{d_i,h}^p$, las potencias activas y reactivas demandadas, respectivamente. La ecuación (6) es una función no lineal para corriente $I_{km,h}^p$ que fluye en la ruta km en el período de tiempo h en la fase p , la cual depende de los voltajes en ambos extremos de la línea en magnitud y ángulo, *p. ej.* $V_{h,k}^p \angle \phi_{h,k}^p$ y $V_{h,m}^p \angle \phi_{h,m}^p$, así como, del tipo de conductor seleccionado λ_{km}^c , *p. ej.* de la resistencia R_{km}^c y la reactancia X_{km}^c asociadas a este. Nótese que en estas restricciones Ω_L define el conjunto de tramos de red del sistema bajo estudio.

La desigualdad definida en (7) asegura que la corriente que fluye en el tramo de red km en el período de tiempo h sea menor capacidad térmica del conductor tipo c asignado a dicho tramo, *p. ej.* I_c^{\max} . La restricción (8) asegura que para cada nodo del sistema, en cada período de tiempo y para cada fase se cumpla la regulación de tensión del sistema, la cual se define entre el límite inferior V_i^{\min} y el límite superior V_i^{\max} , respectivamente. La ecuación (9) asegura que para la ruta que une los nodos k y m sea seleccionado un único tipo de conductor tipo c ; además, la ecuación (10) garantiza que el número total de conductores seleccionado sea equivalente al número de nodos de la red n menos 1. Nótese que esto es un condición necesaria para garantizar que la topología de la red sea radial, más no suficiente [25]. Por otro lado, la ecuación (11) muestra la naturaleza discreta (binaria) de la variable de decisión asociada con el calibre tipo c que sea asignada a la ruta km .

Observación 1 *El modelo matemático de tipo PNLEM definido entre las ecuaciones (1) a (11) representa la formulación general del problema de selección óptima de conductores para sistemas de distribución con estructura asimétrica [8]. La principal complicación en la solución de este modelo corresponde a la dimensión del espacio de soluciones, para lo cual si se tienen l líneas y c tipo de conductores, entonces, la dimensión del espacio de soluciones será c^l .*

Para hacerse a una idea del tamaño del espacio de soluciones se considera un sistema de 27 nodos, el cual requiere de 26 líneas, *p. ej.* $l = 26$, para una configuración radial, además, si el número de calibres disponibles es $c = 6$, entonces el espacio de soluciones será 6^{26} , lo cual implica, un tamaño equivalente a 170581728179578208256, siendo este alrededor de 170 trillones de posibilidades de solución, lo cual es imposible de evaluar de manera exhaustiva. Lo anterior justifica claramente la aplicación de métodos de optimización combinatorial, con el fin de hallar una solución de buena calidad en tiempos de cómputo razonables [8].

3. Metodología de solución

Para abordar el problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución balanceados y desbalanceados, definido por el modelo matemático de tipo PNLEM y presentado desde (1) a (11), se propone una metodología de optimización del tipo maestro-esclavo, en el cual la etapa maestra se encarga de asignar los calibres de los conductores, mientras que la etapa esclava evalúa cada configuración de conductores a través de un flujo trifásico desbalanceado [11]. Es importante mencionar que en este trabajo, la etapa maestra corresponderá al algoritmo de optimización metaheurístico de Newton [13], mientras que la etapa esclava corresponderá al flujo de potencia trifásico triangular [26]. A continuación se presentan las etapas esclava y maestra de la estrategia de optimización propuesta en este trabajo.

3.1. Etapa esclava: flujo de potencia trifásico

El problema de flujo de potencia para sistemas eléctricos de naturaleza trifásica desbalanceada requiere de una solución recursiva, ya que este tiene una estructura no lineal de la forma $x^{m+1} = f(x^m)$, siendo esta una estructura recursiva donde el valor de la solución en la iteración siguiente $m + 1$ depende explícitamente de la solución en la iteración actual m [3]. La metodología de flujo de potencia para sistemas trifásicos fue inicialmente propuesta por Marini *et al.*, en [27], siendo este una mejora del método *TRX* propuesto en [28]. La ventaja del método de flujo de potencia triangular es que es posible demostrar su convergencia para conexiones en estrella según lo reportado en [26], lo cual hace de este un método eficiente y de bajo coste computacional para resolver problemas de flujo de potencia en sistemas trifásicos. La fórmula general para el método de flujo de potencia triangular se define en la ecuación (12).

$$\mathbb{V}_{3\varphi,h}^{m+1} = \mathbf{1}_{3\varphi} V_{13\varphi,h} - \mathbf{T}_{3\varphi}^\top \mathbf{Z}_{3\varphi} \mathbf{T}_{3\varphi} \mathbb{I}_{3\varphi,h}^m, \quad (12)$$

donde $\mathbb{V}_{3\varphi,h}$ es el vector que contiene todos los voltajes en los nodos de demanda para cada fase en cada período de tiempo h , $\mathbf{1}_{3\varphi}$ es una matriz rectangular compuesta de matrices identidad; $V_{13\varphi,h}$ es el vector de voltajes de la subestación para cada período de tiempo, el cual en por unidad se representa como $V_{13\varphi,h} = [1\angle 0^\circ \ 1\angle -120^\circ \ 1\angle 120^\circ]^\top$. Por otro lado, $\mathbf{T}_{3\varphi}$ es la matriz triangular

superior en forma trifásica, $\mathbf{Z}_{3\varphi}$ representa la matriz de impedancias primitivas del sistema en forma trifásica, e $\mathbb{I}_{3\varphi,h}^m$ es el vector de corrientes en los nodos de demanda para cada período de tiempo.

La principal característica del flujo de potencia trifásico es que la corriente en los nodos de demanda depende específicamente del tipo de conexión de la carga, es decir, cargas conectadas en estrella y cargas conectadas en triángulo. Según lo reportado en [26], para cargas conectadas en estrella, la corriente para un nodo arbitrario k en el período de tiempo h toma la forma (13), mientras que para cargas con conexión en triángulo, esta toma la forma (14).

$$\mathbb{I}_{k3\varphi,h}^m = \mathbf{diag}^{-1} (\mathbb{V}_{k3\varphi,h}^*) \mathbb{S}_{k3\varphi,h}^* \quad (13)$$

$$\mathbb{I}_{k3\varphi,h}^m = (\mathbf{diag}^{-1} (\mathbf{M}\mathbb{V}_{k3\varphi,h}^*) - \mathbf{diag}^{-1} (\mathbf{M}^T\mathbb{V}_{k3\varphi,h}^*) \mathbf{H}) \mathbb{S}_{k3\varphi,h}^* \quad (14)$$

donde las matrices \mathbf{M} y \mathbf{H} tienen la siguiente estructura,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

y $\mathbb{S}_{k3\varphi,h}$ es el vector que contiene las demandas de cada nodo. Nótese que \mathbb{Z}^* corresponde a la pareja conjugada de la variable/parámetro \mathbb{Z} .

Una vez construido el vector de corrientes demandadas $\mathbb{I}_{3\varphi,h}^m$ a partir de las ecuaciones (13) y (14), se evalúa la fórmula recursiva partiendo del punto inicial para cada nodo $\mathbb{V}_{k3\varphi,h}^0 = V_{13\varphi,h}$, hasta que se cumpla el criterio de convergencia definido en (15).

$$\max \{ |\mathbb{V}_{3\varphi,h}^{m+1}| - |\mathbb{V}_{3\varphi,h}^m| \} < \epsilon, \quad (15)$$

siendo ϵ el máximo valor de convergencia aceptable para el sistema, el cual se define, según lo recomendado en [26], como $\epsilon = 1 \times 10^{-10}$.

Una vez solucionado el flujo de potencia trifásico con la fórmula recursiva (12), se procede al cálculo de las pérdidas de potencia en cada período de tiempo, para lo cual se calculan las corrientes en todas las ramas $\mathbb{J}_{3\varphi}$ y las caídas de tensión en estas p . *ej.* $\mathbb{E}_{3\varphi}$ por medio de la matriz triangular. Estas variables se definen como en las ecuaciones (16) y (17), respectivamente.

$$\mathbb{J}_{3\varphi,h} = \mathbf{T}_{3\varphi} \mathbb{I}_{3\varphi,h}, \quad (16)$$

$$\mathbb{E}_{3\varphi,h} = \mathbf{Z}_{3\varphi} \mathbb{J}_{3\varphi,h}. \quad (17)$$

Al combinar estas dos ecuaciones, se tiene la ecuación (18), que representa las pérdidas de potencia aparente en cada período de tiempo, p . *ej.* $\mathbb{S}_{\text{loss},h}$.

$$\mathbb{S}_{\text{loss},h} = \mathbb{E}_{3\varphi}^T \mathbb{J}_{3\varphi}^* \quad (18)$$

Observación 2 Una vez es solucionado el problema de flujo de potencia y halladas las pérdidas de potencia para cada período de tiempo h , según la ecuación (18), se obtiene la componente de la función objetivo asociada al costo de las pérdidas de energía dada en (2), la cual se puede hallar según (19).

$$C_{\text{loss}} = C_p T \sum_{h \in \Omega_h} \text{real} \{ \mathbb{S}_{\text{loss},h} \} \Delta_h. \quad (19)$$

Es importante mencionar que, en el caso de que la solución proveída por la etapa maestra al evaluarse en flujo de potencia tenga problemas de infactibilidad por sobrepaso del límite térmico de los conductores, o baja regulación de tensión (fuera del rango admitido), entonces, la función objetivo será penalizada mediante un factor de ponderación que incrementa las pérdidas totales en función del nivel de incumplimiento de las restricciones [29].

3.2. Etapa maestra: algoritmo metaheurístico de Newton

El algoritmo de optimización metaheurística inspirado en el método de solución de sistemas de ecuaciones no lineales de Newton fue recientemente desarrollado por los autores de [13]. El objetivo de este desarrollo fue el diseño de estructuras de acero para pórticos. Este algoritmo tiene como ventaja fundamental la fortaleza matemática de su formulación, siendo fácilmente adaptable a problemas con variables enteras y/o binarias, así como, problemas de optimización en el dominio continuo [30]. Al igual que la mayoría de algoritmos de optimización metaheurística, el algoritmo metaheurístico de Newton (AMN), trabaja con una población inicial X^t , y un conjunto de reglas de evolución que permiten explorar y explotar el espacio de soluciones. Nótese que t es el contador de iteraciones asignado para el AMN.

La estructura de la j^{th} fila de la matriz X^t , representa una posible solución candidata del problema estudiado y toma la estructura definida por la ecuación (20).

$$x_j^t = [2, c, \dots, 6, \dots, 1], \quad (20)$$

donde c representa el mayor calibre disponible en el conjunto de conductores. Además, la dimensión de la matriz asociada con la población inicial X^t es $n_i \times l$, siendo n_i , el número de soluciones candidatas considerado, y l el número de líneas del sistema de distribución.

Observación 3 Con la solución x_j^t se halla la componente de la función objetivo asociada con los costos de inversión en conductores, es decir, se obtiene la componente C_{inv} de la función objetivo definida en (3).

La regla de evolución general para el AMN se define en la ecuación (21) [13]:

$$x_j^{t+1} = x_j^t + \frac{t}{t_{\max}} r_1 \Gamma (x_{j-1}^t - x_{j+1}^t) + \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right) r_2 (x_{\text{best}}^t - x_j^t), \quad (21)$$

donde x_j^{t+1} es la j^{th} solución en la iteración siguiente, t_{\max} es el máximo número de iteraciones, r_1 y r_2 son números aleatorios con distribución uniforme definidos entre 0 y 1, x_{best}^t es la mejor solución contenida en la población hasta el momento (solución que provee las mínimas pérdidas para la iteración t), y Γ toma la forma definida en la ecuación (22).

$$\Gamma = \frac{\tau^2 f(x_{j+1}^t) + (1 - 2\tau) f(x_j^t) - (1 - \tau)^2 f(x_{j-1}^t)}{2\tau f(x_{j+1}^t) - 2f(x_j^t) + 2(1 - \tau) f(x_{j-1}^t)}, \quad (22)$$

siendo $f(x_{j+1}^t)$, $f(x_j^t)$, y $f(x_{j-1}^t)$ los valores de función objetivo para las soluciones x_{j+1}^t , x_j^t , y x_{j-1}^t , respectivamente; además, τ se define según la ecuación (23).

$$\tau = \frac{\|x_j^t - x_{j-1}^t\|}{\|x_{j+1}^t - x_{j-1}^t\|}, \quad (23)$$

Observación 4 Es importante mencionar que, cada solución candidata generada a partir de x_j^{t+1} es verificada con el fin de garantizar la factibilidad del espacio de soluciones, es decir, que esté compuesta de números enteros entre 1 y c . En caso contrario, esta se corrige mediante el redondeo de los valores decimales que sean generados, y en el caso de estar por fuera del rango admisible, este se lleva su valor admisible más cercano [8], p. ej. 1 o c , respectivamente.

3.3. Resumen general de la metodología de solución propuesta

En la figura 1 se presenta en forma general la implementación de la metodología maestro-esclavo, a través de la combinación del AMN y el flujo de potencia mediante el método triangular, para la selección óptima de conductores en sistemas de distribución trifásicos simétricos y asimétricos.

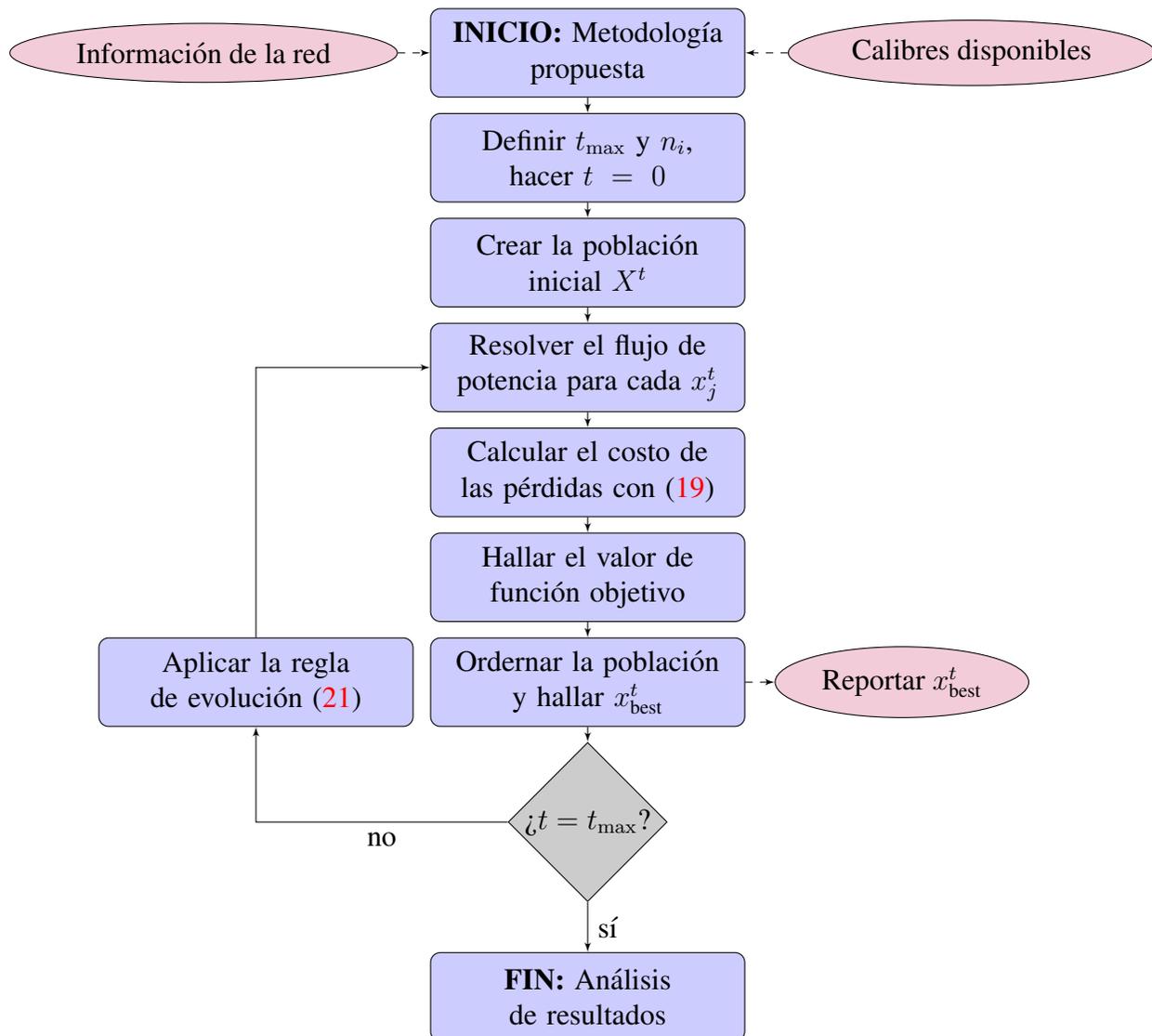


Figura 1. Implementación general de la metodología maestro-esclavo basada en el AMN y el flujo de potencia triangular para la selección óptima de conductores en sistemas de distribución trifásicos.

4. Sistemas de prueba

Para validar la metodología de solución propuesta se emplean dos sistemas de prueba de la literatura especializada compuestos de 8 y 27 nodos con estructura radial. Para ambos sistemas de prueba se considera el peor escenario de operación (pérdidas máximas), las cuales se dan cuando todas las cargas están conectadas en estrella [8]. Además, se considera un escenario de operación en demanda pico, y posibilidad de operación balanceada y desbalanceada. Las características de cada uno de estos sistemas se presenta a continuación.

4.1. Sistema de prueba de 8 nodos

El sistema de prueba de 8 nodos es un sistema radial que opera a una tensión de 13,8 kV entre fase y neutro con topología radial y factor de potencia unitario [8]. La configuración inicial de red para este sistema de prueba se presenta en la figura 2.

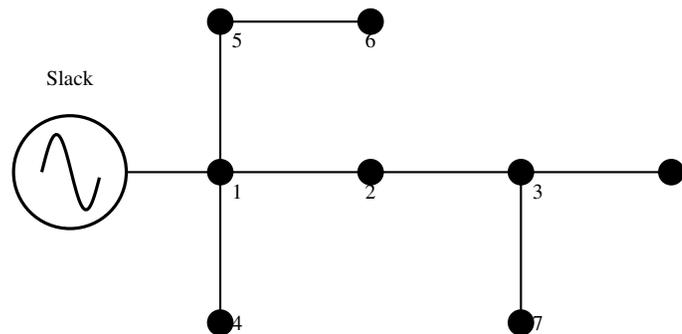


Figura 2. Diagrama monofásico equivalente para el sistema de prueba de 8 nodos

En la tabla I se presenta la información de cargas y longitud de los tramos de red. Es importante mencionar que, la información que se presenta en la tabla I es por fase.

Tabla I. Información de líneas y cargas para el escenario de operación balanceado en el sistema de 8 nodos.

Línea	Nodo i	Nodo j	L_{ij} (km)	$P_{j,h}^D$ (kW)	$Q_{j,h}^D$ (kvar)
1	1	2	1,00	1.054,2	0
2	2	3	1,00	806,5	0
3	1	4	1,00	2.632,5	0
4	1	5	1,00	609,0	0
5	5	6	1,00	2.034,5	0
6	3	7	1,00	932,8	0
7	3	8	1,00	1.731,4	0

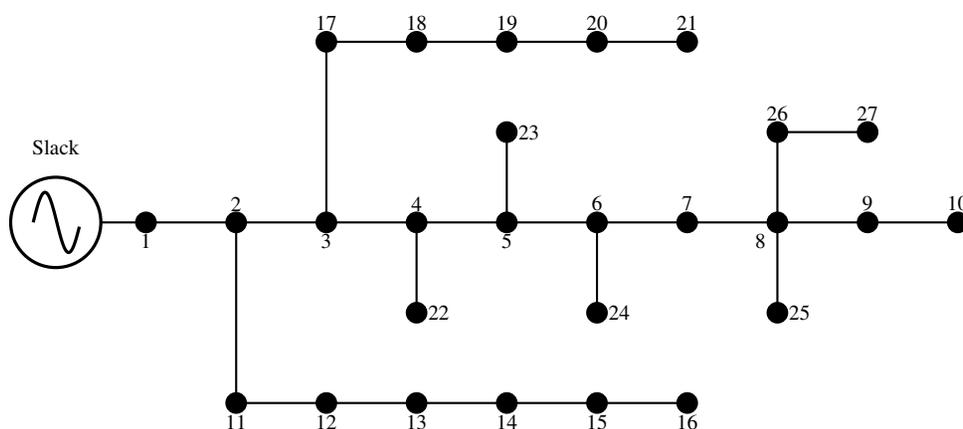
Para el caso de operación desbalanceada en el sistema de prueba de 8 nodos se consideran la distribución de demandas que se reporta en la tabla II.

Tabla II. Distribución de cargas para el escenario de operación desbalanceado en el sistema de 8 nodos

Nodo j	$P_{j,a}^D$ (kW)	$Q_{j,a}^D$ (kvar)	$P_{j,b}^D$ (kW)	$Q_{j,b}^D$ (kvar)	$P_{j,c}^D$ (kW)	$Q_{j,c}^D$ (kvar)
2	3.162,6	0	0	0	0	0
3	0	0	2.419,5	0	0	0
4	0	0	0	0	7.897,5	0
5	913,5	0	913,5	0	0	0
6	0	0	3.051,6	0	3.051,6	0
7	2.798,4	0	0	0	0	0
8	1.298,55	0	2.597,1	0	1.298,55	0

4.2. Sistema de prueba de 27 nodos

El sistema de prueba de 27 nodos es una red de distribución de topología trifásica de naturaleza radial que opera con una tensión de 13,8 kV en el nodo subestación (ver figura 3). Este sistema de prueba fue inicialmente reportado por los autores de [11], en el cual se aplicó el método de búsqueda tabú para la selección óptima de conductores. En la tabla III se presentan los datos de este sistema de prueba para el escenario de operación balanceado.

**Figura 3.** Diagrama monofásico equivalente para el sistema de prueba de 27 nodos.

En la tabla III se presenta la información de cargas y longitud de los tramos de red. Es importante mencionar que, la información que se presenta en la tabla III es por fase.

Para el caso de operación desbalanceada se consideran la distribución de demandas que se reporta en la tabla IV.

4.3. Conjunto de conductores disponibles

Para la validación de la metodología propuesta se consideran 8 tipos de conductores disponibles para ambos sistemas de prueba [8]. La información de estos conductores se presenta en la tabla V, la cual contiene la información de la impedancia promedio de secuencia positiva por kilómetro de red, así como, su respectivo costo.

Tabla III. Información de líneas y cargas para el escenario de operación balanceado para el sistema de 27 nodos

Línea	Nodo i	Nodo j	L_{ij} (km)	$P_{j,h}^D$ (kW)	$Q_{j,h}^D$ (kvar)
1	1	2	0,55	0	0
2	2	3	1,50	0	0
3	3	4	0,45	297,5	184,4
4	4	5	0,63	0	0
5	5	6	0,70	255	158
6	6	7	0,55	0	0
7	7	8	1,00	212,5	131,7
8	8	9	1,25	0	0
9	9	10	1,00	266,1	164,9
10	2	11	1,00	85	52,7
11	11	12	1,23	340	210,7
12	12	13	0,75	297,5	184,4
13	13	14	0,56	191,3	118,5
14	14	15	1,00	106,3	65,8
15	15	16	1,00	255	158
16	3	17	1,00	255	158
17	17	18	0,60	127,5	79
18	18	19	0,90	297,5	184,4
19	19	20	0,95	340	210,7
20	20	21	1,00	85	52,7
21	4	22	1,00	106,3	65,8
22	5	23	1,00	55,3	34,2
23	6	24	0,40	69,7	43,2
24	8	25	0,60	255	158
25	8	26	0,60	63,8	39,5
26	26	27	0,80	170	105,4

5. Resultados y discusión

La validación de la metodología de optimización del tipo maestro-esclavo propuesta, en la cual el AMN determine el conjunto de conductores a localizar en la etapa maestra, y el flujo de potencia triangular determine el costo de las pérdidas en la etapa esclava, se realiza en el software MATLAB en la versión 2021b en un computador personal con procesador Intel(R) Core(TM) i5-2410M CPU @ 2.30GHz, 2301 Mhz, 6 Gb RAM y sistema operativo Windows 10 Home de $\times 64$ bits. Para ambos sistemas de prueba se considera un escenario operativo en demanda pico, *i.e.*, $T = 8.760$ y la demanda siempre está al 100 %. Para estos escenarios de simulación, se considera un costo promedio de la energía C_p equivalente a 0,1390 kWh/año [8]. Es importante mencionar que, para implementar el AMN se tiene en cuenta un tamaño de población equivalente a 20 individuos, 100 repeticiones del algoritmo y 1000 iteraciones por repetición.

Tabla IV. Distribución de cargas para el escenario de operación desbalanceado en el sistema de 27 nodos

Nodo j	$P_{j,a}^D$ (kW)	$Q_{j,a}^D$ (kvar)	$P_{j,b}^D$ (kW)	$Q_{j,b}^D$ (kvar)	$P_{j,c}^D$ (kW)	$Q_{j,c}^D$ (kvar)
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	892,5	553,2	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	765	474	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	637,5	395,1
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	798,3	494,7
11	0	0	255	158,1	0	0
12	1020	632,1	0	0	0	0
13	446,25	276,6	446,25	276,6	0	0
14	0	0	286,95	177,75	286,95	177,75
15	159,45	98,7	0	0	159,45	98,7
16	0	0	382,5	237	382,5	237
17	1	0	765	474	0	0
18	382,5	237	0	0	0	0
19	446,25	276,6	446,25	276,6	0	0
20	0	0	510	316,05	510	316,05
21	127,5	79,05	0	0	127,5	79,05
22	0	0	159,75	98,7	159,75	98,7
23	165,9	102,6	0	0	0	0
24	0	0	0	0	209,1	129,6
25	255	158	255	158	255	158
26	63,8	39,5	63,8	39,5	63,8	39,5
27	170	105,4	170	105,4	170	105,4

Tabla V. Conjunto de conductores disponibles para los sistemas de prueba de 8 y 27 nodos

Calibre (c)	r (Ω/km)	x (Ω/km)	$I^{c,\max}$ (A)	C^c (US\$/km)
1	0,8763	0,4133	180	1.986
2	0,6960	0,4133	200	2.790
3	0,5518	0,4077	230	3.815
4	0,4387	0,3983	270	5.090
5	0,3480	0,3899	300	8.067
6	0,2765	0,3610	340	12.673
7	0,0966	0,1201	600	23.419
8	0,0853	0,0950	720	30.070

5.1. Resultados en en escenario de operación balanceado

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los sistemas de 8 y 27 nodos, cuando se considera el escenario de operación balanceado para ambos sistemas.

5.1.1. Sistema de prueba de 8 nodos

En la tabla VI se presentan la solución alcanzada por el AMN propuesto, así como por los métodos comparativos. Para este escenario de simulación, se consideran como algoritmos de comparación, los siguientes: algoritmo de búsqueda tabú (ABT) [11]; algoritmo genético tradicional (AGT) [22]; algoritmo genético de Chu y Beasley [31]; la solución exacta del modelo de PNLEM en GAMS [9], y algoritmo búsqueda por vórtices (ABV) [8].

Tabla VI. Solución obtenida por el AMN y su comparación con los reportes de la literatura

Método	Calibres	Inversión en conductores (US\$)	Costo de las pérdidas (US\$)	Costos anuales (US\$)
AGT	{6, 5, 3, 4, 4, 1, 4}	125.433	406.222,461	531.655,461
AGCB	{6, 6, 4, 4, 4, 1, 4}	143.076	373.155,965	516.231,965
GAMS	{6, 4, 4, 5, 4, 1, 2}	122.358	416.681,580	539.039,580
ABT	{6, 5, 4, 4, 4, 1, 3}	125.433	397.754,442	523.187,442
DVSA	{6, 6, 5, 5, 4, 2, 4}	163.350	345.007,959	508.357,959
AMN	{6, 6, 5, 5, 4, 2, 4}	163.350	345.007,959	508.357,959

Los resultados presentados en la tabla VI muestran que: (i) la metodología propuesta basada en el AMN alcanza los mismos resultados numéricos que el ABV, con una solución equivalente a US\$ 508.357, 959, de los cuales el 32, 13 % corresponde a los costos de inversión en conductores, y el 67, 87 % representa los costos asociados con las pérdidas de energía durante el horizonte de planeación; (ii) la segunda mejor metodología de solución es el AGCB con una función objetivo equivalente a US\$ 516.231, 965, seguida en tercer lugar por el ABT con un costo anual de US\$ 523.187, 442; (iii) debido a la no linealidad y no convexidad del espacio de soluciones, el resultado del modelo PNLEM en el software GAMS se consigue en una solución óptima de naturaleza local, siendo esta la solución de peor calidad presentada en la tabla VI, con un costo anual adicional de US\$ 30.681, 621; y (iv) es importante mencionar que la solución obtenida por el AMN presenta el mayor nivel de inversión de todos los métodos comparativos al igual que el ABV en términos de calibres de conductores; sin embargo, este costo adicional se ve compensado con el menor nivel de costo en las pérdidas de energía, con lo cual se logra la combinación adecuada para obtener la solución de mejor calidad en este sistema de prueba.

5.1.2. Sistema de prueba de 27 nodos

Para este sistema de prueba en la tabla VI se presentan los resultados comparativos entre el método propuesto y el ABV presentado en [8].

Los resultados de la tabla VII muestran que: (i) el AMN propuesto mejora los resultados reportados por el ABV en [8] en US\$ 4.329, 222, ya que, el AMN logra un costo anual de US\$ 557.695, 255, mientras que el ABV llega a unos costos finales de US\$ 562.024, 477. (ii) la principal diferencia entre las soluciones reportadas por el método propuesto ABV radica en la reducción de los calibres en dos tramos de red, cuando se comparan entre sí. Esto hace que el costo de inversión en conductores del AMN sea menor que el costo alcanzado por el ABV en US\$ 6.607, 350; aunque esto implica que, el costo de las pérdidas de energía se aumentan, siendo la diferencia entre el ABV y el AMN de US\$ 2.278, 128; lo cual se traduce en una ganancia neta en favor del AMN.

Tabla VII. Solución obtenida por el AMN y su comparación con el ABV para el escenario de operación balanceado

Método	Calibres	Inversión en conductores (US\$)	Costo de las pérdidas (US\$)	Costos anuales (US\$)
DVSA	{7, 7, 5, 4, 4, 3, 3, 1, 1, 4, 4, 2, 3, 2, 1, 4, 4, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1}	344.352,150	217.672,327	562.024,477
AMN	{7, 7, 4, 4, 4, 4, 3, 1, 1, 4, 4, 3, 3, 1, 2, 4, 3, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1}	337.744,800	219.950,455	557.695,255

5.2. Resultados en en escenario de operación desbalanceado

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los sistemas de 8 y 27 nodos, cuando se considera el escenario de operación con cargas desbalanceadas para ambos sistemas de prueba. Es importante mencionar que, para estos sistemas de prueba solo existen reportes en el escenario de balanceado con el método ABV presentado en [8].

5.2.1. Sistema de prueba de 8 nodos

En la tabla VIII se presentan los resultados comparativos entre el AMN y el ABV. En estos resultados es posible notar que ambas metodologías de solución alcanzan la misma solución óptima, con un costo de inversión y operación anual equivalente a US\$ 558.758, 394, de los cuales el 51, 85 % están asociados a la inversión en conductores, y el 49, 15 % están asociados al costo anual de las pérdidas de energía.

Tabla VIII. Solución obtenida por el AMN y su comparación con el ABV para el escenario de operación desbalanceado

Método	Calibres	Inversión en conductores (US\$)	Costo de las pérdidas (US\$)	Costos anuales (US\$)
DVSA	{7, 7, 7, 5, 5, 4, 4}	289.713	269.045,394	558.758,394
AMN	{7, 7, 7, 5, 5, 4, 4}	289.713	269.045,394	558.758,394

5.2.2. Sistema de prueba de 27 nodos

En la tabla IX se presenta la comparación entre los resultados del ABV y el AMN propuesto.

De los resultados de la tabla IX es importante notar que: (i) el costo de inversión en conductores y el costo anual de pérdidas se reducen en la solución obtenida mediante el AMN, siendo estos de US\$ 344.954, 40, y US\$ 252.624, 608, respectivamente; mientras que los costos obtenidos por el método AVB son en su orden de US\$ 350.392, 95, y US\$ 257.999, 185. (ii) La ganancia neta obtenida por el AMN en comparación con ABV es de US\$ 10.813, 127, de los cuales el 50, 30 % se logra por reducción del costo de inversión y el 49, 70 % por la reducción en los costos de operación, p. ej. el costo de las pérdidas de energía esperadas durante el horizonte de planeación.

Tabla IX. Solución obtenida por el AMN y su comparación con el ABV para el escenario de operación desbalanceado

Método	Calibres	Inversión en conductores (US\$)	Costo de las pérdidas (US\$)	Costos anuales (US\$)
DVSA	{ 7, 7, 5, 4, 4, 4, 4, 2, 2, 4, 4, 3, 2, 1, 1, 2, 3, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 4, 1 }	350.392,95	257.999,185	608.392,135
AMN	{ 7, 7, 4, 4, 4, 3, 4, 2, 1, 4, 4, 4, 2, 1, 1, 4, 3, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 1 }	344.954,40	252.624,608	597.579,008

5.3. Análisis complementario

Según los resultados en los sistemas de prueba de 8 y 27 nodos para los escenarios de prueba balanceados y desbalanceados, se puede afirmar que:

- ✓ El AMN alcanza los mismos resultados que el ABV para el sistema de 8 nodos en sus versiones balanceadas y desbalanceadas, lo cual permite inferir que para este sistema de distribución, es posible que esta solución corresponda a la solución óptima global. Esto debido a que, para este sistema de prueba la dimensión del espacio de solución es 8^7 , siendo 8 los calibres disponibles, y 7 el número de líneas a asignar, lo que define una dimensión equivalente a 2.097.152. Este resultado para el sistema de 8 nodos en ambos escenarios de prueba fue corroborado mediante la exploración exhaustiva de todo el espacio de soluciones.
- ✓ El AMN para el sistema de 27 nodos demuestra superioridad numérica en relación con el ABV, llegando a soluciones de mejor calidad, convirtiendo los resultados del AMN en el punto de referencia para futuras investigaciones. El éxito del método propuesto en esta investigación se puede atribuir a las propiedades de exploración y explotación del espacio de soluciones que tiene este método debido a su fortaleza matemática en la construcción de dichas reglas.
- ✓ Como era de esperarse, el costo final de operación e inversión las topologías de 8 y 27 nodos es mayor en el escenario de operación desbalanceado, lo cual se atribuye al hecho de que las pérdidas de energía incrementan por la asimetría en las cargas; además, en todos los casos de simulación, el costo de inversión en conductores aumenta, debido a que la selección del calibre depende de la corriente de mayor magnitud en cada línea, independiente de la fase en la que esta se presente.

Con respecto al desempeño numérico después de las 100 ejecuciones del AMN se encontró que el tiempo promedio de solución para el sistema de prueba de 8 nodos fue de 40 s para ambos escenarios de prueba; mientras que para el sistema de prueba de 27 nodos este tiempo fue de

95 s. Estos tiempos son importantes, porque muestran que para dimensiones exponenciales del espacio de solución 8^{26} , el tiempo de procesamiento es menor a 2 minutos, encontrando soluciones de muy buena calidad, con las cuales se mejoran los mejores reportes existentes en la literatura especializada.

6. Conclusiones y trabajos futuros

El problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución trifásicos considerando escenarios de operación balanceado y desbalanceado fue abordado en esta investigación, mediante la aplicación del algoritmo metaheurístico de Newton a través de una estrategia de optimización del tipo maestro-esclavo. En la etapa maestra, el AMN determina el conjunto de calibres a ser instalado en la red de distribución; mientras que, la etapa esclava evalúa un flujo de potencia trifásico para determinar el costo de pérdidas anuales; así como, el cumplimiento de las restricciones de capacidad de transporte de corriente en los conductores, y la regulación de tensión en todos los nodos del sistema.

Los resultados numéricos para el sistema de 8 nodos mostró que el AMN alcanza los mismos resultados reportados por el ABV con una función objetivo de US\$ 508.357, 959 para el caso balanceado, y US\$ 558.758, 394 para el escenario de operación desbalanceado; siendo estos resultados de mejor calidad cuando se compararon el AGT, el AGCB, el ABT y la solución exacta del modelo de PNLEN en el software GAMS. En el caso del sistema de 27 nodos, el AMN mejora los resultados de referencia de la literatura obtenidos con el ABV, siendo esta mejora de US\$ 4.329, 222 en el caso de operación balanceado, y US\$ 10.813, 127, lo cual convierte al método propuesto en la metodología de referencia para comparar nuevos métodos de optimización aplicables al problema de selección de conductores en sistemas trifásicos.

Respecto a los tiempos de procesamiento, los resultados del AMN muestran que se tarda en promedio 40 s para resolver el problema estudiado en el sistema de 8 nodos, y alrededor de 95 s para el sistema de 27 nodos, lo cual corresponde a tiempos de cómputo excelentes considerando que las dimensiones del espacio de solución para estos sistemas son del orden de 8^7 y 8^{26} , siendo el primero del orden de dos millones de posibilidades, el segundo del orden de cientos mil trillones, p. ej., $3.02231454903657 \times 10^{23}$.

Como trabajos futuros se proponen los siguientes: (i) el desarrollo de una metodología de optimización para la selección de conductores en sistemas de distribución que tenga en cuenta de manera simultánea el problema de balance óptimo de fases con el fin de reducir los costos de inversión y operación de la red cuando se compare con el caso desbalanceado presentado en este trabajo; y (ii) aplicar el algoritmo de optimización basado en el gradiente al problema de selección óptima de conductores y comparar sus resultados con el AMN.

Agradecimientos

Este proyecto de investigación en la modalidad de producción académica ha sido desarrollado por los estudiantes Daniel Julián Nivia Torres y Guillermo Alejandro Salazar Alarcón en el marco de

los requisitos de grado del Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

References

- [1] S. A. A. Kazmi, M. K. Shahzad, A. Z. Khan, and D. R. Shin, "Smart Distribution Networks: A Review of Modern Distribution Concepts from a Planning Perspective," *Energies*, vol. 10, no. 4, p. 501, apr 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en10040501> 2
- [2] D.-A. Ramirez, A. Garcés, and J.-J. Mora-Flórez, "A Convex Approximation for the Tertiary Control of Unbalanced Microgrids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 199, p. 107423, oct 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107423> 2
- [3] A. Garcés, "A Linear Three-Phase Load Flow for Power Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 827–828, jan 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2015.2394296> 2, 8
- [4] C. Acosta, R. A. Hincapié, M. Granada, A. H. Escobar, and R. A. Gallego, "An Efficient Three Phase Four Wire Radial Power Flow Including Neutral-Earth Effect," *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 24, no. 5, pp. 690–701, may 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40313-013-0049-7> 2, 6
- [5] G. Bakkabulindi, M. R. Hesamzadeh, M. Amelin, and I. P. D. Silva, "Models for conductor size selection in single wire earth return distribution networks," in *2013 Africon*. IEEE, sep 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/afrcon.2013.6757773> 2
- [6] M. A. Farrag, A. H. Khalil, and S. Omran, "Optimal conductor selection and capacitor placement in radial distribution system using nonlinear AC load flow equations and dynamic load model," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 5, feb 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12316> 3
- [7] S. M. Ismael, S. H. E. A. Aleem, and A. Y. Abdelaziz, "Optimal selection of conductors in Egyptian radial distribution systems using sine-cosine optimization algorithm," in *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. IEEE, dec 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/mepcon.2017.8301170> 3, 4
- [8] J. F. Martínez-Gil, N. A. Moyano-García, O. D. Montoya, and J. A. Alarcon-Villamil, "Optimal Selection of Conductors in Three-Phase Distribution Networks Using a Discrete Version of the Vortex Search Algorithm," *Computation*, vol. 9, no. 7, p. 80, jul 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/computation9070080> 3, 4, 5, 8, 11, 12, 13, 14, 16, 17
- [9] O. D. Montoya, A. Garcés, and C. A. Castro, "Optimal Conductor Size Selection in Radial Distribution Networks Using a Mixed-Integer Non-Linear Programming Formulation," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 8, pp. 2213–2220, aug 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tla.2018.8528237> 3, 4, 6, 16
- [10] I. Osman, M. A. Rahman, A. R. Mahbub, and A. Haque, "Benefits of optimal size conductor in transmission system," in *2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*. IEEE, jan 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/icaee.2014.6838524> 3
- [11] O. D. Montoya, A. Grajales, and R. A. Hincapié, "Selección óptima de conductores en sistemas de distribución empleando el algoritmo búsqueda tabú," *Ingeniare. Rev. chil. ing.*, vol. 26, no. 2, pp. 283–295, jun 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4067/s0718-33052018000200283> 3, 4, 8, 13, 16
- [12] H. Falaghi, M. Ramezani, M.-R. Haghifam, and K. Milani, "Optimal selection of conductors in radial distribution systems with time varying load," in *18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2005)*. IEE, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/cp:20051351> 3
- [13] S. Gholizadeh, M. Danesh, and C. Gheytratmand, "A new Newton metaheuristic algorithm for discrete performance-based design optimization of steel moment frames," *Comput. Struct.*, vol. 234, p. 106250, jul 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106250> 3, 8, 10
- [14] M. R. Raju, K. V. S. R. Murthy, K. Ravindra, and R. S. Rao, "Optimal conductor selection for agricultural distribution system - a case study," in *2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems*. IEEE, jun 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/icias.2010.5716178> 4
- [15] D. Joshi, S. Burada, and K. D. Mistry, "Distribution system planning with optimal conductor selection," in *2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*. IEEE, oct 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/rdcape.2017.8358279> 4

- [16] S. Manikandan, S. Sasitharan, J. V. Rao, and V. Moorthy, "Analysis of optimal conductor selection for radial distribution systems using DPSO," in *2016 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*. IEEE, mar 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/icees.2016.7510623> 4
- [17] P. Samal, S. Mohanty, and S. Ganguly, "Simultaneous capacitor allocation and conductor sizing in unbalanced radial distribution systems using differential evolution algorithm," in *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*. IEEE, dec 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/npsc.2016.7858853> 4
- [18] S. M. Ismael, S. H. E. A. Aleem, A. Y. Abdelaziz, and A. F. Zobaa, "Practical Considerations for Optimal Conductor Reinforcement and Hosting Capacity Enhancement in Radial Distribution Systems," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 27 268–27 277, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/access.2018.2835165> 4
- [19] M. Kumari and R. Ranjan, "Economical Selection of Conductor in Radial Distribution System using PSO," *J. Inst. Eng. (India): B*, apr 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40031-022-00724-8> 5
- [20] T. M. Khalil and A. V. Gorpinich, "Optimal conductor selection and capacitor placement for loss reduction of radial distribution systems by selective particle swarm optimization," in *2012 Seventh International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES)*. IEEE, nov 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/iccscs.2012.6408516> 5
- [21] R. S. Rao, K. Satish, and S. V. L. Narasimham, "Optimal Conductor Size Selection in Distribution Systems Using the Harmony Search Algorithm with a Differential Operator," *Electr. Power Compon. Syst.*, vol. 40, no. 1, pp. 41–56, nov 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15325008.2011.621922> 5
- [22] M. Thenepalle, "A comparative study on optimal conductor selection for radial distribution network using conventional and genetic algorithm approach," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 17, no. 2, pp. 6–13, mar 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5120/2195-2789> 5, 16
- [23] M. Legha, H. Javaheri, and M. Legha, "Optimal Conductor Selection in Radial Distribution Systems for Productivity Improvement Using Genetic Algorithm," *Iraqi j. electr. electron. eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 29–35, jun 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37917/ijeee.9.1.3> 5
- [24] A. Y. Abdelaziz and A. Fathy, "A novel approach based on crow search algorithm for optimal selection of conductor size in radial distribution networks," *Eng. Sci. Technol. Int J.*, vol. 20, no. 2, pp. 391–402, apr 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.02.004> 5
- [25] M. Lavorato, J. F. Franco, M. J. Rider, and R. Romero, "Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 172–180, feb 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2011.2161349> 7
- [26] O. D. Montoya, J. S. Giraldo, L. F. Grisales-Noreña, H. R. Chamorro, and L. Alvarado-Barrios, "Accurate and Efficient Derivative-Free Three-Phase Power Flow Method for Unbalanced Distribution Networks," *Computation*, vol. 9, no. 6, p. 61, may 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/computation9060061> 8, 9
- [27] A. Marini, S. Mortazavi, L. Piegari, and M.-S. Ghazizadeh, "An efficient graph-based power flow algorithm for electrical distribution systems with a comprehensive modeling of distributed generations," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 170, pp. 229–243, may 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.12.026> 8
- [28] P. D. O.-D. Jesus, M. Alvarez, and J. Yusta, "Distribution power flow method based on a real quasi-symmetric matrix," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 95, pp. 148–159, feb 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.08.011> 8
- [29] S. Aras, H. T. Kahraman, and E. Gedkli, "Determination of the Effects of Penalty Coefficient on the Meta-Heuristic Optimization Process," in *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*. IEEE, sep 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/idap.2018.8620922> 10
- [30] O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, L. Alvarado-Barrios, A. Arias-Londoño, and C. Álvarez-Arroyo, "Efficient Reduction in the Annual Investment Costs in AC Distribution Networks via Optimal Integration of Solar PV Sources Using the Newton Metaheuristic Algorithm," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 23, p. 11525, dec 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app112311525> 10
- [31] J. Castilho Neto and A. M. Cossi, "Alocação de Cabos em Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Média Tensão (MT) Utilizando Algoritmo Chu-Beasley," *Energía*, pp. 1–6, 2009. 16

Daniel Julián Nivia Torres

Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Correo electrónico: djniviati@correo.udistrital.edu.co.

Guillermo Alejandro Salazar Alarcón

Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Correo electrónico: gasalazara@correo.udistrital.edu.co.

Oscar Danilo Montoya

Doctor en Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Magíster en Ingeniería Eléctrica de la UTP. Ingeniero Electricista de la UTP. Docente asistente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Investigador asociado (MINCIENCIAS) adscrito al grupo de investigación en Compatibilidad e Interferencia Electromagnética.
Correo electrónico: odmontoyag@udistrital.edu.co.

Metodología para el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución basada en aprendizaje automático

Methodology for Predictive Maintenance of Distribution Transformers based on Machine Learning

Laura I. Alvarez Q¹, **Carlos A. Lozano M¹**, **Diego A. Bravo M²*,**

¹Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia., ²Departamento de Física, Universidad del Cauca. Popayán, Cauca, Colombia.

*Correspondence email: dibravo@unicauca.edu.co

Received: 10th-March-2021. Modified: 16th-November-2021. Accepted: 2nd-March-2022

Abstract

Context: In this paper, we describe a methodology set up to schedule the predictive maintenance of distribution transformers in the Department of Cauca (Colombia) by means of machine learning.

Method: The proposed methodology relies on a predictive classification model that finds the minimum number of distribution transformers prone to failure. To verify this, the model was implemented and tested with real data in the Department of Cauca (Colombia).

Results: It is possible to achieve an effective solution for scheduling the predictive maintenance of distribution transformers by means of machine learning.

Conclusions: The proposed model is an effective tool for problems involving the scheduling of preventive maintenance scheduling problems for distribution transformers.

Keywords: Distribution Transformers, Machine Learning, Predictive maintenance.

Acknowledgements: The authors would like to express their gratitude to Compañía Energética de Occidente [Western Energy Company] for facilitating the data on distribution transformers in the Department of Cauca (Colombia); and to Universidad del Valle and Universidad del Cauca for the academic and scientific resources granted during this project.

Language: Spanish.

Open access



Cite as: Alvarez, L., Lozano, C., Bravo, D. "Metodología para el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución basada en aprendizaje automático". *Ing.* vol. 27, no. 3, 2022. e17742.

<https://doi.org/10.14483/23448393.17742>

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

Resumen

Contexto: En este artículo describimos una metodología que se ha establecido para programar el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución en el Departamento del Cauca (Colombia) mediante aprendizaje automático.

Método: La metodología propuesta se basa en un modelo predictivo de clasificación que encuentra el número mínimo de transformadores de distribución propensos a fallar. Para verificar esto, el modelo fue implementado y probado con datos reales en el Departamento del Cauca (Colombia).

Resultados: Es posible lograr una solución efectiva para programar el mantenimiento predictivo de los transformadores de distribución mediante el uso de aprendizaje automático.

Conclusiones: El modelo propuesto es una herramienta eficaz para los problemas de programación del mantenimiento preventivo de los transformadores de distribución.

Palabras clave: transformadores de distribución, aprendizaje automático, mantenimiento predictivo.

Agradecimientos: Los autores de este trabajo desean expresar sus agradecimientos a la Compañía Energética de Occidente por facilitar los datos de los transformadores de distribución del Departamento del Cauca (Colombia) y a la Universidad del Cauca y la Universidad del Valle por todos los recursos académicos y científicos prestados durante la realización de este proyecto.

1. Introducción

Actualmente, en el departamento de Cauca, el mantenimiento a los transformadores de distribución tiene un enfoque más correctivo que preventivo. Según datos de la Compañía Energética de Occidente en el 2016 se tuvo un reporte de 1.297 transformadores quemados, lo que significó elevados costos por su reposición y por la energía no suministrada debido a la suspensión de servicio. Se registran diversas causas de quema, como manipulación por terceros, sobrecarga, fuga de aceite, falta de poda por baja tensión, y la más recurrente: descarga atmosférica. Debido a fallas en la programación de un adecuado plan de mantenimiento preventivo y al difícil acceso a algunos transformadores rurales, no todos los equipos cuentan con las protecciones (Dispositivo de protección contra sobretensiones **DPS**, cortacircuitos, fusibles, sistema de puesta a tierra e interruptor por baja tensión si aplica) instaladas adecuadamente para afrontar las condiciones de operación y garantizar su continuo funcionamiento. Es entonces cuando surge la necesidad de elaborar planes de mantenimiento preventivo que ayuden a evitar o disminuir el riesgo de falla, con base en los requerimientos del regulador del sector eléctrico, mejorar la calidad del servicio a los clientes y mejorar el uso de los recursos asignados al área de mantenimiento [1].

La gestión del mantenimiento para una empresa de distribución de energía eléctrica busca prevenir o disminuir el riesgo de falla, recuperar el desempeño, incrementar la vida útil de sus activos, cumplir con las normas técnicas, ambientales y de seguridad vigentes mejorando los índices de confiabilidad y la imagen empresarial mediante la calidad del servicio [2]. Se hace diferencia entre tres tipos de mantenimiento: correctivo, preventivo y predictivo. El mantenimiento correctivo se basa en reparar las fallas a medida que estas ocurren, no requiere ninguna planificación y para realizarlo se suspenden los procesos abruptamente. El mantenimiento preventivo tiene un carácter más sistemático, se realiza en tiempos y rutinas de actividades programadas que monitorean el estado del equipo buscando mantener su funcionamiento y reducir el desgaste. Por último, el mantenimiento

predictivo emplea datos históricos para predecir eventos futuros. Normalmente, los datos históricos se utilizan para crear un modelo matemático que capture las tendencias importantes. Este modelo predictivo se usa entonces con los datos actuales para predecir lo que pasará a continuación, o bien para sugerir acciones que llevar a cabo con el fin de obtener resultados óptimos. El mantenimiento predictivo ha recibido mucha atención en los últimos años debido a los avances en la tecnología que lo respalda, especialmente en las áreas de big data y aprendizaje automático [3], [4].

En el sector eléctrico existen varias técnicas de implementación tales como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), el mantenimiento basado en el riesgo (RBM), el Mantenimiento Productivo Total y el Análisis Causa Raíz. El RCM es una técnica para elaborar un plan de mantenimiento que disminuye las interrupciones de los procesos, en este caso en particular suspensiones en el servicio de energía eléctrica, por averías imprevistas. Para esto se analizan los fallos potenciales del sistema a profundidad y se identifican las acciones a realizar para evitarlos. El RBM tiene en cuenta los riesgos del sistema, no solo considera la probabilidad de ocurrencia de la falla sino también sus consecuencias [3]. Al combinar este análisis del riesgo con los requisitos financieros y los recursos humanos de la empresa distribuidora de energía, es posible priorizar los programas de mantenimiento y mejorar los resultados [5], [6].

En este trabajo se propone usar el aprendizaje automático como técnica de clasificación debido a la naturaleza y volumen de los datos; con ella será posible planificar los recursos asignados al mantenimiento [?] prediciendo comportamientos futuros [7], ajustado a las características de la empresa y sin desarrollar un modelo matemático complejo [?], [8]. El artículo está estructurado de la siguiente manera: la sección siguiente está dedicada a la metodología usada para el mantenimiento predictivo de los transformadores usando aprendizaje automático, seguida por los resultados y finalizando con las conclusiones del artículo.

2. Metodología para el mantenimiento predictivo en transformadores de distribución

Representar adecuadamente un sistema real mediante un modelo determinístico depende directamente de la relación explícita entre las variables de dicho sistema [9]. Para este caso en específico, la naturaleza estocástica del sistema de distribución y sus elementos no permite relacionar de forma directa y numérica las variables que intervienen en el proceso; por tal motivo, la metodología que se presenta a continuación tiene en cuenta las condiciones de operación de los elementos, las características climáticas de la región, el historial de fallas de años anteriores y el riesgo asociado a las mismas para el operador de red. El análisis y la optimización de toda la información se realizan mediante aprendizaje automático, a partir de estudios netamente estadísticos y probabilísticos para identificar el plan de mantenimiento más adecuado.

A continuación se describe cada una de las etapas de la metodología diseñada (figura 1) para el sistema de distribución de energía eléctrica en el departamento de Cauca (Colombia), específicamente a los transformadores de distribución como elemento objetivo de la red:

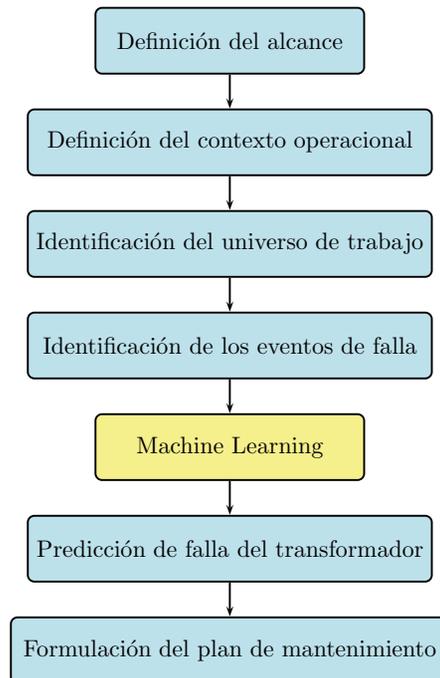


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

1. **Definición del alcance de la metodología:** el objetivo de esta metodología es predecir, con base en las condiciones de operación de los elementos, las características climáticas de la región, el historial de fallas de años anteriores y el riesgo asociado a las mismas para el operador de red; los transformadores que probablemente presentarán falla por quema en el periodo futuro de un año (2021) y el plan de mantenimiento adecuado según la causa más probable para evitar el evento de falla en el departamento de Cauca.
2. **Definición del contexto operacional de los equipos:** los transformadores analizados son activos de distribución conectados a la red del operador a niveles de tensión de 13,2 [kV] y 34,5 [kV], ubicados en zonas rurales y urbanas del departamento de Cauca. Se debe tener en cuenta que se presentan condiciones de alta vegetación y alto nivel cerámico en este departamento, por lo cual hay un número significativo de quemaduras por cortos en baja tensión y descargas atmosféricas respectivamente. También es importante destacar que una gran cantidad de estos activos que se encuentra en sectores rurales que son de difícil acceso por la topografía de la región y no es viable económicamente un seguimiento regular debido al valor del equipo. Por la misma condición de lejanía, muchos de ellos se encuentran con deficiencias en los sistemas de puesta a tierra, conductor de red de baja tensión, cortacircuitos y ubicación óptima de los DPS.
3. **Identificación del conjunto de transformadores de distribución bajo estudio:** para este proyecto se toma como universo del sistema todos aquellos transformadores de distribución conectados a niveles de tensión de 13,2 [kV] y 34,5 [kV], ubicados en zonas rurales y urbanas del departamento de Cauca, propiedad de la empresa distribuidora que implementará el plan de mantenimiento. Es necesario hacer énfasis en que se excluyen transformadores de propiedad particular (terceros), del gobierno, y todo aquel que no sea responsabilidad directa del operador de red. Este universo está conformado por 15869 transformadores que

cumplen con el contexto operativo y los intereses de la compañía en sectores residenciales, comerciales, industriales y oficiales.

4. **Identificación de los eventos de falla en el periodo de estudio:** se realiza un recopilación de información exhaustiva desde el año 2015 hasta el 2020, detectando 6.792 eventos de falla. Su distribución en tiempo se presenta en la tabla I.

Tabla I. Cantidad de eventos de falla registrados desde el año 2015 hasta el 2020.

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Número de fallas	2.108	1.297	995	871	869	652	6.792

Cada evento de falla registra su incidencia o identificador de evento que es único, el elemento sobre el cual ocurre la falla (código del transformador; se encuentran varias incidencias sobre un mismo transformador, es decir transformadores en los que reincide la falla), la fecha y la hora de inicio y finalización de la incidencia (desde que se registra la falla reportada por los usuarios hasta que se restablece el servicio) y la causa probable evidenciada por la brigada que atendió la falla.

5. **Identificación de las variables más representativas y relevantes para el sistema:** como variables representativas y relevantes para el sistema se han tomado las siguientes:

- **Tasa de quema:** variable basada en la confiabilidad del sistema y calculada a partir de los eventos de falla registrados en los años de estudio. Se define como el número de fallas de un componente por unidad de tiempo de registro.

$$TQ = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{Tiempo de estudio}} \quad [fallas/año] \quad (1)$$

- **Localización:** variable binaria que indica la zona en la que se encuentra el transformador: 1 si es urbana y 0 si es rural.
- **Potencia nominal:** capacidad del transformador en kVA. Para transformadores inmersos en aceite la norma IEC 76-1 establece las condiciones normales de servicio como altitud sobre el nivel del mar no mayor a 1.000 m y temperatura ambiente mayor a $-25^{\circ}C$ y menor a $40^{\circ}C$.
- **Autoprotección:** variable binaria que indica si el transformador cuenta internamente con un interruptor como protección por baja tensión: 1 si es autoprotegido y 0 si no lo es.
- **Promedio de densidad de descarga a tierra DDT:** variable en $Rayos/km^2 \cdot año$ está definida como el promedio de número de rayos que caen a tierra por kilómetro cuadrado en un año.
- **Máximo de densidad de descarga a tierra DDT:** variable en $Rayos/km^2 \cdot año$ está definida como el número máximo de rayos que caen a tierra por kilómetro cuadrado en un año.
- **Criticidad según estudio previo para nivel cerámico:** variable binaria producto del resultado de un estudio previo realizado para la empresa distribuidora por terceros: 1 si por su ubicación geográfica se encuentra en riesgo alto y 0 de lo contrario, no presenta alto riesgo.

- **Conectores amovibles:** variable binaria que indica si la instalación del transformador cuenta con conectores amovibles por media tensión para realizar intervenciones sin necesidad de hacer apertura desde el seccionador inmediatamente aguas arriba: 1 si cuenta con los conectores amovibles instalados y 0 si no los tiene.
 - **Tipo de clientes:** variable categórica que indica si el transformador alimenta principalmente a usuarios residenciales estrato 1, 2, 3, 4, 5, 6, comerciales, industriales u oficiales.
 - **Número de usuarios:** variable entera que indica a cuantos clientes les está suministrando el servicio de energía eléctrica el transformador en cuestión.
 - **Energía eléctrica no suministrada EENS:** variable basada en el riesgo que implica la falla, representa los kWh que deja de vender la empresa distribuidora cuando el transformador deja de operar debido a un evento de falla.
 - **Tipo de instalación:** variable categórica que indica si el transformador instalado se encuentra en una cabina, en una estructura tipo H, si tiene un macro con red antifraude, si es tipo *pad mounted*, si está en una estructura sencilla tipo poste, poste red antifraude, torre metálica u otros.
 - **Red aérea:** variable binaria que indica si la red de baja tensión del transformador es de tipo aérea: 1 si en efecto lo es y 0 de lo contrario.
 - **Cola de circuito:** variable binaria que indica si el transformador está ubicado dentro de la red de media tensión en un punto terminal del circuito: 1 si está en la cola y 0 si está en un punto de paso.
 - **Km de red BT:** variable continua que corresponde a la longitud en km con la que cuenta en transformador por baja tensión.
6. **Construcción de un modelo que represente al sistema:** en este trabajo el algoritmo que menor error de predicción tuvo fue el Support Vector Machine (SVM). Este algoritmo para la clasificación trata de resolver las dificultades de muestras de datos complejas, donde las relaciones pueden ser no lineales. En nuestro caso particular, se pretende clasificar a los observaciones en dos clases (dañado o buen estado), pero estas no son separables vía un hiperplano en el espacio dimensional definido por los datos [10].

A partir del conjunto de datos de entrenamiento y prueba de los años 2019 y 2020 se construyeron dos modelos SVM de clasificación binaria. El conjunto de datos del modelo SVM correspondiente al año 2019 fue conformado con 2.417 datos para el entrenamiento (que contienen todos los transformadores quemados y parte de los que están en buen estado) y los 13.452 restantes para la validación, de igual forma para el año 2020. Estos modelos se validan con las respuestas reales de cada año, pero aún no son modelos predictivos para realizar el plan de mantenimiento de años futuros, para ello deben construirse modelos predictivos.

A diferencia de un modelo de clasificación binaria ordinario, donde los datos de entrenamiento y prueba corresponden al mismo año, es imposible tener los datos de prueba para el año actual, por lo que se usaron los datos del año inmediatamente anterior (datos de entrenamiento) para construir el modelo de predicción del año 2021.

7. **Validación del modelo construido:** para validar el poder de predicción de esta aproximación, se entrenó un modelo SVM con un conjunto de datos del año 2019 y se validó con información del año 2020. El conjunto de datos de entrenamiento de 2019 fue modificado en la variable tasa de quema, esta variable contiene información del histórico de fallas del transformador. La tasa de quema se actualizó con los datos acumulados al final del año. El conjunto de datos de entrenamiento fue de 1.585, y se actualiza mes a mes con los datos registrados del año en curso en el sistema central y eliminando los del año anterior con el propósito de aumentar la capacidad predictiva del modelo.
8. **Predicción de los datos deseados mediante el modelo validado:** una vez se comprueba que el modelo predictivo es válido para el año 2020, se realizan las predicciones para el año en curso entrenando el algoritmo SVM con una muestra de 1.589 transformadores de distribución con la tasa de quema actualizada en los eventos de falla del año 2020.
9. **Formulación de la programación del mantenimiento para los equipos predichos** la formulación del plan de mantenimiento se realiza a partir de las causas probables más comunes que se han registrado en los históricos de eventos de quema: descarga atmosférica, corto circuito por baja tensión y sobrecarga. En la tabla II se presentan las actividades de mantenimiento propuestas en este trabajo para mitigar los eventos de falla. Estas actividades serán asignadas a cada uno de los transformadores predichos por el algoritmo de SVM.

La actividad A correspondiente a la inspección general está concebida para ser realizada por un supervisor motorizado (no una brigada pesada). Esta inspección se asignará por defecto a todos los transformadores predichos. Dependiendo de la información recolectada en terreno por el supervisor se ratifica si el transformador requiere una intervención. El restante de actividades será asignada en este trabajo mediante análisis netamente estadístico de las variables que caracterizan el modelo predictivo a manera de sugerencia y guía de cómo disminuir el posible riesgo.

Tabla II. Actividades de mantenimiento y descripción de sus tareas.

Actividad	Descripción	Tareas
A	Inspección General	(a) Inspección visual del estado del transformador, su estructura, sus protecciones y el sistema de puesta a tierra. (b) Recorrido de la red de baja tensión en busca de anomalías o riesgos. (c) Verificación de los usuarios asociados, detección de conexiones ilegales. (d) Verificar el estado de las acometidas.
B	Adecuación de protecciones	(a) Cambio de cortacircuitos. (b) Cambio de DPS. (c) Instalación de interruptor por baja tensión (si aplica). (d) Adecuación del sistema puesta a tierra.
C	Podas	Realización de poda exhaustiva o ligera, según sea necesario
D	Adecuación de la red de baja tensión	(a) Reposición de redes de baja tensión. (b) Cambio de red abierta por red trenzada. (c) Balanceo de cargas en las fases.
E	Repotenciación	Cambio de transformador por uno de capacidad superior al instalado

La actividad B será asignada a transformadores que se encuentren en zonas con DDT altos, se encuentren en estado de criticidad alta según el estudio de nivel cerámico y se encuentren en zona rural. La actividad C será asignada a transformadores que se encuentren principalmente en la zona rural, tengan red aérea, no sea red anti-fraude y su extensión sea considerable. La actividad D será asignada a transformadores con historial de quema reiterativa y red aérea que no sea anti-fraude. Finalmente la actividad E será asignada a todos aquellos transformadores que según su capacidad nominal, el número y el tipo de clientes está llegando al límite de la sobrecarga (límite operativo 120 % de la potencia nominal).

3. Resultados

El conjunto de datos contiene todos los transformadores de distribución conectados a niveles de voltaje de 13,2 kV y 34,5 kV, ubicados en las áreas rurales y urbanas del departamento de Cauca, propiedad de la Compañía Energética de Occidente. Es necesario enfatizar que quedan excluidos los transformadores de propiedad privada (terceros), del gobierno o cualquier persona diferente al operador de la red. El universo está conformado por 15.869 transformadores que responden al contexto operativo y los intereses de la empresa en el sector residencial, comercial, industrial y oficial [11]. El conjunto de datos está prefiltrado y no contiene datos atípicos ni perdidos y pueden consultarse y descargarse en [12].

Las variables predictoras X_i del conjunto de datos de entrenamiento que más aportan a la variable predicha Y_i del modelo obtenido mediante una clasificación binaria con el algoritmo SVM se pueden ver en la figura 2.

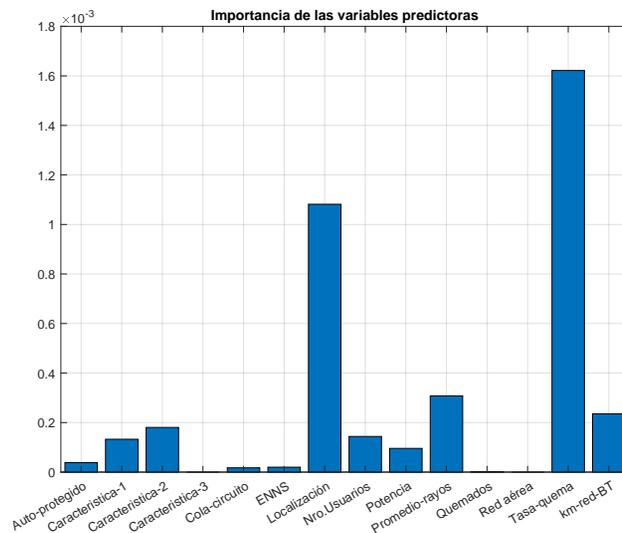


Figura 2. Importancia de las variables de entrada para el clasificador SVM.

La tasa de quema de los transformadores es la variable predictora que más influye en el modelo, esto puede ser confirmado mediante la intuición. La segunda variable de mayor importancia es la localización del transformador, esta variable es discreta (rural o urbana), siendo la parte rural del departamento de Cauca (Colombia) donde la mayoría de transformadores de distribución se

quemados. Las figuras 3(a) y 3(b) muestran el número de transformadores quemados en los años 2019 y 2020 respectivamente.

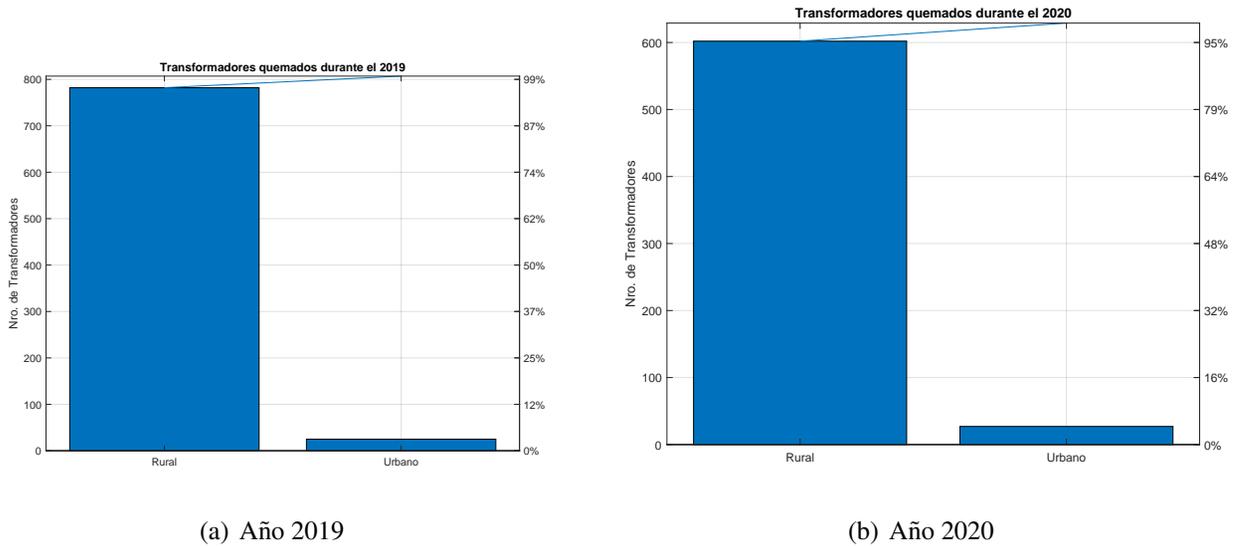


Figura 3. Diagrama de Pareto para los transformadores dañados según su localización.

Los resultados evidencian la falta de mantenimiento preventivo de los transformadores en la parte rural, cabe destacar que son los más alejados de la zona urbana de los municipios, además de tener asociados factores de riesgo de corto circuito por baja tensión. Los transformadores que más sufren daño son los de baja potencia nominal (menores a 20 [kVA]), como se evidencia en las Figs. 4(a) y 4(b).

Estos transformadores se encuentran en su gran mayoría en la parte rural del departamento de Cauca y tienen el riesgo de sobrecarga eléctrica debido a las conexiones ilegales muy comunes en estas zonas a causa de las condiciones socio-económicas.

A partir del conjunto de datos de entrenamiento y prueba de los años 2019 y 2020 se construyeron dos modelos SVM de clasificación binaria, los resultados se resumen en la tabla III.

Tabla III. Resumen Validación del modelo para los años 2019 y 2020.

Año	Error entrenamiento	Error prueba	Exactitud	Total quemados	Porcentaje de acierto
2019	0,0099	0,1629	0,9543	825	56,1338
2020	0,0170	0,1304	0,9739	441	52,1463

La explicación de la tabla para el año 2019 es la siguiente: la exactitud de los aciertos para la clasificación (en buen estado y quemados) de los transformadores es del 95.43 %, para un total de 825 transformadores quemados (variable de salida), el modelo predice un acierto del 56.13 % para esta variable de interés.

Las gráficas de confusión 5(a) y 5(b) validan los modelos SVM para los años 2019 y 2020. La clasificación binaria muestra en la diagonal principal los resultados de los aciertos para las clases

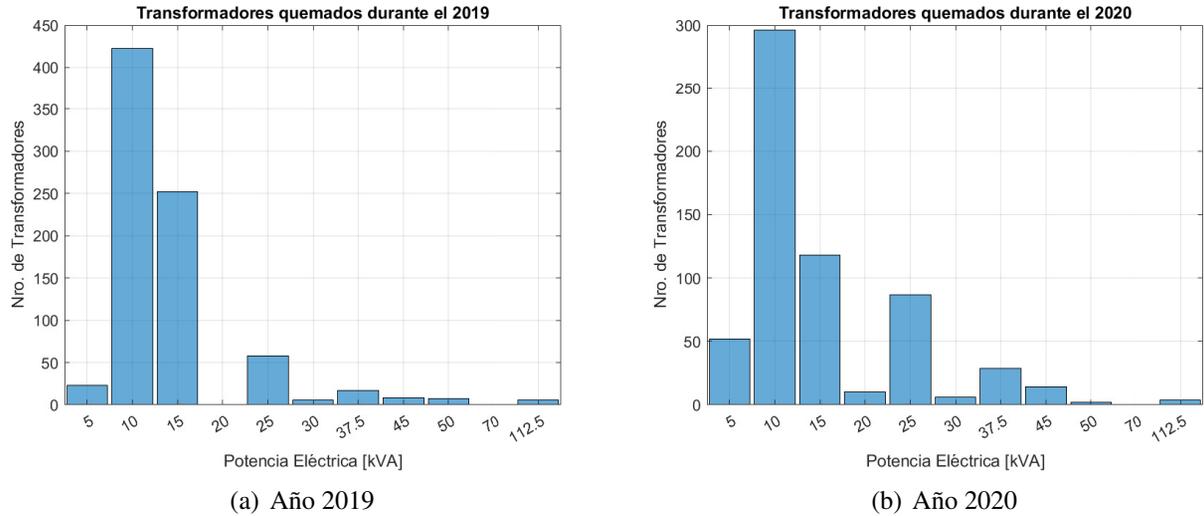


Figura 4. Distribución de los transformadores dañados según potencia nominal.

predichas (0 corresponde a transformadores en buen estado y 1 a los transformadores dañados), para el año 2020 el modelo acertó en 328 transformadores dañados de un total de 441, con un porcentaje de acierto del 52.4 %.

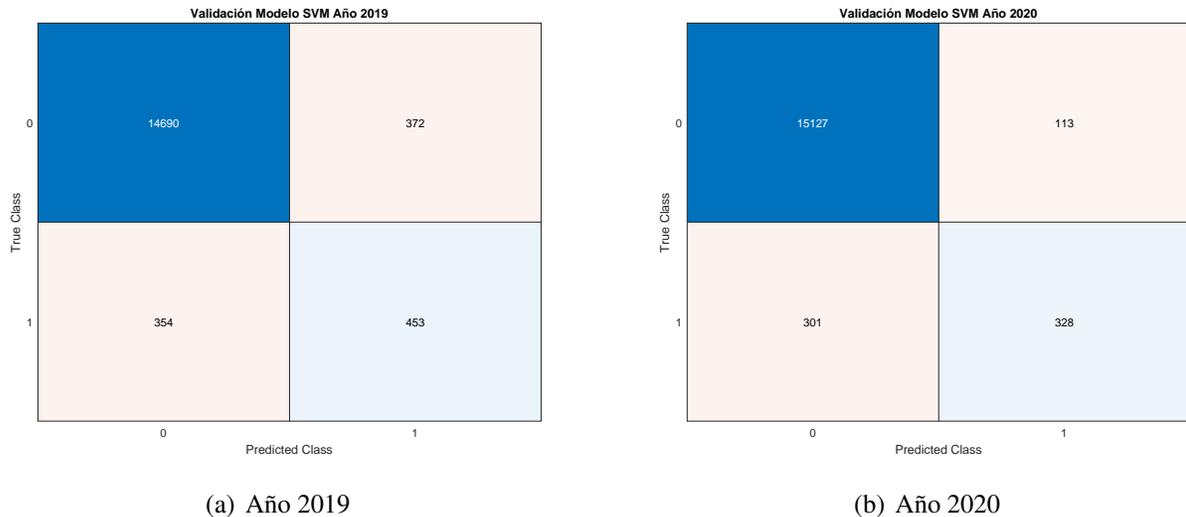


Figura 5. Gráficas de Validación del modelo para los años 2019 y 2020.

El conjunto de datos del modelo SVM correspondiente al año 2019 fue conformado con 2.417 datos para el entrenamiento (que contiene todos los transformadores quemados y parte de los que están en buen estado) y los 13.452 restantes para la validación, de igual forma para el año 2020. Estos modelos se validan con los datos de cada año, pero no son modelos predictivos para realizar el plan de mantenimiento de años futuros, para ello deben construirse modelos predictivos.

3.1. Modelo Predictivo

A diferencia de un modelo de clasificación binaria ordinario, donde los datos de entrenamiento y prueba corresponden al mismo año, es imposible tener los datos de prueba para el año actual, por lo que se usaron los datos del año inmediatamente anterior (datos de entrenamiento) para construir el modelo de predicción del año 2021.

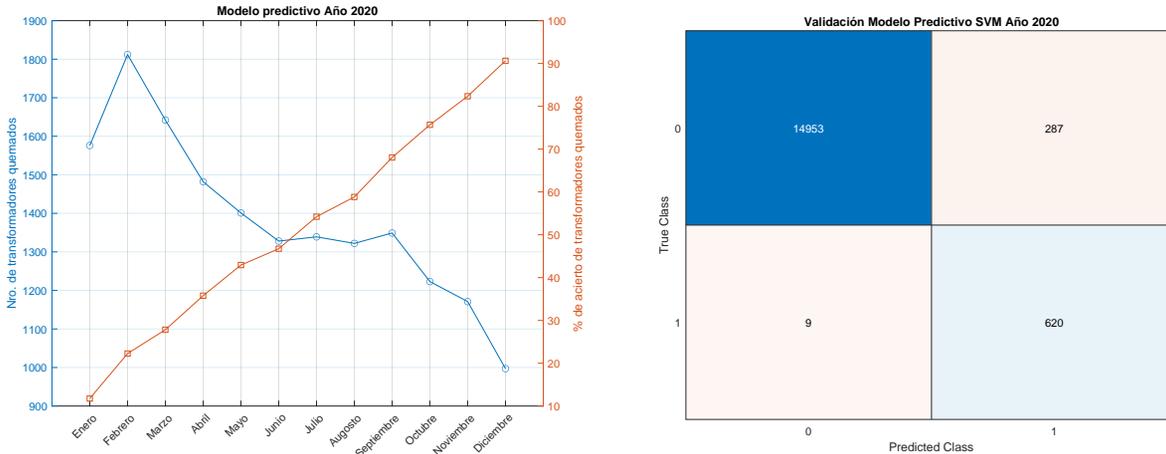
Para validar el poder de predicción de esta aproximación, se entrenó a un modelo SVM con un conjunto de datos de 2019 y se validó con información del año 2020. El conjunto de datos de entrenamiento de 2019 fue modificado en la variable tasa de quema, esta variable contiene información del histórico de fallas del transformador, y se actualizó con los datos acumulados al final del año. El conjunto de datos de entrenamiento fue de 1.585, y se actualizó mes a mes con los datos registrados en el sistema central con el propósito de aumentar la capacidad predictiva del modelo. La tabla IV muestra la validación del modelo predictivo durante el año 2020 actualizándose mes a mes con los datos registrados del año en curso en el sistema central y eliminando los del año anterior con el propósito de aumentar la capacidad predictiva del modelo, en lugar de esperar al finalizar el año para ajustar la información.

Tabla IV. Validación del modelo predictivo mes a mes del año 2020.

Mes 2020	Error entrenamiento	Error prueba	Exactitud	Total quemados	Porcentaje de acierto
Enero	0,0028	0,4561	0,8704	1576	11,7647
Febrero	0,0028	0,4186	0,8638	1812	22,2576
Marzo	0,0022	0,3845	0,8789	1642	27,8219
Abril	0,0028	0,3384	0,8953	1482	35,7711
Mayo	0,0034	0,2981	0,9061	1401	42,925
Junio	0,0029	0,2748	0,9137	1328	46,7409
Julio	0,0023	0,2413	0,9190	1339	54,2130
Agosto	0,0023	0,2189	0,9237	1322	58,8235
Septiembre	0,0029	0,1770	0,9293	1349	68,0445
Octubre	0,0041	0,1346	0,9433	1223	75,6757
Noviembre	0,0059	0,1000	0,9519	1171	82,3529
Diciembre	0,0067	0,0550	0,9694	997	90,6200

Los valores de las dos últimas columnas se muestran en la figura 6(a), a medida que se actualiza la información cada mes y eliminando la del mismo mes del año anterior. El número de transformadores quemados predicho por el modelo disminuye (excepto en el mes de febrero) y el porcentaje de aciertos en los transformadores quemados predichos por el modelo aumenta. Al final del año 2020, el porcentaje de acierto de la variable de salida (transformadores quemados) es del 90,62 %, lo que valida la capacidad predictiva del modelo de clasificación binaria, si este actualiza la información de la base de datos de entrenamiento mes a mes.

La predicción para el año 2021 arrojó 910 transformadores de los cuales 870 se encuentran en zona rural del Cauca, lo cual concuerda con las tendencias de falla en los años anteriores. En la figura 7 se presenta la distribución de las capacidades nominales para los transformadores predichos, en donde se evidencia que los transformadores de 10 kVA continúan siendo prioridad en riesgo. Por el contrario, para esta predicción el algoritmo no le dio prioridad a los transformadores



(a) Comportamiento del modelo predictivo

(b) Gráfica de confusión

Figura 6. Gráficas de validación del modelo predictivo del año 2020.

que según el estudio de nivel cerámico presentan alto riesgo de quema, ya que solo 217 transformadores (23,8 %) pertenecen a él. La mayoría de los transformadores alimenta al sector residencial (98,9 %), siendo sus clientes los más vulnerables y afectados en su calidad de vida y bienestar.

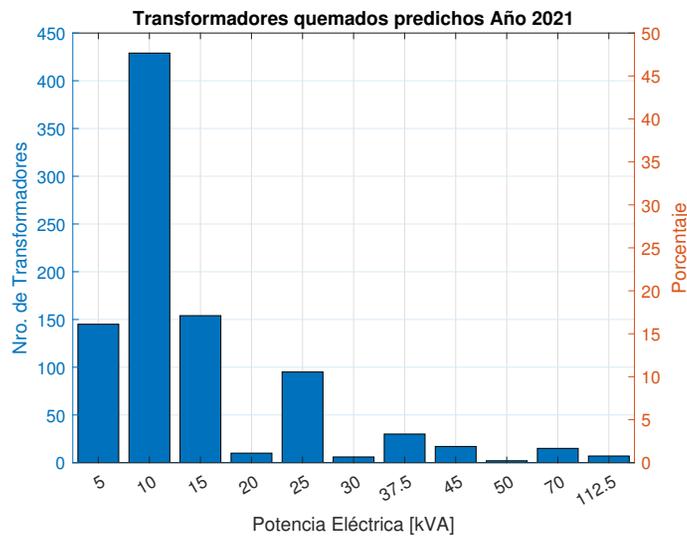


Figura 7. Capacidad nominal del conjunto de transformadores predichos.

3.2. Plan de mantenimiento

Aplicando la formulación de la programación del plan de mantenimiento de la sección anterior a los 910 transformadores predichos por el algoritmo SVM como más probables para falla por quema en el 2021, en la tabla V se presenta la cantidad total sugerida de cada actividad, se debe tener en cuenta que hay transformadores a los que se les sugiere más de una actividad a la vez, [13]. La actividad A es la inspección general, por lo cual se aplica a la totalidad del conjunto.

Tabla V. Actividades sugeridas en el plan de mantenimiento 2021

Actividad	A	B	C	D	E
Nro. Transformadores	910	597	277	240	136

En la tabla VI se presenta la distribución de actividades que se sugiere para el grupo de transformadores predichos. Se entiende que 161 transformadores requieren solo una actividad, en este caso es la inspección general que por defecto se asigna a todos los transformadores de la muestra. Por otro lado, en el otro extremo se tienen 14 transformadores que requieren las cinco actividades propuestas, a estos equipos se sugiere darles prioridad en la inspección ya que estadísticamente son los que presentan alto riesgo de falla por múltiples factores como descarga atmosférica, corto circuito en baja tensión por riesgo forestal, fraude y sobrecarga.

Tabla VI. Distribución de actividades para el grupo de transformadores predichos

Nro. actividades requeridas (A, B, C, D, E)	Nro. transformadores
1	161
2	393
3	225
4	117
5	14
TOTAL	910

3.3. Análisis financiero de la implementación del plan de mantenimiento

En términos de costos por mantenimiento correctivo, en el año 2020 se invirtieron \$3.271.763.447,42 pesos colombianos (COP) en la reposición de transformadores de distribución quemados, \$1.009.900.783,38 (COP) correspondientes a gastos por mano de obra y \$2.261.862.664,04 (COP) a material. A esto deben sumarse los ingresos no percibidos por energía no suministrada, debido a la suspensión no programada del servicio causada por el evento de falla, equivalente en total a 82.458,44 horas durante el año 2020. La cifra puntual en dinero depende directamente de la tarifa aplicada al usuario final, por lo cual en términos prácticos y comparativos, se hará referencia a las horas sin fluido eléctrico. En promedio 126,47 horas por falla, es decir un tiempo de respuesta de cinco días, donde por lo general se cumplen cuatro días en zona rural y un día en zona urbana.

Analizando las predicciones para el año 2020 mes a mes y comparando con los hechos reales, se obtiene la tabla VII, en ella se evidencia que el potencial predictivo del algoritmo es más alto iniciando el ciclo de evaluación (año) ya que, a medida que los eventos de falla empiezan a ocurrir, este tiende a clasificar en mayor medida, reconociendo los equipos que ya se han quemado.

A lo largo de las predicciones en el transcurso de los meses, el conjunto de transformadores predichos varía parcialmente. Los valores se detallan en la última columna Nuevos predichos de la tabla VII. En total 86 transformadores fueron identificados correctamente antes de su falla, 74 de ellos para el mes de enero lo que garantiza un 86 % del potencial de predicción; para el mes de febrero se suman siete transformadores más, y a partir de la experiencia del mes anterior, en marzo dos más al igual que en abril y uno en octubre cuando finalmente se completan los 86 equipos efectivos.

Tabla VII. Clasificación de los transformadores quemados mes a mes del año 2020. [Propio]

Mes 2020	Total predicciones	Total aciertos	Predicción real	Diferencia	Nuevos predichos
Enero	1576	74	74	0	74
Febrero	1812	140	75	65	7
Marzo	1642	175	61	114	2
Abril	1482	225	41	184	2
Mayo	1401	270	30	240	0
Junio	1328	294	10	274	0
Julio	1339	341	16	325	0
Agosto	1322	370	14	356	0
Septiembre	1349	428	12	416	0
Octubre	1223	476	6	470	1
Noviembre	1171	518	5	513	0
Diciembre	997	570	4	566	0

Teniendo en cuenta estas cifras, los costos de reposición y las horas sin fluido eléctrico, en el caso hipotético de haber aplicado la metodología propuesta en este trabajo habría sido posible lograr un ahorro hasta de \$ 431.551.620,36 (COP), incluyendo material y mano de obra; además de 10.876,42 horas de servicio interrumpido por la falla, que hubiesen sido reemplazadas por 344 horas de suspensión programada debido al mantenimiento predictivo, tomando un promedio de 4 horas por la ejecución de los trabajos.

En términos del presupuesto de mantenimiento correctivo, se tiene una disminución del 13% en los gastos al igual que en horas sin fluido eléctrico [14].

4. Conclusiones

En este trabajo el problema de predicción en la falla de transformadores de distribución es abordado mediante técnicas de Machine Learning. Desde el punto de vista del Machine Learning este es un problema de clasificación binaria. El modelo predictivo obtenido mediante esta aproximación permite construir un plan de mantenimiento predictivo reduciendo los costos del mantenimiento correctivo y optimizando los recursos asignados al área de mantenimiento de la Compañía Energética de Occidente.

Los algoritmos de Machine Learning encuentran patrones naturales en los datos que generan información y permiten tomar mejores decisiones y predicciones. Machine Learning Toolbox de Matlab; proporciona funciones de análisis de datos para recopilar tendencias y patrones a partir de un conjunto masivo de datos. El algoritmo de clasificación binaria usado fue el Support Vector Machine (SVM), que muestra un menor porcentaje de error en la capacidad predictiva de la falla en transformadores de distribución. Se presentaron algunos inconvenientes en el estudio, la información de fallas de los transformadores abarca pocas variables predictoras. Si se logra aumentar las variables predictoras, como por ejemplo: tiempo que lleva operando el equipo, intensidad de corriente en bornes de baja tensión, temperatura de operación, humedad del entorno, nivel de aceite, monitoreo del clima, etc; esta información podría ayudar al algoritmo de Machine Learning para capturar la tendencia en las fallas de los transformadores.

El futuro del mantenimiento en la industria es digital. Los avances de la tecnología y el internet de las cosas facilitan interconectar los dispositivos y máquinas, lo que permite a técnicos de mantenimiento y supervisores tener a su disposición datos en tiempo real del estado de estos artefactos; esto permite evolucionar los conceptos de mantenimiento correctivo y preventivo para dejar en primer lugar el mantenimiento predictivo enfocado en la detección de fallas, con lo cual las empresas gestionarán la programación de mantenimiento para sus industrias, reduciendo la cantidad de sobrecostos por daños y averías.

La implementación de la metodología permite un ahorro del 13 % en los gastos de mantenimiento correctivo para el año 2020. El modelo propuesto es una herramienta eficaz para la toma de decisiones, que proporciona una solución ideal para los problemas de programación del mantenimiento preventivo de los transformadores de distribución.

En el futuro se planea construir modelos predictivos con Machine Learning para estimar la vida útil restante de los transformadores de distribución. Una estimación precisa de la vida útil restante de los transformadores podría facilitar el desarrollo de un plan de mantenimiento más rentable para las empresas de distribución de energía eléctrica.

Se recomienda la aplicación de esta metodología a cualquier tipo de elemento de la red, como protecciones, líneas, reconectores, seccionadores y demás; siempre y cuando se tenga identificada la naturaleza de la falla y se cuente con la información necesaria para el entrenamiento.

5. Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean expresar sus agradecimientos a la Compañía Energética de Occidente por facilitar los datos de los transformadores de distribución del departamento de Cauca (Colombia); a la Universidad del Cauca y la Universidad del Valle por todos los recursos académicos y científicos prestados.

Referencias

- [1] V. B. Núñez, R. Velandia, F. Hernández, J. Meléndez, and H. Vargas, "Atributos relevantes para el diagnóstico automático de eventos de tensión en redes de distribución de energía eléctrica," *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. Inform. Ind.*, vol. 10, no. 1, pp. 73–84, 2013. 2
- [2] W. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. CRC Press, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/b11697> 2
- [3] E. Shayesteh and P. Hilber, "Reliability-centered asset management using component reliability importance," in *2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 2016, pp. 1–6. 3
- [4] A. Abdussalam Nuhu, Q. Zeeshan, O. Korhan, M. Asmael, and B. Safaei, "Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0," *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 8211, Oct 2020. 3
- [5] R. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*, ser. Power Engineering (Willis). CRC Press, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9780849375682> 3
- [6] K. Alhamad and M. Alhajri, "A zero-one integer programming for preventive maintenance scheduling for electricity and distiller plants with production," *J Qual Maint Eng*, vol. 26, no. 4, pp. 555–574, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/JQME-12-2018-0102> 3

- [7] T. P. Carvalho, F. A. A. M. N. Soares, R. Vita, R. da P. Francisco, J. P. Basto, and S. G. S. Alcala, "A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance," *Comput Ind Eng*, vol. 137, p. 106024, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024> 3
- [8] H. Li, D. Parikh, Q. He, B. Qian, Z. Li, D. Fang, and A. Hampapur, "Improving rail network velocity: A machine learning approach to predictive maintenance," *Transp. Res. Part C Emerg.*, vol. 45, pp. 17 – 26, 2014, advances in Computing and Communications and their Impact on Transportation Science and Technologies. 3
- [9] D. A. Bravo Montenegro, *Identificación de Sistemas Multivariantes. Teoría y Práctica*. Editorial Académica Española, 05 2012. 3
- [10] S. Hwang, J. Jeong, and Y. Kang, "Svm-rbm based predictive maintenance scheme for iot-enabled smart factory," in *2018 Thirteenth International Conference on Digital Information Management (ICDIM)*, 2018, pp. 162–167. 6
- [11] D.-A. Bravo M, L.-I. Alvarez Q, and C.-A. Lozano M, "Dataset of distribution transformers for predictive maintenance," *Data Brief*, vol. 38, p. 107454, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107454> 8
- [12] D. Bravo, L. Alvarez, and C. Lozano, "Dataset of distribution transformers at cauca department (colombia)," Sep. 2021. [Online]. Available: <https://data.mendeley.com/datasets/zyzj46xpm/4> 8
- [13] L. I. Alvarez, C. Lozano, and D. A. Bravo, "Machine learning for predictive maintenance scheduling of distribution transformers," *J Qual Maint Eng*, Jan. 2022. 12
- [14] L. I. A. Quiñones, *Mantenimiento Predictivo de Transformadores de Distribución*. Editorial Académica Española, 2021. 14

Laura Isabel Alvarez Quiñones

Ingeniera Física de la Universidad del Cauca (2013). Magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle (2021). Actualmente trabaja en la Compañía Energética de Occidente (Colombia) en gestión de activos. Sus áreas de interés son el aprendizaje automático y el mantenimiento predictivo de sistemas eléctricos de potencia.
correo electrónico: laura.isabel.alvarez@correounivalle.edu.co

Carlos Arturo Lozano Moncada

Ingeniero Eléctrico de la Universidad del Valle, (1992); curso estudios de Maestría en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica en la Universidad del Valle, (1995); es Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Strathclyde, (2002). Se ha desempeñado como profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle desde 1995. Sus principales áreas de interés son: Análisis, Operación y Gestión de Sistemas de Potencia, Análisis y Aplicación de Campos Electromagnéticos y mercados de energía.
correo electrónico: carlos.a.lozano@correounivalle.edu.co

Diego Alberto Bravo Montenegro

Ingeniero Físico de la Universidad del Cauca (2003). Especialista en Automatización Industrial, Universidad del Valle (2007). Magíster en Ingeniería Automática de la Universidad del Valle (2012). Doctor en Ciencias de la Electrónica de la Universidad del Cauca (2016). Actualmente es profesor titular del Departamento de Física de la Universidad del Cauca. Sus áreas de interés son el Modelado y control de sistemas dinámicos, Robótica bípeda y Educación en ingeniería.
correo electrónico: dibravo@unicauca.edu.co

Review

Proyectos energéticos en salud: una oportunidad para la mejora continua

Energy Projects in Healthcare: An Opportunity for Continuous Improvement

Hugo Gaspar Hernández Palma^{*,1}, **Daniel Mendoza Casseres**^{id}¹, **Javier Durán Ravelo**²

¹Universidad del Atlántico (Barranquilla, Colombia), ²Universidad Libre (Barranquilla, Colombia)

*Correspondence email: hugohernandezp@mail.uniatlantico.edu.co

Received: 12th/April/2021. Modified: 18th/March/2022. Accepted: 25th/May/2022

Abstract

Context: Climate change and the challenges faced by humanity in terms of sustainability encourage institutions in all sectors to take measures to reduce the impact of their activities. The purpose of the article is to analyze energy projects in the field of healthcare as an opportunity for continuous improvement.

Method: A descriptive qualitative approach is employed to explore the recent literature on energy projects in healthcare. To this end, scientific articles published in the last five years in both English and Spanish were reviewed.

Results: Energy management in healthcare institutions is present as an important component of global operations. However, there is still room for improvement in but in Latin America. 57% of green hospitals in Colombia have achieved energy sustainability goals, with the Cañaveralejo Hospital in the city of Cali being the main point of reference.

Conclusions: Fundamental principles such as an ethical commitment to change, a self-management character, the participation and responsibility of the personnel involved, and the leadership and control of management are essential for achieving a successful change model.

Keywords: energy projects, energy efficiency, continuous improvement, green hospitals, health

Language: Spanish

Open access



© The authors; Cite as: H. Hernández, D. Casseres, J. Durán. "Energy Projects in Healthcare: An Opportunity for Continuous Improvement". *Ing*, vol. 27, no. 3, 2022. e18547.

<https://doi.org/10.14483/23448393.18547>

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

Resumen

Contexto: El cambio climático y los retos que enfrenta la humanidad en términos de la sustentabilidad incentivan a las instituciones de todos los sectores a implementar medidas para reducir el impacto de su actividad. El propósito del artículo es analizar los proyectos energéticos en el ámbito de salud como una oportunidad para la mejora continua.

Metodo: Se emplea un enfoque cualitativo de tipo descriptivo para explorar la literatura reciente sobre los proyectos energéticos en salud. Para ello, se revisaron artículos científicos publicados en los últimos cinco años tanto en inglés como en español.

Resultados: La gestión energética en las instituciones de salud está presente como un componente importante de las operaciones a nivel global. Sin embargo, aún quedan aspectos por mejorar en América Latina. El 57 % de los hospitales verdes en Colombia han logrado metas de sostenibilidad energética, de los cuales el Hospital de Cañaveralejo de la ciudad de Cali es el principal referente.

Conclusiones: Principios fundamentales como el compromiso ético con el cambio, el carácter de autogestión, la participación y responsabilidad del personal involucrado y el liderazgo y control de la conducción directiva son esenciales para el logro de un modelo del cambio exitoso.

Palabras clave: proyectos energéticos, eficiencia energética, mejora continua, hospitales verdes, salud.

Idioma: Español

1. Introducción

De acuerdo con los informes realizados por las Naciones Unidas, a mediados del siglo XX fue acelerado el proceso de degradación del medio ambiente en la historia humana. Anteriormente no se hacían métricas del impacto de la industria con la gravedad del cambio climático, cuya inconciencia ha desencadenado una crisis mundial de la salud pública [1]. Este impacto negativo debe afrontarse trayendo a la humanidad nuevos desafíos para que las futuras generaciones no se destruyan, al contrario, construyan soluciones ecológicas que garanticen la supervivencia de la población y el mejoramiento de la calidad de vida con la construcción de políticas y prácticas amigables hacia el planeta [2].

Por tal motivo, la adecuada gestión de proyectos energéticos es una alternativa que promueve el desarrollo sostenible de las comunidades. Los beneficios obtenidos, mediante la eficiencia energética, son muchos, y comienzan con el uso racional de los recursos, la disminución de emisiones en el medio ambiente y la reducción de costos en términos lucrativos [3] derivados de la reducción del consumo actual de oficina y planta y del uso de herramientas de toma de decisiones [4]. La medición del impacto energético causa controversia mundial y ha sido realizada en los últimos cuarenta años para la creación de mecanismos y técnicas de ingeniería que aporten materiales de generación de energía eléctrica óptimos y más amigables con el entorno, y que eliminen poco a poco la dependencia del consumo de combustibles fósiles dañinos para la salud y el ecosistema [5].

Atendiendo esta realidad, el sector dedicado a la prestación de servicios de salud requiere la mejora continua de sus procesos energéticos, debido a que países como Estados Unidos dejan una huella de carbono de 8 % a 10 % del total generado, Reino Unido genera 25 % de la huella de carbono en el sector público [5] y Brasil 10 % [2]. Relativamente, este componente de la sociedad (sector salud) trabaja en promoción de la vida, pero las cifras muestran que, contrario a lo que

indica el proceso misional en la mayoría de estas entidades, se contribuye negativamente con el cambio climático, donde el aumento de la temperatura es cada vez más extremo, y conlleva al aumento de morbilidad y mortalidad de las comunidades [6].

Sin embargo, los países se encuentran en pleno proceso de adaptación, hospitales, centros médicos y asistenciales comienzan a comprometerse con la búsqueda de un futuro más verde y limpio, con medidas como ahorro y gestión de recursos renovables en los sistemas, inclusive eléctricos, para que sea atacada la problemática más destructiva para la salud: la huella de carbono, que enferma constantemente el planeta y expone negativamente la vida de la población [7]. Por lo anterior, la presente investigación consiste en conocer y analizar, dentro del panorama actual, cuáles son las cifras y el desarrollo de proyectos de gestión energética empleados en el sector salud, para la sustentabilidad y el cuidado de los recursos del planeta como oportunidad de mejora continua [2].

2. Metodología

Se emplea un enfoque cualitativo de tipo descriptivo para explorar la literatura reciente sobre los proyectos energéticos en salud. Para ello, se revisaron artículos científicos publicados en los últimos diez años tanto en idioma inglés como en español. En función de dar respuesta al objetivo planteado se desarrolla una revisión sistematizada, abocada a indagar por las investigaciones sobre procesos de ahorro energético que se han desarrollado en el contexto global y latinoamericano, en esta revisión sistematizada se utilizaron las palabras clave: proyectos energéticos, eficiencia energética, mejora continua, hospitales verdes y salud.

Para la búsqueda de los documentos, se utilizaron las bases de datos Scopus y Web of Science, al ser dos de las más conocidas y avaladas a nivel mundial, sin embargo, también se aprovechó el alcance que tiene la aplicación Google Académico en tema de publicaciones, de manera que pudieran abordarse más contenidos, especialmente de la región latinoamericana, en el tema de ahorro energético para el sector de la salud; consiguientemente, se tiene que dichas publicaciones, además de haber sido resultantes de la búsqueda sistematizada a partir de un conjunto de palabras clave establecidas, debieron cumplir con los siguientes criterios de selección: estar en idiomas inglés y español, haberse publicado dentro del lapso de los últimos diez años, comprendiendo así el intervalo entre 2012 y 2021, sin embargo, se busca concentrarse en publicaciones de los últimos cinco años.

3. Desarrollo y resultados

Debido a las necesidades generadas por el entorno relacionadas con el uso eficiente de los recursos y la creación de medidas de conservación ambiental, países pioneros en temas de gestión energética, que incluyen a Dinamarca, Noruega, España, Estados Unidos y China, han estructurado sus sistemas de gestión con base en guías y normas admitidas por la Organización Internacional de Normalización, consignadas dentro de la ISO 50001: 2011 Sistemas de gestión energética, requisitos con orientación para su uso, relacionada estructuralmente con normas como ISO 9001: 2008, ISO 14001: 2004 e ISO 22000: 2005 [8].

Otros países como Cuba han estructurado la gestión energética organizacional mediante tecnologías de gestión total eficiente de la energía (TGEE) y el diseño de actividades que posibiliten en el ámbito real la mejora de los procesos mediante el ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar, parecida a la norma ISO 50001: 2011, aunque aún las TGEE difieren en algunos requisitos establecidos en términos de planificación con la norma ISO 50001: 2011 [8]. Para el periodo de marzo 2019, la Red Global de Hospitales Verdes mostró cifras de promoción de proyectos de sostenibilidad, incluidos energéticos, las cifras de inscripción se encuentran detalladas en la figura 1

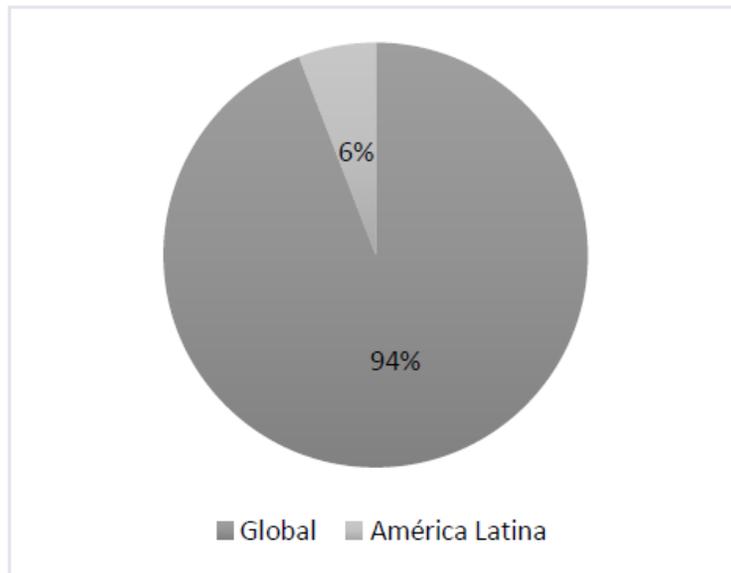


Figura 1. Entidades hospitalarias pertenecientes a la Red Global de Hospitales Verdes
Fuente: Red Global de Hospitales Verdes y Saludables [9]

Conforme a la información consignada en porcentaje en la figura 1, en 2019 más de 36.000 entidades dedicadas al sector salud, pertenecientes a 55 países a nivel global, se encuentran inscritas en una red que promueve la promoción y las prácticas sostenibles para el medio ambiente (94 %), incluidas aquellas relacionadas con el sistema eléctrico, es evidente el bajo interés en Latinoamérica para la generación de cambios innovadores en proyectos energéticos con 2250 miembros de 13 países, sin embargo, el continente latinoamericano participa en la gestión de estrategias de ahorro y sostenibilidad energética, aunque es notorio que debe mejorar su desempeño frente al tema, teniendo en cuenta que su población es grande [9].

Uno de los aportes de eficiencia energética evidenciados en España corresponde al cambio de combustible de las calderas de gasóleo a gas natural en el Hospital de Hellín. El proyecto energético, cuya inversión total fue de 56.232 euros, eliminó emisiones de CO₂ hasta un 25 %, dicha reducción impactó positivamente en eliminación de emisiones de 140 toneladas en el año. Otras emisiones, como la de óxido de nitrógeno, se redujeron en un 60 %. Otros cambios que generó el hospital estaban relacionados con el cambio de equipos con mayor eficiencia energética, que incluyeron una enfriadora y equipos de climatización, y algo muy importante, el sistema de iluminación, que pasó de luminarias tradicionales a luminarias LED (*Light Emitting Diode*, por su sigla en inglés) [10].

Para el Hospital Ibarra, localizado en Ecuador, se realizó una evaluación particular del uso de energía eléctrica en el año 2014. De acuerdo con el plan de gestión de ahorro proyectado, se estimó que el sistema de iluminación genera mayor consumo eléctrico en el mes, frente a otros sistemas. Por ello, las recomendaciones del plan hacen énfasis en un prioritario cambio de luminarias a LED, para que se reduzca el consumo con una representación de ahorro de 29,36 %. Así mismo fueron evaluados equipos de oficina y ascensores, los últimos con la necesidad de un sistema de recuperación de energía, cuya gestión conseguiría el 50 % de ahorro del gasto real. Algo tan sencillo como cambio de luminarias genera un impacto positivo en la optimización de los procesos energéticos sin verse afectado el funcionamiento normal de los procesos [11].

Dentro del panorama colombiano existe un programa de hospital verde que promueve acciones de sostenibilidad ambiental y social, proyectado hacia el liderazgo y el mejoramiento de gestión en temas como residuos, energía, agua, transporte, alimentos, productos farmacéuticos, edificios, compras verdes y sustancias químicas. La gestión de edificios sustentables es una tendencia importante, en términos de ventilación natural y técnicas eficientes que demuestran la minimización del costo de la energía [12]. En el aspecto de gestión energética se busca la implementación de energías limpias renovables, la reducción de consumo y la promoción de eficiencia. Las cifras detallan que, durante el año 2017 en el país, 96 hospitales se encontraban adscritos al programa de hospitales verdes en Colombia, de un total de 2.500 IPS nacionales; de estos 96 hospitales adscritos, el tema más trabajado fue manejo de residuos, energía, agua, y se encontraron falencias en el tema de manejo de alimentos que requiere mayor atención [13]. Conforme a la práctica de acciones eficientes de energía, los resultados muestran datos cuantitativos en la figura 2.

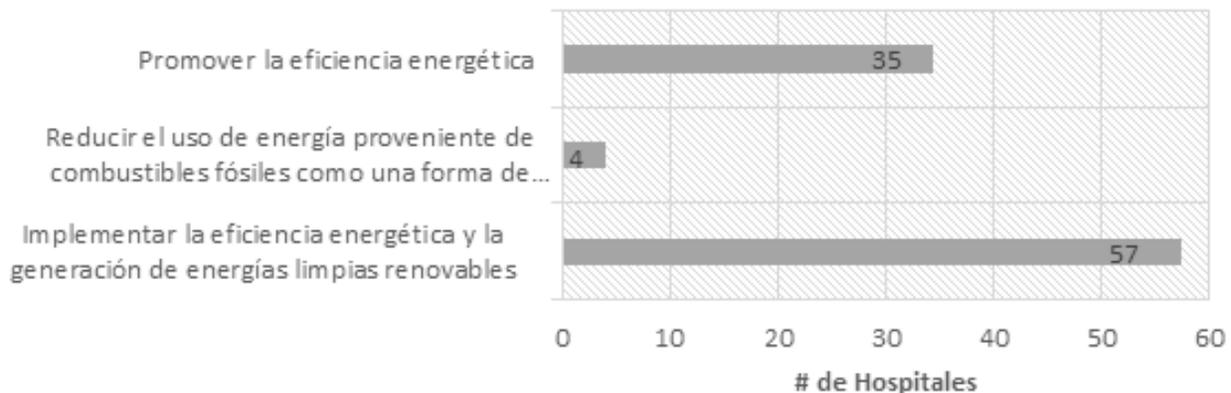


Figura 2. Metas logradas de sostenibilidad en hospitales adscritos al programa hospital verde en Colombia

Fuente: Gil, Guayan, Polania y Restrepo [13]

Los valores consignados en la figura 2 muestran que más de la mitad de los hospitales adscritos en el programa hospital verde en Colombia han implementado cambios derivados de la formulación de proyectos energéticos que mejoren la eficiencia del uso de la energía eléctrica y solo cuatro implementaron el uso de fuentes renovables para el mejoramiento del servicio, lo que corrobora que la utilización de estas energías limpias es mucho menor en los países en desarrollo de América Latina [14]. En cuanto a la promoción de proyectos de mejoramiento energético, 35 % de los hospitales fueron listados, lo que evidencia que se encuentran inscritas dentro de la red, pero requieren mayor compromiso a futuro para que se pase de la misma promoción a acciones concretas [13].

En el país, dentro del programa de promoción de eficiencia energética, se han elaborado políticas aplicables en ciudades como Cali, que posee cinco redes que suman aproximadamente 100 instituciones prestadoras de servicios de salud (IPS). En esta ciudad, el Hospital de Cañaveralejo fue ejemplo de inclusión de alternativas y acciones reales con respecto al servicio de energía eléctrica para la Red de Salud Ladera (con aproximadamente 38 entidades). El hospital logró el ahorro del consumo energético de un 60 % con el reemplazo de iluminación tradicional a luces tipo LED, se expandieron proyectos energéticos en la Red de Salud Ladera mediante la instalación de paneles solares fotovoltaicos, colectores solares, reemplazo de aires acondicionados por tecnología LED y reestructuración de la infraestructura física para la iluminación y ventilación natural [15]. La inversión realizada en la Secretaría de Salud de Cali para los hospitales modelos de eficiencia energética, durante el periodo 2014-2017, fue definida mediante los valores consignados en la figura 3.

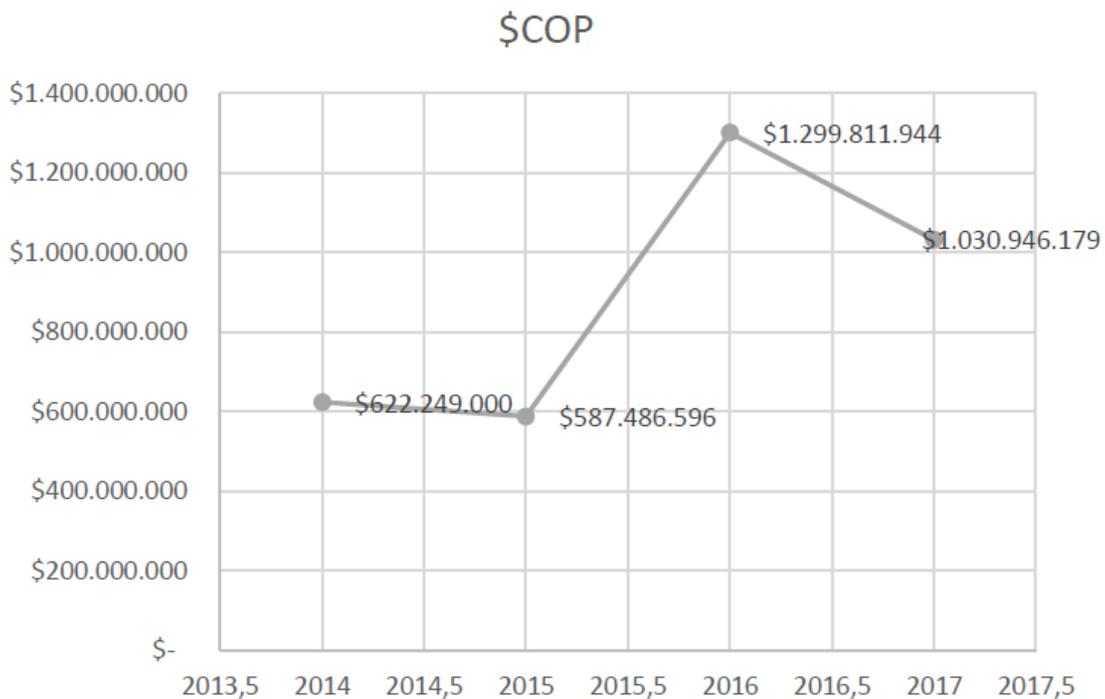


Figura 3. Inversión en proyectos energéticos en hospitales públicos en Cali (Colombia)

Fuente: Red Global de Hospitales Verdes y Saludables [15]

Como se muestra en la figura 3, la mayor inversión en el sector energético de la ciudad de Cali fue en el año 2016, con un total de \$1.299.811.944 COP, lo que evidencia el interés de la Secretaría de Salud por el apoyo a medidas de eficiencia energética. Cabe destacar que la ciudad tiene la clínica más sostenible de Colombia, el Hospital de Cañaveralejo, que sirve como modelo para la generación de nuevos emprendimientos nacionales de sostenibilidad energética. En los años 2014 y 2015, el gobierno hizo una inversión del 48 % y 45 % del total invertido en el año 2016; ya para el año 2017 se evidencia un descenso de un 79 % de inversión de capital con relación al valor mostrado en el año 2016, lo que muestra que, aunque se haya avanzado, se hizo un recorte, por ello las instituciones tienen que trabajar para demostrar al gobierno las necesidades en entidades que aún no han obtenido beneficios.

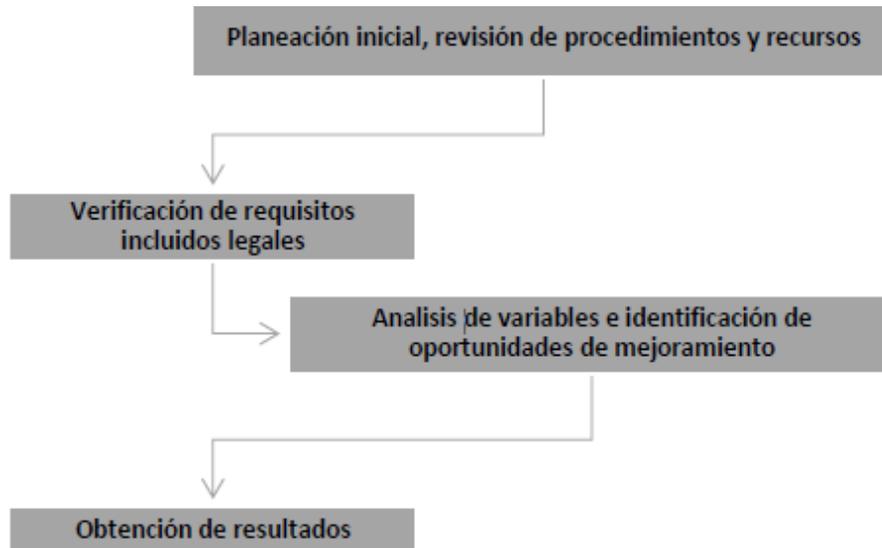


Figura 4. Etapas de planificación de proyectos energéticos para el mejoramiento continuo

Fuente: Correa *et al.* [8]

El trabajo investigativo de Hurtado y Escamilla [16] define la gestión energética como la cantidad de métodos utilizados para el mejoramiento del uso de la energía mediante la definición de una adecuada política energética, procedimientos de economía experimental, teoría de los agentes, softwares de soporte y aplicación, sistemas de control reales y planeación de los recursos energéticos distribuidos. Normativas de calidad y gestión ambiental han sido base para la estructuración de requisitos que encaminen acciones y propuestas de mejoramiento en el sector energético, incentivada mediante certificaciones que avalen las buenas prácticas y elementos distintivos en un entorno severamente competitivo [17].

Lo anterior es semejante a la teoría propuesta por Correa *et al.* [8], que plantea en términos de gestión de energía, que una organización empresarial requiere la adecuada administración de un conjunto, es decir, actividades, productos y procesos que se encuentran conjuntados dentro de un sistema definido, para la optimización de la energía eléctrica utilizada. La gestión de proyectos de eficiencia energética se ha planteado debido a que el consumo de energía en la sociedad ha aumentado considerablemente, y su administración se ha convertido en un grave problema debido al descontrol causado por el uso desmesurado de combustibles fósiles. Frente a la necesidad de aplicación de un nuevo sistema de gestión energética mejorado en todos los sectores, incluso salud, se recomienda un diseño que aplique los procedimientos relacionados en la figura 4. Estos procedimientos son sistematizados dentro de cuatro etapas fundamentales.

La figura 4 muestra un esquema estructurado en etapas, que comienza por la planeación inicial y la revisión de procedimientos y recursos. Esta etapa es de definición, por lo tanto, conlleva el diagnóstico de las necesidades en un escenario inicial, en términos energéticos y en función de los procedimientos para su gestión y manejo [18]. Aquí son definidas responsabilidades para el recurso humano, incluidas aquellas relacionadas con la alta dirección, que tiene un grado de responsabilidad amplio en el funcionamiento del sistema. Es designado un presupuesto inicial para la administración de los recursos proyectados en la estructuración de procedimientos optimizados

y mejorados [19]. El análisis de factores internos y externos es esencial porque repercute directamente en decisiones estratégicas, uso de tecnologías, disposiciones y alcance [20].

Con relación al cumplimiento de requisitos legales, se revisan las obligaciones para que, en el momento de implementación, sea eliminado el riesgo jurídico por incumplimiento de normativa y leyes vigentes. Este tema requiere de asesoría legal, que despeje dudas e inquietudes en términos internacionales, nacionales, regionales y locales relacionados con el uso de la energía [20] y en búsqueda de equilibrio en el desempeño de desafíos relacionados en el reglamento, que posibilite la existencia de buenas opciones de inversión en fuentes de energía sostenibles [21] y de economía circular, es decir, no solo optimización de recursos que beneficien el medio ambiente, sino de un sistema de producción autosuficiente, que a futuro permita que los materiales sean reutilizados varias veces [22].

Como tercera etapa se encuentra la estructuración de variables de uso y consumo energético, mediante diagramas, gráficos de consumo y control, análisis de capacidad, y otras herramientas como diagrama de Pareto, de estratificación y diseño de experimentos que faciliten la identificación de fallas y definición de acciones encaminadas hacia el mejoramiento del desempeño energético. En la definición de resultados son planteados planes de control, luego de la implementación, que midan el comportamiento de los procesos energéticos y el rendimiento en un tiempo programado [8].

Para la medición del comportamiento y el rendimiento de los procesos energéticos han sido establecidas metodologías con enfoque en procesos [23], cuya teoría está establecida en función de en la consecución del objetivo misional de mejoramiento continuo. Las certificaciones son apenas el inicio de implementación de sistemas energéticos. Luego sigue un ciclo de mantenimiento de este que lo sostenga y aplique nuevos parámetros correctivos [24]. El trabajo realizado por López, García, Batte y Cobas [25] afirma que la mejora continua comienza desde el momento de implementación del sistema, sigue con el aprendizaje permanente, el seguimiento en los procesos y la participación. Es así como en su concepto se define como el progreso en varios campos, evidenciados en capacidad intelectual, eficiencia en el uso de recursos, relación profesional y social, y calidad en la prestación de servicios.

La mejora continua incluye planificación, desarrollo y evaluación de la innovación, considerada como herramienta definida por distintas fases de interrelación, entre ellas, definición de políticas y objetivos, que pasan de una fase cualitativa, por las condiciones del entorno, a una cualitativa con la medición de datos e históricos de gestión [26]. La innovación en la mejora continua requiere una transformación cultural que elimine las brechas encontradas en términos de optimización [27] y que asimismo genere ventajas competitivas que permitan un servicio eficiente, nuevos conocimientos y aceptación en el mercado [28]. A continuación, la figura 5 define los principios de gestión de mejora continua recomendados en el proceso de gestión de proyectos de sustentabilidad energética.

Lo observado en la figura 5 corrobora la necesidad de técnicas y herramientas humanas para el análisis, la medición y el avance de los procesos. Sin la colaboración del recurso humano es imposible la reestructuración positiva de sistemas de generación de energía [29]. El compromiso ético con el cambio generado en la organización requiere tiempo y conocimiento, carácter de autogestión o mayor proactividad, debido al desempeño de las actividades comunes y nuevas que requiera el

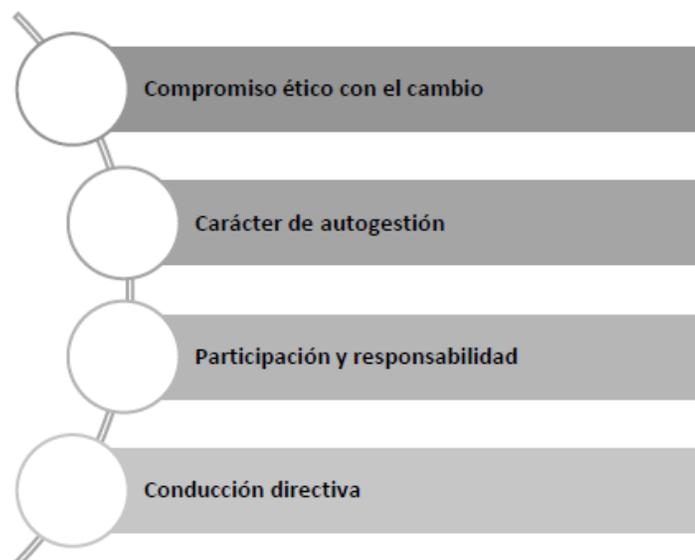


Figura 5. Principios de gestión de mejora continua

Fuente: López, García, Batte y Cobas [25]

sistema, participación con responsabilidad en términos de eficiencia energética, y liderazgo y control de la conducción directiva; es además la base para la calidad y la administración de los demás recursos financieros, técnicos y materiales necesarios para alcanzar el cambio [30].

4. Discusión

Las organizaciones de la salud deben revisar sus procesos energéticos continuamente, no solo enfrascarse en el tema de implementación, porque existe el ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar, que se debe respetar, y de esta manera lograr mantener el impacto positivo en la huella de carbono en el medio ambiente esperado a largo plazo [8]. En relación con las estadísticas planteadas por la Red Global de Hospitales Verdes, en Latinoamérica aún falta mucho camino por recorrer, debido al porcentaje de hospitales interesado en la promoción de sistemas sostenibles de solo 6 % del total global [9].

Del porcentaje latinoamericano se estima que de 2.250 entidades hospitalarias en América Latina [9] interesadas e inscritas en la promoción de sistemas sostenibles con la red global de hospitales, 96 pertenecen a Colombia [13], lo que representa un porcentaje de 4,2 %. En términos de competitividad aún falta camino por recorrer, sin embargo, en contraste con la poca participación, Cali es una ciudad que promete crecimiento de medidas concretas que beneficien la sostenibilidad ambiental.

Los proyectos de eficiencia energética en países como España evidencian en el sector hospitalario la posibilidad de eliminar emisiones de CO₂ hasta en un 25 % [10]. En este contexto también se presentan los resultados de autores que realizaron más recientemente un estudio en la región de Andalucía [31] y quienes muestran una reducción similar de emisiones de CO₂ con un 26 %,

lo cual apoya la hipótesis establecida del amplio espectro de alcance que presenta el sector de la salud. Cabe resaltar que los cambios más representativos para el Hospital de Hellín (España) fueron aplicados en sistemas como iluminación, cambiándose la tecnología tradicional a LED, al igual que en Suramérica, de acuerdo con el caso del Hospital Ibarra, localizado en Ecuador, cuyo plan de gestión generó un ahorro de 29,36 % [11]. Colombia no se queda atrás, pues también el Hospital de Cañaveralejo, localizado en Cali, logró el ahorro del consumo energético de un 60 % con el reemplazo de iluminación tradicional a luces tipo LED [15]. Estos resultados, además, podrían verse afectados de manera muy positiva con desarrollos como los del uso de BIM 6D, que se basa en el modelado de los edificios para la obtención de información, lo cual aplicado en el sector salud muestra ahorro de hasta 50 % del consumo [32]. En Colombia hay estudios que evidencian la existencia de un respaldo desde las instituciones para desarrollar la gestión energética, así como se han definido diferentes alternativas y áreas a intervenir en función de los diversos servicios que estas instituciones prestan [33], por lo que en el ámbito latinoamericano se podrían establecer procesos aún más provechosos a partir del BIM 6D [34]. Esta metodología además puede establecerse en otros espacios como lo demuestran diversos estudios que expresan resultados altamente positivos con la implementación de este proceso, ya sea en edificaciones nuevas como en edificaciones de distintos sectores que requieran un proceso de restauración o recuperación en materia energética [35], [36].

5. Conclusiones

Al ser detallada información relevante sobre la gestión energética empleada en el sector salud a nivel global, se destaca la importancia de la formulación de proyectos de eficiencia energética y generación de energía mediante fuentes renovables para la disminución de contaminación ambiental en el planeta. De acuerdo con el marco planteado, los sistemas de gestión, estructurados bajo normas como la ISO 50001: 2011 y TGEE, han sido implementados mundialmente no solo para la promoción de buenas prácticas en el sector energético sino para su implementación con casos reales y exitosos aplicados en el sector salud, que paradójicamente, a pesar de originarse para la atención y el cuidado de la vida, genera una huella de carbono del 8 % al 25 %.

La mejora continua de la gestión energética en entidades hospitalarias, centros de salud y clínicas llega a ser alcanzada mediante un análisis detallado y un diagnóstico de todos los recursos utilizados. Principios fundamentales como: compromiso ético con el cambio, carácter de autogestión, participación y responsabilidad del personal involucrado, y liderazgo y control de la conducción directiva son esenciales para el logro de un modelo de cambio exitoso. La mejora continua funciona como resultado de la gestión energética, que incluya la etapa de planificación de actividades, productos y procesos con miras a la optimización.

En el panorama mundial, se ha notado el compromiso, desde el año 2005, de países desarrollados como Dinamarca, Noruega, España, Estados Unidos y China en la inserción de tecnologías y técnicas de gestión eficientes energéticamente, pero aún hay que trabajar más para el aumento participativo del sector salud en el cambio paulatino, debido a su alto grado de responsabilidad con la huella de carbono generada, en especial en los países latinoamericanos que de acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación se demuestra que es relativamente bajo.

De este modo, se hace relevante destacar que estos resultados pueden tener una incidencia en la planificación de diferentes instituciones, desde las organizaciones del sector de la salud, pasando por entidades gubernamentales y alcanzando hasta a la academia; esto debido a que permite evidenciar las realidades palpables que pueden aplicarse en materia de ahorro energético en la actualidad, lo que puede tener una incidencia en proyectos más ecoamigables que provengan del sector público, así como la transformación de diversas estructuraciones ya existentes que pueden desarrollar las gerencias hospitalarias en busca de un consumo más eficiente. Finalmente, la academia puede establecer un punto de ampliación a esta línea de investigación para profundizar en este campo de la ciencia orientado a la eficiencia y el desarrollo de procesos y sistemas energéticos con impactos positivos en materia de consumo.

En este orden de ideas, se presentan oportunidades relevantes asociadas a proyectos de réplica y masificación dentro del sector de la salud, que viene a ser apoyado por un número importante de estudios en materia energética y metodologías de ahorro desarrolladas en el sector; sin embargo, esto abre una importante ruta alterna para diferentes líneas de investigación como pueden ser entidades públicas, instituciones de educación superior y sectores industriales y comerciales, en otras palabras, todas las organizaciones indispensables para las sociedades modernas, las cuales requieren el reflector investigativo para indagar en las oportunidades asociadas a proyectos ecoamigables en cuestión de consumo energético.

Referencias

- [1] A. Mustafa, “Sustainable development and environmentally friendly energy systems”, *IJPSE*, vol. 1, no. 1, pp. 1-39, 2017. <https://doi.org/10.21744/ijpse.v1i1.2> ↑2
- [2] J. Karliner y R. Guenther, *Agenda Global para Hospitales Verdes y Saludables: un marco integral de salud ambiental para los hospitales y los sistemas de salud de todo el mundo*, Red Global de Hospitales Verdes y Saludables, 2011 [En línea]. <https://saludsindanio.org/americanalatina/temas/red-global> ↑2, 3
- [3] J. Valderrama, “Huella del carbono cambio climático, gestión sustentable y eficiencia energética”, *Inf. Tec.*, vol. 29, no. 4, 2018. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000400001> ↑2
- [4] Q. Zhu, F. Lujia, A. Mayyas, M. A. Omar, Y. Al-Hammadi, and S. Al Saleh, “Production energy optimization using low dynamic programming, a decision support tool for sustainable manufacturing”, *JCLPro*, vol. 105, pp. 178-183, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.066> ↑2
- [5] T. Reyes, J. Campos, J. Neto y A. Silva, “Sistema de gestión energética. Estudio de caso: Hospital de Enfermedades Cardiovasculares”, *ITEGAM-JETIA*, vol. 2, no. 8, 2016. <https://dx.doi.org/10.5935/2447-0228.20160038> ↑2
- [6] D. Cuartas y F. Méndez, “Cambio climático y salud: retos para Colombia”, *Rev. de la Univ. Ind. de Santander: Salud*, vol. 48, no. 4, pp. 428-435, 2016. <https://doi.org/10.18273/revsal.v48n4-2016001> ↑3
- [7] M. A. Rajaeifar, H. Ghanavati, B. Dashti, R. Heijungs, M. Aghbashlo, and M. Tabatabaei, “Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review”, *Ren. and Sust. Ene. Rev.*, vol. 79, pp. 414-439, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.109> ↑3
- [8] J. Correa, A. E. Borroto Nordelo, A. E., R. González Álvarez, M. Curbelo Martínez, and A. M. Díaz Rodríguez, “Diseño y aplicación de un procedimiento para la planificación energética según la NC-ISO 50001:2011”, *Ing. Ener.*, vol. 35, no. 1, pp. 38-47, 2014. ↑3, 4, 7, 8, 9
- [9] Red Global de Hospitales Verdes y Saludables, “Miembros”, 2022. [En línea]. <https://www.hospitalesporlasaludambiental.net/miembros/> ↑4, 9
- [10] R. Calero, A. Losa, J. Pérez, F. Díaz, R. Belda y F. Vecina, “Implantación de proyectos de sostenibilidad medioambiental en instituciones sanitarias publicas: el caso de la Gerencia de Atención Integrada de Hellin”, *Rev. de*

- Salud Amb.*, vol. 18, no. 1, pp. 3-9, 2018. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/879> ↑4, 9
- [11] O. Arellano, “Estudio y análisis de eficiencia energética del sistema eléctrico del hospital IESS-Ibarra”, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador, 2015. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/12484> ↑5, 10
- [12] M. Sechilariu, F. Locment, and B. Wang, “Photovoltaic electricity for sustainable building: Efficiency and energy cost reduction for isolated DC microgrid”, *Energies*, vol. 8, no. 8, pp. 7945-7967, 2015. <https://doi.org/10.3390/en8087945> ↑5
- [13] J. Gil, I. Guayan, L. Polania y H. Restrepo, “Análisis situacional de los hospitales verdes colombianos pertenecientes a la red global”, *Rev. de Salud Amb.*, vol. 19, no. 1, pp. 12-22, 2019. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/918> ↑5, 9
- [14] A. Meneses, R. Diaz-Chavez, H. Velásquez-Arredondo, D. Cárdenas-Chávez, R. Parra, and A. Ruiz-Colorado, “Sustainable energy from agro-industrial wastewaters in Latin-America”, *Ren. and Sust. Ener. Rev.* vol. 56, pp. 1249-1262, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.036> ↑5
- [15] Red Global de Hospitales Verdes y Saludables, “Promoción de políticas públicas que fomenten la eficiencia energética y el uso de energías renovables”, 2017. [En línea]. <https://www.greenhospitals.net/wp-content/uploads/2018/03/Secretar%C3%ADa-de-Salud-P%C3%BAblica-Cali-Colombia.pdf> ↑6, 10
- [16] E. Hurtado y J. Escamilla “Modelo de gestión de la demanda energética integral”, *Rev. Fac. de Cs. Econom. Inv. y Ref.*, vol. 23, no. 2, pp. 137-147, 2015. <https://doi.org/10.18359/rfce.1612> ↑7
- [17] M. Robert y M. Echarri, “Propuesta de acciones para el mejoramiento del desempeño ambiental en entidades de restauración”, *Rev. Cient. Ecociencia*, vol. 4, no. 1, 2017. <https://doi.org/10.21855/ecociencia.41.24> ↑7
- [18] S. Kronick, M. Kurz, S. Lin, D. Edelson, R. Berg, J. Billi, J. Cabanas, D. Cone, D. Diercks, J. Foster, R. Meeks, A. Travers, and M. Welsford, “Part 4: Systems of care and continuous quality improvement”, *Circulation*, vol. 132, no. 18, pp. 397-413, 2015. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000258> ↑7
- [19] L. Armela, “El costeo objetivo en el proceso de planeación”, *Cofin Habana*, vol. 11, no. 2, pp. 192-205, 2017. ↑8
- [20] L. Gómez et al. (Ed.), *Manual para la implementación de un sistema de gestión de la energía, México: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee) / Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)*, 2014 [En línea]. https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/SGEn/manuales/ManualGestionEnergia_V2_1.pdf ↑8
- [21] C. B. Souza, H. Koch, M. Siegmund-Schultze, J. Köppel, “An exploratory scenario analysis of strategic pathways towards a sustainable electricity system of the drought-stricken São Francisco River Basin”, *Energy Systems*, vol. 12, pp. 563-602, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12667-019-00343-1> ↑8
- [22] A. Genovese, A. Acquaye, A. Figueroa, S. Lenny Koh, “Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications”, *Omega*, vol. 66, pp. 344-357, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.05.015> ↑8
- [23] Y. Ylanen, “Leadership, safety climate, and continuous quality improvement: Impact on process quality and patient safety”, *Health Care Mng. Rev.* vol. 40, no. 1, pp. 24-34, 2015. <https://doi.org/10.1097/HMR.0000000000000006> ↑8
- [24] J. Riascos, “Metodologías y herramientas para el mejoramiento de los procesos industriales”, *Rev. Ing. Ind.*, vol. 2, no. 2, pp. 17-29, 2014. ↑8
- [25] O. López, J. García, I. Batte y M. Cobas, “La mejora continua: objetivo determinante para alcanzar la excelencia en instituciones de educación superior”, *Edumecentro*, vol. 7, no. 4, pp. 196-215, 2015. ↑8, 9
- [26] Ferreira, H. Hernández y C. Alvarino, “Sistema de Gestión de la innovación en el subsector hotelero: una herramienta para el mejoramiento continuo: una aproximación al tema”, *Jour. of Eng. and Tech.*, vol. 5, no. 1, 2016. ↑8
- [27] J. Naranjo y G. Calderón, “Construyendo una cultura de innovación: una propuesta de transformación cultural”, *Est. Geren.*, vol. 31, no. 135, pp. 223-236, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2014.12.005> ↑8
- [28] M. Bravo, “Aspectos conceptuales sobre la innovación y su financiamiento”, *An. Econ.*, vol. 27, no. 66, pp. 25-46, 2012. ↑8
- [29] L. Vásquez, “Propuesta de mejoramiento de procesos en el área de producción de la empresa panificadora Panarte a través del estudio de tiempos y movimientos”, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Industrial, Es-

cuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2017. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17268> ↑8

- [30] R. Ferreira Rodrigues, H. Correa Vecchi de Oliveira, D. Moreno Trepim, C. Oliveira e Silva Paixão, A. Esteves de Faria Pinto, “The management by processes as business strategy of continuous improvement”, *JoLS*, vol. 4, no. 1, pp. 22-42, 2019. ↑9
- [31] F. J. Montiel-Santiago, M. J. Hermoso-Orzáez, J. Terrados-Cepeda, and P. Brito, “Analysis and energy certification of an Andalusian Public Health Center. Comparative between the general option and simplified procedures”, *Proceedings*, Vol. 38, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019038003> ↑9
- [32] F. J. Montiel-Santiago, M. J. Hermoso-Orzáez, and J. Terrados-Cepeda, “Sustainability and energy efficiency: BIM 6D. Study of the BIM methodology applied to hospital buildings. Value of interior lighting and daylight in energy simulation”, *Sustainability*, vol. 12, no. 14, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12145731> ↑10
- [33] D. Martínez-Sierra, M. García-Samper, H. Hernández-Palma, and W. Niebles-Nuñez, “Gestión energética en el sector salud en Colombia: un caso de desarrollo limpio y sostenible”, *Inf. Tecnol.*, vol. 30, no. 5, pp. 47-56, 2019. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000500047> ↑10
- [34] P. Canales, C. Valderrama-Ulloa, and X. Ferrada, “Hospitales sustentables: partidas críticas para su construcción y el rol de la inspección técnica”, *Háb. Sust.*, vol. 11, no. 2, pp. 22-33, 2021. <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2021.11.02.02> ↑10
- [35] R. L. Keller, K. Muir, F. Roth, M. Jattke, and M. Stucki, “From bandages to buildings: Identifying the environmental hotspots of hospitals”, *Jour. of Clean. Prod.*, vol. 319, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128479> ↑10
- [36] J. P. Carvalho, M. Almeida, L. Bragança, R. Mateus, “BIM-based energy analysis and sustainability assessment—Application to Portuguese buildings”, *Buildings*, vol. 11, no. 6, 2021. <https://doi.org/10.3390/buildings11060246> ↑10

Hugo Gaspar Hernández Palma

Ingeniero Industrial de la Universidad Libre seccional Barranquilla, Magíster en Sistemas de Gestión de la Universidad Autónoma del Caribe y Doctorante en Ingeniería Energética de la Universidad de la Costa. Docente de la Universidad del Atlántico en la Facultad de Ciencias Económicas adscrito al programa de Administración de Empresas. Investigador del grupo: Organizaciones Sostenibles.

Correo electrónico: hugoherandezp@mail.uniatlantico.edu.co

Daniel Mendoza Casseres

Ingeniero Químico de la Universidad del Atlántico y Magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad de los Andes. Profesor asociado al programa de Ingeniería Industrial de la Universidad del Atlántico. Director del Grupo de Ingeniería, Investigación e Innovación para el Desarrollo.

Correo electrónico: danielmendoza@uniatlantico.edu.co

Javier Duran Ravelo

Ingeniero Químico y Especialista en Gestión de la Calidad de la Universidad del Atlántico y Magíster en Ingeniería con Especialidad en Sistemas de Calidad y Productividad del Instituto Tecnológico de Monterrey, México. Profesor Tiempo Completo en la Universidad Libre seccional Barranquilla. Miembro del grupo Gestión Ecológica y Agroindustrial (GEA) de la Universidad Libre.

Correo electrónico: javier.duran@unilibre.edu.co

Oportunidades de mejora para los procesos de recepción, fabricación y despacho de máquinas despulpadoras de café

Improvement Opportunities for the Reception, Manufacturing, and Dispatch Processes of Coffee Pulping Machines

Jairo Roberto Pérez-González¹, Xiomy Carolina Cárdenas-Cortés¹, Daniela Ocampo-Arias¹, Yony Fernando Ceballos¹

¹Grupo de investigación Ingeniería y sociedad, Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Correspondence E-mail: yony.ceballos@udea.edu.co

Received: 26th/July/2021. Modified: 21st/April/2022. Accepted: 11th/May/2022

Abstract

Context: Coffee is a popular drink obtained from the seed of a shrub called cafeto, which is ground and toasted in order to obtain the powder used for the elaboration of the drink. For its transformation, it is necessary to use different types of machines, which is an important market niche in the country's economy. Therefore, it is necessary to identify opportunities for improvement in the activities of the process involving ordering, production, and dispatch of coffee pulping machines in a Colombian company.

Method: By using simulation as a tool, a model is built which appropriately represents the reality of the company, starting with the delimitation of the problem, continuing the identification of key variables, the taking of samples and their statistical analysis, the construction of the simulation with its respective validation and verification processes, and ending with the analysis of results and possibilities of application in the company, together with the conclusions of the process.

Results: Based on the scenarios elaborated, it is recommended to design a dispatch area to access information quickly and in a timely manner, together with the development of specialized software that allows digitizing orders and referrals, as well as with the planning of delivery routes for prioritized orders according to the key variables of the process. With the implementation of the suggestions above, the queue of assembled and non-dispatched machines was reduced by 51%, and the dispatches of coffee pulping machines increased by 49%, thus improving customer satisfaction.

Conclusions: The investment required to implement the solution scenario represents medium-term returns, which, together with customer satisfaction, allows the company to be made competitive. A study of the logistics of dispatching orders is proposed, since this part of the problem is evident, but cannot be solved by simulation.

Keywords: coffee pulping machines, discrete event simulation, assembly, production line, coffee

Language: Spanish

Open access



Cite as: Pérez-Gonzalez, J., Cárdenas-Cortés, X., Ocampo-Arias, D., Ceballos, Y. "Oportunidades de mejora para los procesos de recepción, fabricación y despacho de máquinas despulpadoras de café". *Ing.*, vol. 27, no. 3, 2022. e18314. <https://doi.org/10.14483/23448393.18314>

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

Resumen

Contexto: El café es una bebida popular que se obtiene de la semilla de un arbusto denominado cafeto, esta es molida y tostada para obtener el polvo que se utiliza para la elaboración de la bebida. Para su transformación es necesario emplear diferentes tipos de máquinas, lo cual es un nicho de mercado importante para la economía del país. Por lo tanto, se hace necesario identificar oportunidades de mejora en las actividades del proceso que comprende pedido, producción y despacho de las máquinas despulpadoras de café en una empresa colombiana.

Metodo: A partir del uso de simulación como herramienta, se procede a construir un modelo que represente apropiadamente la realidad de la empresa, iniciando por la delimitación del problema, siguiendo con la identificación de variables clave, la toma de muestras y su análisis estadístico, la construcción de la simulación con sus respectivos procesos de validación y verificación, y finalmente el análisis de resultados, y las posibilidades de aplicación en la empresa en conjunto con conclusiones del proceso.

Resultados: A partir de los escenarios construidos, se recomienda diseñar un área de despacho para acceder a la información de forma rápida y oportuna junto con el desarrollo de un software especializado que permita digitalizar órdenes y remisiones, adicionalmente la planeación de rutas de entrega de pedidos priorizados según las variables clave en el proceso. Con la implantación de las anteriores sugerencias, la cola de máquinas ensambladas y sin ser despachadas se redujo en un 51 % y los despachos de las máquinas despulpadoras de café incrementaron en un 49 % mejorando la satisfacción del cliente.

Conclusiones: La inversión necesaria para implementar el escenario de solución representa retornos a mediano plazo, lo cual, junto con la satisfacción del cliente, permite hacer competitiva a la empresa. Se propone hacer un estudio de la logística de despacho de los pedidos, dado que esta parte del problema se evidencia, pero no se puede resolver mediante simulación.

Palabras clave: despulpadoras de café, simulación discreta, ensamble, línea de producto, café.

Idioma: español

1. Introducción

En Colombia el café es uno de los principales productos de exportación dado que tiene alta calidad y gran variedad, además cerca de 2,7 millones de personas dependen directamente del cultivo de este en el país [1]–[4]. Para su transformación o beneficio es necesario realizar la recolección de la cereza en el cafeto, posteriormente el descerezado o despulpado para eliminar la cáscara externa y parte de la pulpa adherida a los granos (tradicionalmente en una máquina despulpadora), luego la fermentación para descomponer los restos de pulpa, pasar a un proceso de lavado con abundante agua para eliminar restos de pulpa fermentada, posteriormente a un proceso de secado el cual puede ser al sol o en máquinas secadoras (máquina tipo guardiola) y finalmente el trillado mediante una máquina descascarilladora para eliminar el pergamino (cáscara interna de la cereza) y obtener el café verde [4]–[6]. La fabricación y distribución de máquinas para la línea agrícola, en específico en la transformación de caña de azúcar y de café, es una necesidad en Colombia, dada la importancia de esta industria para el país [2], [7], [8].

En una empresa de este sector en Antioquia se observa la necesidad de optimizar el proceso de ensamble y distribución de estas máquinas para asegurar sostenibilidad en el mercado y contribuir de una manera ágil al desarrollo del sector agrícola del país [9], [10]. La empresa actualmente tiene una demora en la entrega de las máquinas despulpadoras, no tiene una política de recepción

de pedidos, de fabricación ni de entrega, es decir, cuando llega una solicitud de venta se envía a producción la cantidad de máquinas requeridas, luego estas van a un lugar de almacenamiento hasta que sean despachadas. Incluso el despacho no tiene un orden establecido, no se manejan prioridades y al indagar los motivos de esas entregas no ordenadas se identifica que es debido a que los transportadores son los que deciden qué pedidos llevar con base en su ruta y no tienen en cuenta las fechas en las cuales se pidieron las máquinas.

Este trabajo está enfocado en conocer todo el proceso que implica despachar las despulpadoras de café cuando son pedidas por los clientes, es decir, se estudiará el proceso desde que llega el pedido de la máquina, así como la fabricación y el despacho de estas con el fin de identificar las posibles actividades que causan demoras en la entrega, y mejorarlas, prestando un mejor servicio y cumpliendo las políticas de calidad establecidas, las cuales se basan en satisfacción de los clientes. En la sección siguiente se procede a la descripción de un modelo que representa la situación problemática y que permite evaluar diferentes escenarios de solución del problema descrito.

2. Metodología

Un modelo es la representación de un sistema real y es útil en la medida en que represente la esencia de la situación real del objeto de estudio, facilite el desarrollo de procesos de inferencia que no se podrían llevar a cabo sin él y proporcione conocimientos que puedan ser transferidos a diversas situaciones [11]–[13]. Por lo tanto, para observar el comportamiento de la operación de estos sistemas a través del tiempo se utilizan las herramientas de simulación. “La simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo” [14], [15].

La simulación por eventos discretos se emplea cuando se quiere observar de manera detallada el comportamiento de un sistema en un momento específico. Por lo tanto, cuando las variables solo cambian en determinados puntos discretos del tiempo en los que ocurren los eventos, por lo que no se incluyen sistemas que estén cambiando continuamente, se habla de simulación de eventos discretos. El presente trabajo estará enfocado en establecer las actividades que tienen oportunidad de mejora por medio de la simulación de eventos discretos desde el momento que los clientes hacen el pedido de las máquinas despulpadoras de café hasta que la reciben. El proceso inicia con la solicitud de la venta, seguida de la fabricación y el despacho y en este sentido, es preciso aclarar algunos conceptos [16]. Se le conoce como recepción del pedido a la solicitud de la venta de la máquina realizada por los clientes de la empresa, quienes son personas que trabajan de manera independiente el cultivo del café en sus fincas ubicadas en las zonas rurales del país, cooperativas de caficultores o personas y empresas del exterior [17], [18].

La clasificación de las despulpadoras es un proceso donde se establece qué modelo de máquina se solicitó, dado que en la empresa se fabrican once tipos que se diferencian por la capacidad. Además, estas son fabricadas en hierro colado con pechero torneado que logra un ajuste apropiado con el cilindro, tienen sistema de graduación que permite verificar visualmente el ajuste de todo el

pechero, la transmisión es con cadena y piñones fresados, lo cual las hace silenciosas y precisas. Estas máquinas se encargan de quitarle la cáscara al grano una vez esté seco y sin averiarlo en su interior para luego continuar con el proceso del beneficio, el cual transforma los frutos en café pergamino.

El sistema objeto de estudio es el proceso que implica comercializar las máquinas despulpadoras de café. Este inicia con la recepción del pedido, posteriormente se realiza una clasificación del tipo de piezas requeridas para la fabricación y se hace una requisición de producción, luego de la clasificación se inicia el proceso de la fabricación de piezas en hierro fundido en la fábrica. Las piezas que serán caso de estudio para la fabricación de una máquina despulpadora de café son: el cilindro, la cureña, el volante y el pechero.

Una despulpadora necesita dos piezas tipo cureñas para ser ensamblada, la cureña compone el chasis de la máquina y su producción inicia con el pulido de la pieza de hierro para darle un acabado más fino, posteriormente se perfora, se ensambla y se pinta el chasis. El volante es el componente que hace girar el cilindro, su producción inicia con la actividad de torneado a la pieza, luego la perforación y se finaliza con la pintura. El pechero inicia con el torneado, posteriormente se pule y se finaliza igualmente pintando la pieza. Los recursos humanos necesarios se presentan en la tabla I.

Una vez fabricadas las piezas anteriores se unen, en este punto se recolectan un cilindro, dos cureñas, un volante y un pechero para realizar el ensamble de la máquina. Posteriormente se

Tabla I. Recursos para la elaboración de despulpadoras

Tipo de pieza	Actividades Involucradas	Recursos
Cilindro	Refrentado	1 persona
	Perforación	1 persona
	Entarugado	1 persona
	Rectificado	1 persona
	Torneado	2 persona
	Pintura	Departamento
Cureña	Pulido	1 persona
	Perforación	1 persona
	Ensamble Chasis	1 persona
	Pintura	Departamento
Volante	Torneado	1 persona
	Perforación	1 persona
	Pintura	Departamento
Pechero	Torneado	1 persona
	Pulido	1 persona
	Pintura	Departamento
Cilindro	Refrentado	1 persona
	Perforación	1 persona
	Entarugado	1 persona
	Rectificado	1 persona
	Torneado	2 persona

despacha, se da la salida del sistema con el fin de hacer la entrega a los clientes, de acuerdo con la disponibilidad que tenga el conductor y la ruta que haga o según la presión que el cliente ejerza. La actividad de pintura se ve presente en cada uno de los procesos para la fabricación de los cuatro tipos de piezas, dicha actividad es llevada a cabo por un departamento de tres personas.

3. Construcción del modelo

Partiendo de que un modelo está constituido por variables, y que estas son elementos que cambian constantemente ya que están sujetos a variaciones en el tiempo, es fundamental describirlas para comprender y tener claridad de la simulación del proceso. Existen tres tipos de variables, las exógenas: que son variables influenciadas por agentes externos al proceso, generalmente no son controlables, pero cuando lo son se denominan parámetros que asumen valores fijos, las endógenas: son variables que representan actividades que se dan internamente en el sistema y son modificadas por este, y las variables de estado que reflejan características relevantes del sistema y elementos que lo componen en un instante de tiempo específico [1], [2]. Las variables empleadas pueden verse en la tabla II.

Tabla II. Variables del modelo

Nombre	Descripción	Tipo
Tiempo entre llegadas de pedidos	Es el tiempo que transcurre entre la llegada de un pedido y otro	Exógena
Tiempo de despacho de pedidos	Es el tiempo que transcurre entre la salida de una máquina despulpadora y otra	Endógena
Tiempo de ensamble de las piezas	Es el tiempo que tarda un operario en ensamblar un cilindro, dos cureñas, un volante y un pechero	Endógena
Tiempo de refrentado del cilindro	Es el tiempo que tarda en realizarse la actividad de refrentado por un operario	Endógena
Tiempo de encamisado del cilindro	Es el tiempo que tarda en realizarse la actividad de encamisado por un operario	Endógena
Cantidad de piezas ensambladas	Es el número de piezas que son ensambladas por un operario	Estado y desempeño
Cantidad de máquinas despulpadoras despachadas	Es el número de piezas que son despachadas por dos conductores	Estado y desempeño
Tiempo de las máquinas despulpadoras en el sistema	Es el tiempo promedio que transcurre entre la realización del pedido y la salida de las máquinas despulpadoras del sistema	Estado y desempeño
Tiempo de cola para ensamblar cilindro	Es el tiempo promedio que pasa la pieza cilindro en cola antes de ser ensamblada	Estado y desempeño
Tiempo de cola para ensamblar cureña	Es el tiempo promedio que pasa la pieza cureña en cola antes de ser ensamblada	Estado y desempeño
Tiempo de cola para ensamblar volante	Es el tiempo promedio que pasa la pieza volante en cola antes de ser ensamblada	Estado y desempeño
Tiempo de cola para ensamblar pechero	Es el tiempo promedio que pasa la pieza pechero en cola antes de ser ensamblada	Estado y desempeño
Tiempo de cola para despachar máquina despulpadora	Es el tiempo promedio que pasa la máquina despulpadora en cola antes de ser despachada	Estado y desempeño

Para conceptualizar el modelo a simular y relacionar las variables correspondientes a los tiempos que pasan las piezas cilindro, volante, cureña y pechero en cola antes de ser ensambladas, se establece que estas variables permiten identificar los cuellos de botella, dado que si falta alguna de esas partes no se lograría fabricar la máquina e incrementaría los tiempos en fases posteriores de ensamblado.

La relación de las variables cantidad de piezas ensambladas y cantidad de piezas despachadas permite conocer el número de máquinas que a pesar de estar terminadas se quedan en el sistema, esto a su vez se relaciona con el tiempo de la cola para despachar la máquina despulpadora, es decir, permite conocer esos tiempos de espera del producto terminado que no es despachado, así mismo la variable tiempo de las máquinas despulpadoras en el sistema se relaciona con todas las variables que involucran los tiempos de las actividades y las colas en el modelo simulado. Con el fin de conceptualizar el modelo a simular se realiza la tabla II que especifica la información a tratar y permite ver en detalle los elementos que se tendrán en cuenta al momento de realizar la simulación [19].

Para realizar el modelo de simulación del proceso de recepción del pedido hasta que se entregan a los clientes las máquinas despulpadoras de café es necesario tener en cuenta los tiempos de llegada de los pedidos, los de fabricación y ensamble de las piezas y los de despacho.

Los tiempos de llegada de los pedidos tienen asignada una distribución aleatoria dado que la empresa no tiene compactada y controlada esta información, los pedidos se reciben mediante correo electrónico, pero no se hace registro en una base de datos y adicionalmente no se sabe qué cantidad de máquinas se van a solicitar en un día. Los tiempos asociados a las actividades de fabricación de las piezas de la máquina y de ensamble fueron proporcionados por el personal de la empresa. Estas actividades tienen asignadas distribuciones average con tiempos promedios consignados en la tabla IV. Finalmente, los tiempos asociados al despacho de las máquinas a los clientes se tomaron con base a las remisiones que se tienen en la empresa, para encontrar una distribución que se ajuste a los tiempos encontrados de entrega en primera instancia se procede a calcular el tamaño de la muestra, es decir, el número de datos necesarios para hacer una correcta estimación.

El tamaño de muestra se establece con un nivel de significancia del 5 %. En total se encontraron 32 tiempos de despachos y se encontró una varianza de 103,30 en estos datos, el error máximo permitido se encontró usando la ecuación de cálculo del error y con toda la información ya determinada se calculó el número de datos que deben ser tomados. Los datos ajustados y construidos con ayuda de los expertos se presentan en la tabla IV.

Luego de conceptualizar el modelo, hallar los tamaños de muestra ideales, tomar los datos y ajustarles las distribuciones correspondientes, se procede a construir el modelo en el software simul8, que permitirá simular el sistema para después analizarlo, sacar conclusiones y evaluar posibles escenarios que ayuden a solucionar la problemática planteada. El modelo inicia con una entrada correspondiente a los pedidos de los clientes con distribución aleatoria porque la empresa no cuenta con esta información y porque no se sabe qué cantidad ni cada cuánto se van a solicitar las máquinas, es decir, no se sabe en qué momento va a llegar un pedido de venta.

Tabla III. Relaciones empleadas en el modelo

Componente	Incluido/ No incluido	Justificación
Entrada: Pedidos	Incluido	Corresponde a la llegada de los pedidos realizados por los clientes
Actividades		
1. Cotización de pedido	No incluido	La actividad no genera tiempo significativo en el sistema
2. Recepción de pedido	Incluido	Se incluye la actividad en el modelo siguiendo una distribución empírica definida por expertos
3. Generación de factura	No incluido	La actividad no genera tiempo significativo en el sistema
4. Clasificación de tipo de pieza pedido	Incluido	Clasificación de las piezas a fabricar según el tipo de máquina pedida
5. Fabricación de piezas: cilindro, cureña, volante y pechero	Incluido	Son de vital importancia para la simulación del proceso ya que su producción permite el ensamble y las ventas de las máquinas despulpadoras de café
6. Ensamble de máquina	Incluido	Permite calcular la cantidad de máquinas que son ensambladas
7. Almacenamiento	No incluido	La empresa no tiene ningún registro de la actividad
8. Despacho de pedido	Incluido	Es importante pues determina la cantidad de máquinas que son despachadas a los clientes
Colas		
1. Colas correspondientes a las actividades de fabricación de piezas	Incluido	
2. Cola de las piezas fabricadas para ensamblar	Incluido	Las colas no tienen tiempo de vida media y poseen capacidades ilimitadas
3. cola de las piezas ensambladas para despachar	Incluido	
Recursos		
15 operarios	2 conductores	

Posteriormente, los pedidos que ingresan pasan a una actividad que no genera tiempo dentro del sistema (distribución fija en cero) para ser clasificados según el tipo de pieza, por medio de una probabilidad, siendo esta: pieza cilindro 20 %, pieza volante 20 %, pieza pechero 20 % y pieza cureña 40 %, esta última teniendo una probabilidad más alta debido a que se requieren dos piezas de este tipo para llevar a cabo el ensamble de la máquina despulpadora. Las actividades correspondientes a cada pieza (cilindro, cureña, volante y pechero) también son fijas y no toman tiempo en el sistema, esto con el único fin de separar los tipos de piezas.

El cilindro tiene asociadas las actividades de refrentado, perforación, entarugado, rectificado, torno, encamisado y pintura en ese orden consecutivo; la cureña tiene relacionada las actividades de pulido, perforación, ensamble del chasis y pintura en ese orden consecutivo; la pieza volante tiene asociadas las actividades de torneado, perforación y pintura en ese orden consecutivo; y la pieza pechero tiene involucradas las actividades de torneado, pulido y pintura en ese orden consecutivo con distribución average con tiempos promedios informados por la empresa, dado que anteriormente habían realizado un estudio de métodos y tiempos. La asignación de las distribu-

Tabla IV. Distribuciones ajustadas

Pieza	Actividad	Distribución de la actividad	Tiempo promedio (Horas)
Cilindro	Refrentado	<i>Average</i>	0,25
	Perforación	<i>Average</i>	0,15
	Entarugado	<i>Average</i>	0,11666
	Rectificado	<i>Average</i>	0,183333
	Torno	<i>Average</i>	0,283333
	Encamisado	<i>Average</i>	0,283333
	Pintura	<i>Average</i>	0,16667
Cureña	Pulido	<i>Average</i>	0,0333
	Perforación	<i>Average</i>	0,25
	Chasis	<i>Average</i>	0,11667
	Pintura	<i>Average</i>	0,0666
Volante	Torno	<i>Average</i>	0,25
	Perforación	<i>Average</i>	0,1
	Pintura	<i>Average</i>	0,0666
Pechero	Torno	<i>Average</i>	0,15
	Pulido	<i>Average</i>	0,1166
	Pintura	<i>Average</i>	0,0666
Ensamble		<i>Average</i>	0,3333
Despacho		Exponencial	10,05
Tipo de pieza		Fija	0

ciones correspondientes a las actividades mencionadas anteriormente se realiza de la manera que lo indica la figura 1. Una vez asignadas las respectivas distribuciones a las actividades y terminada la última actividad de la fabricación de cada pieza que es pintura, las piezas pasan a unas colas que esperan por la actividad de ensamble de las máquinas despulpadoras, dicha actividad sigue una distribución average.

Posteriormente, en la actividad de ensamble se especifica el número de piezas que se debe recolectar de cada cola para ensamblar la máquina de esta manera: una pieza proveniente del proceso de cilindro, una proveniente del proceso de volante, una proveniente del proceso de pechero y dos que provengan del proceso de cureña. Luego se marca la casilla de “Assemble” para indicar que en esa actividad de ensamble deben entrar cinco piezas y debe salir solo una. Las piezas ensambladas pasan a una cola de despacho y luego a la actividad de despacho que sigue una distribución exponencial con media 10,05, dicha distribución fue asignada con base en los registros de facturas facilitados por la empresa. Finalmente, se da la salida de las máquinas despulpadoras del sistema.

Después de elaborar el modelo se procede con la validación con el fin de asegurar que los supuestos usados fueron apropiados. Mediante la técnica de intuición de expertos se realizó una reunión con un experto de la empresa, encargado de la recepción de pedidos de las máquinas despulpadoras de café y de todo el proceso en general. El experto llega a la conclusión que el modelo es correcto, que arroja resultados aproximados a la realidad en los tiempos adecuados y, teniendo

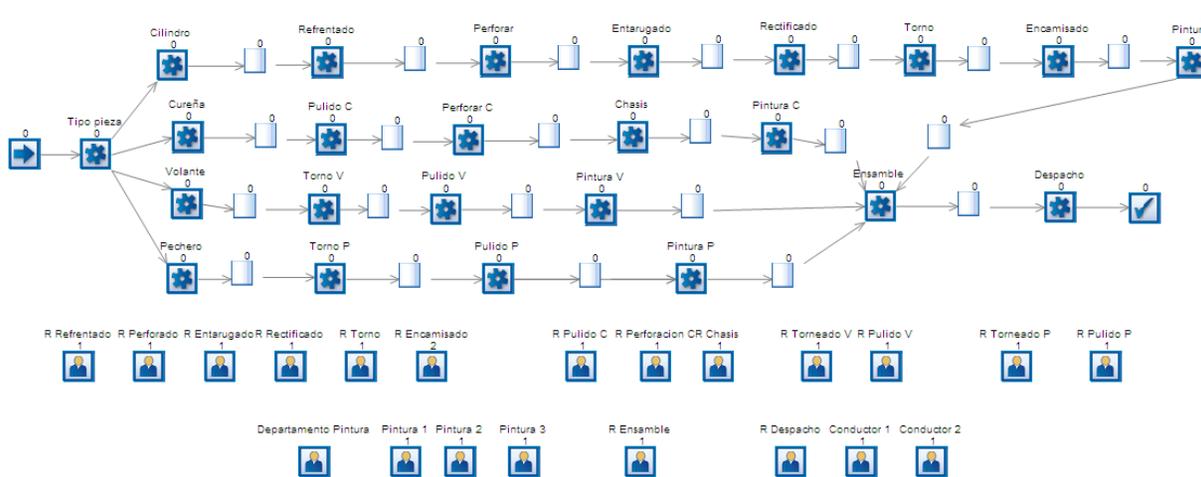


Figura 1. Implementación del modelo de simulación

en cuenta parámetros claves que son determinantes para el proceso, que el modelo replica apropiadamente la actualidad de la empresa.

También se realiza la comparación con los resultados de la realidad y se encuentra que en la empresa durante 200 horas se ensamblan entre 65 y 75 máquinas desulpadoras y el modelo arrojó que en promedio se ensamblan 69 máquinas, lo cual indica que se comporta conforme a la realidad.

4. Resultados

Para dar solución a los largos tiempos de despacho de las máquinas desulpadoras se plantearon tres escenarios que permiten ver los cambios de esta variable y de la de tiempo de entrega.

4.1. Escenario 1

Se hace la sugerencia de aumentar a 250 las horas laboradas en el mes dentro de la empresa, así se lograría ensamblar más máquinas porque se producen más piezas, además los despachos de las máquinas desulpadoras también aumentarían y por ende el tiempo de espera que se tiene de productos terminados sin ser despachados reduciría, finalmente los clientes y la compañía se verían beneficiados porque se cumplirían los acuerdos establecidos y la satisfacción de los compradores. Los detalles del escenario se presentan en la tabla V.

Luego de incrementar a 250 las horas laboradas en un mes, se observa que aumenta de 18 a 27 la cantidad de pedidos despachados de máquinas desulpadoras a los clientes; sin embargo, la cola de máquinas ensambladas al igual que la cola de máquinas sin despachar ocasiona un incremento de 46 a 61 en la cantidad de pedidos (Tabla VI).

Finalmente, se concluye que este escenario no mejora en gran medida los problemas planteados inicialmente, dado que el tiempo de espera del producto terminado sin ser despachado incrementa mucho comparado con el aumento de despachos, por lo que posiblemente el cliente también se vería afectado.

Tabla V. Información empleada en el escenario 1

Objetivo	Disminuir la cantidad de máquinas en la cola después del ensamble
Factor de cambio	Horas laboradas al mes
Nivel 1	Aumentar a 250 las horas laborales
Supuesto	Al aumentar las horas laborales en el proceso, la cola que existe luego del ensamble reduciría y el despacho de las máquinas aumentaría
Hipótesis	Hipótesis nula: el tiempo de espera antes del despacho disminuye Hipótesis alternativa: el tiempo de espera antes del despacho no disminuye
Longitud de la corrida	1 mes equivale a 200 horas, 10 horas laborales al día, 20 días laborales al mes
Número de réplicas	500
VARIABLES de estado	Cantidad de máquinas en la cola de despacho

Tabla VI. Resultados escenario 1

Factor para analizar	Implementación nivel 1: aumentar a 250 h
Cantidad de piezas tipo cilindro que quedan en la cola antes de ensamblar	0
Cantidad de piezas tipo cureña que quedan en la cola antes de ensamblar	8
Cantidad de piezas tipo volante que quedan en la cola antes de ensamblar	5
Cantidad de piezas tipo pechero que quedan en la cola antes de ensamblar	15
Cantidad de máquinas ensambladas que quedan en la cola antes de despachar	61
Cantidad de pedidos despachados	27

4.2. Escenario 2

Se propone aumentar un conductor en la actividad de despacho de las máquinas despulpadoras de café, es decir que en total se cuente con tres personas que distribuyan y entreguen los productos logrando aumentar los despachos y disminuir la cola de espera de máquinas ensambladas, adicionalmente sería ideal realizar una adecuada planeación de las rutas que cada uno cubriría con el fin de que los despachos se hagan con mayor control (Ver tabla VII).

Como se planteó, se procede a aumentar la cantidad de conductores en la actividad de despacho de las máquinas despulpadoras de café, se pasó de tener dos empleados a tres desarrollando esta actividad, los resultados de las corridas se observan en la tabla VIII donde el incremento de colaboradores en la actividad no genera ningún cambio en la cantidad de pedidos despachados a los clientes.

Finalmente, se concluye que el escenario no genera cambios positivos en las salidas del sistema por lo que no se recomienda implementarlo.

Tabla VII. Información empleada en el escenario 2

Objetivo	Disminuir la cantidad de máquinas en la cola después del ensamble
Factor de cambio	Número de conductores
Nivel 1	Aumentar un conductor en la actividad de despacho
Supuesto	Al aumentar la cantidad de conductores asignados a la actividad de despacho se puede descongestionar la cola que se tiene luego del ensamble
Hipótesis	Hipótesis nula: el tiempo de espera antes del despacho disminuye Hipótesis alternativa: el tiempo de espera antes del despacho no disminuye
Longitud de la corrida	1 mes equivale a 200 horas, 10 horas laborales al día, 20 días laborales al mes
Número de réplicas	500
Variables de estado	Cantidad de máquinas en la cola de despacho

Tabla VIII. Resultados escenario 2

Factor para analizar	Implementación nivel 1: dos conductores en despacho	Implementación nivel 2: tres conductores en despacho
Cantidad de piezas tipo cilindro que quedan en la cola antes de ensamblar	0	0
Cantidad de piezas tipo cureña que quedan en la cola antes de ensamblar	24	24
Cantidad de piezas tipo volante que quedan en la cola antes de ensamblar	9	9
Cantidad de piezas tipo pechero que quedan en la cola antes de ensamblar	18	18
Cantidad de máquinas ensambladas que quedan en la cola antes de despachar	46	46
Cantidad de pedidos despachados	18	18

4.3. Escenario 3

Se hace la sugerencia de que la empresa cree un departamento o área exclusiva de despacho adicional para que esta actividad se realice en menos tiempo, de forma más organizada y controlada, es decir que cuente con personal capacitado para este fin, además que se documente la información para poder establecer indicadores y a su vez mejoras, de igual manera esta área se enfocaría en despachar los pedidos basados en variables más importantes como son las fechas de las solicitudes y el estado de pago por parte de los clientes, logrando entregar los pedidos en tiempos oportunos (Ver información en la tabla IX).

Luego de crear el área de despacho al interior de la empresa se observa que la cantidad de máquinas ensambladas sin ser despachadas disminuye considerablemente en este escenario, ya que permanecen en la cola 25 máquinas en vez de 46, es decir, logran pasar a la actividad de despacho 21 máquinas despulpadoras más en comparación con las condiciones iniciales; a su vez, la cantidad

máquinas despulpadoras despachadas aumenta de 18 a 37, es decir que bajo este escenario se le entregan a los clientes 19 máquinas más pronto (tabla X).

Tabla IX. Información empleada en el escenario 3

Objetivo	Disminuir la cantidad de máquinas en la cola después del ensamble
Factor de cambio	Actividad de despacho
Nivel 1	Crear un departamento adicional que realice la actividad de despacho
Supuesto	Crear en la empresa un departamento destinado a realizar el despacho de las máquinas de una forma más ágil, organizada y controlada
Hipótesis	Hipótesis nula: el tiempo de espera antes del despacho disminuye Hipótesis alternativa: el tiempo de espera antes del despacho no disminuye
Longitud de la corrida	1 mes = 200 horas, 10 horas laborales al día, 20 días laborales al mes
Número de réplicas	500
Variables de estado	Cantidad de máquinas en la cola de despacho

Tabla X. Resultados escenario 3

Factor para analizar	Implementación nivel 1: 1 departamento de despacho	Implementación nivel 2: 2 departamentos de despacho
Cantidad de piezas tipo cilindro que quedan en la cola antes de ensamblar	0	0
Cantidad de piezas tipo cureña que quedan en la cola antes de ensamblar	24	24
Cantidad de piezas tipo volante que quedan en la cola antes de ensamblar	9	9
Cantidad de piezas tipo pechero que quedan en la cola antes de ensamblar	18	18
Cantidad de máquinas ensambladas que quedan en la cola antes de despachar	46	25
Cantidad de pedidos despachados	18	37

Finalmente, se puede concluir que el escenario 3 mejora significativamente la situación problemática de la empresa, dado que al realizar más despachos y en tiempos más cortos se logra cumplir con su propuesta de venta, la cual se basa en la satisfacción de los clientes, porque entregaría las máquinas despulpadoras de café que fabrica de alta calidad en tiempos oportunos.

Con los resultados obtenidos en el diseño experimental y con los escenarios planteados anteriormente, se recomienda a la empresa aplicar el tercer escenario propuesto, en donde se debe diseñar e implementar un área de despacho donde se tengan dos empleados calificados para dicho fin, una aplicación o programa que permita digitalizar las órdenes o remisiones de despacho, para tener

acceso a la información de forma más segura y rápida; cada despachador cuenta a su vez con un conductor, por lo que se deben planear las rutas de entrega con base en variables más importantes como la fecha de pedido y de pago del cliente; como se observó en el escenario correspondiente, la cola de máquinas ensambladas y sin ser despachadas se redujo en un 51 %, ya que se pasó de una cola de 46 a 25 máquinas, adicionalmente los despachos de las máquinas despulpadoras de café incrementaron en un 49 %, porque en se pasó 18 a 37 máquinas entregadas, por consiguiente la satisfacción del cliente será mayor.

Realizar esta implementación trae consigo unos costos tales como el talento humano requerido que sería un empleado más en el despacho, porque ya la empresa cuenta con los dos conductores y un despachador, lo que se haría es reasignar a los conductores, es decir cada despachador debe quedar con un conductor asignado, el programa o la aplicación, la adecuación del área de despacho al interior de la empresa y los equipos como computadores y materiales requeridos, los costos se observan en la tabla **XI**.

Tabla XI. Costo de la implementación

Ítem	Costo USD
Talento humano	\$ 205,79
Adecuación del área en la empresa	\$ 394,74
Equipos y materiales	\$ 789,47
Programa para digitalizar la información	\$ 526,32
Costo total	\$ 1.916,32

Finalmente, se puede concluir que el escenario tres, mejora significativamente la situación problemática de la empresa, dado que al realizar más despachos y en tiempos más cortos se logra cumplir con su propuesta de venta, la cual se basa en la satisfacción de los clientes, porque entregarían las máquinas despulpadoras de café que fabrica de alta calidad en tiempos oportunos. Junto con lo anterior se concluye que el modelo base permite hacer una fácil modificación a la estructura del sistema, permitiendo la implementación de diferentes escenarios, los cuales se restringen a partir de la factibilidad expresada por los expertos del sistema.

5. Conclusiones

La empresa presenta problemas con el cumplimiento en la entrega de las máquinas despulpadoras de café, el cual es su producto más vendido, debido a que en el proceso que implica desde la recepción del pedido hasta el despacho tiene cuellos de botellas que no permiten una entrega oportuna al cliente y genera unos sobrecostos al tener que dar descuentos sobre los valores finales de las máquinas por incumplimiento en las entregas.

El proceso inicia con la llegada del pedido de las máquinas donde se identificó que es necesario generar estrategias para consolidar la información; en la fabricación de las piezas que componen la máquina se debe trabajar en la actividad de elaboración del cilindro, dado que es un cuello de botella porque es fundamental para el ensamble; luego de ser ensambladas las máquinas se evidencia un tiempo de espera prolongado antes de ser despachadas; finalmente la actividad de despacho es de-

masiado lenta evidenciando que la empresa tiene un grave problema de logística de distribución de sus productos, esta actividad es la que genera el mayor retraso en los despachos de las máquinas despulpadoras de café.

Un aspecto de gran importancia y crítico a lo largo del trabajo fue la recopilación y el análisis de datos, puesto que son estos los que permiten tener un acercamiento al comportamiento del sistema en la realidad, realizar pruebas de bondad de ajuste para implementar el modelo que se quiere representar y finalmente garantizar una alta confiabilidad de los resultados obtenidos en dicho modelo para así generar un escenario con recomendaciones que sean válidas y factibles para la empresa.

Mediante la simulación de eventos discretos se logró simular y evaluar cómo se comportaría el sistema modelado teniendo un departamento de despacho, permitiendo mostrar un panorama a la empresa, de manera que pueda tomar decisiones acertadas evaluando los costos implicados en función del beneficio y que sería lo más recomendable tomando en cuenta las variables de estudio. No obstante, hay que evaluar la cantidad de puestos de trabajo para lograr ajustar el modelo a otras empresas del sector, dado que, así los centros de trabajo sean iguales, es necesario evaluar distribuciones de planta diferentes.

Como posibles trabajos futuros de esta investigación se pueden agregar modelos de simulación que desde su estructura modular puedan replicar cada una de las estaciones de trabajo con un simple proceso de copiado y pegado posterior a una conexión, siguiendo la secuenciación lógica que podría existir en plantas futuras de la empresa. Es necesario, además, que se evalúen las distribuciones posibles y las variaciones respecto al número de operarios al interior de la planta, de tal forma que el sistema se ajuste al modelo deseado. Y que en términos de investigaciones futuras se prevea la posibilidad de emplear modelos sistematizados a partir de la modificación física de las máquinas, es decir la inclusión de nuevas tecnologías en los procesos de despulpado al interior de este tipo de empresas, además de la posibilidad de realizar procesos de maquila externa en empresas del sector, haciendo una integración vertical del proceso productivo. También se sugiere la posibilidad de realizar un entorno online en el cual, de forma real, utilizando una mezcla de analítica de datos, se actualicen las distribuciones de cada uno de los puestos de trabajo en función de la información histórica recolectada en el quehacer diario de la planta.

Referencias

- [1] E. M. Sanmiguel Jaimés, I. Barahona, and H. H. Pérez-Villarreal, "Sensory evaluation of commercial coffee brands in Colombia", *Int. J. Bus. Syst. Res.*, vol. 9, no. 3, pp. 195-213, 2015. <https://doi.org/10.1504/IJBSR.2015.071831> ↑2, 5
- [2] A. Thomson, "Colombian coffee", *Lat. Trade*, vol. 6, no. 3, p. 74, 1998 [Online]. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=247184&lang=es&site=ehost-live> ↑2, 5
- [3] J. A. Pineda, M. Piniero, and A. Ramírez, "Coffee production and women's empowerment in Colombia", *Hum. Organ.*, vol. 78, no. 1, pp. 64-74, 2019. <https://doi.org/10.17730/0018-7259.78.1.64> ↑2
- [4] L. Bravo-Monroy, S. G. Potts, and J. Tzanopoulos, "Drivers influencing farmer decisions for adopting organic or conventional coffee management practices", *Food Policy*, vol. 58, pp. 49-61, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.11.003> ↑2
- [5] J. Miklian and J. P. Medina Bickel, "Theorizing business and local peacebuilding through the 'footprints of peace' coffee project in rural Colombia", *Bus. Soc.*, vol. 59, no. 4, pp. 676-715, 2020. <https://doi.org/10.1177/>

- 0007650317749441 ↑2
- [6] L. C. Olmos Villalba, E. A. Duque Grisales, and E. Rodriguez, “State of the art of coffee drying technologies in Colombia and their global development”, *Espacios*, vol. 38, no. 29, 2017. ↑2
- [7] F. M. Borém, E. P. Isquierdo, and J. H. da S. Taveira, “Coffee Processing”, in *Handbook of Coffee Post-Harvest Technology*, 2014, pp. 49-68. ↑2
- [8] L. F. Samper and X. F. Quiñones-Ruiz, “Towards a balanced sustainability vision for the coffee industry”, *Resources*, vol. 6, no. 2, 2017. <https://doi.org/10.3390/resources6020017> ↑2
- [9] H. Edelmann, X. F. Quiñones-Ruiz, and M. Penker, “How close do you like your coffee? - Examining proximity and its effects in relationship coffee models”, *J. Rural Stud.*, vol. 91, pp. 24-33, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2022.02.007> ↑2
- [10] F. Ceballos-Sierra, and S. Dall’Erba, “The effect of climate variability on Colombian coffee productivity: A dynamic panel model approach”, *Agric. Syst.*, vol. 190, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103126> ↑2
- [11] T. Lucas, W. D. Kelton, P. J. Sanchez, S. M. Sanchez, and B. L. Anderson, “Changing the paradigm: Simulation, now a method of first resort”, *Nav. Res. Logist.*, vol. 62, no. 4, pp. 293-303, 2015. <https://doi.org/10.1002/nav.21628> ↑3
- [12] S. Minegishi, and D. Thiel, “System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain”, *Simul. Pract. Theory*, vol. 8, no. 5, pp. 321-339, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0928-4869\(00\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0928-4869(00)00026-4) ↑3
- [13] R. Ramos-Hernández, C. Sánchez-Ramírez, D. R. Mota-López, F. Sandoval-Salas, and J. L. García-Alcaraz, “Evaluation of bioenergy potential from coffee pulp through System Dynamics”, *Renew. Energy*, vol. 165, pp. 863-877, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.040> ↑3
- [14] R. Coss Bu, *Simulación: un enfoque práctico*, México D.F.: Limusa Noriega, 1996 ↑3
- [15] N. Silveira Velloso, R. Rodrigues Magalhães, F. L. Santos, and A. A. Rezende Santos, “Modal properties of coffee plants via numerical simulation”, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 175, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105552> ↑3
- [16] E. M. Rocha, and M. J. Lopes, “Bottleneck prediction and data-driven discrete-event simulation for a balanced manufacturing line”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 200, pp. 1145-1154, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.314> ↑3
- [17] E. A. Muñoz Meneses y Y. E. Muñoz Martínez, “Capacitación, mantenimiento y arreglo de máquinas despulpadoras de Café (Coffea arábica) a 100 caficultores del municipio de Taminango - Nariño.”, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Pasto, 2020. [Online]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/31791> ↑3
- [18] E. T. Cortés-Macías, C. Fuentes López, P. Gentile, J. Girón-Hernández, and A. Fuentes López, “Impact of post-harvest treatments on physicochemical and sensory characteristics of coffee beans in Huila, Colombia”, *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 187, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111852> ↑3
- [19] S. Robinson, “A tutorial on conceptual modeling for simulation”, *Proceedings - 2015 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2016, pp. 1820-1834. <https://doi.org/10.1109/wsc.2015.7408298> ↑6

Jairo Roberto Pérez González

Ingeniero Industrial de la Universidad de Antioquia.
Correo electrónico: jroberto.perez@udea.edu.co

Xiomy Carolina Cárdenas

Ingeniera Industrial de la Universidad de Antioquia.
Correo electrónico: xiomy.cardenas@udea.edu.co

Daniela Ocampo Arias

Ingeniera Industrial de la Universidad de Antioquia.
Correo electrónico: daniela.ocampo3@udea.edu.co

Yony Fernando Ceballos

Doctor en Ingeniería, Magíster en Ingeniería e ingeniero de Sistemas e Informática de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Profesor Titular de la Universidad de Antioquia; investigador del grupo Ingeniería y Sociedad. Actualmente es miembro de Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) y de System Dynamics Society (SDS).
Correo electrónico: yony.ceballos@udea.edu.co

Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión

Alternatives to Treat Sludge from Sewage Treatment Plants: A Review

Geraldine Cárdenas Torrado¹, **Francisco José Molina Pérez**²

¹Magíster en Gestión Ambiental, Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia), ²Doctor en Ingeniería Química y Ambiental, Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia)

Correspondence E-mail: geraldine.cardenast@udea.edu.co, francisco.molina@udea.edu.co

Received: 4th/May/2021. Modified: 15th/April/2022. Accepted: 16th/May/2022

Abstract

Context: Research has shown the efficiency of various treatments for sludge. However, new alternatives have been presented which merit an updated review. That is why this work aims to carry out said update with regard to conventional and new techniques to treat sludge.

Method: The article is based on a review of documents in various databases, first grouping the conventional alternatives and later the new ones, both consisting of alternatives of sludge thickening, stabilization, and dewatering techniques, and analyzing them based on economic, technical, and environmental criteria.

Results: This study found that direct osmosis is one of the most promising alternatives in sludge thickening, supercritical water oxidation, and pyrolysis in stabilization and vacuum filtration during the dehydration of said byproducts.

Conclusions: This article allowed an updated review of conventional and new alternatives for sludge treatment, observing that, both in thickening and stabilization, the new alternatives are highly efficient, whereas vacuum filtration, a conventional alternative, improved its performance through the use of modified flocculants, standing out in the dehydration of sludge. This is why more research is required which improve the current challenges and yields and inquire into the release of pollutants into the environment when using biosolids.

Keywords: conventional alternatives, dehydration, thickening, stabilization, new alternatives, sludge treatment.

Language: spanish.

Open access



Cite as: G. Cárdenas, F. Molina. "Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión". *Ing.* vol. 27, no. 3, 2022. e17945.

<https://doi.org/10.14483/23448393.117945>

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

Resumen

Contexto: La investigación han demostrado la eficiencia de diversos tratamientos para lodos. Sin embargo, se han presentado nuevas alternativas que ameritan una revisión actualizada. Es por ello que este trabajo tiene como objetivo realizar dicha actualización con respecto a técnicas convencionales y nuevas para tratar los lodos.

Metodo: Este artículo está basado en una revisión de documentos en diversas bases de datos, agrupando en primera instancia las alternativas convencionales y posteriormente las nuevas, constituidas ambas por alternativas de técnicas de espesamiento, estabilización y deshidratación de lodos, y analizándolas con base en criterios económicos, técnicos y ambientales.

Resultados: En este estudio se encontró que la ósmosis directa es una de las alternativas más prometedoras en el espesamiento de lodos, la oxidación de agua supercrítica y la pirólisis en la estabilización y la filtración al vacío en la deshidratación de dichos subproductos.

Conclusiones: Este artículo permitió la revisión actualizada de alternativas convencionales y nuevas para el tratamiento de lodos, observando que, tanto en el espesamiento como en la estabilización, las nuevas alternativas tienen eficiencias altas, mientras la filtración al vacío, una alternativa convencional, mejoró su rendimiento mediante el uso del floculante modificado, destacándose en la deshidratación de lodos. Es por ello que se requieren más investigaciones que mejoren los desafíos y rendimientos presentes e indaguen sobre la liberación al ambiente de contaminantes al utilizar los biosólidos..

Palabras clave: alternativas convencionales, deshidratación, espesamiento, estabilización, nuevas alternativas, tratamiento de lodos

Idioma: español

1. Introducción

Tratar las aguas residuales genera subproductos conocidos como lodos, cuya generación sigue aumentando con el paso de los años. Los lodos residuales son aquellos sólidos suspendidos en un líquido, mientras que los biosólidos son aquellas fracciones orgánicas de los lodos estabilizadas [1]. De igual forma, los lodos residuales necesitan reducciones del contenido de humedad [2] Dichos lodos son considerados en su mayoría como residuos contaminantes y la disposición de estos puede generar problemas ambientales y de salud pública al realizarse incorrectamente [3] Por lo tanto, se hace necesario estudiar diversas alternativas de tratamiento y realizar la evaluación cuidadosa de las características finales de los biosólidos como su pH, contenido de nutrientes y metales pesados, antes de su aprovechamiento o aplicación en los suelos.

Igualmente, el volumen de los lodos ha aumentado por el crecimiento poblacional de manera especial en áreas urbanas [4] y a pesar de que los lodos poseen compuestos constitutivos que presentan microorganismos, sustancias poliméricas extracelulares secretadas y contaminantes orgánicos [5], pueden valorizarse para la producción de biogás, materiales renovables o en la agricultura. Por lo cual, las alternativas de tratamiento están tomando mayor importancia, ya que permiten gestionar los lodos mediante el espesamiento, la estabilización y la deshidratación de los mismos para su posterior aprovechamiento [6]

La gestión de los lodos parte de una caracterización de los residuos con el fin de conocer las características fisicoquímicas y microbiológicas de ellos. Posteriormente, los lodos son extraídos para

recibir procesos de tratamiento que reduzcan la humedad y los contaminantes presentes, así como para valorizar su contenido de materia orgánica y nutrientes. Estos tratamientos pueden iniciar con un proceso de espesamiento, seguidamente se realiza la estabilización de los lodos para aprovechar la energía y los nutrientes, disminuir los microorganismos patógenos y los olores ofensivos, finalizando con la deshidratación, que reduce el exceso de humedad y facilita su transporte. Por último, los biosólidos pueden ser aprovechados en la agricultura, la enmienda a suelos o la valorización energética, dependiendo de sus características [7]. En la figura 1 se ilustra el esquema del tratamiento de lodos.

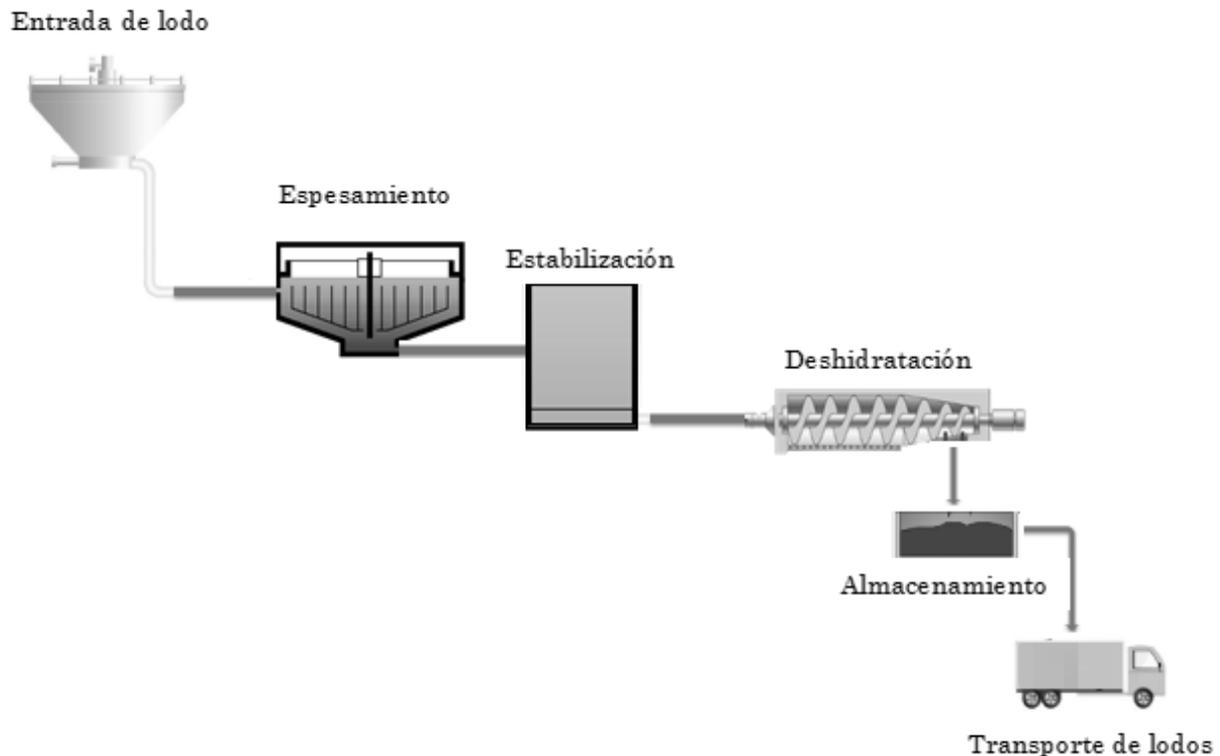


Figura 1: Esquema del tratamiento de lodos

Estudios recientes han demostrado la eficiencia de diferentes tratamientos para los lodos, sin embargo, se presentan nuevas alternativas que ameritan la realización de una revisión actualizada. Es por ello que este artículo ofrece una revisión sobre las alternativas de tratamiento convencionales y no convencionales, incluyendo sus ventajas y limitaciones, teniendo en cuenta criterios económicos, criterios técnicos como el rendimiento de las alternativas y criterios ambientales como la generación de olores ofensivos; cubriendo las operaciones y procesos de espesamiento, estabilización y deshidratación, y algunas opciones para el aprovechamiento de los biosólidos generados.

2. Metodología

Se revisó literatura orientada al tratamiento de los lodos. El número de documentos revisados estuvo alrededor de 220, de los cuales se encuentran 80 citados en el presente artículo. Para la selección de la información se tuvieron en cuenta criterios de inclusión como documentos publi-

cados a partir del año 2015, usando palabras claves como “tratamiento de lodos”, “estabilización de lodos”, “rendimiento de alternativas”, “espesamientos de lodos”, “deshidratación”, “reducción del volumen del lodo”, “impactos ambientales”, “consumo de energía”, tanto en idioma inglés como español. Así mismo, se establecieron criterios de exclusión como estudios que no proporcionaban datos relevantes, documentos sin rigor científico e investigaciones con poca claridad en la eficiencia de las alternativas de tratamiento estudiadas. La revisión de literatura inició con la fase preparatoria, accediendo a bases de datos como ScienceDirect, Taylor amp; Francis Online y SpringerLink. Posteriormente, en la fase descriptiva se tuvieron presentes características, ventajas y limitaciones de las alternativas de tratamiento, criterios económicos, criterios técnicos como el rendimiento de las mismas y criterios ambientales como generación de olores ofensivos, emisiones atmosféricas o consumo de energía. Además, se categorizó y ordenó la información con el fin de mejorar su interpretación, agrupando por una parte las alternativas convencionales y por otra parte las nuevas alternativas, constituidas ambas de técnicas de espesamiento, estabilización y deshidratación de los lodos. Seguidamente, en la fase interpretativa se analizaron las alternativas con base en los documentos más relevantes, sistematizando hallazgos, conceptos, eficiencias, dificultades y recomendaciones presentados por los autores de las investigaciones sobre las diferentes técnicas para el tratamiento de los lodos.

3. Resultados y discusión

3.1. Alternativas convencionales para el tratamiento de lodos residuales

Con el fin de cumplir con los valores máximos permisibles fijados por diversas normatividades y disminuir los problemas asociados a los lodos como generación de olores ofensivos o la probabilidad de atraer vectores, se han estudiado e implementado alternativas convencionales para el tratamiento de ellos. Dichos tratamientos han estado enmarcados en la evaluación de técnicas para el espesamiento, la estabilización y la deshidratación de los lodos. No obstante, pese a que son tecnologías convencionales, actualmente se siguen evaluando con el fin de mejorar sus limitaciones. A continuación, se describen alternativas convencionales de espesamiento, estabilización y deshidratación.

3.1.1. Alternativas de espesamiento de lodos

Se han estudiado diversas técnicas para el tratamiento de lodos, sin embargo, muchas de ellas presentan limitaciones al analizarlas con base en criterios económicos, técnicos y ambientales. En la actualidad se siguen empleando y estudiando procesos convencionales de espesamiento, estabilización y deshidratación de lodos. Estos procesos no solo buscan disminuir el volumen de los lodos, sino eliminar los contaminantes y olores ofensivos. No obstante, procesos de espesamiento como el de gravedad, en donde los equipos giratorios con baja velocidad permiten que los lodos se sedimenten, presentan limitaciones en cuanto a la generación de olores ofensivos y el requerimiento de mayor área, aunque tienen un bajo costo de operación y mantenimiento, con bajo consumo energético. Además, el espesado por gravedad aumenta la cantidad de sólidos totales, pasando de 0,48 a 1,696 g/L, según una investigación realizada en México [8]. Actualmente se evalúan diversas opciones para optimizar su rendimiento, una de las alternativas es la adición de polímeros para mejorar el proceso de espesamiento por gravedad [9]. Evaluar el espesamiento, añadiendo

el polímero catiónico *Caesalpinia spinosa* y el polímero catiónico cloruro de polidialildimetilammonio, permite obtener espesamientos de 1,8 % de sólidos totales a 2,58 % con el primer polímero y de 1,8 % de sólidos totales a 2,68 % con el segundo polímero [10]. Ahora bien, el espesamiento por flotación de aire disuelto o DAF (*Dissolved Air Flotation*) basado en saturar con aire el agua, generando burbujas que atrapan las partículas del lodo para ser separadas de la fase líquida, presenta mayor eficiencia de separación entre los sólidos y líquidos que el espesamiento por gravedad, aunque tiene elevado costo y complejo mantenimiento. Dicho tratamiento, acoplado con el sistema de lodos activados de alta tasa, elimina el 78 % de los sólidos suspendidos totales influentes [11]. No obstante, el espesamiento por flotación de aire disuelto presenta un alto consumo energético y a diferencia del espesamiento por centrifugación, el tratamiento por DAF puede verse limitado por la generación de olores. Mientras que el espesamiento por centrifugación, aunque puede presentar una operación intermitente y altos costos operativos y de mantenimiento, no produce olores y maneja grandes cantidades de lodos en espacios pequeños [12]. Al mismo tiempo, la centrifugación permite no solo espesar los lodos, sino deshidratarlos, aunque es necesario estudiar su rendimiento mediante pruebas de laboratorio [13].

3.1.2. Alternativas de estabilización de lodos

Por otro lado, con el propósito de disminuir microorganismos patógenos y olores ofensivos, se estudian alternativas de estabilización [14]. En el caso de la estabilización con óxido de calcio, esta ofrece cambios extensos, además de ventajas sobre estabilizaciones como la digestión aerobia. La estabilización con óxido de calcio logra que la humedad se reduzca del 10 al 12 % y que el contenido orgánico oscile entre el 4 y el 9 %. Sin embargo, dichos resultados pueden variar de acuerdo con el contenido de cal añadida. El proceso fisicoquímico, aunque reduce los organismos patógenos en los lodos, elimina malos olores y minimiza su potencial de descomposición, aumenta la masa total y la alcalinidad de las estructuras orgánicas. Al mismo tiempo que la compra del material alcalino puede ser costosa. Es por ello que las alternativas convencionales son cada vez más estudiadas, esto con el fin de incorporar materiales o nuevos insumos que aumenten el rendimiento de ellas y permitan ampliar el aprovechamiento de los biosólidos obtenidos. En el caso de la estabilización con óxido de cal, resulta provechoso incorporar cenizas de aceite de palma con la finalidad de que dichos biosólidos sean aprovechados como materiales para la construcción, esto mediante la producción de agregados artificiales ligeros [15]. La adición de óxido de calcio es uno de los tratamientos más usados puesto que es un proceso simple, que además permite que los biosólidos sean aprovechados en la agricultura [16]. De igual forma, de los tratamientos usados en Irlanda, la estabilización con óxido de calcio es el tratamiento más popular por su bajo costo operativo, aunque requiere monitorear su pH [17].

Ahora bien, el uso de lombrices mediante la alternativa de vermicompostaje permite estabilizar los lodos con bajos costos de producción, siendo ideal en plantas pequeñas, aunque necesita altos contenidos de materia orgánica. El vermicompostaje, a diferencia de la estabilización con óxido de cal, puede estar limitado por la presencia de contaminantes en los lodos como metales pesados, los cuales inhiben la actividad de las lombrices. Sin embargo, algunos autores señalan que dicho vermicompostaje puede mejorar su rendimiento al usarlo con diversos materiales como paja y aserrín, arrojando reducciones del pH y el COT (carbono orgánico total), incluso eliminando metales pesados y mitigando su movilidad, mejorando el proceso de estabilización [18]. Es por ello que los lodos de

naturaleza peligrosa pueden requerir la adición de materiales aditivos como paja y aserrín con el fin de reducir la toxicidad de los metales pesados y que estos puedan ser asimilados por las lombrices, de modo que se evite la inactividad de ellas [19]. Por otra parte, el vermicompostaje puede proporcionar un producto aprovechable en la agricultura al igual que el tratamiento con óxido de cal [20]. No obstante, aunque el vermicompostaje produce abono esencial para la aplicación agrícola y fertilizantes mediante la actividad de las lombrices, esta alternativa emite óxido nitroso [21]. De igual forma, el rendimiento de dicha alternativa se ve influenciado por parámetros como un pH entre 5 y 8, y una humedad entre 40 y 55 %, puesto que al no cumplir con dichas especificaciones, los lodos se deben someter a un pretratamiento [22]. En ese sentido, al igual que las alternativas anteriores, la digestión anaerobia es una tecnología típica en la estabilización de los lodos, la cual degrada los sólidos, pero sin necesidad de oxígeno. Dicha digestión logra producir biogás utilizable como fuente de energía, aunque puede generar olores durante el proceso y no reducir los metales pesados presentes a diferencia del vermicompostaje, al ser estos liberados al suelo por procesos de lixiviación [23]. La digestión anaerobia evaluada junto con el compostaje aerobio ha permitido obtener tasas de degradación orgánica que varían entre el 0,5 y el 80,2 % al estudiarse en diferentes plantas. Estos tratamientos han permitido la disposición final segura de los biosólidos [24]. Por otra parte, la digestión aerobia, al igual que la anaerobia, es un método comúnmente utilizado en el tratamiento de los subproductos. La digestión aerobia degrada la materia orgánica en presencia de oxígeno, logrando la estabilización y la reducción del lodo. Dicho tratamiento, a comparación del anaerobio, tiene un menor costo para la construcción y es de fácil operación, aunque debido al requerimiento de aire, puede ser una alternativa costosa con un consumo de energía de 0,167 kWh/t (kilovatios hora por tonelada de lodo) [25]. Esta digestión puede generar cambios en los flóculos de los lodos empeorando las propiedades de deshidratación [26], aunque inactiva eficientemente los microorganismos patógenos y es usada en plantas de tratamiento medianas y pequeñas a diferencia de la estabilización con vermicompostaje [27]. Ahora bien, mientras la digestión anaerobia logra una reducción de los sólidos suspendidos totales (SST) del 66 al 86 %, la digestión aerobia logra una reducción de los SST del 57 al 76 %, demostrando un mejor rendimiento la digestión anaerobia [28]. Por otro lado, aunque comúnmente se estudian individualmente las estabilizaciones por digestión aerobia y anaerobia, se ha demostrado que combinar dichos tratamientos elimina microcontaminantes emergentes y convencionales, obteniendo biosólidos seguros para la reutilización en la agricultura, siendo eficiente en la estabilización de estos [29].

De igual forma, como se mencionó anteriormente, la digestión anaerobia se ha evaluado junto con el compostaje aerobio. Esto se debe a que el compostaje estabiliza los lodos mediante la degradación biológica en condiciones aerobias para obtener un producto estable, cuya alternativa es ecológica y de bajo costo. El compostaje no solo permite ser implementado con otras alternativas, sino que origina un sustrato llamado composta, el cual es usado en los suelos para mejorar su calidad [30]. Este compostaje aunque permite obtener un producto usado principalmente en la agricultura por su calidad, durante el proceso, al igual que con la digestión anaerobia, emite malos olores [31]. Además, el compostaje puede ser entendido como una tecnología limpia, aunque a menudo se descuida la liberación de dióxido de carbono (CO₂) [32]. Igualmente, en el compostaje se pueden generar productos finales con una menor calidad, debido a que las emisiones de amoníaco (NH₃) pueden ocasionar la pérdida de nitrógeno superior al 50 % [33].

Sin embargo, existe una alternativa para tratar los lodos que no solo permite estabilizarlos, sino que reduce el volumen de los lodos y recupera energía. Esta alternativa es la incineración, la cual aunque permite controlar los parámetros antes mencionados, requiere de diseños eficientes para la recuperación energética, la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero y la deshidratación previa de los lodos *in situ*, convirtiéndola en una alternativa costosa, además, de tener un alto consumo de energía [34].

3.1.3. Alternativas de deshidratación de lodos

Una vez los lodos son estabilizados, estos requieren recibir procesos de deshidratación que reduzcan la humedad de los mismos, haciendo fácil su manipulación [35]. La reducción de la humedad en los lodos disminuye el volumen de ellos y por ende el precio de eliminación [36].

Dentro de los tratamientos convencionales más usados en la deshidratación de los lodos, encontramos los lechos de secado, estos tratamientos suelen ser muy empleados debido a que son métodos simples y económicos [37]. Sin embargo, dichos sistemas de tratamiento pueden generar olores desagradables y lixiviados y necesitar grandes superficies para su funcionamiento, además de requerir gran cantidad de mano de obra para remover los lodos. En cuanto a su rendimiento, los lechos de secado, luego de implementarse por cinco meses, disminuyen 15,2 % la concentración de carbono orgánico presente en los lodos y reducen la actividad biológica de microorganismos aerobios y hongos, mientras los metales pesados se mantienen dentro del límite permisible [38]. Esta reducción del carbono orgánico puede estar asociada a la degradación de la materia orgánica [39]. Ahora bien, los lechos de secado se diferencian del secado térmico, ya que este último, aunque igualmente es un tratamiento común, representa un gran consumo de energía: entre 41 y 150 kWh/t y por ende grandes inversiones [40].

Por otra parte, algunas alternativas de deshidratación requieren que los lodos sean acondicionados previamente, puesto que su rendimiento se puede ver reducido, es el caso de los filtros prensa, los cuales forman parte de la deshidratación mecánica de los lodos [41]. En los filtros prensa se han usado acondicionadores como Na_2SiO_3 (silicato sódico) con FeCl_3 (cloruro de hierro), los cuales disminuyen el contenido de humedad. No obstante, si se desea mejorar aún más el proceso se pueden añadir cenizas volantes, logrando reducir la humedad el 45 % [40]. Los filtros prensa se diferencian de los lechos de secado por su consumo de energía. Dichos filtros tienen un consumo energético entre 40 y 60 kWh/t, al igual que los filtros al vacío [12]. Ambos filtros, por lo tanto, requieren de un alto consumo, aunque este es menor que el del secado térmico, al mismo tiempo que depende de las características de filtración, de las propiedades del lodo y del proceso de deshidratación [42]. El consumo energético de los filtros al vacío y los filtros prensa podría disminuir los porcentajes de uso de dichos tratamientos al aumentar los costos operativos, pero aunque los lechos de secado son alternativas muy usadas, los filtros al vacío igualmente tienden a ser muy utilizados, puesto que el agua es separada aplicando vacío mediante un medio poroso, obteniendo una remoción de la humedad del 65 al 85 % en un tiempo de 60 a 75 minutos, según la investigación realizada en un equipo piloto de filtración al vacío [43].

Al mismo tiempo, la centrifugación es también una de las alternativas que requiere que los lodos sean previamente acondicionados. La centrifugación, a pesar de tener un alto consumo de energía

de 60-80 kWh/t, una operación intermitente y altos costos operativos, puede mejorar su rendimiento al agregar polvo de carbón y aserrín, produciendo más porcentaje de sólidos de torta, aumentando en 43,8 y 24,6 el porcentaje, respectivamente. Además, este tratamiento reduce el 56 y el 89 % la humedad, respectivamente [13].

Por el contrario, mientras existen alternativas que usan medios mecánicos para deshidratar los lodos, los humedales requieren especies de plantas eficientes para el tratamiento de dichos subproductos. Estos humedales se distinguen por el poco consumo de energía, los bajos costos de mantenimiento y operación, y además de las ventajas antes mencionadas, los biosólidos obtenidos suelen ser empleados como fertilizantes agrícolas. No obstante, dichos biosólidos requieren la eliminación de contaminantes como metales pesados [44], además, los humedales necesitan grandes áreas para su implementación [45]. Igualmente, dichos sistemas disminuyen los nutrientes como nitrógeno y fósforo en los biosólidos, elementos importantes en la calidad de los subproductos. En cuanto a su rendimiento, este es calculado con base en el incremento en la concentración de los sólidos totales (ST), registrando valores de 24 a 31 % [46].

3.2. Nuevas alternativas para el tratamiento de lodos residuales

Las limitaciones de los tratamientos convencionales, junto con el desconocimiento de ciertos contaminantes como los emergentes, han propiciado el uso bien sea a escala de laboratorio o industrial, de nuevas alternativas para el tratamiento de los lodos. Implementar algunas de las nuevas tecnologías no implica el cambio total de las convencionales, sino procesos de reformulación con el fin de mejorar los rendimientos obtenidos. Es por ello que a continuación se describen nuevas alternativas de espesamiento, estabilización y deshidratación de lodos.

3.2.1. Alternativas de espesamiento de lodos

Con el fin de aplicar alternativas con bajo consumo energético, las cuales sean eficaces en el tratamiento de los lodos, se estudian técnicas como la ósmosis directa. Dicha alternativa tiene un consumo de energía máximo de $0,276 \pm 0,033$ kWh/t, que depende de las condiciones operativas, aunque se evidencia que el consumo es menor al de las alternativas convencionales, promoviendo una reducción económica [47]. En cuanto a su rendimiento, la ósmosis directa impulsada por agua de mar concentra los lodos hasta 52,5 g/L en cada ciclo de operación. No obstante, esta tecnología utiliza una membrana que se ensucia durante el proceso de tratamiento disminuyendo el flujo del agua. Sin embargo, dicho problema ha disminuido con el uso del coagulante cloruro de polialuminio [48]. Este coagulante aumenta la permeabilidad de la membrana puesto que se reduce el contenido de sustancias poliméricas extracelulares [49]. Es por ello que los coagulantes han tomado importancia en el tratamiento de los lodos, logrando una separación entre el sólido-líquido eficiente [50]. Ahora bien, con base en investigaciones previas, se usan láminas planas y de fibra hueca para dicho espesamiento. Las fibras huecas pueden resultar favorables por su naturaleza mecánica autosuficiente; aunque, como se mencionó anteriormente, las membranas se ensucian constantemente. Es por ello que estudios han propuesto reducir el tamaño del poro en la membrana, sin embargo, se reduciría la permeabilidad de esta, optando por la adición de otra capa [51], puesto que la fabricación de una membrana de doble capa de fibra hueca demostraría una mejoría en la concentración de los lodos y en el ensuciamiento de ella [52].

3.2.2. Alternativas de estabilización de lodos

Una de las desventajas antes mencionadas en el tratamiento convencional de compostaje es que las emisiones de amoníaco pueden ocasionar pérdida de nitrógeno. Sin embargo, en la actualidad, la madera de pino modificada con ácido sulfúrico e hidróxido de sodio se implementa como agente de carga para disminuir hasta en un 9,4 % la pérdida de nitrógeno al reducir las emisiones de amoníaco [53]. También, el compostaje es implementado con la adición de larvas de escarabajos. Dichas larvas han permitido la reducción de algas en un 48,6 %, de coliformes totales en un 47,3 % y de salmonella y huevos de helminto en un 100% [54].

Además, con el fin de estabilizar metales pesados, eliminar olores, disminuir microorganismos patógenos y combatir y degradar contaminantes orgánicos persistentes, se estudian y emplean tratamientos a escala de laboratorio como la oxidación de agua supercrítica o SCWO (*Super-Critical Water Oxidation*). La SCWO no solo ofrece las ventajas antes mencionadas, sino que, a diferencia de algunos procesos convencionales, genera mayores productos y subproductos reutilizables como minerales, agua limpia, metales, CO₂ y calor, útil en la producción de energía. En cuanto a su rendimiento, la SCWO logra eliminar en los lodos el 99 % de la DQO y el 98 % de p-terc-butylcatecol, un compuesto orgánico recalcitrante agregado a los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales en China, con el fin de evaluar la eficiencia de dicha alternativa de estabilización. No obstante, el tratamiento requiere operar en condiciones típicas con el fin de lograr una eliminación eficiente, siendo el calentamiento y la presurización pasos indispensables dentro del proceso de la SCWO que demandan altos consumos de energía, alrededor de 550 kWh/t [55]. Además, este tratamiento posee altos costos operativos ya que requiere presión y temperatura elevadas [56]. Sin embargo, el uso de reactores puede solucionar los problemas mencionados.

En China es estudiada e implementada la SCWO como un proceso combinado con gasificación de agua supercrítica o SCWG (*Super-Critical Water Gasification*) [57]. Esta última permite disponer sosteniblemente los biosólidos, al mismo tiempo ayuda a la degradación de compuestos como antibióticos y priones, la eliminación de bacterias o virus patógenos y recuperar nutrientes como nitrógeno y potasio [58]. La SCWG logra tratamientos con altos rendimientos, los gases de dicha alternativa contienen metano e hidrógeno con capacidad para producir energía. Al mismo tiempo, la SCWG no requiere que los lodos reciban un pretratamiento con el fin de disminuir el contenido de humedad a diferencia de la SCWO [59].

Por otro lado, existen alternativas como la del pretratamiento electroquímico, que al igual que la electrodeshidratación o EDW (*Electro-Dewatering*) son técnicas prometedoras. El pretratamiento electroquímico no solo permite estabilizar los lodos sino que los deshidrata, incluso con poca adición de productos químicos. Este tratamiento ofrece ventajas como la inactivación de patógenos como la *E.coli* y la *Salmonella spp* con un voltaje de 15 voltios (V), permitiendo la aplicación adecuada de los biosólidos en la agricultura [60]. Además, una de las mayores desventajas que han presentado diversos sistemas de estabilización ha sido la generación de olor, lo cual se mitiga con dicha alternativa al reducir el sulfuro de hidrógeno (H₂S) causante de olores ofensivos. Al mismo tiempo, el consumo de energía puede ser bajo, registrando valores de 13 kWh/t a 64 kWh/t con un voltaje de 12 voltios, reduciendo los costos económicos [61].

Con base en lo antes mencionado, tratar y disponer los lodos es uno de los problemas de los sistemas de tratamiento, bien sea por la normatividad vigente, los contenidos de humedad, los olores generados o los microorganismos patógenos [62]. Es por ello que la desinfección utilizando mecanismos como radiación solar y elevación del pH se viene implementando con el fin de eliminar organismos patógenos [63]. Y aunque la digestión aerobia y anaerobia es un método común en los tratamientos de lodos in situ, la desinfección de los organismos patógenos es muy lenta [64]. Por lo anterior, se implementa la desinfección de los lodos mediante tratamiento térmico eléctrico usando corriente continua (CC), ya que esta alternativa inactiva patógenos como la *E.coli* con concentraciones de NaCl (cloruro de sodio) y NH₄Cl (cloruro de amonio), usados para mejorar la conductividad en la mezcla de los lodos. No obstante, el tratamiento térmico eléctrico usando corriente continua promueve la corrosión en los electrodos y, a pesar de que se comercializan electrodos anticorrosión, los costos pueden ser altos. Sin embargo, dicho tratamiento puede representar un bajo consumo de energía dependiendo del volumen de lodos a tratar, la concentración de las sales y el calor producido.

Ahora bien, en caso de no solo requerir que en los lodos se reduzcan los contaminantes orgánicos persistentes y se eliminen microorganismos patógenos, sino que además se estabilicen los metales pesados y se disminuya el volumen de los mismos, la pirólisis es la alternativa ideal [65]. La pirólisis además permite obtener productos como un bioaceite compuesto de hidrocarburos aromáticos, alifáticos, entre otros, el cual puede ser usado como materia prima en industrias, aunque se ha demostrado que utilizar el bioaceite puede liberar los contaminantes acumulados en él. De igual forma, dicha alternativa emite gases como metano, hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono, los cuales son quemados para generar calor para la pirólisis [66] y un producto llamado biochar que se puede incinerar [67]. Dicho tratamiento puede representar altos costos por la instalación de equipos adicionales, además de requerir un alto consumo de energía de 118 MJ/t (megajulio o *megajoule* por tonelada de lodo), aunque se puede reducir con el uso de dispositivos asistidos por microondas [68].

3.2.3. Alternativas de deshidratación de lodos

Dentro de los tratamientos estudiados actualmente, encontramos la EDW por presión, la cual reduce el volumen de los poros al aplicar presión, extrayendo el agua del lodo, siendo útil por consumir menos energía que un proceso de electro-ósmosis. En dicha técnica se deshidratan mecánicamente los lodos y luego es aplicado el potencial eléctrico. Aunque la deshidratación mecánica ha sido estudiada considerablemente, aspectos de la EDW aún se desconocen. En la EDW se aumentan los sólidos secos y se reduce la concentración de *E.coli*, propiciando que los biosólidos se puedan aplicar a tierras agrícolas. En cuanto a su rendimiento, la EDW permite que el lodo alcance una sequedad del 31,3 % a 15 voltios y 43,9 % a 25 voltios. Sin embargo, dicha alternativa puede liberar enzimas de células muertas y carbono orgánico [69]. Al mismo tiempo, la temperatura del lodo influye en el consumo de energía, es por ello que a una temperatura de 50 °C se reduce el voltaje de 35 voltios a 15 voltios y se registra un consumo de energía de 108,23 kWh/t [70].

Otra de las alternativas estudiadas a escala de laboratorio es la oxidación Fenton, la cual es usada como una alternativa eficaz para la deshidratación y desinfección de los lodos, ya que reduce la concentración del COT (carbono orgánico total) a más del 50 % durante tres horas de

tratamiento [71]. El tratamiento Fenton logra reducir el contenido de humedad en los lodos al desintegrar los flóculos. Sin embargo, aún se siguen evaluando acondicionadores orgánicos naturales como *Moringa oleifera* (MO), el cual al ser añadido mejora la deshidratación de los lodos al aumentar el tamaño de la partícula. El Fenton-MO ha adquirido importancia dentro de los tratamientos de lodos al considerarse un método rentable, respetuoso y eficiente para la deshidratación de los mismos, con un costo razonable. Al mismo tiempo, este método aumenta la porosidad de los biosólidos, reduciendo del 73,86 al 61,82 % en peso del contenido de agua de la torta de lodo [72]. También, la humedad se reduce de 85,3 a 73,8 % con un pH de 5. Y a pesar de reducir la humedad y lograr desinfectar los biosólidos, se conservan los compuestos nutritivos, así como los materiales orgánicos esenciales en la producción de fertilizantes [73].

Los tratamientos de deshidratación requieren un mayor estudio con el fin de mejorar sus rendimientos, es por ello que diversos acondicionadores y floculantes se vienen analizando y aplicando en la actualidad. Dichos acondicionadores químicos aunque han sido utilizados para mejorar la deshidratación, durante su uso liberan iones inorgánicos, es por ello que los acondicionadores físicos como escorias, cenizas, entre otros, se estudian y desarrollan en la actualidad junto con los acondicionadores químicos, mejorando la permeabilidad de los biosólidos [74]. Un ejemplo de ello ha sido el uso del biochar de cáscara de arroz con cloruro férrico (FeCl_3), combinación usada en el tratamiento de los lodos como acondicionador y deshidratante [75]. Con dicho acondicionador se ha logrado que la resistencia del lodo a la filtración disminuya en 97,9 % y la humedad del biosólido se reduzca del 96,7 al 77,9 % durante 6 minutos. Ahora bien, un recurso que puede resultar eficiente para elaborar biochar, por su contenido de carbono, es la paja de arroz, siendo un material de bajo costo [76].

De igual manera, el uso de floculantes químicos para la deshidratación de los lodos es común, aunque genera contaminación ambiental. Actualmente se estudian y usan floculantes para el pretratamiento de los lodos como el polvo de núcleo de maíz modificado con NaOH (hidróxido de sodio) y bromuro de cetiltrimetilamonio, los cuales reducen la humedad y la resistencia específica de filtración del lodo [77], siendo útil para el tratamiento de los subproductos por su simplicidad en la operación y bajo costo. Esta alternativa de tratamiento al usar núcleo de maíz para la deshidratación no causa impactos ambientales, debido a que el núcleo de maíz tiene alto valor de calentamiento y es de fácil biodegradabilidad. No obstante, este tratamiento requiere de condiciones óptimas de dosificación, velocidad de los lodos y tiempo de agitación. Implementar el tratamiento convencional utilizando filtración al vacío con el pretratamiento de polvo de núcleo de maíz modificado ha permitido que las resistencias específicas de filtración y el contenido del agua se reduzcan en un 55 y 40 % respectivamente.

Sin embargo, pese a que con los tratamientos de deshidratación anteriormente mencionados se logra reducciones de humedad, estos no consiguen la disolución de las sustancias poliméricas extracelulares, las cuales son importantes en la liberación del agua presente en los lodos. Por esta razón se utilizan tensoactivos en la deshidratación, permitiendo la liberación de las sustancias poliméricas extracelulares y que en la superficie de los subproductos se neutralice la carga negativa, aunque se requiere el uso de surfactantes para mejorar el proceso, los cuales pueden ser costosos. Es por ello que se estudia el uso del surfactante catiónico biodegradable esterquat de palma, utilizado en la liberación de lodos oleosos, alcanzando una pérdida de peso en el lodo aceitoso de

81,31 % con una concentración de esterquat de palma de 100 mg/L [78]. No obstante, los tensoactivos pueden causar contaminación secundaria, dando paso al estudio de los biotensoactivos, los cuales reducen la toxicidad [79].

El tratamiento Fenton, mencionado anteriormente, logra reducir el contenido de humedad en los biosólidos y es usado en combinación con acondicionadores orgánicos naturales, también puede combinarse con los tensoactivos, con el fin de mejorar la deshidratación de los lodos. La combinación entre el tensioactivo catiónico cloruro de dodecil dimetil bencil amonio y el tratamiento Fenton ha evidenciado mejoras en dicho proceso al permitir que el contenido de humedad en los biosólidos disminuya de 63,36 a 57,17 % [80].

3.3. ¿Alternativas convencionales o nuevas para el tratamiento de los lodos?

Algunas alternativas para el tratamiento de los lodos, tanto convencionales como nuevas, no registran con certeza datos sobre consumo de energía, costos económicos o impactos ambientales. Por consiguiente, elegir una alternativa adecuada, bien sea de espesamiento, estabilización o deshidratación, puede producir incertidumbre.

No obstante, con base en los estudios antes mencionados sobre las alternativas de tratamiento convencionales y nuevas, el espesamiento por centrifugación puede ser una alternativa adecuada para grandes cantidades de lodos, además de no producir olores. Este, sin embargo, tiene altos costos operativos y de mantenimiento, al igual que el tratamiento de flotación de aire disuelto, por sus altos consumos de energía, mientras que el espesamiento por gravedad tiene poca eficiencia, habría que optar entonces por la ósmosis directa como una tecnología prometedora en el espesamiento de los lodos, con bajo consumo de energía en condiciones controladas. Al mismo tiempo, esta, con el fin de mejorar la concentración de los lodos y mitigar el ensuciamiento de la membrana, puede emplear coagulantes como el cloruro de polialuminio o utilizar una membrana de doble capa de fibra hueca.

La digestión anaerobia, a pesar de estar limitada para escalas pequeñas por su valor económico y su huella ambiental, suele ser empleada en la estabilización, ya que tiene un mejor rendimiento en cuanto a la eliminación de SST, a diferencia de la digestión aerobia. Esta última, además, presenta altos consumos de energía en contraste con la anaerobia. Por otro lado, implementar la digestión anaerobia junto con el compostaje permite contar con alternativas de estabilización que logran producir biogás y fertilizantes. Sin embargo, no logran degradar contaminantes orgánicos persistentes. Del mismo modo, aunque el tratamiento térmico eléctrico con CC (corriente continua) desinfecta los lodos, no se han encontrado investigaciones que permitan concluir que degradan dichos contaminantes orgánicos persistentes.

Es por ello que la pirólisis y la SWCO se usan en la actualidad, ya que logran estabilizar los lodos con contaminantes orgánicos persistentes. La pirólisis, por tal, es una alternativa prometedora para la eliminación y la estabilización de los lodos, ya que disminuye el volumen de estos, los microorganismos patógenos y estabiliza los metales pesados, además, se obtienen productos aprovechables a pesar de su alto consumo de energía, el cual se puede reducir con el uso de dispositivos asistidos por microondas. Al mismo tiempo, la SWCO, pese a que es experimentada a escala de laboratorio,

puede ser una alternativa prometedora para el tratamiento de los subproductos, puesto que estabiliza lodos con contaminantes orgánicos persistentes y metales pesados, aunque sus requerimientos operacionales demanden altos consumos de energía.

La filtración al vacío puede considerarse como una de las alternativas más prometedoras en la deshidratación de los lodos, en la cual, para reducir el consumo energético se deben tener en cuenta las características de filtración, las propiedades del lodo y el proceso de deshidratación. La filtración al vacío logra reducir la humedad entre el 65 y 85 %. Al mismo tiempo, permite mejorar su eficiencia al agregar floculantes como el polvo de núcleo de maíz modificado con NaOH y bromuro de cetiltrimetilamonio, los cuales reducen la resistencia específica de filtración del lodo. La tabla I resume las alternativas convencionales y nuevas para el tratamiento de los lodos, analizadas con base en criterios económicos, técnicos y ambientales.

Tabla I: Resumen de alternativas convencionales y nuevas para el tratamiento de los lodos

Tratamientos	Alternativas convencionales				
	Análisis de alternativas				
	Criterios económicos	Criterios técnicos	Criterios ambientales	Ref	
Alternativas de espesamiento	Gravedad	*Bajo costo de operación y mantenimiento	*Requerimiento de mayor área para su implementación *Aumento de los sólidos totales de 0,48 a 1,696 g/L *Mejora del proceso con la adición de polímeros	*Generación de olores ofensivos *Consumo energético	[8] [9] [10]
	Flotación de aire disuelto	*Elevado costo	*Complejo mantenimiento *Elimina el 78 % de los sólidos suspendidos totales	*Consumo energético *Generación de olores	[11]
	Centrifugación	*Altos costos operativos	*Operación intermitente *Maneja grandes cantidades de lodos	*No genera olores ofensivos *Consumo energético	[12] [13]
Alternativas de estabilización	Óxido de calcio	*Material alcalino costoso *Bajo costo operativo	*Humedad baja del 10 al 12 % *Contenido orgánico entre el 4 y 9 % *Reducción de organismos patógenos *Reducción del potencial de descomposición de los biosólidos *Aumento de la masa total *Proceso simple *Requiere monitoreo del pH	* No genera olores, los elimina	[14] [15] [17]
	Vermicompostaje	*Bajos costos de producción	*Requerimientos como altas cantidades de materia orgánica *Eliminación y mitigación del movimiento de metales pesados *Influenciado por parámetros como pH entre 5 y 8 y una humedad entre 40 y 55 % *Producción de abono y fertilizantes *Ideal para plantas pequeñas	* Generación de óxido nitroso	[18] [19] [20] [21] [22]

	Digestión anaerobia	*La construcción requiere un mayor costo a diferencia del aerobio	*Poca reducción de metales pesados en lodos *Reducción de los sólidos suspendidos totales (SST) del 66 al 86 % *Producción de biogás	*Generación de olores	[23] [24] [2] [8]
	Digestión aerobia	*La construcción requiere un menor costo a diferencia del anaerobio *Elevado costo por su consumo de energía	*Fácil operación *Consumo de energía de 0,167 kWh/t *Uso en plantas de tratamiento medianas y pequeñas *Reducción de SST del 57 al 76 %	*Consumo energético	[25] [27] [28]
	Compostaje	*Alternativa de bajo costo	*Producción de sustrato llamado composta *Reducción de nutrientes orgánicos por las emisiones	*Alternativa ecológica *Generación de olores ofensivos *Emisión de dióxido de carbono y amoníaco	[30] [31] [32] [33]
	Incineración	*Alternativa costosa por la necesidad de diseños eficientes	*Estabilización de lodos *Reducción del volumen de lodos *Recuperación de energía *Deshidratación previa de lodos in situ *Alto consumo de energía	*Emisión de gases *Consumo energético	[34]
Alternativas de deshidratación	Lechos de secado	*Alternativa de bajo costo	*Alternativa simple *Requerimientos como grandes superficies para su funcionamiento *Alta mano de obra *Disminución de concentración de carbono orgánico presente en lodos de 15,2 %	*Generación de olores ofensivos * Generación de residuos líquidos	[37] [38] [39]
	Secado térmico	*Grandes inversiones por requerimiento energético e instrumental	*Deshidratación de lodos *Consumo de energía entre 41 y 150 kWh/t	*Consumo energético	[40]
	Filtros prensa	*Altos costos operativos	*Acondicionamiento previo de lodos *Reducciones de humedad de 45 % *Consumo de energía entre 40 y 60 kWh/t	*Consumo energético	[12] [40] [41] [42]
	Filtración al vacío	*Altos costos operativos	*Consumo de energía entre 40 y 60 kWh/t *Remoción de humedad entre 65 y 85 %	*Consumo energético	[12] [42] [43]
	Centrifugación	*Altos costos operativos	*Consumo de energía de 60 a 80 kWh/t *Aumento de sólidos de torta del 43,8 % y 24,6 % al agregar polvo de carbón y aserrín *Reducción de humedad del 56 % y 89 % al agregar polvo de carbón y aserrín	*No genera olores ofensivos *Consumo energético	[12] [13]

	Humedales	*Bajos costos de mantenimiento y operación	*Requerimientos de plantas eficientes para tratamiento de lodos *Bajo consumo de energía *Grandes áreas para su implementación *Disminución de nutrientes como nitrógeno y fósforo en los biosólidos *Aumento en la concentración de SST, con valores de 24 a 31 %	*Consumo energético	[44] [45] [46]
Nuevas alternativas					
	Tratamientos	Análisis de alternativas			Ref
		Criterios económicos	Criterios técnicos	Criterios ambientales	
Alternativas de espesamiento	Ósmosis directa	*Bajos costos operativos por el poco consumo de energía	*Consumo de energía máximo de 0,276 ± 0,033 kWh/t *La ósmosis directa impulsada por agua de mar concentra los lodos hasta 52,5 g/L en cada ciclo de operación *Uso de coagulante para reducir ensuciamiento de la membrana *Fabricación de membrana de doble capa de fibra hueca para reducir ensuciamiento de la misma y aumentar la concentración de lodos	*Consumo energético	[47] [48] [49] [50] [51] [52]
	Oxidación de agua supercrítica	*Altos costos operativos	*Disminución de microorganismos patógenos *Degradación de contaminantes orgánicos persistentes y metales pesados *Generación de mayores productos y subproductos reutilizables *Eliminación de 99 % de DQO y 98 % de p-terc-butilcatecol en lodos *Altos consumos de energía de 550 kWh/t	*Eliminación de olores ofensivos *Consumo energético	[55] [56]
Alternativas de estabilización	Gasificación de agua supercrítica	*Altos costos operativos	*Degradación de compuestos como antibióticos *Eliminación de bacterias *Recuperación de nutrientes	*Consumo energético *Emisiones de metano e hidrógeno	[57] [58] [59]
	Pretratamiento electroquímico	*Bajos costos operativos al registrar consumos de energía entre 13kWh/t y 64kWh/t	*Estabilización y deshidratación de lodos *Inactivación de patógenos como E.coli y Salmonella spp	*Eliminación de olores ofensivos al reducir el sulfuro de hidrógeno	[60] [61]
	Tratamiento térmico eléctrico usando corriente continua	*Electrodos anticorrosión con altos costos	*Inactivación de patógenos como E.coli *Fomentación de la corrosión en los electrodos *Bajo consumo de energía	*Consumo energético	[64]

	Pirólisis	*Altos costos por instalación de equipos adicionales	*Estabilización de metales pesados *Eliminación de microorganismos patógenos *Combate de contaminantes orgánicos persistentes *Disminución de volumen de lodos *Obtención de productos como bioaceite *Alto consumo de energía de 118 MJ/t	*Eliminación de olores ofensivos *Emisiones de metano, hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono* Consumo energético	[65] [66] [67] [68]
Alternativas de deshidratación	Electro deshidratación	*Altos costos por consumo de energía de 108 kWh/t	*Consume menos energía que un proceso de electroósmosis *Aumento de sólidos secos *Reducción de concentración de E.coli en los biosólidos *Sequedad de 31,3 % a 15 voltios y 43,9% a 25 voltios	*Consumo energético *Liberación de carbono orgánico	[60] [70]
	Fenton	*Alternativa con costo razonable	*Método rentable *Reducción del 73,86 al 61,82 % en peso del contenido de agua de torta de lodo *Reducción de humedad de 85,3 a 73,8 % *Reducción de concentración del COT (carbono orgánico total)	*Método respetuoso con el ambiente para deshidratar lodos (Fenton-MO)	[71] [72] [73]
	Tensioactivos	* El uso de surfactantes para mejorar el proceso puede ser costoso	*Deshidratación de lodos *Liberación de sustancias poliméricas extracelulares *Pérdida de peso en lodo aceitoso de 81,31% con el uso de surfactantes	*Contaminación secundaria	[78] [79]

4. Conclusiones

Las alternativas convencionales y nuevas de tratamiento de los lodos se ven influenciadas por el tipo de lodo a tratar, el conocimiento especializado sobre el uso eficiente de las alternativas, el uso de acondicionadores para mejorar la eficiencia, las áreas de implementación disponibles, la generación de olores ofensivos, la presencia de contaminantes, los costos económicos y el consumo energético. A pesar de las diferentes influencias o limitaciones que puedan presentar las alternativas de tratamiento, es necesaria su implementación, puesto que la disposición en el ambiente o el aprovechamiento de los lodos sin someterlos a procesos de tratamiento pueden contaminar cuerpos hídricos y el suelo con altas cargas de materia orgánica, microorganismos patógenos o metales pesados. Tratamientos como el espesamiento, la estabilización y la deshidratación se aplican en diversos países con el fin de reducir microorganismos, humedad, metales pesados y olores desagradables y, aunque comúnmente se emplean alternativas como la digestión anaerobia y aerobia para el tratamiento de los lodos in situ, la eliminación de los microorganismos patógenos puede ser muy lenta y algunos parásitos como los helmintos pueden seguir activos aún después del tratamiento, dando paso a la necesidad de investigar nuevas alternativas.

Por lo que técnicas como la pirólisis y la SWCO son discutidas como alternativas potenciales que estabilizan lodos que contienen contaminantes orgánicos persistentes y eliminan microorganismos patógenos, mientras que la ósmosis directa es una tecnología prometedora en el espesamiento de los lodos.

Teniendo en cuenta la información antes mencionada, las nuevas alternativas como la ósmosis directa y la pirólisis junto con la SWCO son las que han demostrado un mejor rendimiento con base en esta revisión en el espesamiento y la estabilización de los lodos, respectivamente. No obstante, algunas de las alternativas novedosas solo se han estudiado a escala de laboratorio, limitando su aplicación a escala industrial. Mientras que el estudio de diversos pretratamientos ha permitido aumentar la eficacia de las alternativas convencionales. Un ejemplo de ello es la filtración al vacío, la cual ha demostrado un mejor rendimiento en la deshidratación de los lodos mediante el uso del floculante polvo de núcleo de maíz modificado con NaOH y bromuro de cetiltrimetilamonio.

Por otra parte, se siguen presentando desafíos en cuanto a la liberación de contaminantes con el uso de lodos y biosólidos, ya que algunos de estos contaminantes podrían acumularse o seguir presentes en los productos obtenidos en tratamientos como la pirólisis. Esto debido a que la pirólisis, a pesar de que permite obtener un bioaceite, podría generar problemas de contaminación ambiental. Paralelamente, se debe estudiar con mayor detalle el uso y los impactos ambientales de pretratamientos y acondicionadores, los cuales no solo son empleados para mejorar los rendimientos de las alternativas de deshidratación, sino que son utilizados en tratamientos de espesamiento y estabilización de los lodos.

Referencias

- [1] J. Hu *et al.*, “Using a strong chemical oxidant, potassium ferrate (K₂FeO₄), in waste activated sludge treatment: A review”, *Environ. Res.*, vol. 188, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109764> ↑2
- [2] W. Zhang, Y. Xu, B. Dong, and X. Dai, “Characterizing the sludge moisture distribution during anaerobic digestion process through various approaches”, *Sci. Total Environ.*, vol. 675, pp. 184-191, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.095> ↑2, 14
- [3] M. B. Flandes y J. L. Soto, “Comparación de distintos métodos de secado (3) para lodos, de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Jerónimo, del municipio de Purísima del Rincón, GTO”, *Jóvenes cienc.*, vol. 3, pp. 350-356, 2017. [En línea]. <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2314/1802> ↑2
- [4] H. Du, and F. Li, “Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge”, *Chemosphere*, vol. 168, pp. 1022-1031, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.108> ↑2
- [5] Y. Chen, H. Chen, J. Li, and L. Xiao, “Rapid and efficient activated sludge treatment by electro-Fenton oxidation”, *Water Res.*, vol. 152, pp. 181-190, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.035> ↑2
- [6] M. Schnell, T. Horst, and P. Quicker, “Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review”, *J. Environ. Manage.*, vol. 263, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110367> ↑2
- [7] A. Amador-Díaz, E. Veliz-Lorenzo y M. Bataller-Venta, “Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones”, *CENIC*, vol. 46, 2015. [En línea]. <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf> ↑3
- [8] A. Peña, *Balances de materia a una línea de lodos de una EDAR urbana*, Trabajo de pregrado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 2019. [En línea]. <https://core.ac.uk/download/pdf/232122808.pdf> ↑4, 13, 14
- [9] S. E. Garrido, “Optimización de los procesos de tratamiento de residuos provenientes de la remoción de arsénico en agua para consumo humano”, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, Informe

- técnico, 2019. [En línea]. <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/2159/DP-1627.5.pdf> ↑4, 13
- [10] R. Cayo, “Evaluación de la eficiencia de *Caesalpinia Spinosa* (goma de tara) y polímero catiónico sintético (Polydadmec) en el espesamiento de lodos por gravedad”, *VII Congreso Nacional de Investigación*, Perú, 2018. [En línea]. http://eventoscientificos.upeu.edu.pe/index.php/viiconacin/vii_conacin/paper/view/4473 ↑5, 13
- [11] C. Cagnetta et al., “High-rate activated sludge systems combined with dissolved air flotation enable effective organics removal and recovery”, *Bioresour. Technol.*, vol. 291, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121833> ↑5, 13
- [12] J. Suárez, A. Jácome y P. Ures, *Tecnologías de deshidratación de fangos*, Ficha técnica, Universidade da Coruña, La Coruña, España, 2015. ↑5, 7, 13, 14
- [13] S. Semiyaga, M. Okure, C. Niwagaba, P. Nyenje, and F. Kanssime, “Optimization of centrifuge operating conditions for dewatering physically conditioned fecal sludge from urban slums”, *Environ. Technol. Innov.*, vol. 8, pp. 28-39, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.03.005> ↑5, 8, 13, 14
- [14] B. Chatterjee, and D. Mazumder, “Anaerobic digestion for the stabilization of the organic fraction of municipal solid waste: A review”, *Environ. Rev.*, vol. 24, no. 4, pp. 426- 459, 2016. <https://doi.org/10.1139/er-2015-0077> ↑5, 13
- [15] P. C. Lau, D. C. L Teo, and M. A. Mannan, “Characteristics of lightweight aggregate produced from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 558-567, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.022> ↑5, 13
- [16] V. Cortés et al., *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para el 70% de la cabecera municipal de Cajamarca, Tolima*, Trabajo de pregrado, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia, 2017. ↑5
- [17] M. G. Healy et al., “Metal concentrations in lime stabilized, thermally dried and anaerobically digested sewage sludges”, *Waste Manage.*, vol. 48, pp. 404-408, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.028> ↑5, 13
- [18] [18] Y. Zhang et al., “Effect of vermicomposting on concentration and speciation of heavy metals in sewage sludge with additive materials”, *Bioresour. Technol.*, vol. 218, pp. 867- 873, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.045> ↑5, 13
- [19] K. Sharma, and V. K. Garg, “Vermicomposting of Waste: A Zero-Waste Approach for Waste Management”, M. J. Taherzadeh, K. Bolton, J. Wong, and A. Pandey (Eds.), *Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches* (pp. 133-164), Elsevier, 2019. ↑6, 13
- [20] K. Malińska, M. Zabochnicka , R. Cáceres, and O. Marfà , “The effect of precomposted sewage sludge mixture amended with biochar on the growth and reproduction of *Eisenia fetida* during laboratory vermicomposting”, *Ecol. Eng.*, vol. 90, pp. 35-41, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.042> ↑6, 13
- [21] B. Lv, Y. Cui, H. Wei, Q. Chen, and D. Zhang, “Elucidating the role of earthworms in N₂O emission and production pathway during vermicomposting of sewage sludge and rice straw”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 400, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123215> ↑6, 13
- [22] S. L. Lim, L. H. Lee, and T. Y. Wu, “Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis”, *J. Clean Prod.*, vol. 111, pp. 262-278, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.083> ↑6, 13
- [23] R. Solera, M. Pérez y D. Sales, “Biodegradación anaerobia de lodos y residuos agroalimentarios”, *Sem@foro*, no. 66, pp. 58-60, 2018. [En línea]. <https://www.semicrobiologia.org/wp-content/uploads/2021/04/25-Especial-Lodos.pdf> ↑6, 14
- [24] X. Mei, J. Tang, and Y. Zhang, “Sludge stabilization: Characteristics of the end- products and an alternative evaluative methodology”, *Waste Manage.*, vol. 105, pp. 355- 363, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.027> ↑6, 14
- [25] P. Foladori, M. Vaccari, and F. Vitali, “Energy audit in small wastewater treatment plants: methodology, energy consumption indicators, and lessons learned”, *Water Sci. Technol.*, vol. 72, no. 6, pp. 1007-1015, 2015. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.306> ↑6, 14
- [26] S. Bahar, and A.S Ciggin, “A simple kinetic modeling approach for aerobic stabilization of real waste activated sludge”, *Chem. Eng. J.* vol. 303, pp. 194-201, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.149> ↑6

- [27] X. Zhu, W. Yuan, Z. Wu, X. Wang, and X. Zhang, “New insight into sludge digestion mechanism for simultaneous sludge thickening and reduction using flat-sheet membrane- coupled aerobic digesters”, *Chem. Eng. J.*, vol. 309, pp. 41-48, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.014> ↑6, 14
- [28] S. Teoh, and L. Y. Li, “Feasibility of alternative sewage sludge treatment methods from a lifecycle assessment (LCA) perspective”, *J. Clean Prod.*, vol. 247, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119495> ↑6, 14
- [29] M. C. Tomei, D. Mosca, G. Mascolo, and U. Kunkel, “Post-aerobic treatment to enhance the removal of conventional and emerging micropollutants in the digestion of waste sludge”, *Waste Manage.*, vol. 96, pp. 36-46, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.013> ↑6
- [30] M. Kumar et al., “Influence of medical stone amendment on gaseous emissions, microbial biomass and abundance of ammonia oxidizing bacteria genes during biosolids composting”, *Bioresour.Technol.*, vol. 247, pp. 970-979, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.201> ↑6, 14
- [31] M. Kumar et al., “Heterogeneity of zeolite combined with biochar properties as a function of sewage sludge composting and production of nutrient-rich compost”, *Waste Manage.*, vol. 68, pp. 760-773, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.008> ↑6, 14
- [32] C. P. Chien et al., “A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation strategies”, *J. Clean Prod.*, vol. 146, pp. 149-157, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.066> ↑6, 14
- [33] Y. Yang, M. Kumar, X. Ren, H. Guo, and J. Lv, “Effect of bean dregs on nitrogen transformation and bacterial dynamics during pig manure composting”, *Bioresour. Technol.*, vol. 288, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121430> ↑6, 14
- [34] D. Elalami et al., “Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 114, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109287> ↑7, 14
- [35] [35] M. C. Torres, *Propuesta para el aprovechamiento de los lodos generados en la PTAR de la empresa regional Aguas del Tequendama*, Trabajo de pregrado, Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6593> ↑7
- [36] L. S. Tang, D. H. Zheng, Z. L. Zhao, and L. J. Zhang, “Dehydration of sludge using the polyethylene glycol solution dialysis method and the mechanism of dehydration”, *J. Environ. Sci. Health, Part A*, vol. 53, no. 14, pp. 1199-1206, 2018. <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1528009> ↑7
- [37] E. A. Medrano, *Diagnóstico y evaluación de la laguna de oxidación de la comunidad de Montoro a fin de reducir el impacto ambiental y la contaminación de la zona*, Trabajo de posgrado, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción Aguascalientes, Universidad Autónoma de Aguascalientes, México, 2018. [En línea]. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/1564> ↑7, 14
- [38] J. Castellanos, N. Merchán, J. Galvis y E. Manjarres, “Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos”, *Gest. Ambient.*, vol. 21, no. 2, pp. 242-251, 2018. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.75876> ↑7, 14
- [39] D. Santos, E. Teshima, S. Dias, R. Araújo y C. Silva, “Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbico de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário”, *Eng. Sanit. Ambient.*, vol. 22, no. 2, pp. 341-349, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016100531> ↑7, 14
- [40] J. Zhang et al., “The study of Na₂SiO₃ as conditioner used to deep dewater the urban sewage dewatered sludge by filter press”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 174, pp. 331-337, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.004> ↑7, 14
- [41] Y. Andrade y L. Castro, *Diseño hidráulico de una planta de tratamiento de agua residual en el hospital nuevo del municipio de Zipaquirá Colombia*, Trabajo de pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15258/1/Dise%C3%B1o%20hidraulico%20de%20una%20PTAR%20ZIPAQUIRA.pdf> ↑7, 14
- [42] M. Huttunen et al., “Specific energy consumption of cake dewatering with vacuum filters”, *Miner. Eng.*, vol. 100, pp. 144-154, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.025> ↑7, 14
- [43] G. González y L. Prado, *Elaboración de equipo piloto a escala para el tratamiento de lodos residuales para determinar el porcentaje de humedad y la eficiencia del método*, Trabajo de pregrado, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2019. [En línea]. <http://repositorio.ug.edu>

- [ec/handle/redug/42636](#) ↑7, 14
- [44] S. Hu, and Z. Chen, “Earthworm effects on biosolids characteristics in sludge treatment wetlands”, *Ecol. Eng.*, vol. 118, pp. 12-18, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.016> ↑8, 15
- [45] S. Hu et al., “Drained water quality in sludge treatment wetlands: Effects of earthworm densities and plant species”, *J. Clean Prod.*, vol. 247, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119128> ↑8, 15
- [46] S. Wang et al., “Deciphering of organic matter and nutrient removal and bacterial community in three sludge treatment wetlands under different operating conditions”, *J. Environ. Manage.*, vol. 260, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110159> ↑8, 15
- [47] S. M. Iskander, S. Zou, B. Brazil, J. T. Novak, and Z. He, “Energy consumption by forward osmosis treatment of landfill leachate for water recovery”, *Waste Manage.*, vol. 63, pp. 284-291, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.026> ↑8, 15
- [48] F. Sun, D. Lu, J. Shin, T. Haur, and Y. Zhou, “Mitigation of membrane fouling in a seawater-driven forward osmosis system for waste activated sludge thickening”, *J. Clean Prod.*, vol. 241, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118373> ↑8, 15
- [49] A. Ding et al., “In situ coagulation versus pre-coagulation for gravity-driven membrane bioreactor during decentralized sewage treatment: Permeability stabilization, fouling layer formation and biological activity”, *Water Res.*, vol. 126, pp. 197-207, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.027> ↑8, 15
- [50] H. Wei, B. Gao, J. Ren, A. Li, and H. Yang, “Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review”, *Water Res.*, vol. 143, pp. 608-631, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029> ↑8, 15
- [51] G. Han, Z. Cheng, and T. Chung, “Thin-film composite (TFC) hollow fiber membrane with double-polyamide active layers for internal concentration polarization and fouling mitigation in osmotic processes”, *J. Membr. Sci.*, vol. 523, pp. 497-504, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.10.022> ↑8, 15
- [52] D. Y. Fan, B. Wu, Y. Chen, Z. Dong, and R. Wang, “A novel thin film composite hollow fiber osmotic membrane with one-step prepared dual-layer substrate for sludge thickening”, *J. Membr. Sci.*, vol. 575, pp. 98-108, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.01.007> ↑8, 15
- [53] Y. Liu, L. Ding, B. Wang, Q. He, and D. Wang, “Using the modified pine wood as a novel recyclable bulking agent for sewage sludge composting: Effect on nitrogen conversion and microbial community structures”, *Bioresour. Technol.*, vol. 309, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123357> ↑9
- [54] B. Pacheco, *Evaluación del proceso de biotransformación de biosólidos procedentes de la planta de tratamiento de agua residual de Tunja - Boyacá, mediante compostaje con adición de larvas de escarabajos*, Trabajo de posgrado, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia, 2019. ↑9
- [55] F. Zhang et al., “Energy consumption and exergy analyses of a supercritical water oxidation system with a transpiring wall reactor”, *Energy Conv. Manag.*, vol. 145, pp. 82- 92, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.082> ↑9, 15
- [56] Z. Yan, B. Örmeci, Y. Han, and J. Zhang, “Supercritical water oxidation for treatment of wastewater sludge and recalcitrant organic contaminants”, *Environ. Technol. Inno.*, vol. 18, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100728> ↑9, 15
- [57] L. Qian et al., “Treatment of sewage sludge in supercritical water and evaluation of the combined process of supercritical water gasification and oxidation”, *Bioresour. Technol.*, vol. 176, pp. 218-224, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.125> ↑9, 15
- [58] E. Adar, M. Ince, and M. Sinan, “Supercritical water gasification of sewage sludge by continuous flow tubular reactor: A pilot scale study”, *Chem. Eng. J.*, vol. 391, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123499> ↑9, 15
- [59] E. Adar, B. Karatop, M. Ince, and M. Sinan, “Comparison of methods for sustainable energy management with sewage sludge in Turkey based on SWOT-FAHP analysis”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 62, pp. 429-440, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.007> ↑9, 15
- [60] Q. Zeng et al., “Electrochemical pretreatment for stabilization of waste activated sludge: Simultaneously enhancing dewaterability, inactivating pathogens and mitigating hydrogen sulfide”, *Water Res.*, vol. 166, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115035> ↑9, 15, 16
- [61] N. Shivasankaran, A. V. Balan, S. P. Sankar, S. Magibalan, and C. M. Dinesh, “Removal of hydrogen sulphide and odour from tannery amp; textile effluents”, *Mater Today Proc.*, vol. 21, no. 1, pp. 777-781, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.242> ↑9, 15
- [62] G. Zhou, Y. Gu, H. Yuan, Y. Gong, and Y. Wu, “Selecting sustainable technologies for disposal of municipal

- sewage sludge using a multi-criterion decision-making method: A case study from China”, *Resour. Conserv. Recy.*, vol. 161, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104881> ↑10
- [63] M. I. García, *Tratamiento de lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de la concentración de coliformes fecales y totales*, Trabajo de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, Cuenca, Ecuador, 2016. [En línea]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12044/1/UPS-CT005866.pdf> ↑10
- [64] Z. Yin, M. Hoffmann, and S. Jiang, “Sludge disinfection using electrical thermal treatment: The role of ohmic heating”, *Sci. Total Environ.*, vol. 615, pp. 262-271, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.175> ↑10, 15
- [65] X. Liu *et al.*, “Pyrolysis and subsequent direct combustion of pyrolytic gases for sewage sludge treatment in China”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 128, pp. 464-470, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.091> ↑10, 16
- [66] D. Barry, C. Barbiero, C. Briens, and F. Berruti “Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge”, *Biomass Bioenerg.*, vol. 122, pp. 472-480, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.041> ↑10, 16
- [67] S. Nanda, A. K. Dalai, F. Berruti, and J. A. Kozinski., “Biochar as an exceptional bioresource for energy, agronomy, carbon sequestration, activated carbon and specialty materials”, *Waste Biomass.*, vol. 7, pp. 201-235, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9459-z> ↑10, 16
- [68] A. Zaker, Z. Chen, X. Wang, and Q. Zhang, “Microwave-assisted pyrolysis of sewage sludge: A review”, *Fuel Process. Technol.*, vol. 187, pp. 84-104, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.12.011> ↑10, 16
- [69] J. Rumky *et al.*, “Electro-dewatering treatment of sludge: Assessment of the influence on relevant indicators for disposal in agriculture”, *J. Environ. Manage.*, vol. 268, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110689> ↑10
- [70] H. Lv *et al.*, “Effects of temperature variation on wastewater sludge electro- dewatering”, *J. Clean Prod.*, vol. 214, pp. 873-880, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.033> ↑10, 16
- [71] [71] G. Vilardi, I. Bavasso, M. Scarsella, N. Verdone, and L. Di Palma, “Fenton oxidation of primary municipal wastewater treatment plant sludge: process modelling and reactor scale-up”, *Process Saf. Environ. Protect.*, vol. 140, pp. 46-59, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.002> ↑11, 16
- [72] M. C. Amie, K. Kai, S. Peng, and Y. Zhang, “Sludge dewaterability by dual conditioning using Fenton’s reagent with *Moringa oleifera*”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102838> ↑11, 16
- [73] N. Ding *et al.*, “Improving the dewaterability of citric acid wastewater sludge by Fenton treatment”, *J. Clean Prod.*, vol. 196, pp. 739-746, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.139> ↑11, 16
- [74] J. Guo, and C. Chen, “Sludge conditioning using the composite of a bioflocculant and PAC for enhancement in dewaterability”, *Chemosphere*, vol. 185, pp. 277-283, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.111> ↑11
- [75] Y. Wu *et al.*, “Possibility of sludge conditioning and dewatering with rice husk biochar modified by ferric chloride”, *Bioresour. Technol.*, vol. 205, pp. 258-263, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.020> ↑11
- [76] J. Li *et al.*, “Modification and use of biochar from wheat straw (*Triticum aestivum* L.) for nitrate and phosphate removal from water”, *Desalin. Water Treat.*, vol. 57, no. 10, pp. 4681-4693, 2016. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.994104> ↑11
- [77] Z. Guo *et al.*, “Dewatering performance of sewage sludge under pretreatment with modified corn-core powder”, *Sci. Total Environ.*, vol. 684, pp. 402-412, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.366> ↑11
- [78] S. W. Puasa, K. N. Ismail, M. Z. A. Musman, and N.A. Sulong, “Enhanced oily sludge dewatering using plant-based surfactant technology”, *Mater Today Proc.*, vol. 19, no. 4, pp. 1159-1165, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.009> ↑12, 16
- [79] R. Guan *et al.*, “Functionality of surfactants in waste-activated sludge treatment: A review”, *Sci. Total Environ.*, vol. 609, pp. 1433-1442, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.189> ↑12, 16
- [80] C. Hong, Z. Wang, Y. Si, Q. Yang, and Y. Xing, “Improving sludge dewaterability by combined conditioning with Fenton’s reagent and surfactant”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 101, pp. 809-816, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7939-0> ↑12

Geraldine Cárdenas Torrado

Ingeniera Ambiental de la Universidad Francisco de Paula Santander; Magíster en Gestión Ambiental de la Universidad de Antioquia. Integrante del Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental - GAIA, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Correo electrónico: geraldine.cardenast@udea.edu.co

Francisco José Molina Pérez

Ingeniero Sanitario de la Universidad de Antioquia; Especialista en Ingeniería Ambiental de la Universidad de São Paulo; Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle; Doctor en Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Santiago de Compostela; Docente de la Universidad de Antioquia; Coordinador del Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental - GAIA, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Correo electrónico: francisco.molina@udea.edu.co

Generación y composición de residuos sólidos domiciliarios en Honduras durante la pandemia Covid-19

Household Waste Generation and Composition in Honduras during the Covid-19 Pandemic

Norvin Requena Sánchez¹, Dalia Carbonel Ramos^{1*}, Rómulo Romero Centeno¹

¹Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería (Lima, Perú).

*Correspondence E-mail: dcarbonelr@uni.pe

Received: 19th/May/2021. Modified: 22th/November/2021. Accepted: 10th/March/2022

Abstract

Context: Solid waste management during the Covid-19 pandemic has caused environmental effects that have not been sufficiently studied, especially in Latin American cities. This study presents a characterization of waste in Honduras during the Covid-19 lockdown, which uses a novel methodology that allows collecting information without the need for fieldwork.

Method: This study was implemented in three phases (data recording, training, and data generation). All activities were carried out with the support of virtual tools such as forms and group calls. The participants received four training sessions and characterized their residues for seven days.

Results: The waste generation per capita was 0,475 kg/inhab/day at the national level and 0,549 kg/inhab/day in Distrito Central [the central district]. There is an increase in the proportion of non-usable inorganic waste and a decrease in organic and recyclable waste. It is estimated that each household generates 3,7 masks nationwide and 4 masks in Distrito Central on a weekly basis.

Conclusions: The per-capita generation of household waste decreased during the lockdown, which may be due to a decline in families' purchasing power given the reduction in the economic activities. The appearance of a new residue is recorded: disposable masks and gloves.

Keywords: waste management, waste generation, disposable masks

Acknowledgments: To the students of the Solid Waste Technical Team at the Department of Environmental Engineering of Universidad Nacional de Ingeniería in Peru, to the Department of Engineering of Universidad Nacional Autónoma de Honduras, to the Japan International Cooperation Agency's Honduras office, to the Honduran Association of Japan Scholarship Holders, to the Inter-municipal Service Company, and to the San Juan River Watershed Commonwealth.

Language: spanish.

Open access



Cite as: Requena, N., Carbonel, D., Romero, R. "Generación y composición de residuos sólidos domiciliarios en Honduras durante la pandemia Covid-19". *Ing.*, vol. 27, no. 3, 2022. e17989.

<https://doi.org/10.14483/23448393.17989>

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

Resumen

Contexto: La gestión de residuos sólidos durante la pandemia del Covid-19 ha ocasionado efectos ambientales que no han sido lo suficientemente estudiados, especialmente en las ciudades de América Latina. En este estudio se presenta una caracterización de residuos en Honduras durante la cuarentena por Covid-19, utilizando una metodología innovadora que permite recolectar información sin necesidad de realizar trabajo de campo.

Método: El estudio se implementó en tres fases (registro de datos, capacitación y generación de información). Todas las actividades se realizaron con apoyo de herramientas virtuales como formularios y llamadas grupales. Los participantes recibieron cuatro sesiones de capacitación y caracterizaron sus residuos durante siete días.

Resultados: La generación per cápita fue de 0,475 kg/hab/día a nivel nacional y 0,549 kg/hab/día en el Distrito Central. Se observa un aumento en la proporción de residuos inorgánicos no aprovechables y una disminución de residuos orgánicos y aprovechables. Semanalmente se estima que cada vivienda genera 3,7 mascarillas a nivel nacional y 4 mascarillas en el Distrito Central.

Conclusiones: La generación per cápita de residuos domiciliarios disminuyó durante la cuarentena, lo cual puede deberse a una menor capacidad de adquisición de las familias por la reducción en las actividades económicas. Se registra la aparición de un nuevo residuo: las mascarillas y guantes descartables.

Palabras clave: gestión de residuos, generación de residuos, mascarillas descartables

Agradecimientos: A los alumnos del Equipo Técnico de Residuos Sólidos de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería en Perú, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, la oficina en Honduras de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón, la Asociación Hondureña de Becarios de Japón, la Empresa Intermunicipal de Servicios y la Mancomunidad Cuenca del Río San Juan.

Idioma: español

1. Introducción

A marzo del 2021 Honduras presenta un total de 174.243 casos acumulados de Covid-19 [1]. El 14 marzo del 2020 el país decretó estado de emergencia nacional, con condiciones estrictas de confinamiento, cierre de instituciones educativas, cese de actividades comerciales y limitación del libre tránsito [2]. El proceso de reactivación económica por fases inició desde el mes de junio del 2020 [3]. Durante el mes de agosto gran parte de los municipios del país, incluyendo el Distrito Central, se encontraba en la Fase 1 de reapertura que implicaba la reincorporación del 20 % de empleados. En setiembre inició la Fase 2 que implicó la reincorporación del 40 % al 60 % de empleados [4].

Entre los efectos ambientales de la pandemia del Covid-19 se encuentran los cambios en la generación y composición de residuos domiciliarios [5], urbanos [6]- [8] y hospitalarios [9], [10]. A pesar de que la recolección de residuos sólidos es un servicio esencial; datos sobre la misma, especialmente en las ciudades de América Latina, no son difundidos y en algunos casos ni recopilados [11]. En la región se han realizado varios estudios sobre el impacto del Covid-19 en los residuos sólidos. Como ejemplo están las investigaciones sobre la contaminación de las costas y playas en América del Sur con textiles poliméricos antivirales provenientes de equipos de protección personal (EPP) [12]; la presencia de EPP en la Costa de Lima, Perú [13], o la distribución y densidad de mascarillas en las playas turísticas de Chile [14]. Estas investigaciones evaluaron la presencia,

mas no la generación per cápita, de este tipo de residuos. De otro lado, tres estudios realizados en Brasil analizaron la influencia de la pandemia en la generación de residuos de comida [15], residuos reciclables [16] y el en el ciclo de la gestión de residuos [17], [18]. El primero de ellos, a pesar de que presenta información cuantitativa, no recoge datos de la composición total de los residuos generados en el hogar. El estudio implementado en São Paulo por Urban y Nakada [18] se sustenta en información sobre la generación mensual de residuos municipales publicada durante los últimos 10 años por el municipio. Este último, por cierto, es un caso excepcional pues son pocos los países de la región que cuentan con una base similar de datos de libre acceso. A pesar de la relevancia y aporte de estos artículos y de la importancia de estudiar diferentes tipos de residuos en un contexto de pandemia, hasta donde es conocimiento de los autores, ningún estudio en la región ha recopilado información cuantitativa sobre generación y composición de residuos sólidos domiciliarios durante la pandemia.

En Honduras la única información disponible sobre residuos sólidos se refiere a los residuos hospitalarios del Distrito Central; en el pico de la pandemia llegaron a producirse 97 toneladas semanales, durante agosto este valor se mantuvo entre 54 y 57 toneladas [19]. En este país los municipios afrontan problemas gerenciales, administrativos, técnicos y operativos para brindar servicios eficientes y eficaces de recolección, transporte y disposición final de residuos [20]. Según datos del 2010 solo el 26,7 % de los municipios contaba con planes de manejo de residuos [11]. La información disponible sobre gestión de residuos está dispersa y proviene de estudios hechos por la cooperación internacional (Organización Panamericana de la Salud - OPS, Banco Interamericano de Desarrollo y Agencia de Cooperación Internacional del Japón - Jica).

En este contexto, este estudio presenta información sobre la generación y composición de los residuos durante la pandemia del Covid-19 en Honduras. Para ello se aplicó una metodología innovadora que permite recolectar información sin necesidad de hacer trabajo de campo, lo que reduce el riesgo de exposición. Esta metodología nace de la necesidad de recopilar información en condiciones de confinamiento y se apoya en medios virtuales para la convocatoria, la capacitación, el registro y la entrega de información. Además de facilitar la obtención de información cuantitativa sobre generación y composición de residuos sólidos domiciliarios; esta metodología sirve también como una herramienta de capacitación y sensibilización ciudadana para la segregación en la fuente de residuos. Estos tres componentes: información, capacitación y sensibilización son aspectos esenciales para la gestión integral de residuos sólidos municipales.

2. Metodología

El diseño de la metodología, la coordinación y la implementación del estudio fue realizado por el Equipo Técnico de Residuos Sólidos de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería en Perú.

2.1. Participantes y recopilación de información

El estudio se realizó con alumnos universitarios y voluntarios convocados por redes sociales. Los alumnos universitarios fueron 25 estudiantes del curso de Ingeniería Ambiental de la carrera de

Ingeniería Química de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras. La convocatoria por redes sociales fue realizada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, la oficina de Honduras de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón, la Asociación Hondureña de Becarios de Japón, la Empresa Intermunicipal de Servicios y la Mancomunidad Cuenca del Río San Juan.

El presente estudio se implementó en tres fases: (i) fase de registro de datos y sensibilización, (ii) fase de capacitación y (iii) fase de generación de información (figura 1). Todas las fases se realizaron virtualmente, en total los participantes recibieron cuatro sesiones de capacitación.



Figura 1. Secuencia metodológica de estudio

La primera semana de agosto del 2020 se hizo una convocatoria en redes sociales para la inscripción al estudio. En la fase 1 las personas inscritas se registraron ingresando datos personales y de vivienda. Con el objetivo de conocer las prácticas de los participantes relacionadas con la gestión de residuos, los participantes respondieron nueve preguntas de opción cerrada. Las preguntas fueron sobre sus hábitos de reducción, segregación, aprovechamiento y almacenamiento de residuos sólidos (tabla I). La fase 1 terminó con una sesión de sensibilización en gestión de residuos sólidos.

Tabla I. Indicadores de la encuesta

Aspecto	Indicadores
Almacenamiento	Material utilizado
Recolección	Frecuencia de recolección
	Horario de recolección
Segregación	Capacitación o experiencia previa
	Entrega de residuos a un reciclador
	Tipos de residuos separados
Aprovechamiento	Formas de aprovechamiento de residuos orgánicos
Reducción	Compras de bolsas reutilizables

En la fase 2 se desarrollaron dos sesiones de capacitación en segregación de residuos orgánicos e inorgánicos. En la primer sesión se presentaron a los participantes diferentes opciones para reducir la cantidad de residuos que se entregan al camión recolector para la disposición final. Una de ellas fue la elaboración de ecoladrillos. El ecoladrillo consiste en residuos inorgánicos no aprovechables limpios y compactados en un botella de tereftalato de polietileno (PET); los ecoladrillos pueden ser utilizados en construcciones menores como bancos o edificaciones de un solo nivel. En la segunda sesión se explicó la metodología de los 7 días de estudio, los tipos de residuos a clasificar y ejemplos para cada uno de ellos. Al finalizar estas sesiones se instruyó a los participantes para que instalaran contenedores separados de residuos en sus hogares y replicaran la metodología aprendida en casa. De esta manera toda la familia podría participar en la separación de residuos durante la fase 3.

La fase 3 tuvo una duración de 7 días, periodo en el cual los participantes registraron diariamente los pesos y la composición de sus residuos. En el día 0, un domingo, retiraron todos los residuos de los contenedores del hogar para iniciar el día 1 (lunes) sin ningún residuo. Del día 1 al día 7 (de lunes a domingo), separaron y pesaron sus residuos diariamente. Los residuos se clasificaron según se indica en la tabla II. Los participantes entregaron la información recolectada el día 4 (del día 1 al día 3) y el día 7 (del día 4 al día 7) usando un formulario de Google, indicando el peso según el tipo de residuo. En esta fase se realizó una última sesión de capacitación en economía circular.

En la tabla II se detalla la clasificación de los residuos. Es importante precisar que el ecoladrillo responde al componente de sensibilización de la metodología, pues busca que los participantes aprovechen al máximo los residuos que generan. Las mascarillas y los guantes se clasificaron como residuos peligrosos; dado que no es posible identificar si estos EPP contienen o no el virus del Covid-19. Como medida de prevención muchos gobiernos nacionales recomiendan disponer de estos como residuos infecciosos o en contenedores especiales para su posterior incineración [21], [22].

Para asegurar una adecuada categorización de los residuos por parte de los participantes se implementaron las siguientes medidas: (i) capacitación en tipos de residuos y estudios de caracterización de residuos previa al inicio del pesaje, en la fase 2; (ii) comunicación con los participantes durante los 7 días de levantamiento de información, en la fase 3 y; (iii) revisión de las fotografías enviadas por los participantes, donde registraron los residuos colocados en cada uno de los contenedores de segregación.

En la figura 2 se muestran fotografías de la implementación del estudio de caracterización de residuos por parte de los participantes.

2.2. Procesamiento de la información

La información se procesó según dos grupos: (i) respuestas a la encuesta y (ii) caracterización de residuos. Los datos de cada uno de los dos grupos se analizaron según el ámbito geográfico: Distrito Central y nacional. El primer grupo, como su nombre lo indica, abarca solamente los participantes de dicho distrito. El ámbito nacional incluye todos los participantes.

Tabla II. Clasificación de residuos en el estudio

Tipo	Detalle	Ejemplos
Orgánicos	Orgánicos	Restos de cáscaras, frutas, verduras, hortalizas, malezas y otros residuos verdes similares
Inorgánicos	Aprovechables diferenciados	Papeles, hojas de cuadernos o revistas, papel periódico, cartón liso o corrugado, botellas o envases de vidrio, tetrapack, latas, plástico (polipropileno, tereftalato de poliestireno, polietileno de alta densidad, policloruro de vinilo u otros similares).
	Ecoladrillo	Bolsas de plástico, material de empaque y envolturas
	Aceite usado	Aceite usado de cocina
No	Peligrosos	Mascarillas, guantes, pilas, focos, etc.
	Sanitarios	Papel higiénico, toallas sanitarias, pañales, gasas, etc.
aprovechables	Inertes y otros	Cabello, textiles, caucho, jebes, poliestireno expandido, residuos de barrido de la casa, sobras de guiso de comida, aderezos y huesos, papel toalla usado en la cocina, etc.

En total se recibieron 71 encuestas (30 del Distrito Central y 41 a nivel nacional) y 54 formularios del estudio de caracterización (22 del Distrito Central y 32 a nivel nacional). El número de muestras de encuestas fue mayor al número de muestras de caracterización de residuos. Esto se debe a que no todos los participantes presentaron o recolectaron datos de más de 3 días, también se descartaron las muestras que no fueron pesadas con balanza (sino usando el método del tanteo o hidrostático).

Los parámetros estadísticos de los datos de caracterización de residuos se hallaron según la fórmula para el cálculo del tamaño de la muestra (Ecuación 1) sugerido por el Centro Panamericano de la Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [23]:

$$n = \frac{Z^2_{1-\alpha/2} N \sigma^2}{(N - 1)E^2 + Z^2_{1-\alpha/2} \sigma^2} \tag{1}$$

Donde n es el tamaño de la muestra, $Z^2_{1-\alpha/2}$ el nivel de confianza, N el tamaño de la población, la desviación estándar y E el error permisible de la generación per cápita (GPC). Los datos de la muestra se validaron usando la prueba de significación para la media de la población con una desviación estándar conocida [23]. La GPC (kg/hab./día) se determinó dividiendo el peso total diario de los residuos entre el número de muestras. Para calcular la composición se halló el porcentaje de cada tipo de residuos teniendo en cuenta los datos del peso total de los residuos y el peso de cada tipo de residuo [23].

2.3. Limitaciones del estudio

Dada la naturaleza participativa y voluntaria de la metodología propuesta existe una serie de limitaciones respecto a la muestra posible de evaluar y a la representatividad de los resultados obtenidos. En primer lugar, los participantes requieren de una conexión a internet en su casa, esto limita la



(a)



(b)



(c)

Figura 2. Desarrollo del estudio de caracterización de residuos (a) tachos para segregación de residuos, (b) elaboración del ecoladrillo y (c) capacitación a miembros de la familia

aplicación de la metodología de estudio en zonas rurales y de bajo nivel socio económico. En segundo lugar, la participación en el estudio representa un gran compromiso (para cumplir los 7 días de estudio) e inversión de tiempo por parte de los participantes (aproximadamente 1 hora diaria durante 7 días). Esto hace que solo las personas que reconozcan la relevancia de un estudio de caracterización de residuos sólidos estén lo suficientemente motivadas para completar el levantamiento de datos. Un tercer aspecto es la variabilidad en el empleo de diferentes balanzas por parte de cada participante, este error puede afectar el cálculo de la GPC y la composición.

3. Resultados

3.1. Hábitos de generación de residuos

3.1.1. Almacenamiento

El material más usado para sacar los residuos de la casa, tanto en el Distrito Central (74 %) como a nivel nacional (70 %), son las bolsas de plástico. Las cajas de cartón son el segundo material más usado en el Distrito Central (16 %) y los sacos, costales y similares el segundo material más usado a nivel nacional (16 %).

Estos resultados concuerdan con los presentados en el Plan Director de Residuos Municipales del Distrito Central donde se afirma que la forma de almacenamiento de residuos en los frentes de las viviendas comúnmente es con bolsas de plástico; cajas de cartón, baldes, sacos y otro tipo de recipientes se reportan en menor medida [24].

3.1.2. Frecuencia y horario de recolección

La mayor parte de los participantes de los dos ámbitos de estudios (59 % a nivel nacional y 76% en el Distrito Central) sacan sus residuos cada 2 o cada 3 días. En el Distrito Central son muy pocas las personas que sacan los residuos con una frecuencia mayor a 3 días (10 %), a nivel nacional este porcentaje es algo mayor (28 %).

En el Distrito Central, según la Superintendencia de Aseo Municipal (AMDC) [25], en el año 2019 la recolección de residuos aumentó a una frecuencia de 3 veces por semana. Esto concuerda con el alto porcentaje de personas que sacan sus residuos cada 2 días en dicho lugar. Incluso se afirma que en más del 60 % de barrios y colonias la recolección se hace 2 veces al día [26], sin embargo solo el 13 % de los encuestados del Distrito Central manifestó sacar sus residuos diariamente.

Entre los participantes del estudio la cobertura de recolección fue del 87 % a nivel nacional y del 97 % en el Distrito Central. Estas respuestas reflejan la diferencia entre los datos de cobertura de recolección nacional y en el Distrito Central. En el año 2010 se reportó una cobertura de recolección nacional del 64,4 % [11], mientras que para el Distrito Central se reportó una cobertura del 91,43% [25].

3.1.3. Segregación de residuos

La mayor parte de los participantes del estudio no contaba con capacitación previa o experiencia en segregación de residuos (66 % a nivel nacional y 70 % en el Distrito Central).

A nivel nacional el 63 % manifestó entregar sus residuos a un reciclador antes de la pandemia entre siempre y algunas veces, en el Distrito Central esta proporción fue del 60 %. El 17 % a nivel nacional y el 10 % en el Distrito Central indicó que en su municipio no hay recicladores. Dada la poca implementación de programas municipales de segregación en la fuente, se puede asumir que los recicladores referidos son informales [27]. El elevado porcentaje de personas que entregan sus residuos a un reciclador tiene su correlato en los reportes de la ciudad de Tegucigalpa donde

durante los últimos años se ha evidenciado un aumento en el reciclaje informal; se calcula que de las 70 toneladas de residuos que se generan diariamente, 54 son captadas por recicladores antes de que lleguen a la infraestructura de disposición final de la ciudad [28].

A nivel nacional el 27 % clasifica sus residuos en tres grupos: orgánicos, aprovechables y no aprovechables. En el Distrito Central el 33 % clasifica sus residuos en dos grupos: aprovechables y el resto. Es muy poco el porcentaje de hogares que solo segrega residuos orgánicos, lo usual es que aquellos que segregan sus residuos en la fuente prioricen la segregación de los residuos aprovechables.

3.1.4. Aprovechamiento de residuos orgánicos

En el Distrito Central el 47 % indica realizar el aprovechamiento de los residuos orgánicos, a nivel nacional asciende a 65 %. La gran mayoría (87 % a nivel nacional y 93 % en el Distrito Central) aprovecha este tipo de residuos para la elaboración de abono orgánico, principalmente compost. En Honduras, pese a que la materia orgánica representa un alto porcentaje de los residuos sólidos domiciliarios, las prácticas de compostaje no se encuentran muy desarrolladas [27]. Sin embargo, los resultados de la encuesta realizada demuestran que la valorización de residuos orgánicos domiciliarios para la elaboración de compost es una práctica que puede resultar autosostenible a escala familiar.

3.1.5. Compras en bolsas reutilizables

El uso de bolsas reutilizables es una práctica extendida en el país. Solo el 17 % de los participantes (tanto a nivel nacional como en el Distrito Central) manifiesta nunca usar bolsas reutilizables para realizar las compras. En Tegucigalpa, por ejemplo, varios supermercados promueven el uso de bolsas reutilizables entre sus clientes [29]- [31]. Además, en ocho municipios del país (Guanaja, Roatán, Útila, El Porvenir, Puerto Cortés, Santa Cruz de Yojoa, Gracias y Trujillo) se han promulgado ordenanzas municipales que prohíben el empleo de plástico de un solo uso [32]. A pesar de que a raíz de la pandemia muchos de estos municipios hayan tenido que retroceder en estas prohibiciones [33] es posible que los hábitos adquiridos desde antes de la pandemia se mantengan durante el estado de emergencia

3.2. Caracterización de residuos

3.2.1. GPC de residuos domiciliarios

En la tabla III se detallan los parámetros estadísticos y la GPC en el Distrito Central y en el ámbito nacional.

Tabla III. Parámetros estadísticos de estudio

Ámbito	Muestra	Coficiente de confianza	Error	Desviación estándar	GPC (kg/hab./día)
Distrito Central	22	1,96	25 %	0,323	0,549
Nacional	53	1,96	16 %	0,271	0,475

Como se observa en la tabla III la GPC del Distrito Central fue mayor que la GPC nacional. Este resultado es de esperarse dado que en el Distrito Central se concentra una mayor área urbana, lo que suele resultar en mayor acceso a recursos y por ende una mayor generación de residuos.

Uno de los objetivos de este estudio de caracterización de residuos sólidos durante la pandemia es poder evaluar si la generación ha aumentado o disminuido producto de la cuarentena, para ello es necesario comparar la GPC de estudio con los valores referenciales más recientes. Para el caso de Honduras esto es un reto, los datos de la GPC a nivel nacional y en el Distrito Central se encuentran dispersos y en algunos casos no guardan relación entre sí. En la tabla IV se muestran los datos existentes de la GPC municipal y domiciliaria entre los años 1999 y 2018 en Honduras.

Tabla IV. GPC municipal y domiciliaria nacional y en el Distrito Central

GPC municipal (kg/hab./día)	GPC domiciliaria (kg/hab./día)	Año	Fuente
Nacional			
0,65		2015	[34]
	0,61	2010	[11]
0,45		2005	[35]
	0,50	2003	[36]
Distrito Central			
0,675		2018	[25]
	0,94	2010	[11]
			[37]
	0,459-0,758	2010*	
	0,54	2003	[36]
0,759		2003	[38]
	0,328-0,541	1998	[37]
*: Proyección de 1998			

Se observa que no en todos los casos la GPC municipal es mayor a la GPC domiciliaria. La GPC municipal siempre deberá de ser mayor a la GPC domiciliaria pues incluye, además de los residuos domiciliarios, los residuos comerciales, de mercados, barrido de calles, entre otros. Se han colocado ambos datos en la tabla IV para mostrar lo contradictorio de la información, pues en algunos casos la GPC municipal es menor a la domiciliaria. Por ejemplo, la GPC domiciliaria del Distrito Central del año 2010 (0,94 kg/hab./día) es mayor a la GPC municipal del año 2018 (0,675 kg/hab./día).

Otro punto para analizar, respecto a los datos de la GPC, es la variedad de las fuentes; aunque los datos más recientes sí provienen de organismos gubernamentales. La información más reciente tanto de la GPC municipal nacional como del Distrito Central provienen de Mi Ambiente (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente de Honduras) y de la AMDC respectivamente. Sin embargo, antes del 2015 los datos de la GPC domiciliaria nacional y del Distrito Central más citados provenían de la OPS, determinados en el contexto de evaluaciones regionales. Es esta diversidad de fuentes y años de estudio lo que podría originar las contradicciones señaladas líneas arriba.

Tabla V. Composición de residuos sólidos nacional y en el Distrito Central

Tipos de residuo	Nacional	Distrito Central
Orgánicos	54.33%	46.45%
Aprovechables diferenciados	14.92%	14.61%
Ecoladrillo	2.87%	2.74%
Aceite usado	1.28%	0.42%
Peligrosos	1.52%	1.43%
Sanitarios	10.99%	14.36%
Inertes y otros	13.99%	20.00%

Para poder comparar la GPC domiciliaria se usarán los valores más recientes, 0,61 kg/hab./día a nivel nacional y 0,94 kg/hab./día en el Distrito Central (aunque este último valor parezca un poco elevado considerando que es mayor a la GPC municipal del 2018). Dada la variabilidad de los datos, no se realizó un análisis de variación porcentual entre la GPC domiciliaria anterior y la actual; sin embargo (y considerando el error indicado en la tabla III), se puede concluir que para ambos casos la GPC domiciliaria durante la pandemia ha disminuido.

El impacto en la generación de residuos sólidos en diferentes ciudades del mundo ha sido muy variado. En Estados Unidos se reportó un incremento de hasta el 30 % de residuos sólidos domiciliarios hacia fines de abril [39], en México se ha reportado también en varios municipios un aumento en la generación de residuos [40]. Sin embargo, la situación ha sido la opuesta en otros lugares; el Gobierno de la República Popular China informó el 11 de marzo que la cantidad de residuos sólidos municipales generados en ciudades grandes y medianas se redujo en un 30 % durante el brote de Covid-19 [41]. En ciudades como Shanghái también se reportó una reducción del 23 % en residuos sólidos municipales [42], igual ocurrió en Lima [43], Milán y Barcelona [44].

El aumento en la generación de residuos se ha explicado por un mayor consumo de productos de limpieza, de protección, desechables, entregas a domicilio y compras por internet [44]- [46]. De otro lado, la disminución en la generación de residuos puede deberse a una menor capacidad de adquisición en el hogar por el cierre de un gran número de actividades económicas [47], [48]. Otro factor que podría explicar la disminución de residuos es la selección de la muestra, como se explica la sección de limitaciones del estudio. Los participantes podrían haber adoptado prácticas de reducción de residuos previo al inicio del estudio o, incluso, como resultado de las sesiones de sensibilización recibidas antes de la fase 3.

3.2.2. Composición de residuos domiciliarios

En la tabla V se presenta la composición de residuos domiciliarios nacional y en el Distrito Central.

La composición de residuos domiciliarios entre el Distrito Central y a nivel nacional es relativamente similar. Resalta la proporción de orgánicos y de peligrosos que es ligeramente menor en el Distrito Central.

Así como en el caso de la GPC los datos de composición son escasos. En la tabla VI se muestra la información que se ha podido recuperar. Para la ciudad de Tegucigalpa solamente existen los datos elaborados por Jica en 1999 y la proyección hecha ese año para el 2010. Los datos más actuales

son de Mi Ambiente, aunque son a nivel nacional y de residuos municipales; a pesar de ello, estos son los que se usarán como referencia para comparar con los datos de este estudio.

Tabla VI. Composición de residuos en Tegucigalpa y a nivel nacional

Categoría	Residuos sólidos domiciliarios		Residuos sólidos municipales
	Residuos sólidos domiciliarios Jica, 1991* Tegucigalpa	Residuos sólidos domiciliarios (Proyección de Jica para el 2010*) Tegucigalpa	Residuos sólidos municipales 2019** Nacional
Orgánicos			57,9 %
Residuos de alimentos	47,2 %	40 %	
Hierbas y madera	11,6 %	12 %	
Inorgánicos			
Papel y cartón	11,5 %	15 %	17,36 %
Plásticos	7,1 %	8 %	14,41 %
Metales	1,9 %	4 %	2,11 %
Vidrio	3,5 %	4 %	1,27 %
Cerámica y piedras	12,1 %	10 %	
Otros (textiles, cuero, goma, etc.)	5,1 %	6 %	5,64 %

*Datos de [49]

**Datos de [50]

Dada la disparidad en la clasificación de la composición de los residuos entre los resultados del 2019 (tabla VI) y del presente estudio (tabla V), solo se pueden hacer comparaciones con categorías amplias de residuos. Al comparar la composición de residuos municipales del 2019 con la composición hallada en el presente estudio se observa que la proporción de orgánicos y aprovechables es menor para el presente caso, y la proporción de residuos inorgánicos no aprovechables es mayor. Como se observa en la tabla V la proporción de residuos sanitarios representa la mayor cantidad de residuos inorgánicos no aprovechables; sin embargo, llama la atención que los residuos sanitarios no estén clasificados en la composición de los otros informes (tabla VI). Podría asumirse que los residuos sanitarios se encuentran dentro de la categoría otros, en ese caso la mayor proporción de residuos sanitarios en las viviendas durante la cuarentena podría explicarse porque todos los miembros de la familia se encuentran todo el día en sus casas [51], [52].

3.2.3. Residuos de guantes y mascarillas

Los participantes indicaron que los residuos peligrosos estaban compuestos de mascarillas, guantes, y en menor proporción, pilas, focos de luz y jeringas. En la tabla VII se muestra la cantidad de mascarillas y guantes que se generaron durante la semana de estudio en cada hogar y por persona.

Tabla VII. Cantidad de mascarillas y guantes generados

	Nacional		Distrito Central	
	Hogar/semana	Hab./semana	Hogar/semana	Hab./semana
Mascarillas	3,698	0,987	3,973	0,479
Guantes	1,683	0,369	2,108	0,068

La pandemia de Covid-19 ha introducido nuevos materiales al uso cotidiano de las familias, las mascarillas y los guantes son ahora productos de uso diario y necesariamente descartables. En Honduras ya se está observando el incremento de estos residuos en las calles y riberas de los ríos, así mismo se ha reportado un aumento en las importaciones de estos elementos [33]

En la tabla VII se observa que las mascarillas se generan en mayor cantidad que los pares de guantes. Al contrario que con la GPC, el uso de mascarillas y guantes es menor en el Distrito Central. A pesar de ello, las cantidades generadas no dejan de ser significativas, si con estos datos se calcula un aproximado de mascarillas y guantes generados a la semana en el Distrito Central se tiene un total de 1.320.197 y 258.299 respectivamente.

De la tabla VII se obtiene que la generación diaria de mascarillas por habitante oscila entre 0,141 y 0,145. Estos resultados varían mucho de las estimaciones hechas por otros investigadores. En algunos estudios se asume que cada persona usa una mascarilla diaria [21], [53], [54]. Nzediegwu Chang [55] por su parte estiman dos mascarillas diarias por persona; es importante resaltar que esta suposición ha sido citada y tomada como certera por muchos otros autores [18], [56], [57]. Sin embargo, estas cantidades difieren mucho de los resultados obtenidos en el presente estudio. Es probable que las personas no estén generando una o dos mascarillas diarias debido a diferentes motivos; como el uso de mascarillas de tela, el reúso de mascarillas descartables, poco tiempo de permanencia en la calle, entre otras. Una estimación adecuada de la generación per cápita de mascarillas es un dato importante al momento de planificar la recolección, el tratamiento y la disposición final de este tipo de residuos.

4. Conclusiones

El artículo presenta los resultados de la generación y composición de residuos en Honduras durante la pandemia del Covid-19 en el 2020. A pesar de las limitaciones metodológicas del estudio, como las variaciones en el pesaje, el uso de balanzas y el tamaño de la muestra, la importancia del mismo radica en la capacitación brindada a los participantes, y de estos a sus familias, para un adecuado manejo y segregación de los residuos sólidos. En el contexto hondureño, donde la información sobre generación y composición de residuos no está actualizada, es importante contar con data que pueda servir como referencia y metodologías que faciliten la recolección de la misma.

La GPC hallada fue de 0,475 kg/hab./día a nivel nacional y 0,549 kg/hab./día en el Distrito Central, estos valores representan una disminución en comparación con años anteriores. Esto puede deberse a una menor capacidad de adquisición de las familias debido a la reducción de las actividades económicas por la pandemia, y también a la muestra seleccionada. Al comparar la composición de residuos de este estudio con resultados anteriores a nivel nacional, se observa un aumento en la proporción de residuos inorgánicos no aprovechables y una disminución de los residuos orgánicos y aprovechables. Entre los residuos peligrosos se estima que cada vivienda a nivel semanal genera 3,7 mascarillas a nivel nacional y 4 mascarillas en el Distrito Central.

La metodología de estudio puede adaptarse para su uso por instituciones de investigación y gobiernos locales. Se recomienda aplicarla como parte de programas que cuenten con financiamiento

para incluir incentivos (p. ej. certificados, cursos gratis, dinero) a los participantes, así como la entrega de balanzas. De esta manera se reduciría el error en el pesaje y se tendría una muestra más amplia y variada. De igual modo esta metodología se podría aplicar para evaluar otro tipo de residuos como por ejemplo los comerciales.

Referencias

- [1] Sinager, Comunicado #65, 2021. [Online]. <https://covid19honduras.org/Comunicado-065-2021> ↑2
- [2] El Heraldo, “Cronología: las principales fechas que dieron paso a la reapertura inteligente”, El Heraldo, 2020. <https://www.elheraldo.hn/pais/1386433-466/reapertura-inteligente-honduras-cronologia-principales-fechas-pandemia-coronavirus> ↑2
- [3] D. Álvarez, “Honduras: Esto es lo que debes saber sobre el inicio del plan de reapertura inteligente”, *Tu Nota*, 2020. <https://www.tunota.com/honduras-esto-es-lo-que-debes-saber-sobre-el-inicio-del-plan-de-reapertura-inteligente> ↑2
- [4] Xinhua, “Honduras avanza a fase 2 de reapertura económica en el marco de la pandemia de COVID-19”, *Xinhua Español*, 2020. http://spanish.xinhuanet.com/2020-09/28/c_139404583.htm ↑2
- [5] O. Ouhsine, A. Ouigmane, E. Layati, B. Aba, R. Isaifan, and M. Berkani, “Impact of COVID-19 on the qualitative and quantitative aspect of household solid waste”, *Glob. J. Environ. Sci. Manag.*, vol. 6, no. Special Issue (Covid-19), pp. 41-52, 2020. <https://doi.org/10.22034/GJESM.2019.06.SI.05> ↑2
- [6] M. A. Zambrano-Monserrate, M. A. Ruano, and L. Sanchez-Alcalde, “Indirect effects of COVID-19 on the environment”, *Sci. Total Environ.*, vol. 728, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138813> ↑2
- [7] S. Haque, S. Uddin, S. Sayem, and K. M. Mohib, “Coronavirus disease 2019 (COVID-19) induced waste scenario: A short overview”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 1, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104660> ↑
- [8] S. Moonsammy et al., “COVID-19 effects on municipality waste collection services for households: statistical modelling of perspectives from Guyana and Nigeria”, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 23, pp. 1678-1687, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01225-4> ↑2
- [9] P. Nowakowski, S. Kuśnierz, P. Sosna, J. Mauer, and D. Maj, “Disposal of personal protective equipment during the COVID-19 pandemic is a challenge for waste collection companies and society: A case study in Poland”, *Resources*, vol. 9, no. 10, 2020. <https://doi.org/10.3390/resources9100116> ↑2
- [10] J. Wang et al., “Quantitative evaluation of infectious health care wastes from numbers of confirmed, suspected and out-patients during COVID-19 pandemic: A case study of Wuhan”, *Waste Manag.*, vol. 126, pp. 323-330, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.026> ↑2
- [11] P. Tello Espinoza, E. Martínez Arce, D. Daza, M. Soulier Faure y H. Terraza, *Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010 OPS, AIDIS, BID*, 2011. [En línea]. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Informe-de-la-evaluacin-regional-del-manejo-de-residuos-slidos-urbanos-en-Amrica-Latina-y-el-Caribe-2010.pdf> ↑2, 3, 8, 10
- [12] M. Arduoso, A. D. Forero-López, N. S. Buzzi, C. V. Spetter, and M. D. Fernández-Severini, “COVID-19 pandemic repercussions on plastic and antiviral polymeric textile causing pollution on beaches and coasts of South America”, *Sci. Total Environ.*, vol. 763, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144365> ↑2
- [13] G. E. De la Torre, R. J. Rakib, C. I. Pizarro-Ortega, and D. C. Dioses-Salinas, “Occurrence of personal protective equipment (PPE) associated with the COVID-19 pandemic along the coast of Lima, Peru”, *Sci. Total Environ.*, vol. 774, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145774> ↑2
- [14] M. Thiel et al., “COVID lessons from the global south - Face masks invading tourist beaches and recommendations for the outdoor seasons”, *Sci. Total Environ.*, vol. 786, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147486> ↑2
- [15] V. G. H. Schmitt, M. M. Cequea, J. M. Vásquez Neyra, and M. Ferasso, “Consumption behavior and residential food waste during the COVID-19 pandemic outbreak in Brazil”, *Sustainability*, vol. 13, no. 7, 2021. <https://doi.org/10.3390/s13071111>

- [//doi.org/10.3390/su13073702](https://doi.org/10.3390/su13073702) ↑3
- [16] R. de Almeida, R. G. de Souza, and J. C. Campos, “Lessons and challenges for the recycling sector of Brazil from the pandemic outbreak of COVID-19”, *Waste Dispos. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 145-154, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42768-021-00075-y> ↑3
- [17] C. S. G. Penteado, and M. A. S. de Castro, “Covid-19 effects on municipal solid waste management: What can effectively be done in the Brazilian scenario?”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 164, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105152> ↑3
- [18] R. C. Urban, and L. Y. K. Nakada, “COVID-19 pandemic: Solid waste and environmental impacts in Brazil”, *Sci. Total Environ.*, vol. 755, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142471> ↑3, 13
- [19] La Tribuna, Centros producen 50 toneladas de residuos al atender COVID-19, *La Tribuna*, 2020. <https://www.latribuna.hn/2020/08/29/centros-producen-50-toneladas-de-resid-resid-al-atender-covid-19/> ↑3
- [20] Mi Ambiente, *Informe del estado del ambiente - Geo Honduras (2014)*, 2014. [En línea]. <https://repositorio.credia.hn/handle/123456789/182> ↑3
- [21] S. Sangkham, “Face mask and medical waste disposal during the novel COVID-19 pandemic in Asia”, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 2, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100052> ↑5, 13
- [22] N. Ardiana, I. W. K. Suryawan, and B. Ridhosari, “Challenges for hazardous waste management related to COVID-19 pandemic at train station”, *Int. J. Adv. Trends Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 5, pp. 8364-8370, 2020. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/210952020> ↑5
- [23] A. Cantanhede, L. Sandoval Alvarado, G. Monge y C. Caycho Chumpitaz, “Hojas de divulgación técnica - CEPIS No 97”, Lima, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 2005. [En línea]. <https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39488> ↑6
- [24] J. A. Rodríguez, *Plan Director para el Manejo de Residuos Sólidos Municipales*, Municipio del Distrito Central, 2012. [En línea]. http://www.miambiente.gob.hn/media/adjuntos/libroscescco/None/2019-07-17/20%3A51%3A37.192876%2B00%3A00/PDMRSM_del_Distrito_Central.pdf ↑8
- [25] AMDC, “Superintendencia de Aseo Municipal AMDC, Honduras”, 2019. <https://www.facebook.com/pages/category/Government-Organization/Superintendencia-de-Aseo-Municipal-AMDC-Honduras-132774796776237/> ↑8, 10
- [26] E. Mendoza, “Colonias con problemas de basura repuntan casos de dengue en la capital de Honduras”, *El Heraldo*, 2019. <https://www.elheraldo.hn/tegucigalpa/1306438-466/colonias-con-problemas-de-basura-repuntan-en-casos-de-dengue-en-la> ↑8
- [27] M. Minelli, *Diagnóstico de la cadena productiva de desechos sólidos en Honduras (Tegucigalpa y San Pedro Sula)*, Tegucigalpa, 2012. [En línea]. <http://www.pasocierto.com.br/esp/assets/dd3-p3-diagnostico-cadena-de-valores-honduras-2008.pdf> ↑8, 9
- [28] E. Mendoza, “Con ley pretenden formalizar la labor de reciclaje en la capital”, *El Heraldo*, 2017. <https://www.elheraldo.hn/tegucigalpa/1038487-466/con-ley-pretenden-formalizar-la-labor-de-reciclaje-en-la-capital> ↑9
- [29] Hondurasensusmanos, “Pronto ‘Reinventar y cambia la forma de llevar tus compras’ con lanzamiento de bolsas ecológicas”, *Hondurasensusmanos*, 2020. <http://www.hondurasensusmanos.info/2020/02/01/pronto-reinventar-y-cambia-la-forma-de-llevar-tus-compras-con-lanzamiento-de-bolsas-ecologicas/> ↑9
- [30] Hondurasensusmanos, “Protege el ambiente con las bolsas reutilizables de supermercado La Colonia”, *Hondurasensusmanos*, 2019. <http://www.hondurasensusmanos.info/2019/10/16/protege-el-ambiente-con-las-bolsas-reutilizables-de-supermercado-la-colonia-2/> ↑
- [31] *El Diario de Honduras*, “Cortitelas lanza bolsas ecológicas”, *El Diario de Honduras*, 2019. ↑9
- [32] *Radio América*, “Los 8 municipios de Honduras que han dicho ¡NO! al plástico de un solo uso”, *Radio América*, 2020. <http://www.radioamerica.hn/los-8-municipios-de-honduras-que-han-dicho-no-al-plastico-de-un-solo-uso/> ↑9
- [33] J. C. Rivera, “Guantes y mascarilla amenazan a los arrecifes de Honduras”, *La Prensa*, 2020. <https://www.laprensa.hn/premium/guantes-y-mascarillas-amenazan-a-los-arrecifes-honduras-plastico-clima-EHLP1393351> ↑9, 13
- [34] Mi Ambiente, “Diagnóstico sobre la situación de la gestión de los residuos en Honduras 2016”, 2017. ↑10
- [35] W. Lobo, “Situación actual de los desechos sólidos en La Ceiba y Choloma”, San Pedro Sula, 2005. ↑10

- [36] OPS, “Evaluación Regional de los Servicios de Manejo de Residuos Sólidos Municipales. Informe Analítico de Honduras”, 2003. ↑10
- [37] JICA, JICA, *Estudio sobre manejo de residuos sólidos del área urbana de Tegucigalpa, Distrito Central, en la República de Honduras* (Capítulo 3), Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 1999. Estudio sobre manejo de residuos sólidos del área urbana de Tegucigalpa, Distrito Central, en la República de Honduras (Capítulo 3), Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 1999. ↑10
- [38] Experco International, *Estudio de Evaluación de Auditoría Ambiental (EAA) para el Cierre técnico del Botadero Municipal y la ampliación del sitio, en el Distrito Central*, Experco International, 2003. ↑10
- [39] B. N. Kulkarni, and V. Anantharama, “Repercussions of COVID-19 pandemic on municipal solid waste management: Challenges and opportunities”, *Sci. Total Environ.*, vol. 743, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140693> ↑11
- [40] A. Gavilán García, T. Ramírez Muñoz y D. F. Huerta Colosia, “Panorama de la generación y manejo de residuos sólidos y médicos durante la emergencia sanitaria por COVID-19”, Ciudad de México, INECC, 2020. [En línea]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/569684/Residuos_COVID.pdf ↑11
- [41] J. J. Klemeš, Y. Van Fan, R. R. Tan, and P. Jiang, “Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 127, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109883> ↑11
- [42] Y. Van Fan, P. Jiang, M. Hemzal, and J. J. Klemeš, “An update of COVID-19 influence on waste management”, *Sci. Total Environ.*, vol. 754, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142014> ↑11
- [43] N. Requena, S. Medina, S. Torres, and L. Diaz, “El impacto del covid-19, en la composición de los residuos sólidos domiciliarios - estudio de caso en temporada de aislamiento social obligatorio”, 2020. ↑11
- [44] S. A. Sarkodie, and P. A. Owusu, “Impact of COVID-19 pandemic on waste management”, *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, pp. 7951-7960, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00956-y> ↑11
- [45] L. Tenenbaum, “The amount of plastic waste is surging because of the Coronavirus pandemic”, *Forbes*, 2020. <https://www.forbes.com/sites/lauratenenbaum/2020/04/25/plastic-waste-during-the-time-of-covid-19/#4e74328f7e48> ↑
- [46] M. Pruet, “Coronavirus consumer trends: Consumer electronics, pet supplies, and more”, Criteo, 2020. <https://www.criteo.com/blog/coronavirus-consumer-trends/> ↑11
- [47] C. C. Naughton, “Will the COVID-19 pandemic change waste generation and composition?: The need for more real-time waste management data and systems thinking”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 162, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105050> ↑11
- [48] E. Ikiz, V. W. Maclaren, E. Alfred, and S. Sivanesan, “Impact of COVID-19 on household waste flows, diversion and reuse: The case of multi-residential buildings in Toronto, Canada”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 164, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105111> ↑11
- [49] Gobierno de la República de Honduras, “Análisis sectorial de los residuos sólidos, Honduras”, SERNA, Secretaría de Salud, AMHON, OPS/OMS, 2010. [En línea]. https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/52564/Analisis_sectorial2010_spa.pdf?sequence=1 ↑12
- [50] M. Martínez, “Problemática, marco legal y político de la gestión integral de residuos en Honduras”, 2019, p. 22, [En línea]. https://www.paho.org/hon/index.php?option=com_docman&view=download&alias=448-7-problematica-de-girs-marvin&category_slug=desarrollo-humano-sostenible-y-estilos-de-vida-sal&Itemid=211 ↑12
- [51] G. M. Babulal *et al.*, “The impact of COVID-19 on the well-being and cognition of older adults living in the United States and Latin America”, *eClinicalMedicine*, vol. 35, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2021.100848> ↑12
- [52] R. Garcia-Cerde *et al.*, “Alcohol use during the COVID-19 pandemic in Latin America and the Caribbean”, *Rev. Panam. Salud Pública*, vol. 45, 2021. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2021.52> ↑12
- [53] N. U. Benson, D. E. Basse, and T. Palanisami, “COVID pollution: Impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint”, *Heliyon*, vol. 7, no. 2, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06343> ↑13
- [54] H. Chowdhury, T. Chowdhury, and S. M. Sait, “Estimating marine plastic pollution from COVID-19 face masks in coastal regions”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 168, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112419> ↑13
- [55] C. Nzediegwu and S. X. Chang, “Improper solid waste management increases potential for COVID-19 spread in developing countries”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 161, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105050>

[resconrec.2020.104947](#) ↑13

- [56] D. Hantoko et al., “Challenges and practices on waste management and disposal during COVID-19 pandemic”, *J. Environ. Manage.*, vol. 286, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112140> ↑13
- [57] A. Tripathi, V. K. Tyagi, V. Vivekanand, P. Bose, and S. Suthar, “Challenges, opportunities and progress in solid waste management during COVID-19 pandemic”, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 2, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100060> ↑13

Norvin Requena Sánchez

Magíster en Ciencias Ambientales, Universidad de São Paulo; Ingeniero Sanitario, Universidad Nacional de Ingeniería (Perú). Actualmente se desempeña en la Subdirección Técnica Científica de la Dirección de Evaluación Ambiental del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Docente de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería. Miembro del Equipo Técnico de Residuos Sólidos de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Correo electrónico: nrequenas@uni.edu.pe

Dalia Carbonel Ramos

Magíster en Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Ingeniería; Ingeniera Forestal, Universidad Nacional Agraria La Molina (Perú). Actualmente es asesora del Equipo Técnico de Residuos Sólidos de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Correo electrónico: dcarbonelr@uni.pe

Rómulo Romero Centeno

Doctor en Ciencias de la Educación, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle; Magíster en Didáctica Universitaria, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle. Docente de la Universidad Nacional de Ingeniería (Perú). Es director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería y director del Departamento Académico de Estudios Especiales Básicos de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Correo electrónico: rromero@uni.edu.pe

Reflection

Sobre la determinación del umbral del rango del factor de intensidad de tensiones y los factores que lo afectan

On Determining the Stress Intensity Factor Range Threshold and the Factors that Affect It

Kebin Alberto Medina-Bernal¹, Libardo Vicente Vanegas-Useche¹ ¹

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira (Pereira, Colombia)

*Correo de correspondencia: lvanegas@utp.edu.co

Received: 13th/Aug/2021. Modified: 9th/Dec/2021. Accepted: 24th/May/2022

Abstract

Context: The stress intensity factor range threshold ΔK_{th} is a value below which fatigue crack propagation is insignificant. This factor is usually employed to establish the fatigue life of an engineering element. However, its determination, the way in which the different factors influence its value, and its application are still subjects of discussion.

Method: This paper discusses the methods and criteria for determining ΔK_{th} and the factors that affect it.

Results: Standard ASTM experimental methods are the most used tests. However, they may prove to be inaccurate, since compression pre-cracking tests can yield conservative results. In recent years, many sound analytical and numerical methods for the determination of the threshold have been proposed. Many factors and variables can affect the value of ΔK_{th} , such as crack closure, geometry, crack size, load characteristics, microstructure, material properties, environment, residual stresses, and mixed-mode loads.

Conclusions: The threshold can be determined via standard ASTM tests or theoretical or numerical methods. Much progress has been made in this field, but more research is required to improve experimental methods and obtain analytical or numerical methods that more comprehensively capture the different complexities, factors, and variables that affect the threshold.

Keywords: crack closure, load ratio, microstructure

Language: Spanish

Open access



Cite as: Medina-Bernal, K. A., Vanegas-Useche, L. V. "Sobre la determinación del umbral del rango del factor de intensidad de tensiones y los factores que lo afectan". *Ing.*, vol. 27, no. 3, 2022. e18453.

<https://doi.org/10.14483/23448393.18453>

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

Resumen

Contexto: El umbral del rango del factor de intensidad de tensiones ΔK_{th} es un valor por debajo del cual la propagación de grietas de fatiga es insignificante. Este suele usarse para establecer la vida a fatiga de un elemento ingenieril. Sin embargo, su determinación, la forma en que diferentes factores influyen en su valor y su aplicación aún son temas de discusión.

Metodo: Este trabajo discute sobre los métodos y criterios existentes para la determinación de ΔK_{th} y los factores que lo afectan.

Resultados: Los métodos experimentales estándar ASTM son los ensayos más usados. Sin embargo, estos pueden resultar inexactos, pues los ensayos de preagrietamiento a compresión pueden producir resultados conservativos. Recientemente se han propuesto muchos métodos analíticos y numéricos para determinar el umbral. Muchos factores y variables afectan el valor de ΔK_{th} , tales como el cierre de grieta, la geometría, el tamaño de la grieta, las características de la carga, la microestructura, las propiedades del material, el ambiente, las tensiones residuales y las cargas de modo mixto.

Conclusiones: El umbral puede determinarse mediante ensayos estándar ASTM o métodos teóricos o numéricos. Se ha avanzado mucho en este campo, pero se requiere más investigación para mejorar los métodos experimentales y obtener métodos analíticos o numéricos que capturen más integralmente las diferentes complejidades, factores y variables que afectan el umbral.

Palabras clave: cierre de grieta, relación de carga, microestructura

Idioma: español

1. Introducción

La mecánica de fractura es una ciencia relativamente nueva que estudia elementos agrietados. Es una ciencia importante, ya que muchas estructuras y máquinas son propensas a desarrollar grietas y fallar por fatiga o a tener defectos tipo grieta producidos durante la fabricación. Algunas de las aplicaciones de la mecánica de fractura son recipientes a presión [1], estructuras metálicas [2], industria aeronáutica [3] y ejes de transmisión [4].

Por su parte, el factor de intensidad de tensiones K , de la mecánica de fractura elástica lineal (LEFM), es un parámetro que representa la intensidad del campo de tensiones en las vecindades de una grieta de un componente. Este parámetro aplica cuando la zona de deformación plástica en las vecindades de la grieta es muy pequeña comparada con el campo de tensiones elásticas. El comportamiento típico de la propagación de grietas por fatiga en la mecánica de fractura puede describirse a través de la curva sigmoideal [5] en escala logarítmica (figura 1) de la velocidad de propagación de la grieta da/dN (siendo a la extensión de la grieta y N el número de ciclos) contra el rango del factor de intensidad de tensiones $\Delta K = K_{max} - K_{min}$, para determinada relación de carga $R = K_{min}/K_{max}$ (K mínimo sobre K máximo).

En esta curva se pueden distinguir tres regiones, cada una de las cuales obedece a sus propias características. En la región 2 se observa un crecimiento estable con una relación casi lineal en escala logarítmica entre da/dN y ΔK , que es conocida como la Ley de Paris, $da/dN = C(\Delta K)^n$, donde C y n son parámetros empíricos. Esta ley permite cuantificar la propagación de grietas en esta zona. En la región 3 la velocidad de propagación de la grieta es grande, correspondiente a una

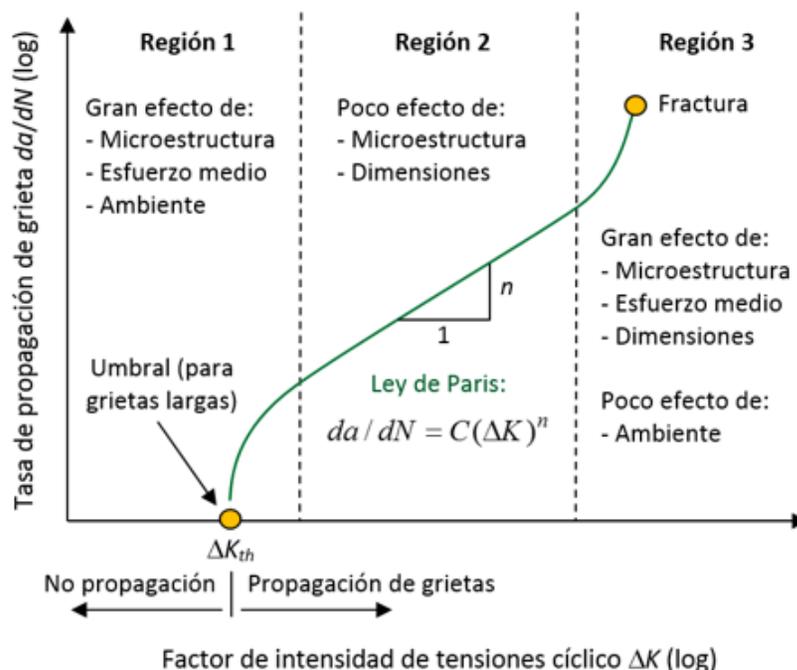


Figura 1. Diagrama de crecimiento de grietas largas $da/dN - \Delta K$. Basado en [5]

aceleración en la propagación de la grieta, hasta que se presenta colapso plástico o una fractura inestable cuando K_{max} alcanza un valor crítico conocido como la tenacidad a la fractura K_c . Este comportamiento inestable es atribuido a la interacción entre mecanismos dinámicos y estáticos de crecimiento de grietas. La región 1 se caracteriza por una rápida reducción de da/dN cuando ΔK se aproxima de forma asintótica hacia un valor característico, denominado umbral del rango del factor de intensidad de tensiones ΔK_{th} .

Usualmente, la mayor parte de la vida de fatiga de un componente (alrededor del 80 % [6]) transcurre en la región umbral de propagación; lo cual está generalmente asociado a pequeños tamaños de grieta. De acuerdo con Su *et al.* [7], el crecimiento de grietas cortas ocupa del 50 al 90 % de la vida útil a la fatiga de diversos metales. Por lo tanto, describir el comportamiento de las grietas en la zona umbral es de gran importancia, y comprender el significado del umbral ΔK_{th} es crucial para el entendimiento de dicho comportamiento. Es más, establecer con exactitud el valor de ΔK_{th} es importante, con el fin de determinar si algún defecto crecerá o no [8]. Taylor [9] publicó valores de ΔK_{th} de muchos materiales, para aplicaciones prácticas de ingeniería.

En el análisis por fatiga, el umbral del rango del factor de intensidad de tensiones ΔK_{th} es utilizado dentro de la filosofía de diseño basado en la tolerancia de daño [10]. Esta filosofía ha adoptado el concepto de ΔK_{th} en diseños de ingeniería con vida infinita o una extensa vida a fatiga. Una grieta será tolerada si ΔK es menor a ΔK_{th} . Idealmente, ΔK_{th} es el valor para el cual la velocidad de propagación de grietas es cero. El concepto más generalizado para describir el umbral de propagación es el basado en la LEFM. Se define como el valor del rango del factor de intensidad de tensiones por debajo del cual no se aprecia el crecimiento de grietas (válido para grietas largas; véase la sección Tamaño de la grieta) bajo condiciones de servicio de carga cíclica, teniendo en

cuenta los métodos y la tecnología disponible para el monitoreo de la grieta. El estándar ASTM E647-15e1 [11] lo define como el valor asintótico de ΔK de la curva da/dN vs. ΔK , donde da/dN toma un valor próximo a cero; para efectos prácticos, se toma un valor (arbitrario) de 10^{-10} m/ciclo para la mayoría de materiales [11]. El umbral existe porque no son posibles tasas de crecimiento de grietas por fatiga da/dN menores a aproximadamente un espaciado de la red cristalina. Los valores experimentales de dicho umbral, en modo I, son consistentes con esta observación, aunque a veces se ha observado crecimiento de grietas de menos de aproximadamente un espaciado de la red [12].

En la literatura se pueden encontrar curvas y ecuaciones para determinar ΔK_{th} . Por ejemplo, Hasegawa *et al.* [8] presentan curvas y ecuaciones para aceros ferríticos y aleaciones de aluminio, suministradas en el boletín de la WRC (Welding Research Council) [13], en la Sección VIII de la ASME (American Society of Mechanical Engineers) [1], por el IIW (International Institute of Welding) [14] y por el BS (British Standards) 7910 [2].

En el presente artículo se discute sobre los métodos y criterios existentes para la determinación de ΔK_{th} y sobre los factores que lo afectan. La segunda sección presenta los métodos para determinarlo. La tercera sección discute los factores que inciden en su valor. Finalmente, la cuarta sección presenta las conclusiones.

2. Métodos para determinar ΔK_{th}

Debido a su importancia en el diseño por fatiga, se han hecho innumerables esfuerzos por calcular ΔK_{th} , bien sea a través de métodos experimentales, estimaciones numéricas o modelos teóricos o semiteóricos.

2.1. Métodos experimentales

Es difícil determinar ΔK_{th} experimentalmente, ya que toma mucho tiempo establecer si la grieta está creciendo o no [8]. Usualmente, se halla por extrapolación o directamente de la curva de propagación de la grieta.

2.1.1. Métodos estándar ASTM

Este método permite observar la evolución de la extensión de la grieta en función del número de ciclos. Los ensayos se realizan en muestras preagrietadas estandarizadas para ensayos de mecánica de fractura, para una mejor comparación de datos, sometidas por lo general a carga de tracción pura (modo I), con control de carga y a una frecuencia constante. El preagrietamiento se realiza con el fin de iniciar una grieta desde una entalla que permita a la grieta salir de la zona afectada por la plasticidad generada alrededor de esta entalla.

El estándar ASTM E647-15e1 [8] propone tres modos de control de carga para conducir los ensayos de propagación de grietas: el método de amplitud de fuerza constante para $da/dN > 10^{-8}$ m/ciclo, el método de disminución de K para $da/dN < 10^{-8}$ m/ciclo y el método de control de K alternativo.

El método de amplitud de fuerza constante se vuelve cada vez más difícil de usar a medida que las tasas de crecimiento disminuyen por debajo de 10^8 m/ciclo, debido a consideraciones previas al agrietamiento. Por lo tanto, el método de disminución de K es más aconsejable para las tasas mayores a 10^8 m/ciclo y no es adecuado para determinar el umbral. Por su parte, el método de reducción de K no se recomienda para tasas de crecimiento de grietas superiores a 10^8 m/ciclo, ya que el historial de carga anterior a los asociados niveles de ΔK puede influir en el comportamiento de la tasa de crecimiento de grietas por fatiga cercana al umbral. Finalmente, el método de control de K alternativo puede hacerse con K_{max} o K_{medio} constante; se puede obtener una estimación más conservadora del umbral mediante este método [11].

Método de disminución de K

La disminución de la fuerza durante la prueba de disminución de K puede hacerse en pasos de fuerza decrecientes (figura 2(a)) o de manera continua por una técnica automatizada [11]. En este método, la relación entre K y el tamaño de la grieta a para una prueba con C constante está dada por la ecuación (1) [11]:

$$\Delta K = \Delta K_i * e^{C(a-a_i)} \quad (1)$$

donde ΔK_i y a_i son el rango del factor de intensidad de tensiones y la extensión de la grieta al inicio del ensayo. C es la rapidez de reducción de carga (gradiente de K normalizado), el cual debe cumplir con la relación de la ecuación (2) [11]:

$$C = \frac{1}{K} * \frac{dK}{da} > -0,08 \text{ mm}^{-1} \quad (2)$$

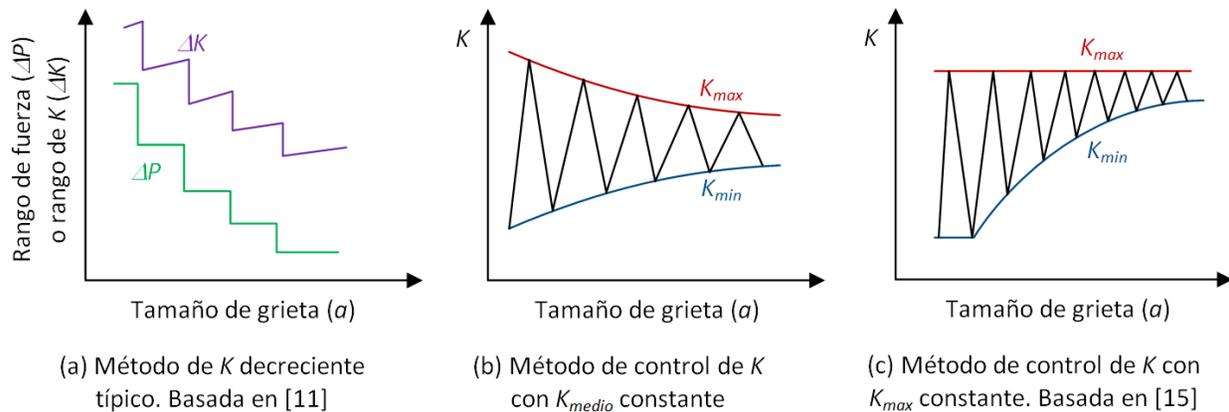


Figura 2. Métodos de la norma ASTM E 647-15e1

Se recomienda que la relación de fuerzas (fuerza mínima sobre fuerza máxima) y C sean mantenidos constantes durante la prueba. Para determinar el umbral, ΔK se reduce hasta alcanzar ΔK_{th} ; este será el ΔK correspondiente a la velocidad de propagación mínima definida en el ensayo, que para la mayoría de materiales es de 10^{-10} m/ciclo [11].

Método de control de K alternativo

Este puede hacerse con K_{max} o K_{medio} constante, y la estimación del umbral es más conservadora. Para hallar el umbral, se reduce progresivamente ΔK , aumentando gradualmente K_{min} (figura 2(c)), si el ensayo se hace con K_{max} constante, o disminuyendo K_{max} y aumentando K_{min} (figura 2(b)), si el ensayo se hace con K_{medio} constante, hasta alcanzar ΔK_{th} (por ejemplo, 10^{-10} m/ciclo. Generar datos con un gradiente de K adecuado, utilizando un valor constante y positivo de C , reduce el tiempo de prueba, entre otras ventajas. [11].

2.1.2. Método de preagrietamiento a compresión

Los métodos anteriores son adecuados para estudiar el crecimiento de grietas largas [16]. Este método puede ser empleado para cualquier tamaño de grieta y garantiza la obtención de un ΔK_{th} libre de efectos de cierre de grieta. Además, este procedimiento se usa con frecuencia para generar preagrietamiento de materiales frágiles. En este método, al igual que a tracción cíclica, se crea una grieta que surge desde la raíz de una entalla sometida a elevadas cargas cíclicas de amplitud constante a compresión (la carga máxima y la carga mínima están a compresión). El método de preagrietamiento a compresión se realiza a una amplitud de carga ΔK definida y una relación de carga R definida. Posteriormente, la grieta se propaga aplicando una pequeña carga de tracción, con una reducción progresiva de la velocidad de propagación, hasta que crezca fuera del campo de tensiones residuales a tracción creadas por las cargas compresivas. Por último, se aplica una carga de amplitud constante, para un R determinado, para terminar de definir la curva de propagación [16]. El número de ciclos es relativamente amplio, con el fin de reducir las tensiones residuales al mínimo.

2.2. Métodos analíticos y numéricos

Los métodos experimentales pueden llegar a ser costosos y demandar mucho tiempo [8], en especial cuando se requieren bajas frecuencias cíclicas. Esto, debido al gran número de ciclos requerido. Además, son incapaces de considerar todos los factores que influyen en la medida. Lo ideal sería tener modelos teóricos o semiteóricos y numéricos que incluyan al menos algunos de los factores que intervienen en el crecimiento de grietas. Los modelos semiteóricos son modelos mecánicos que se usan en conjunto con parámetros determinados de manera experimental.

Se han desarrollado muchos métodos de predicción de crecimiento de grietas, tanto para grietas cortas como largas, teniendo en cuenta la plasticidad alrededor del frente de la grieta, la carga y el concepto de cierre de grieta. Las grietas cortas exhiben características de propagación bastante diferentes a las de las largas; por ejemplo, las tasas de crecimiento de grietas cortas presentan una variabilidad significativa, las cuales se ven afectadas por tensiones locales, microestructura del material, límites de grano, dislocaciones, tamaño de grano y resistencia de fluencia [17]. Por ejemplo, Su *et al.* [7] indican que cuando la longitud de una grieta superficial en aceros austeníticos es menor a 3 granos, la tasa de crecimiento es obstaculizada por la microestructura, y dicho efecto se reduce con el crecimiento de la grieta.

Newman [18] propuso un modelo numérico para predecir el crecimiento de grietas, postulando que el cierre de grieta afecta significativamente dicho crecimiento. El modelo incorpora varios parámetros de ajuste que dependen de datos experimentales. Sin embargo, según Bang e Ince [17], el modelo no tiene en cuenta que las evidencias experimentales indican que no se desarrolla un cierre de grieta significativo para grietas cortas, y esos modelos basados en el cierre de grieta no pueden proporcionar resultados precisos para grietas cortas [19]. Otros autores también han usado el enfoque de cierre de grieta para estimar la propagación de grietas cortas y largas (por ejemplo, [6]).

En contraste, Vasudevan *et al.* [20], [21] sugirieron un modelo de doble parámetro de propagación de grietas (enfoque unificado) basado en ΔK y K_{max} , sin tener en cuenta el cierre de grieta. Esto debido al cuestionamiento de los métodos basados en el cierre de grieta, los cuales sobreestiman de manera sustancial el crecimiento de grietas cortas [17]. Al trabajar con este par de parámetros, se tienen en cuenta los efectos de la relación de carga (R). En el enfoque unificado se supone que las fuerzas impulsoras (ΔK y K_{max}) deben ser lo suficientemente grandes para inducir el daño por fatiga y, por lo tanto, propagar las grietas, tanto cortas como largas. Entonces, las grietas cortas también deben tener umbrales de crecimiento de grietas correspondientes, para tener en cuenta la resistencia de los materiales a la propagación de grietas cortas. [17]

Más tarde, se propuso la teoría UniGrow. Noroozi y Glinka [22], [23] introdujeron la teoría UniGrow basada en dos parámetros de fuerza conductora. En esta teoría, los efectos de la tensión residual sobre el comportamiento de crecimiento de las grietas bajo cargas de fatiga se consideran corrigiendo los dos parámetros de fuerza impulsora, ΔK y K_{max} , con el factor de intensidad de tensiones residuales, K_r [17].

Recientemente, en [24], [25] sugirieron un modelo UniGrow modificado, el cual considera las tasas de propagación de grietas, tanto cortas como largas. Se informa que dicho modelo modificado tiene una correlación adecuada con datos de crecimiento de grietas largas, pero el modelo no se correlacionó con datos de grietas cortas [17].

Por otro lado, la integral J cíclica de la mecánica de fractura elastoplástica puede ser, en teoría, aplicada a grietas cortas, debido al tamaño considerable de la zona plástica en comparación con la longitud de la grieta; sin embargo, no está comprobado todavía que funcione para grietas cortas. Otro método propuesto para evaluar el crecimiento de grietas cortas es el diagrama Kitagawa-Takashi [26], el cual fue modificado por Atzori y Lazzarin [27], [28] para determinar el límite de fatiga de grietas largas y cortas. [17].

Recientemente, Christopher *et al.* [29] propusieron un modelo de crecimiento de grietas, conocido como modelo CJP, para tener en cuenta el impacto de la zona plástica en la punta de la grieta y su interacción con el campo de tensiones elásticas. El modelo CJP incluye una serie de parámetros para describir los efectos de aumento y retardo del crecimiento de grietas.

Finalmente, en [17] proponen un modelo que combina el enfoque unificado y el modelo UniGrow para predecir el comportamiento de grietas tanto cortas como largas. El modelo tiene en cuenta los parámetros de las fuerzas impulsoras y los umbrales correspondientes. Las variables que considera

son ΔK , K_{max} , K_r y los correspondientes umbrales de crecimiento de grietas, K_{th} y $K_{max,th}$. De esta manera, se unifica el comportamiento de las grietas por fatiga en los dos regímenes: grietas cortas y largas.

Realmente, hay muchos métodos de propagación de grietas cortas; una revisión detallada puede encontrarse en [17]. Muchos de los métodos propuestos tienen una validez razonable bajo condiciones específicas. A pesar de que es difícil que los diferentes modelos capturen todos los factores y complejidades presentes en diferentes casos, recientemente se ha avanzado para conseguir aproximaciones cada vez más satisfactorias, acordes con los datos experimentales. Así, hay que seguir avanzando para que los modelos, tanto analíticos como numéricos, sean cada vez más universales. Por ahora, los métodos experimentales continúan siendo la mejor forma de determinar el umbral de propagación.

3. Factores que afectan a ΔK_{th}

3.1. Mecanismos intrínsecos y mecanismos extrínsecos

Estudios en la zona umbral han determinado que existen dos tipos de procesos que pueden intervenir en el valor de ΔK_{th} : procesos intrínsecos y procesos extrínsecos [30]. Los primeros producen nueva superficie de fractura en el frente de grieta [31]; se refieren a mecanismos de fatiga que reflejan los cambios en la resistencia propia del material a la propagación de grietas, en los que actúan mecanismos en el frente de la grieta o delante de este. Los segundos son mecanismos de fatiga que están relacionados con la reducción en la fuerza conductora de la grieta, y que actúan en el ancho de la grieta.

Los efectos de los mecanismos intrínsecos sobre ΔK_{th} pueden reflejarse en un factor intrínseco del umbral de propagación ΔK_{thint} ; asimismo, los mecanismos extrínsecos se reflejan en un ΔK_{thext} . La suma de estos dos factores da como resultado el umbral de propagación de grietas total, tal como se indica en la ecuación (3):

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{thint} + \Delta K_{thext} \quad (3)$$

ΔK_{thint} representa la resistencia propia del material a la propagación de grietas por fatiga, para una grieta considerada ideal, y ha sido propuesto como el límite de emisión de dislocaciones para una punta de grieta ideal. Este factor es el resultado de mecanismos que previenen que efectos microplásticos ocurran cerca de la punta de grieta, como dislocaciones atrapadas en los límites de grano, sistemas de deslizamiento interrumpidos por inclusiones, relaciones de carga microscópicamente finitas, entre otros [32].

ΔK_{thext} está compuesto de diferentes contribuciones que pueden ser clasificadas dentro de tres grandes grupos:

- Protección geométrica (desviación y ramificación de la grieta) (figura 3). Usualmente, no se establece cuantitativamente, ya que para hacerlo es necesario conocer la geometría microscópica y un criterio para la propagación en modo mixto, que generalmente es supuesto [33].

- Protección de zona (figura 3). Como microgrietas o efectos producidos por discordancias de diferentes fases. En materiales metálicos homogéneos no suele ser importante.
- Protección por contacto (figura 3). Comprende los mecanismos de cierre de grieta y el “puenteo” o acoplamiento de la grieta.

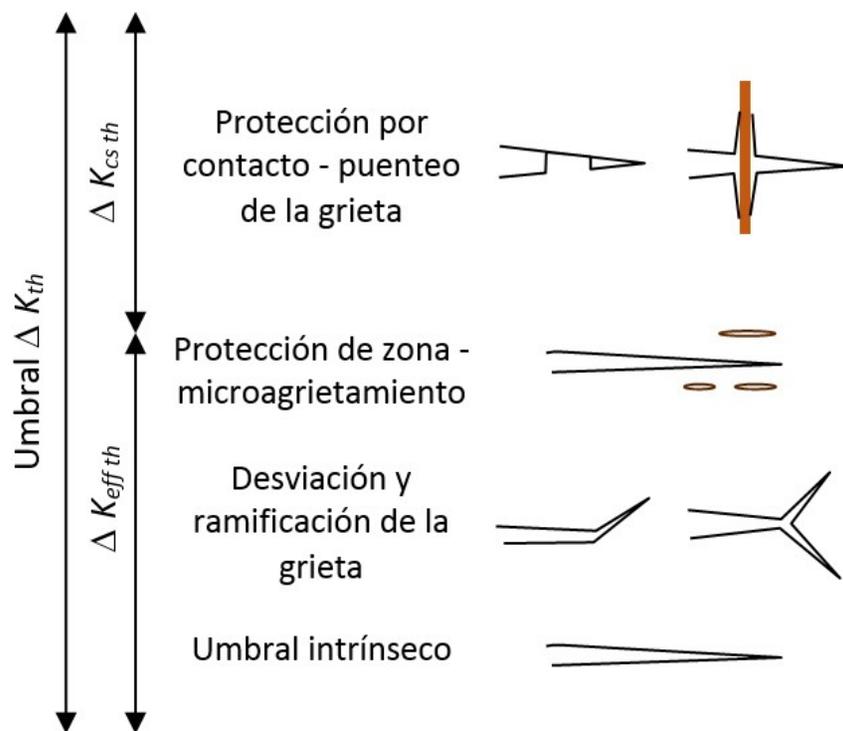


Figura 3. Representación de las diferentes contribuciones a ΔK_{th} . Basada en [30]

Dado que la contribución de la protección geométrica y la protección de zona representan solo un pequeño aumento en ΔK_{th} , y que la mayor contribución viene de la protección por contacto, una predicción imprecisa de la protección geométrica y de zona no acarreará un gran error en la aproximación total. En muchos de los experimentos que se han llevado a cabo, se miden solamente el ΔK_{th} y el efecto del cierre de grieta. Por lo tanto, se suele emplear el factor $\Delta K_{th\,eff}$, el cual es la resta del umbral total y la contribución del cierre de grieta. Entonces, ΔK_{th} puede expresarse de acuerdo con la ecuación (4) (figura 3):

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th\,eff} + \Delta K_{clth} \quad (4)$$

Donde ΔK_{clth} representa el aporte únicamente de los efectos de los diferentes mecanismos de cierre de grieta. Entonces $\Delta K_{th\,eff}$ representa el límite físico de carga más bajo, el cual garantiza que la grieta no se propagará incluso sin la presencia de algún mecanismo de cierre de grieta. ΔK_{clth} presenta una alta dispersión y sensibilidad a las condiciones de ensayo y del material (a diferencia de $\Delta K_{th\,eff}$, el cual suele estar dentro de un estrecho rango para un tipo de material). Por consiguiente, es conveniente realizar una descripción del comportamiento del fenómeno del cierre de grieta y sus diferentes mecanismos en la zona umbral de propagación.

Cierre de grieta

En un elemento agrietado sometido a una carga cíclica tracción-tracción (es decir, K_{min} y K_{max} son ambos positivos) las superficies de fractura pueden aún estar en contacto entre sí, por lo que la grieta estaría completamente abierta solo en una parte del ciclo de carga. Lo anterior se conoce como cierre de grieta. Se supone que no existe daño en la punta de la grieta cuando sus caras están en contacto, por lo que esta parte del ciclo de carga no tiene efecto en el crecimiento de la grieta; es decir, la grieta solo se propaga cuando está abierta. Una parte de la fuerza aplicada es usada para reabrir las caras de la grieta interferida, por lo que la magnitud efectiva del rango del factor de intensidad de tensiones es menor, lo cual conlleva a un menor daño por ciclo. De esta forma, la ecuación (5) define un rango del factor de intensidad de tensiones efectivo ΔK_{eff} :

$$\begin{cases} K_{max} - K_{cl} & \text{si } K_{min} < K_{cl} \\ K_{max} - K_{min} & \text{si } K_{min} > K_{cl} \end{cases} \quad (5)$$

Donde K_{cl} representa el factor de intensidad de tensiones en el momento en que entran en contacto las caras de la grieta. Una vez K_{min} supera el valor de K_{cl} , el efecto del cierre de grieta es nulo.

Para la mayoría de los materiales metálicos existen diferentes mecanismos físicos por los que puede manifestarse el cierre de grieta. Los más importantes se discuten brevemente a continuación (figura 4).

Cierre de grieta inducido por plasticidad PICC (*plasticity-induced crack closure*): es causado por las zonas plásticas formadas, bajo carga, delante del frente de la grieta. Cuando la grieta se propaga bajo carga cíclica, quedan deformaciones residuales en el material estirado plásticamente, entre las superficies de la grieta. Esto causa un desajuste geométrico, en especial en las zonas en las que prevalecen condiciones de tensión plana, donde la zona plástica es más grande.

Cierre de grieta inducido por partículas de óxido OICC (*oxide-induced crack closure*): es causado por la formación de productos corrosivos, como partículas de óxido, que cubren el ancho de la grieta, con grosores del orden del desplazamiento de apertura de la punta de la grieta CTOD (*crack tip opening displacement*); estas partículas aparecen como resultado del contacto reiterado entre las superficies de fractura de la grieta o también de partículas presentes en el ambiente.

Cierre de grieta inducido por rugosidad de superficie RICC (*roughness-induced crack closure*): surge del desplazamiento mutuo de las dos caras de la grieta a causa de la deformación plástica en la punta de la grieta, el cual genera asperezas en la cara de esta. En este tipo de cierre ocurre contacto discreto de puntos a lo largo del ancho de la grieta.

El cierre de grieta está presente en todas las regiones de la curva de propagación de grietas; sin embargo, su influencia se concentra principalmente en la zona umbral. El cierre de grieta es el principal mecanismo para explicar el comportamiento del crecimiento de grietas en la zona umbral. Bajo este concepto se ha podido explicar la relación que guardan diferentes factores como la carga aplicada, el ambiente, la microestructura, entre otros, con el umbral de propagación ΔK_{th} .

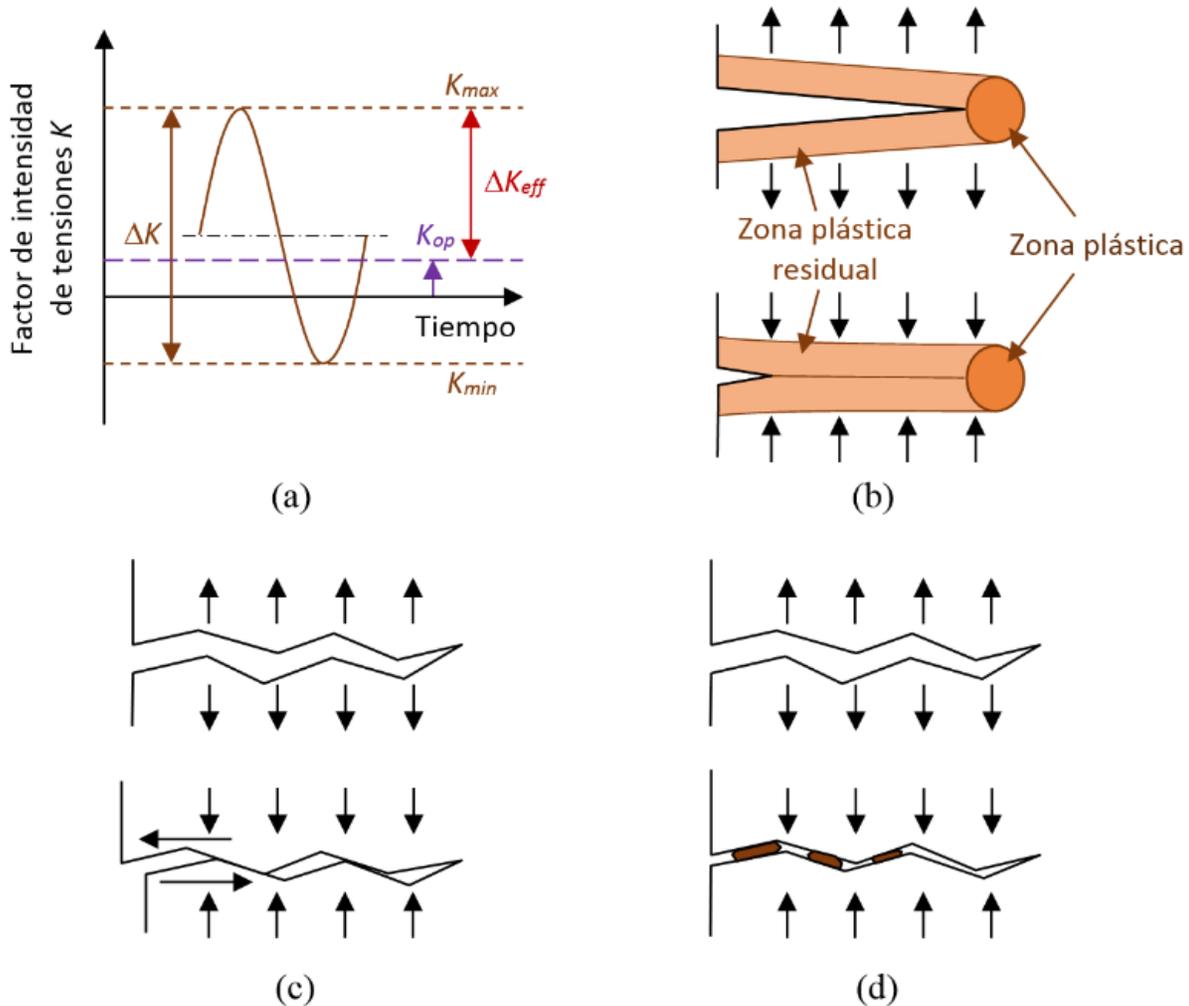


Figura 4. Mecanismos del cierre de grieta. a) nomenclatura; b) cierre de grieta inducido por plasticidad (PICC); c) cierre de grieta inducido por rugosidad (RICC); d) cierre de grieta inducido por óxido (OICC). Basada en [6]

De acuerdo con Pippin y Hohenwarter [31], el cierre de grieta inducido por plasticidad puede predecirse para tensión plana, deformación plana y en la región de transición entre estas dos. También, para todo tipo de condiciones de carga, incluida la carga de amplitud constante y variable, para grietas cortas y para la transición de deformación en pequeña escala a la de gran escala. Por el contrario, la predicción de cierre inducido por rugosidad e inducido por óxido no es tan sencilla. Información detallada sobre la contribución de los efectos del cierre de grieta sobre el umbral de propagación de grietas se suministra en [31].

3.2. Tamaño de la grieta

En la región umbral, la LEFM suele usarse como herramienta para describir el comportamiento de la propagación de grietas a través del concepto de ΔK_{th} , por debajo del cual las grietas no deberían propagarse. Esto es cierto para grietas largas, por lo que su aplicación a grietas cortas es bastante discutida, ya que el principio de similitud en la mecánica de fractura no se cumple. Este principio establece que todas las grietas, sin importar su tamaño en un mismo material, tendrán la misma

velocidad de propagación, es decir, se comportarán igual (como grietas largas) si el historial de la fuerza conductora de la grieta ΔK es el mismo.

El comportamiento de propagación de grietas largas y de grietas cortas presenta varias diferencias, principalmente en la región umbral de propagación. Las grietas cortas crecen con una velocidad de propagación mayor que las grietas largas, para un ΔK determinado, además de continuar propagándose por debajo del umbral ΔK_{th} determinado con ensayos de propagación de grietas estándar (para grietas largas) [31], [34]. Así, la estimación del tiempo de vida de un elemento que contiene pequeñas grietas o defectos con información para grietas largas será poco segura.

Con el fin de comprender la relación entre tamaño de grieta y crecimiento de grietas y el umbral de propagación ΔK_{th} es importante distinguir los diferentes tamaños de grieta existentes. Esto permite clasificar las observaciones e identificar los conceptos específicos aplicables para cada tipo de grieta. Si bien no existen límites claros, en la literatura se encuentran frecuentemente los siguientes. De acuerdo con Su *et al.* [7], las grietas pueden clasificarse como microestructuralmente cortas, grietas en la zona de transición, físicamente cortas y largas.

Grietas microestructuralmente cortas su tamaño es comparable con el de las dimensiones microestructurales características del material, como el tamaño de grano o la distancia entre fases; por esta razón, la mecánica de fractura basada en la mecánica del medio continuo no puede aplicarse [10]. De acuerdo con el estándar ASTM E647-15e1 [11], una grieta microestructuralmente corta tiene una longitud correspondiente a 5 a 10 granos; sin embargo, la longitud varía bajo diferentes condiciones [7].

Zona de transición las grietas en la zona de transición tienen un tamaño de entre 5 y 10 granos y 0,5 mm [7].

Grietas físicamente cortas para las cuales la extensión de la grieta supera considerablemente la escala de la zona plástica, por lo general con extensiones entre 0,5 y 1,5 mm [7] o 0,5 y 1 mm [17].

Grietas largas la definición de una grieta larga no es posible en términos absolutos [19]; su tamaño típicamente comprende muchos granos. Por ejemplo, Santus y Taylor [35] indican que una grieta es larga si su tamaño es 10 veces el promedio del tamaño de grano o de otra barrera microestructural. Para muchos materiales, una grieta es larga usualmente si es mayor que 1 a 2 mm [7] o 0,5 a 1 mm [17], pero el valor exacto depende del material y puede salirse de estos rangos.

Se cree que el umbral de propagación para grietas microestructuralmente cortas está limitado por $\Delta K_{th,eff}$ o por $\Delta K_{th,int}$, el cual no muestra ninguna dependencia con respecto a la extensión de la grieta. El comportamiento por debajo del umbral intrínseco del material está caracterizado por un comportamiento discontinuo, de aceleración y desaceleración, producto de la aleatoriedad en la dirección y la oposición de las barreras microestructurales presentes en el material y por la alta irregularidad en la forma de la grieta. El umbral para grietas físicamente cortas sí depende de la extensión de la grieta: aumenta de manera acelerada y uniforme en la medida en que aumenta la extensión de la grieta para luego crecer lentamente hasta alcanzar un valor constante, el cual es considerado como el umbral para grietas largas $\Delta K_{th,LC}$ en una determinada relación de carga R .

Este comportamiento es trazado en una curva denominada curva de resistencia o curva R , como la de la figura 5.

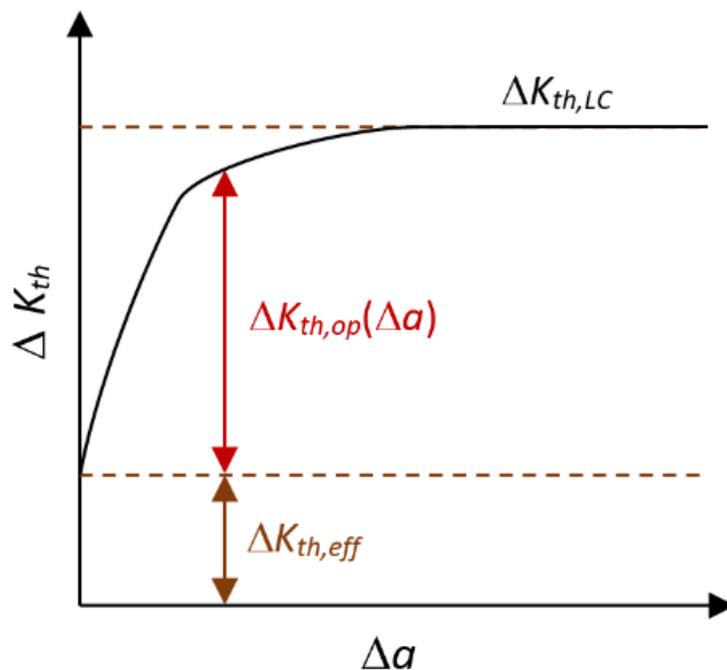


Figura 5. Curva de resistencia o curva R . Basada en [36]

La dependencia de la longitud de la grieta con respecto a ΔK_{th} puede explicarse a través de los efectos del cierre de grieta [36]. En la figura 6 se aprecia como $U = \Delta K_{eff} / \Delta K$, el cual es un parámetro adimensional que representa el efecto del cierre de grieta, es función de la extensión de la grieta. Para una grieta considerablemente corta (microestructuralmente) $U = 1$, es decir, no presenta efecto de cierre, ya que la grieta no tiene un recorrido suficiente que permita la acumulación de material detrás de la punta de la grieta, ni rugosidad de superficie de la grieta que permita que el fenómeno se manifieste. La grieta crece con la aplicación de un historial de carga (grietas físicamente cortas), manifestándose el efecto de cierre de grieta y aumentando a medida que la zona plástica deformada o partículas corrosivas se acumulan en el ancho de la grieta, $U < 1$, hasta que el cierre de grieta se satura y se alcanza un valor independiente del tamaño de grieta U_{LC} (grietas largas). A partir de allí, el crecimiento de la grieta puede ser descrito por la curva $da/dN - \Delta K$ pero corregido por el efecto del cierre de grieta. Así pues, puede deducirse que el aumento de ΔK_{th} con el aumento de la extensión de la grieta es causado por el correspondiente aumento del cierre de grieta.

3.3. Condiciones de carga

Diferentes condiciones de carga suelen implicar diferentes comportamientos en la zona umbral y en ΔK_{th} . A continuación, se tratan algunas de las condiciones de carga más relevantes.

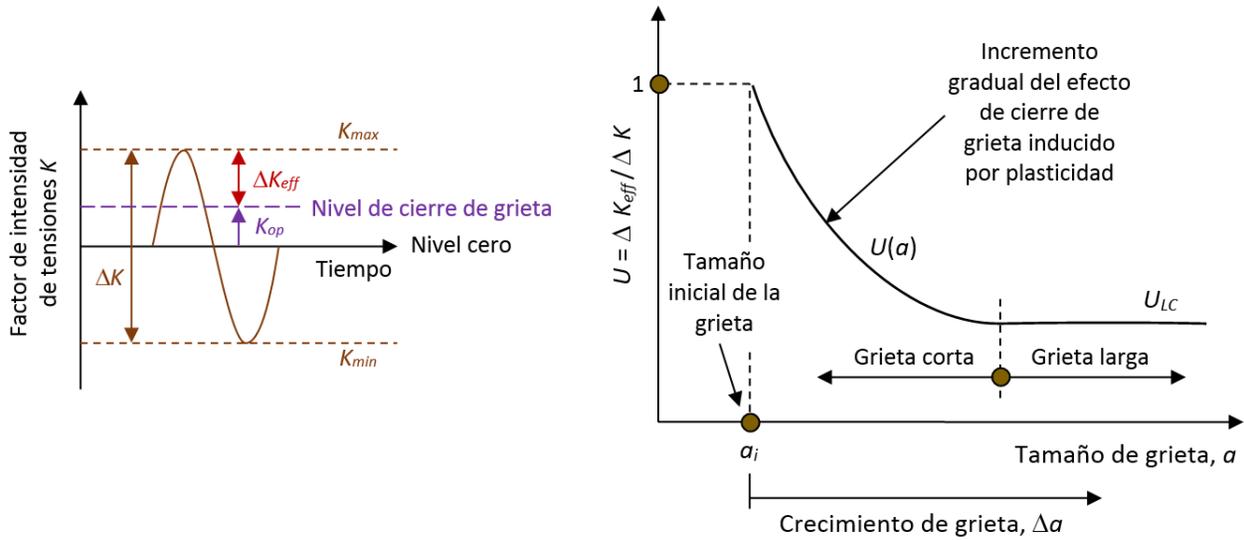


Figura 6. Esquema de la dependencia del parámetro adimensional de cierre U con el tamaño de la grieta Basada en [36]

3.3.1. Relación de carga (R)

El umbral ΔK_{th} depende fuertemente de la relación de carga (R) o del factor de intensidad de tensiones medio [37]. Por esto, en la literatura se han propuesto varias relaciones empíricas [38]- [44]. Estas muestran que hay varios patrones de variación del umbral con la relación R y que se deben usar diferentes fórmulas empíricas para diferentes materiales [37].

Además, se han propuesto varios conceptos para la explicación física de los efectos de R sobre ΔK_{th} , como las tensiones residuales a compresión o tracción, o efectos del ambiente provocados por reacciones químicas en la vecindad de la punta de la grieta. Sin embargo, ha sido el cierre de grieta el mecanismo tradicionalmente aceptado y el de resultados más consistentes. Para que haya propagación de grietas, la grieta debe estar abierta. Esto se logra con la aplicación de una carga de tracción. Las caras de la grieta se separan cada vez más en la medida en que se aumenta la relación de carga, estando más abierta, haciendo que el CTOD sea más grande que las partículas de óxido, las rugosidades de las superficies de fractura de la grieta y los desplazamientos de deformación plástica, lo que reduce los efectos del cierre de grieta hasta que prácticamente desaparecen. Partiendo del concepto de cierre de grieta, es posible distinguir dos tipos de comportamiento, descritos por la ecuación (6) [45]:

$$\Delta K_{th} = \begin{cases} \Delta K_{thmax} * (1 - R) & si R < R_c \\ \Delta K_{theff} & si R > R_c \end{cases} \quad (6)$$

Donde R_c representa el R crítico en que se presenta el cambio en el comportamiento.

Sin embargo, en la literatura es fácil encontrar estudios cuyos resultados experimentales han demostrado desviarse considerablemente del comportamiento basado en el cierre de grieta, como el mostrado en la figura 7 y en [8], en el que se presentan curvas similares a la de la figura 7 (y las ecuaciones correspondientes), para aceros ferríticos y aleaciones de aluminio, suministradas en el boletín del WRC (Welding Research Council) [13], en la Sección VIII de la ASME (American

Society of Mechanical Engineers) [1], por el IIW (International Institute of Welding) [14] y por el BS (British Standards) 7910 [2].

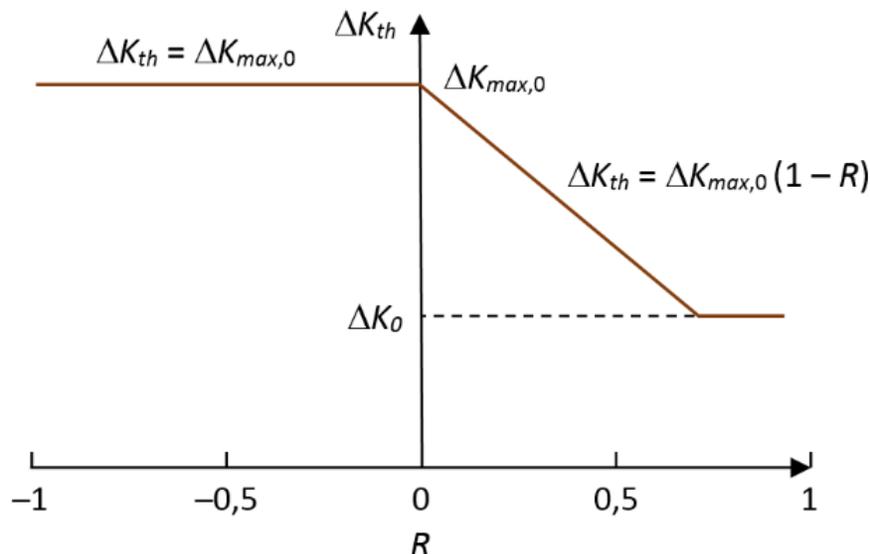


Figura 7. Esquema de los efectos de R sobre ΔK_{th} según el efecto teórico del cierre de grieta. Basada en [46]

Según la ecuación (6), para $R > R_c$ se espera que K_{min} sea mayor a K_{cl} , de manera que el efecto del cierre de grieta desaparece y de esta manera ΔK_{th} pasa a ser independiente de R , adoptando un valor constante igual a $\Delta K_{th,eff}$. Sin embargo, este no siempre es el caso: varios estudios han mostrado que luego de superar R_c , ΔK_{th} continúa decreciendo con el aumento de R , desviándose del comportamiento que venía trayendo, como en la figura 8. Similarmente, Cai *et al.* [37] presentan seis tipos de curvas R vs. ΔK_{th} en las que se aprecia la diversidad de las relaciones entre R y ΔK_{th} , de acuerdo con diferentes experimentadores y diferentes materiales. Por lo tanto, se ha considerado que en este rango ($R > R_c$) el efecto del cierre de grieta aún puede estar presente o que otros mecanismos se manifiestan, como se explica a continuación.

Presencia de cierre de grieta a nivel microestructural con grandes valores de R . Como se ha mencionado, a grandes valores de R la presencia de cierre de grieta se cree que es nula. Es probable que las técnicas o los métodos empleados para determinar el nivel de los efectos del cierre de grieta en estos niveles de carga, seguramente muy bajos, no sean lo suficientemente sensibles o desarrollados para detectarlos, siendo imperceptibles y por lo tanto considerados como inexistentes. Los métodos generalmente usados evalúan el nivel de cierre de forma global, pero estudios como el de Yamada y Newman [47], que lo miden de forma local, para una escala microestructural cerca y delante de la punta de la grieta, han mostrado que pequeños niveles de RICC y de OICC pueden seguir estando presentes a R elevados.

Efectos de K_{max} Es probable que el cierre de grieta no sea el único mecanismo que afecta el crecimiento de la grieta, por lo que se han propuesto otros mecanismos como el efecto de K_{max} . Este efecto se ha atribuido a cambios en los mecanismos de daño: de un crecimiento de grieta normal a la aparición de mecanismos de modo estático (de fractura a tracción) en la punta de la grieta, como división o desgarramiento dúctil, cuando K_{max} alcanza valores cercanos a la tenacidad a la fractura

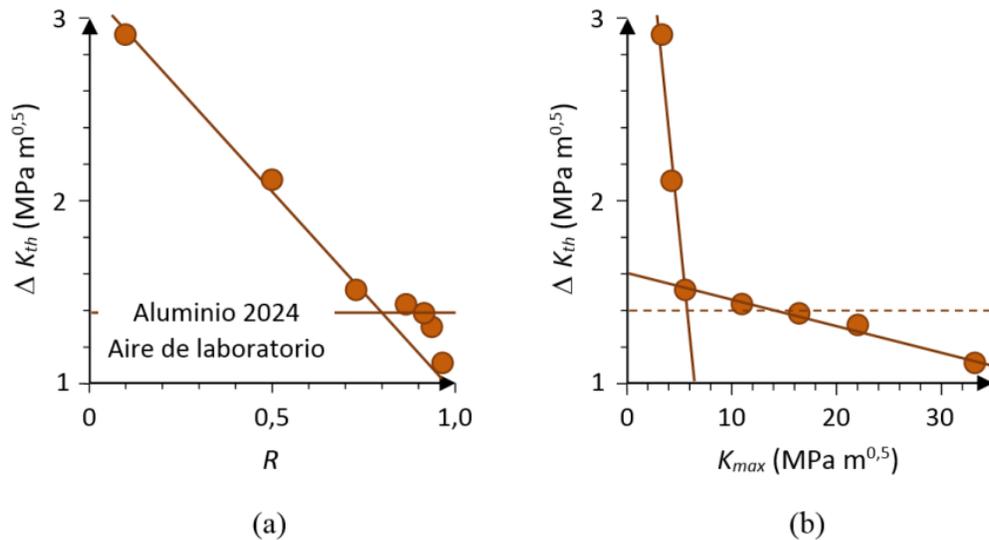


Figura 8. a) $\Delta K_{th} - R$; (b) $\Delta K_{th} - K_{max}$: con presencia de cierre de grieta u otros mecanismos para R elevados. Basada en [49]

K_{IC} ($0,3K_{IC} < K_{max} < 0,6K_{IC}$) [48]. Una posible explicación es que el incremento de K_{max} fomenta un mayor movimiento de dislocaciones, llevando a que más dislocaciones se acumulen en barreras microestructurales y, así, ocurra un mayor daño en la punta de la grieta causado por el aumento en la formación de microvacíos y microgrietas. Cuanto mayor es el aumento de K_{max} , acercándose a K_{IC} , mayor es la reducción de ΔK_{max} .

Otra hipótesis para grandes valores de K_{max} es la de los mecanismos de agrietamiento por carga sostenida *SLC* (*sustained load cracking*), como fluencia o agrietamiento asistido por hidratos, que dependen del tiempo de exposición y de las condiciones ambientales. Estos pueden mostrar un crecimiento de grieta estable bajo cargas monotónicas cuando K supera un umbral que es menor a K_{IC} (como en aleaciones de titanio). Los efectos sobre ΔK_{th} podrían aparecer cuando K_{max} supere un umbral de *SLC*. El comportamiento estaría dominado por cargas estáticas más que por cargas cíclicas [10], [50].

Para el lector interesado, Zhu *et al.* [51] presentan una revisión histórica de la investigación sobre la relación entre el cierre de grieta y el factor R

3.3.2. Tensiones residuales macroscópicas

Las tensiones residuales macroscópicas pueden ser consideradas como una carga estática interna adicional actuando de forma superpuesta a la carga cíclica que afecta el valor de R y de K_{max} de forma local, llevándolos a un mayor o menor nivel, dependiendo del tipo de tensión residual. Por lo tanto, de forma indirecta, afectan el valor de ΔK_{th} , bien sea a través de efectos del cierre de grieta o por los efectos de K_{max} .

La presencia de un pico de tensión residual de tracción en la punta de la grieta, de magnitud suficientemente grande, debería suprimir cualquier efecto del cierre de grieta, manteniendo la grieta abierta. Este comportamiento es equivalente a tener un R local más alto. De manera que ΔK_{th}

será menor al esperado en un material sin tensiones residuales. El efecto contrario se espera con la presencia de tensiones residuales compresivas, es decir, la grieta se mantendrá cerrada aun para valores pequeños de R .

Sin embargo, determinar la influencia de tensiones residuales sobre ΔK_{th} suele tornarse problemático, ya que por lo general la presencia de las tensiones residuales en un componente no es homogénea, sino que muestra importantes variaciones a través del grosor del componente, así como en otras direcciones, pasando por tensiones residuales a tracción y compresión [52]. Así pues, la relación de carga total no será constante, sino que dependerá de la sección del componente a analizar. Además, los métodos para su medición resultan complejos.

3.3.3. Historial de carga (reducción de carga)

Los procedimientos de reducción de carga manteniendo R constante han mostrado valores poco conservativos de ΔK_{th} . La tendencia es que con grandes valores iniciales del ensayo de ΔK y una alta velocidad de reducción de carga se obtienen ΔK_{th} más altos. Gradientes de reducción de carga más cortos, es decir, una velocidad de reducción de carga más alta hará que la deformación plástica en un paso de reducción de carga se encuentre más cerca del anterior (figura 9(a)). Además, cuanto mayor sea el valor del ΔK inicial, mayor será el tamaño de la zona plástica generada. Así pues, el material deformado plásticamente se acumulará en el ancho de la grieta, estando muy próximo a la punta de la grieta, alterando así el estado de tensiones en dicha punta, y aumentando los efectos de PICC [53].

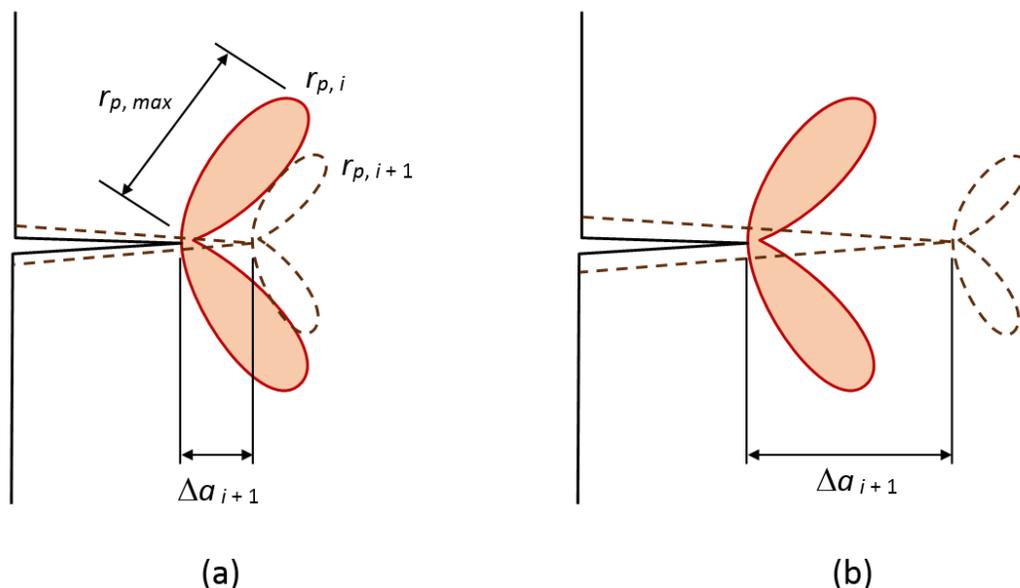


Figura 9. Formas de aplicar la reducción de carga: (a) demasiado rápido; (b) forma correcta . Basada en [54]

Por lo tanto, lo que se busca para eliminar los efectos del historial de carga es la aplicación de un ΔK y una velocidad de reducción de carga C más baja (figura 9(b)). Mientras más grande sea el ΔK inicial menores serán los valores de C requeridos para evitar valores de ΔK_{th} demasiado

altos [55]. La velocidad de la reducción de carga debe ser la adecuada, de tal forma que la zona plástica del ciclo de carga anterior no interfiera sobre la zona plástica actual. Sin embargo, el PICC no es el único mecanismo de cierre que debe ser evitado: si la reducción es muy lenta, puede llegar a propiciar la formación de partículas corrosivas que aumenten el OICC. El OICC es promovido por gradientes de carga muy bajos, lo que se traduce en un mayor lapso de tiempo disponible para que partículas corrosivas se consoliden en capas.

3.3.4. Amplitud de carga variable

La amplitud de carga en aplicaciones reales no es totalmente constante. Son frecuentes los cambios en la tensión media y en la relación de carga, por cambios de servicio o condiciones accidentales, creando patrones de carga complejos en los que es difícil determinar el comportamiento de la propagación de grietas. Una de las secuencias de amplitud de carga variable más documentadas, relativamente sencilla y común en áreas como la aeronáutica, es la de sobrecargas o descargas periódicas contenidas en una base de amplitud constante. Dependiendo de diversos factores, secuencias de amplitud de carga variable pueden generar una reducción o una aceleración en el crecimiento de la grieta.

El comportamiento de ΔK_{th} para secuencias de carga con sobrecargas o descargas es diferente a los valores esperados para ensayos con una carga de amplitud constante. Cuando se aplican sobrecargas, son introducidas también tensiones residuales. Una sobrecarga a tracción produce tensiones residuales compresivas cerca de la punta de la grieta, mientras que sobrecargas a compresión generan tensiones residuales a tracción. También, cuando se aplican sobrecargas pueden originarse el PICC y desviaciones de la grieta. Para considerar el efecto de las sobrecargas sobre el umbral de propagación, son fundamentales dos factores: la relación de carga o magnitud de la sobrecarga y la frecuencia de carga a la que se realiza (la cantidad de ciclos por cada sobrecarga). Por ejemplo, un aumento en la relación de la sobrecarga a tensión muestra una mejora en ΔK_{th} ; y el aumento en la frecuencia de una sobrecarga compresiva, es decir, el número de ciclos entre picos o sobrecargas es menor y la reducción del umbral de propagación es mayor [56].

3.3.5. Modo mixto de carga

En ingeniería es común encontrar aplicaciones con carga mixta, es decir, una combinación de cargas torsionales (modo III), de corte (modo II) y a tracción (modo I), estáticas y cíclicas. Conocer el umbral de propagación bajo el efecto de una carga mixta tendría enormes beneficios prácticos. El problema es que este es un fenómeno que resulta bastante complejo, ya que diferentes combinaciones de cargas superpuestas llegan a presentar comportamientos completamente diversos. Además, la medición del cierre de grieta para grietas en modo de corte es aún una tarea bastante compleja [5]. Simplificando el comportamiento del modo mixto de carga, puede hacerse una estimación sencilla de la no propagación de grietas (válida para efectos prácticos de diseño, aunque no siempre con resultados satisfactorios) partiendo de la descripción del crecimiento de grieta bajo condiciones de carga mixta con un rango del factor de intensidad de tensiones equivalente ΔK_{eq} . Así pues, Richard y Sander [57], por ejemplo, proponen que una grieta sujeta a una carga mixta bidimensional (I + II) se propagará si ΔK_{eq} supera el umbral de propagación ΔK_{Ith} , de acuerdo con la ecuación (7):

$$\Delta K_{eq} = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} * \sqrt{\Delta K_I^2 + 5,336\Delta K_{II}^2} > \Delta K_{Ith} \quad (7)$$

Igualmente, una grieta sujeta a una carga mixta tridimensional (I + II + III) se propagará si ΔK_{eq} supera el umbral de propagación ΔK_{Ith} , de acuerdo con la ecuación (8):

$$\Delta K_{eq} = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} * \sqrt{\Delta K_I^2 + 5,336\Delta K_{II}^2 + 4\Delta K_{III}^2} > \Delta K_{Ith} \quad (8)$$

Se toma ΔK_{Ith} como límite en las anteriores ecuaciones, ya que generalmente ΔK_{Ith} es menor que ΔK_{IIth} y ΔK_{IIIth} , siendo de esta manera la estimación más conservadora.

3.4. ΔK_{theff} módulo de Young y vector de Burger

Los mecanismos intrínsecos que gobiernan el comportamiento de ΔK_{thint} (o de ΔK_{theff}) aún no son totalmente entendidos. La estimación de este factor a través de diferentes modelos suele involucrar una gran cantidad de variables microestructurales y mecánicas que permiten buenas aproximaciones; cuantas más variables se utilicen, mayor precisión se obtiene. Sin embargo, varios de estos parámetros utilizados son difíciles de determinar, ya sea empírica o analíticamente, por lo que la aplicación de la mayoría de estos modelos es limitada. Lo que suelen tener en común los diferentes modelos es que muestran una relación proporcional al módulo de Young E , que ha permitido estimaciones más sencillas, involucrando solo dos variables: E y el vector de Burger b , con los que se obtienen resultados razonables. Entonces, puede decirse que ΔK_{theff} depende principalmente de las propiedades elásticas, representadas por E , como una medición indirecta de la resistencia de las uniones metálicas; y de la red cristalina, caracterizada por b , que cuantifica la distorsión de esta.

Hertzberg [58] observó que el vector de Burger era equivalente a la relación $(\Delta K_{theff}/E)^2$, en varios sistemas de aleaciones metálicas, con lo que de una regresión lineal obtuvo la ecuación (9):

$$\Delta K_{theff} \approx \sqrt{b}E \quad (9)$$

Relación válida para la mayoría de metales aleados. Para metales puros, introducir el factor 3/4 en la ecuación (9) permite que los resultados obtenidos concuerden satisfactoriamente con los experimentales.

El módulo de elasticidad E se encuentra relacionado con la fuerza de las uniones interatómicas del material y el crecimiento de grietas en sistemas metálicos implica la ruptura de estas uniones, convirtiéndose entonces en una posible explicación de la relación encontrada.

El crecimiento de grietas en materiales dúctiles es causado por el movimiento de dislocaciones (deformación plástica) en la punta de la grieta. El vector de Burger permite cuantificar la distorsión de la red cristalina, siendo este la magnitud de la distorsión mínima en la red debido a dislocaciones y, por tanto, el avance de grieta más pequeño posible.

3.5. Propiedades microestructurales

La microestructura influye en el componente extrínseco del umbral de propagación asociado a mecanismos de protección, principalmente los niveles del efecto del cierre de grieta. Existe una gran cantidad de parámetros microestructurales que pueden afectar al ΔK_{th} , pero la mayoría puede asociarse con cambios en el grado de rugosidad de la superficie de fractura, y por lo tanto con el RICC, y en menor medida con la deflexión de la grieta. Tamaños de grano, límites y orientación de grano, inclusiones, proporción, distribución y morfología de una segunda fase, límites de fase y precipitados, entre otros, pueden causar la desviación y la ramificación de la grieta, que mejoran el modo de desplazamiento de corte (II), y de esta forma el RICC.

El efecto de la microestructura sobre el valor de $\Delta K_{th,eff}$ es por lo general mínimo. Se pueden considerar efectos como tortuosidad, desviación, acoplamiento o ramificación de las grietas.

Actualmente es un desafío encontrar la forma ideal de llevar a cabo cambios en las características microestructurales del material, y que estos resulten en un efecto positivo en la resistencia a la propagación de grietas. Esto debido a que estos cambios pueden resultar en efectos negativos sobre las propiedades mecánicas del material, o en cambios en otras características microestructurales que no permitan el efecto esperado. Encontrar el equilibrio o el punto óptimo es el objetivo de tratamientos térmicos o mecánicos llevados a cabo.

3.6. Ambiente

El efecto del ambiente es muy difícil de cuantificar debido a la gran variedad de mecanismos inducidos por el ambiente que pueden llegar a afectar a la fuerza conductora de la grieta. Se han propuesto numerosos mecanismos intentando explicar la influencia del ambiente en la propagación de grietas de fatiga. Sin embargo, en la zona umbral de propagación es posible considerar las contribuciones del ambiente sobre ΔK_{th} a partir de la competición entre dos tipos de mecanismos de oxidación frecuentes, con efectos opuestos [59]. El primer tipo es el de los mecanismos de cierre de la grieta ya conocidos, predominantemente el inducido por óxido en atmósferas gaseosas (en ambientes líquidos probablemente dominará el cierre inducido por fluido viscoso), que causan la desaceleración de la grieta y el aumento de ΔK_{th} . El segundo tipo se refiere a procesos de corrosión por fatiga (la fragilización por hidrógeno como el más destacado), los cuales aceleran el crecimiento de las grietas y reducen el valor de ΔK_{th} . Continúa siendo un gran reto establecer exactamente el efecto del ambiente sobre ΔK_{th} , ya que determinar la contribución o la presencia de los mecanismos mencionados depende de numerosos factores del ambiente como el tipo de ambiente, la humedad, la presión, la temperatura y la frecuencia, entre otros, aparte de otros no relacionados con el ambiente. Además, la influencia de un mecanismo puede contrarrestar la influencia de otro o incluso compensarlo.

3.7. Geometría y ancho de la muestra

Los efectos de la geometría y las dimensiones de la muestra aún no son completamente entendidos. Algunos han intentado explicar su influencia por medio de la relación entre el grosor de la muestra y el cierre de grieta. Romaniv *et al.* [60] explicaron el efecto del grosor de la muestra sobre el umbral

de propagación a partir del efecto del estado tensión -deformación sobre el cierre de grieta. El OICC aumenta con el incremento del grosor debido al aumento de las restricciones plásticas en la punta de la grieta, que proporcionan el comienzo de la formación de partículas corrosivas. En cambio, el PICC se reduce con el aumento del grosor debido a que un menor grosor promueve condiciones de tensión plana, condiciones ideales para que ocurra el PICC. De esta manera, en condiciones donde el PICC predomine, ΔK_{th} decrece con el aumento del grosor de la grieta; mientras que con un OICC mayor el efecto será el inverso (figura 10).

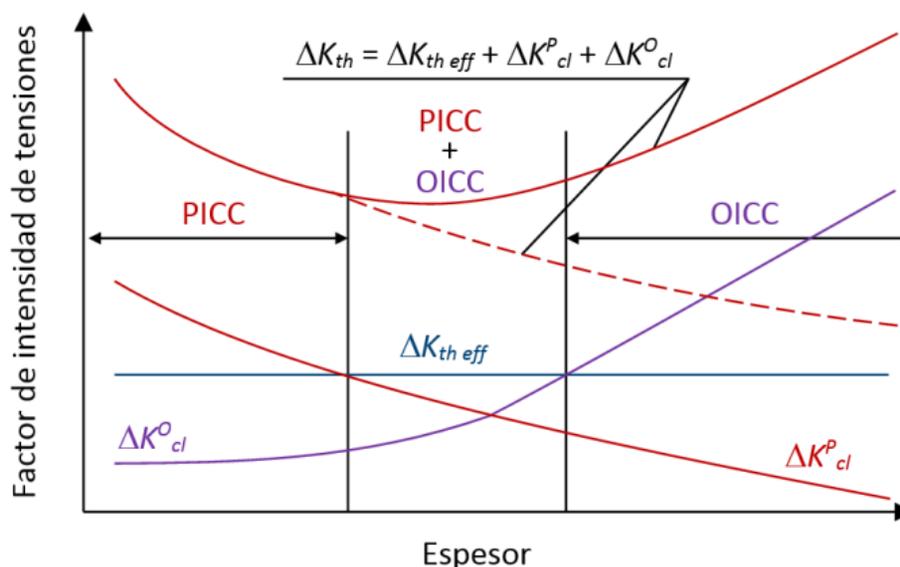


Figura 10. Dependencia del grosor de la muestra sobre ΔK_{th} . Basada en [61]

En cuanto a la geometría de la muestra, se tiende a asumir que el valor de ΔK_{th} es independiente de esta, aunque varios ensayos realizados con diferentes tipos de geometrías han mostrado resultados que presentan una gran dispersión, por lo que la tendencia no ha sido aún definida. Sin embargo, en estudios como [62], la relación de la geometría de la muestra con ΔK_{th} se vincula con el nivel de restricción geométrica, cuantificado con la “tensión T” (parámetro que no suele ser considerado dentro de LEFM, pero que en la zona umbral su magnitud y signo pueden llegar a afectar el tamaño y la forma de la zona plástica). El nivel de restricción puede influir en la intensidad del cierre de grieta. Un bajo nivel de restricción está asociado a una menor triaxialidad de tensiones en la punta de la grieta, lo que produce tamaños de la zona plástica cerca a la punta de la grieta más grandes, y puede llevar a una mejor estabilización de la grieta en modo I durante su propagación. Esto puede conducir a que una geometría con un bajo nivel de restricción ($T < 0$) alcance una menor rugosidad en la superficie de fractura, un menor RICC, y por lo tanto exhiba un ΔK_{th} más bajo que una geometría con un alto nivel de restricción ($T > 0$).

4. Conclusiones

El umbral del rango del factor de intensidad de tensiones ΔK_{th} es un parámetro importante, ya que está relacionado con el tiempo de vida de un componente mecánico, y muchos de estos están sometidos a valores de ΔK cercanos a dicho umbral.

En este trabajo se discutió acerca de los métodos existentes para la determinación de ΔK_{th} . Se describieron los métodos experimentales (estándar ASTM E647-15e1 [11]), los cuales son los más aplicados, aunque pueden arrojar resultados inexactos. Por ejemplo, de acuerdo con Zerbst *et al.* [10], los métodos estándar para la determinación experimental de ΔK_{th} arrojan resultados no conservativos en ciertos casos. También, se presentó el método de preagrietamiento a compresión, el cual puede producir resultados conservativos. Con respecto a los ensayos experimentales, debería ser un objetivo mejorar los métodos, las técnicas de ensayos y la tecnología para determinar ΔK_{th} . Si bien se ha avanzado, aún existen dificultades en la aplicación de este parámetro en situaciones prácticas de ingeniería. Se describieron también modelos semiteóricos o numéricos. Se ha avanzado significativamente en los últimos años, obteniéndose resultados acordes con datos experimentales; sin embargo, se debe seguir avanzando en la investigación, para que estos modelos sean más universales.

En este artículo también se discutió sobre los factores que afectan a ΔK_{th} . Es posible distinguir dos factores de ΔK_{th} : un factor intrínseco ΔK_{thint} (o ΔK_{theff}), correspondiente a mecanismos que actúan en la punta de la grieta, y un factor extrínseco, en el que intervienen mecanismos en el ancho de la grieta. A partir de estos, y haciendo particular énfasis en los mecanismos de cierre de grieta, se analizó la forma en que los parámetros más influyentes como el tamaño de la grieta a , la relación de carga R , la microestructura y el ambiente afectan al valor de ΔK_{th} . Otros factores que inciden en el umbral son la geometría de la probeta o componente, las propiedades del material en escalas microscópicas y fenomenológicas, el historial de la carga (por ejemplo, carga de amplitud variable), las tensiones residuales y las cargas de modo mixto [10].

Los valores de ΔK_{th} encontrados en la literatura presentan una dispersión significativa, atribuida principalmente al factor extrínseco. Esto trae problemas en el análisis de fatiga, ya que la estimación de vida de un componente responde de forma sensible a pequeñas variaciones de ΔK_{th} . Una solución a la dispersión en los resultados es la de considerar la situación como libre de efectos extrínsecos como el cierre de grieta, tomando como umbral de propagación a ΔK_{theff} , cuyos valores pueden limitarse a un estrecho rango para una aleación determinada. Sin embargo, esto traería como consecuencia una estimación demasiado conservativa. Es de vital importancia lograr un entendimiento más profundo de los mecanismos que actúan en la etapa de propagación de grietas a fatiga en la región umbral, principalmente los extrínsecos, para la comprensión de ΔK_{th} . También es importante encontrar una manera de reducir la dispersión en los resultados.

Por un lado, el cierre de grieta es el concepto más importante para comprender y racionalizar de manera uniforme el efecto de la mayoría de los parámetros que intervienen en el valor del umbral de propagación. Sin embargo, estudiar los efectos de cierre de grieta presenta muchas complejidades. Por ejemplo, separar cuantitativamente la contribución de cada uno de los mecanismos de cierre es una tarea difícil. Por lo tanto, modelar el umbral de propagación con base en el cierre de grieta es discutible. Por lo anterior, seguramente sea necesario, al menos, desarrollar una reinterpretación del fenómeno del cierre de grieta. A pesar de esto, la apuesta en los últimos años y en un futuro cercano para lograr una mayor comprensión del crecimiento de grietas en la región del umbral y una estimación más precisa del umbral de propagación parece seguir siendo el entender mejor el fenómeno del cierre de grieta y el lograr un método más exacto de medición, principalmente en la zona umbral, en donde se presentan mayores dificultades. Si bien el efecto de cierre de grieta es el

mecanismo más importante, otros mecanismos como protección de zona, protección geométrica o fenómenos causados por el ambiente, como la fragilización por hidrógeno, también requieren una mejor comprensión.

Por otro lado, en algunas investigaciones (por ejemplo, [63], [64]) se ha cuestionado sobre los métodos basados en el cierre de grieta, ya que sobreestiman de manera sustancial el crecimiento de grietas cortas y afectan al umbral [17]. Por esto, se ha formulado otro tipo de conceptos alternativos al cierre de grieta. Por ejemplo, Vasudevan *et al.* [21] sugirieron un modelo de propagación de grietas basado en ΔK y en ΔK_{max} , sin tener en cuenta el cierre de grieta. También, se han propuesto teorías como las aproximaciones multifractales y la de tensiones residuales en la punta de la grieta.

Recientemente, se han propuesto muchos métodos y teorías alternativas, fundamentadas tanto teórica como experimentalmente. Se resaltan la teoría UniGrow (parámetro Kapa) [22], [23] y la teoría de doble parámetro [21] (basada en ΔK y en ΔK_{max}). Muchos de los métodos desarrollados tienen una validez razonable bajo condiciones particulares. Sin embargo, hay que seguir avanzando para que los modelos, tanto analíticos como numéricos, sean cada vez más universales. También, se debe avanzar en el desarrollo de modelos de problemas con carga mixta (modo I, II y III), cargas estáticas y cíclicas, ya que hay aplicaciones reales con carga mixta. Sin embargo, este es un fenómeno complejo que representa mayores complejidades y retos.

Finalmente, se debe avanzar para que las estimaciones de ΔK_{th} a partir de principios básicos consideren los diferentes factores, variables y complejidades del comportamiento en la zona umbral de propagación. Por ejemplo, se debe establecer con mayor exactitud el efecto del ambiente sobre ΔK_{th} , ya que hay muchos mecanismos y variables asociados, tales como tipo de ambiente, humedad, presión y temperatura, entre otros, los cuales interactúan de manera compleja. Como opinan algunos, el umbral basado en LEFM puede no ser suficiente para predecir la no propagación de grietas en situaciones reales, en escenarios tan complejos como condiciones de amplitud de carga variable con patrones de carga impredecible, o en condiciones de carga mixta con combinaciones difíciles de precisar. Esto dificulta la generalización de la información obtenida en ensayos y la posibilidad de aplicarlos en problemas específicos reales de ingeniería. En una aplicación práctica, el valor de ΔK_{th} dependerá de diferentes parámetros que se combinan de una manera compleja, siendo muy difícil distinguir el efecto de cada uno por separado. Así pues, los resultados obtenidos experimentalmente difícilmente pueden ser transferibles a aplicaciones reales.

Referencias

- [1] ASME, “Article KD-4, Fracture Mechanics Evaluation”, *Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 3*, New York, American Society of Mechanical Engineers, 2019. ↑ 2, 4, 15
- [2] British Standard, *Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaw in Metallic Structures*, BS 7910, London, The British Standard Institution, 2019. ↑ 2, 4, 15
- [3] C. A. Cabrera Arias, F. S. Garay Rairan, I. Arango Calderón y Ó. E. Gómez Vargas, “Design of a troubleshooting digital test bench for the beechcraft king C-90, 200, B200, 300 and 350 aircraft GCU”, *Ingeniería*, vol. 25, no. 3, pp. 393-409, 2020. <https://doi.org/10.14483/23448393.16903> ↑ 2

- [4] S. Rodríguez Pulecio, J. J. Coronado Marín y N. Arzola de la Peña, “Mecánica de la fractura aplicada a ejes de molinos de caña de azúcar”, *Ingeniería*, vol. 10, no. 2, pp. 23-29, 2005. <https://doi.org/10.14483/23448393.2713> ↑2
- [5] U. Zerbst *et al.*, “Fatigue and fracture of weldments”, in *Fatigue and Fracture of Weldments*. Springer, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04073-4_1 ↑2, 3, 18
- [6] K. J. Miller, “The behaviour of short fatigue cracks and their initiation part I - A review of two recent books”, *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 10, no. 1, pp. 75-91, 1987. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1987.tb01150.x> ↑3, 7, 11
- [7] M. Su, L. Xu, C. Peng, Y. Han, and L. Zhao, “Fatigue short crack growth, model and EBSD characterization of marine steel welding joint”, *Int. J. Fatigue*, vol. 156, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106689> ↑3, 6, 12
- [8] K. Hasegawa, D. Dvořák, V. Mareš, B. Strnadel, and S. Usami, “Suitability of fatigue crack growth thresholds at negative stress ratios for ferritic steels and aluminum alloys in flaw evaluation procedures”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 248, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107670> ↑3, 4, 6, 14
- [9] D. Taylor, *A Compendium of Fatigue Thresholds and Growth Rates*, London, Engineering Materials Advisory Services, 1985. ↑3
- [10] U. Zerbst, M. Vormwald, R. Pippan, H.-P. Gänser, C. Sarrazin-Baudoux, and M. Madia, “About the fatigue crack propagation threshold of metals as a design criterion - A review”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 153, pp. 190-243, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.12.002> ↑3, 12, 16, 22
- [11] ASTM, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM E647-15e1*, West Conshohocken, PA, ASTM International, 2015. ↑4, 5, 6, 12, 22
- [12] L. P. Pook, “Mixed-mode fatigue crack growth thresholds: a personal historical review of work at the National Engineering Laboratory, 1975-1989”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 187, pp. 115-141, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.028> ↑4
- [13] J. M. Barsom, “Fatigue behavior of pressure-vessel steels”, *WRC Bulletin*, 194, New York, The Welding Research Council, 1974. ↑4, 14
- [14] A. Hobbacher, *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*, document XIII-2151-07 / XV 1254-07, Paris, International Institute of Welding, 2007. ↑4, 15
- [15] G. Marci, “Determination of the partitioning point dividing ΔK into $\Delta K_{th\,eff}$ ”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 53, no. 1, pp. 23-36, 1996. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(95\)00082-7](https://doi.org/10.1016/0013-7944(95)00082-7) ↑
- [16] S. C. Forth, J. C. Newman, and R. G. Forman, “Generating fatigue crack growth thresholds with constant amplitude loads”, *Fatigue 2002*, pp. 2337-2344, 2002. ↑6
- [17] D. J. Bang, and A. Ince, “A short and long crack growth model based on 2-parameter driving force and crack growth thresholds”, *Int. J. of Fatigue*, vol. 141, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105870> ↑6, 7, 8, 12, 23
- [18] J. C. Newman, “A review of modelling small-crack behavior and fatigue-life predictions for aluminum alloys”, *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 17, no. 4, pp. 429-439, 1994. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1994.tb00242.x> ↑7
- [19] D. Leonetti, J. Maljaars, and H. H. Snijder, “Fracture mechanics based fatigue life prediction for a weld toe crack under constant and variable amplitude random block loading—Modeling and uncertainty estimation”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 242, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107487> ↑7, 12
- [20] K. Sadananda, A. Arcari, and A. K. Vasudevan, “Does a nucleated crack propagate?”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 176, pp. 144-160, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.02.003> ↑7
- [21] A. K. Vasudevan, K. Sadanada, and N. Louat, “A review of crack closure, fatigue crack threshold and related phenomena”, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 188, no. 1-2, pp. 1-22, 1994. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)90351-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90351-4) ↑7, 23
- [22] A. H. Noroozi, G. Glinka, and S. Lambert, “A two parameter driving force for fatigue crack growth analysis”, *Int. J. Fatigue*, vol. 27, no. 10-12, pp. 1277-1296, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.002> ↑7, 23
- [23] A. H. Noroozi, G. Glinka, and S. Lambert, “A study of the stress ratio effects on fatigue crack growth using the unified two-parameter fatigue crack growth driving force”, *Int. J. Fatigue*, vol. 29, no. 9-11, pp.1616-1633, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.12.008> ↑7, 23
- [24] D. J. Bang, A. Ince, and L. Q. Tang, “A modification of UniGrow 2-parameter driving force model for short fatigue crack growth”, *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 42, no.1, pp. 45-60, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.04.002>

- 1111/ffe.12865 ↑7
- [25] D. J. Bang, A. Ince, and M. Noban, “Modeling approach for a unified crack growth model in short and long fatigue crack regimes”, *Int. J. Fatigue*, vol. 128, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.042> ↑7
- [26] H. Kitagawa, and S. Takahashi, “Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stages”, *Proceedings of 2nd International Conference on Mechanical Behavior of Materials*, pp. 627-631, 1976. ↑7
- [27] B. Atzori, and P. Lazzarin, “Notch sensitivity and defect sensitivity under fatigue loading: Two sides of the same medal”, *Int. J. Fract.*, vol. 107, pp. 1-8, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1007686727207> ↑7
- [28] B. Atzori, and P. Lazzarin, “A three-dimensional graphical aid to analyze fatigue crack nucleation and propagation phases under fatigue limit conditions”, *Int. J. Fract.*, vol. 118, no. 3, pp. 271-284, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1022965909483> ↑7
- [29] M. N. James, C. J. Christopher, Y. Lu, and E. A. Patterson, “Local crack plasticity and its influences on the global elastic stress field”, *Int. J. Fatigue*, vol. 46, pp. 4-15, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.04.015> ↑7
- [30] R. O. Ritchie, “Mechanisms of fatigue crack propagation in metals, ceramics and composites: Role of crack tip shielding”, *Mater. Sci. Eng.: A*, vol. 103, no. 1, pp. 15-28, 1988. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90547-2](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90547-2) ↑8, 9
- [31] R. Pippin, and A. Hohenwarter, “Fatigue crack closure: A review of the physical phenomena”, *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 40, no. 4, pp. 471-495, 2017. <https://doi.org/10.1111/ffe.12578> ↑8, 11, 12
- [32] H. J. Schindler, “On the significance of crack tip shielding in fatigue threshold— Theoretical relations and experimental implications”, in J. C. Newman, and R. S. Piascik (Eds.), *Fatigue Crack Growth Thresholds, Endurance Limits, and Design* ASTM International, 2000. <https://doi.org/10.1520/stp13425s> ↑8
- [33] R. Pippin, “The effective threshold of fatigue crack propagation in aluminium alloys. I. The influence of yield stress and chemical composition”, *Phil. Magazine A*, vol. 77, no. 4, pp. 861-873, 1998. <https://doi.org/10.1080/01418619808221216> ↑8
- [34] K. J. Miller, “Materials science perspective of metal fatigue resistance”, *Mater. Sci. Tech.*, vol. 9, no. 6, pp. 453-462, 1993. <https://doi.org/10.1179/mst.1993.9.6.453> ↑12
- [35] C. Santus, and D. Taylor, “Physically short crack propagation in metals during high cycle fatigue”, *Int. J. Fatigue*, vol. 31, no. 8-9, pp. 1356-1365, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.03.002> ↑12
- [36] U. Zerbst, and M. Madia, “Fracture mechanics based assessment of the fatigue strength: Approach for the determination of the initial crack size”, *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 38, no. 9, pp. 1066-1075, 2015. <https://doi.org/10.1111/ffe.12288> ↑13, 14
- [37] X. Cai, R. Xia, M. Huo, and J. Xu, “A threshold formula for fatigue crack growth with mean stress intensity factors”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 135, pp. 639-645, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.014> ↑14, 15
- [38] D. Kujawski, and F. Ellyin, “A unified approach to mean stress effect on fatigue threshold conditions”, *Int. J. Fatigue*, vol. 17, no. 2, pp. 101-106, 1995. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(95\)95888-n](https://doi.org/10.1016/0142-1123(95)95888-n) ↑14
- [39] D. N. Lal, and T. K. G. Namboodhiri, “A model for the effect of mean stress on the threshold condition for fatigue crack propagation”, *Mater. Sci. Eng.: A*, vol. 130, no. 1, pp.37-49, 1990. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(90\)90079-i](https://doi.org/10.1016/0921-5093(90)90079-i) ↑
- [40] V. Kloster, H. A. Richard, and G. Kullmer, “Experimental characterization of the threshold and fatigue crack growth behaviour regarding negative stress ratios”, *Ann. Nuclear Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 14-24, 2013. ↑
- [41] K. Walker, “The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum”, in M. S. Rosenfeld (Ed.), *Effect of Environment and Complex Load History on Fatigue Life*, ASTM International, 1970. <https://doi.org/10.1520/stp32032s> ↑
- [42] T. Mann, “The influence of mean stress on fatigue crack propagation in aluminum alloys”, *Int. J. Fatigue*, vol. 29, no. 8, pp. 1393-1401, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.11.010> ↑
- [43] V. M. Radhakrishnan, “Endurance diagram”, *Int. J. Fatigue*, vol. 12, no. 6, pp. 513-517, 1990. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(90\)90224-3](https://doi.org/10.1016/0142-1123(90)90224-3) ↑
- [44] H. Döker, “Fatigue crack growth threshold: Implications, determination and data evaluation”, *Int. J. Fatigue*, vol. 19, no. 93, pp. 145-149, 1997. [https://doi.org/10.1016/s0142-1123\(97\)00058-3](https://doi.org/10.1016/s0142-1123(97)00058-3) ↑14
- [45] R. Schmidt, and P. Paris, “Threshold for fatigue crack propagation and the effects of load ratio and frequency”, in J. Kaufman, J. Swedlow, H. Corten, J. Srawley, R. Heyer, E. Wessel, and G. Irwin (Eds.), *Progress in Flaw Growth*

- and *Fracture Toughness Testing*, ASTM International, 1973. <https://doi.org/10.1520/stp49638s> ↑14
- [46] Z. Chen, *The Effect of R Ratio and Temperature on Fatigue Crack Growth Threshold of Power Plant Steels*, Doctoral Thesis, ETH, Zurich, 2018. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000274863> ↑15
- [47] Y. Yamada, and J. C. Newman Jr, “Crack closure under high load-ratio conditions for Inconel-718 near threshold behavior”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 76, no. 2, pp. 209-220, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.09.009> ↑15
- [48] J. A. Newman, W. T. Riddell, and R. S. Piascik, “Effects of K_{max} on fatigue crack growth threshold in aluminum alloys”, in J. C. Newman, and R. S. Piascik (Eds.), *Fatigue Crack Growth Thresholds, Endurance Limits, and Design*, ASTM International, 2000. <https://doi.org/10.1520/stp13426s> ↑16
- [49] J. A. Newman, *The Effects of Load Ratio on Threshold Fatigue Crack Growth of Aluminum Alloys*, Ph.D. Dissertation, Virginia Tech., 2000. <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/29418> ↑16
- [50] B. L. Boyce, and R. O. Ritchie, “Effect of load ratio and maximum stress intensity on the fatigue threshold in Ti-6Al-4V”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 68, no. 2, pp. 129-147, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(00\)00099-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(00)00099-0) ↑16
- [51] M.-L. Zhu, F.-Z. Xuan, and S.-T. Tu., “Effect of load ratio on fatigue crack growth in the nearthreshold regime: A literature review, and a combined crack closure and driving force approach”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 141, pp. 57-77, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.05.005> ↑16
- [52] R. Sunder, “Why and how residual stress affects metal fatigue”, *Advanced Materials Springer Proceedings in Physics*, vol. 175, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26324-3_34 ↑17
- [53] J. W. Sheldon, K. R. Bain, and J. K. Donald, “Investigation of the effects of shed-rate, initial K_{max} , and geometric constraint on ΔK_{th} in Ti-6Al-4V at room temperature”, *Int. J. Fatigue*, vol. 21, no. 7, pp. 733-741, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00037-7) ↑17
- [54] I. Verpoest, E. Aernoudt, A. Deruytere, and M. De Bondt, “The fatigue threshold, surface condition and fatigue limit of steel wire”, *Int. J. Fatigue*, vol. 7, no. 4, pp. 199-214, 1985. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(85\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0142-1123(85)90051-9) ↑17
- [55] R. C. McClung, “Analysis of fatigue crack closure during simulated threshold testing”, in J. C. Newman, and R. S. Piascik (Eds.), *Fatigue Crack Growth Thresholds, Endurance Limits, and Design*, ASTM International, 2000. <https://doi.org/10.1520/stp13435s> ↑18
- [56] T. H. Topper, and M. T. Yu, “The effect of overloads on threshold and crack closure”, *Int. J. of Fatigue*, vol. 7, no. 3, pp. 159-164, 1985. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(85\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0142-1123(85)90027-1) ↑18
- [57] H. A. Richard, and M. Sander, *Fatigue Crack Growth*, Berlin, Springer, 2016. ↑18
- [58] R. W. Hertzberg, “On the calculation of closure-free fatigue crack propagation data in monolithic metal alloys”, *Mat. Sc. Eng.: A*, vol. 190, no. 1-2, pp. 25-32, 1995. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)09610-9](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)09610-9) ↑19
- [59] J. Petit, G. Hénaff, and C. Sarrazin-Baudoux, “Environmentally assisted fatigue in the gaseous atmosphere”, *Compr. Struct. Integr.*, vol. 6, pp. 211-280, 2003. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043749-4/06130-9> ↑20
- [60] O. N. Romaniv, A. N. Tkach, and N. Lenets, “Effect of fatigue crack closure on near-threshold crack resistance of structural steels”, *Fat. Fract. Eng. Mat. Struct.*, vol. 10, no. 3, pp. 203-212, 1987. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1987.tb00478.x> ↑20
- [61] D. A. Lados, D. Apelian, and J. K. Donald, “Fatigue crack growth mechanisms at the microstructure scale in Al-Si-Mg cast alloys: Mechanisms in the near-threshold regime”, *Acta Materialia*, vol. 54, no. 6, pp. 1475-1486, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.019> ↑21
- [62] P. Hutař, S. Seitzl, and T. Kruml, “Effect of specimen geometry on fatigue crack propagation in threshold region”, *Int. Conf. on Fracture (ICF 12)*, vol. 4, pp. 2914-2922, 2009 ↑21
- [63] P. C. Paris, H. Tada, and J. K. Donald, “Service load fatigue damage —A historical perspective”, *Int. J. Fatigue*, vol. 21, Supplement I, pp. S35-S46, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00054-7) ↑23
- [64] D. Kujawski, “Enhanced model of partial crack closure for correlation of R-ratio effects in aluminum alloys”, *Int. J. Fatigue*, vol. 23, no. 2, pp. 95-102, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00085-2) ↑23

Kebin Alberto Medina-Bernal

Ingeniero Mecánico de la Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia).
Correo electrónico: kebin14@utp.edu.co

Libardo Vicente Vanegas-Useche

Ingeniero Mecánico de la Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia). Magíster en Tecnología de Fabricación y Gestión de Sistemas Avanzadas de la Universidad de Manchester (Reino Unido). Doctor en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Surrey (Reino Unido). Profesor Titular en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira e integrante del grupo de investigación “Procesos de Manufactura y Diseño de Máquinas” de la misma universidad.

Correo electrónico: lvanegas@utp.edu.co

Evaluación de superficies reflectantes para paneles solares bifaciales mediante la metodología de superficie respuesta

Evaluation of Reflective Surfaces for Bifacial Solar Panels using the Response Surface Methodology

Juan Pablo Castaño Serna¹, **Ainhoa Rubio-Clemente**¹, **Edwin Chica Arrieta**¹

¹Grupo de Investigación Energía Alternativa (GEA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia)

*Correspondence E-mail : juan.castano16@udea.edu.co

Received: 10th/May/2021. Modified: 21st/April/2022. Accepted: 06th/May/2022

Abstract

Context: Bifacial photovoltaic solar panels can generate more energy than monofacial ones since, in the case of the former, both sides of the panel are available to capture the solar irradiance and transform it into electrical energy. The additional power that can be generated by bifacial panels depends, among other factors, on the nature and the type of the reflective surface, as well as on the orientation of the photovoltaic module.

Method: In this work, several reflective surfaces are evaluated in order to determine the optimal configuration of a bifacial panel. To this effect, and based on the response surface methodology, the characteristic curves of the photovoltaic panel (current-voltage) for different elevation levels with respect to four reflective surfaces are experimentally represented.

Results: The results of this study reveal that, by installing a bifacial panel on reflective mirror surfaces at an elevation of 98,66% of the panel width, a 6,6% increase in the electrical energy generation is achieved in comparison with monofacial photovoltaic modules.

Conclusions: Through the applied methodology, the mirror surface was identified to be the best among the four surfaces evaluated for the use of reflected radiation, followed by concrete, water, and soil.

Keywords: solar energy, bifacial application, solar panel bifacial configuration

Language: Spanish.

Open access



Cite as: Castaño, J., Rubio, A., Chica, E. "Evaluación de superficies reflectantes para paneles solares bifaciales mediante la metodología de superficie respuesta". *Ing.*, vol. 27, no. 3, 2022. e18069.

<https://doi.org/10.14483/23448393.18069>

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

Resumen

Contexto: Los paneles solares fotovoltaicos bifaciales pueden generar más energía que los monofaciales, ya que, en el primer caso, ambos lados del panel quedan a disposición para captar la irradiancia solar y transformarla en energía eléctrica. La potencia adicional que se puede generar en los paneles bifaciales depende, entre otros factores, de la naturaleza y el tipo de la superficie reflectiva, así como de la orientación del módulo fotovoltaico.

Método: En este trabajo se evalúan diversas superficies reflectantes para determinar la configuración óptima de un panel bifacial. Para este propósito, y con base en la metodología de superficie de respuesta, las curvas características del panel fotovoltaico (corriente-voltaje) para diversas elevaciones con respecto a cuatro superficies reflectantes son trazadas experimentalmente.

Resultados: Los resultados del estudio revelan que, al instalar un panel bifacial sobre superficies reflectantes de espejo a una elevación del 98,66 % del ancho del panel, se logra alcanzar un aumento del 6,6 % de la generación de energía eléctrica en comparación con los módulos fotovoltaicos monofaciales.

Conclusiones: Con la metodología aplicada, se identificó que la superficie de espejo es la mejor de las cuatro superficies evaluadas para el aprovechamiento de la irradiación reflejada, seguida por el concreto, el agua y la tierra.

Palabras clave: aplicación bifacial, configuración bifacial de paneles solares, energía solar

Idioma: español

1. Introducción

Generar energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos presenta ventajas económicas y medioambientales en comparación con otras fuentes de energía basadas en el uso de combustibles fósiles [1], [2], [3]. Los sistemas fotovoltaicos son de fácil instalación, tienen bajos costos de mantenimiento, larga vida útil, alta confiabilidad y pueden ser usados para la generación distribuida donde se requiera un suministro de electricidad. Entre las principales desventajas de la energía solar, destaca la baja eficiencia de los paneles solares y la intermitencia de la generación de electricidad debido a los efectos estocásticos de la fuente. En este sentido, los paneles fotovoltaicos bifaciales pueden ser una opción para aumentar la eficiencia de los proyectos solares y, de esta manera, reducir el uso de áreas destinadas para la instalación de los paneles [4], [5]. Cabe destacar que los paneles bifaciales son capaces de recibir y aprovechar la irradiación solar por ambas caras del panel, aumentando su capacidad de generar energía eléctrica. La irradiación solar que puede recibir el panel es la suma de la irradiancia directa (G_d), la irradiancia difusa (G_{dif}) y la irradiancia reflejada (G_{albedo}). La porción reflejada también se conoce como albedo [6], [7], [8]. Una mayor proporción de irradiación reflejada hará que la cara inferior del panel produzca más y que, por tanto, el módulo tenga mejor rendimiento.

Estudios reportados en la literatura muestran que cuando los paneles bifaciales se instalan en superficies altamente reflectantes se puede originar un aumento en la generación de energía eléctrica hasta del 50 %, debido a la potencia adicional producida por la parte posterior del módulo en función de la superficie reflectante y de la altura óptima de instalación del panel [9], [10]. Si bien, debe tenerse en cuenta que la generación de electricidad por parte del módulo fotovoltaico depende particularmente de las condiciones ambientales y del albedo del entorno, así como de la orientación,

la inclinación y la altura de elevación del panel respecto de la superficie de soporte [2], [11], [12], por lo que este incremento de la potencia de salida no siempre se observa. Experimentos realizados al aire libre por Wei et al. muestran que un albedo alto es beneficioso para obtener una salida de potencia hasta del 7,6 %; 15,4 % y 29,2 % en terrenos cubiertos con hierba, arena y nieve, respectivamente [13].

En relación con el albedo, se puede decir que se refiere a la relación entre la irradiación reflejada por una superficie respecto de la irradiación incidente sobre la misma. Así, el albedo depende de las características físicas de la superficie. A modo de ejemplo, las superficies referidas a continuación exhiben los siguientes rangos de albedo: pintura de color (0,15-0,35), árboles (0,15-0,18), asfalto (0,05-0,2), concreto (0,25-0,7), techo corrugado (0,1-0,15), hierba (0,25-0,3), hielo (0,3-0,5), tejas rojas y marrones (0,1-0,35), ladrillo/piedra (0,2-0,4), tierra (0,15-0,45), océano (0,05-0,1), nieve vieja (0,65-0,81), pintura blanca (0,5-0,9), espejo (0,72-0,85), agua (0,03-1,0) y nieve fresca (0,81-0,88) [9], [14], [15]. En general, las superficies de colores claros, brillantes y de textura suave tienen albedos muchos más altos que las superficies de colores oscuros, mates y rugosas.

En la actualidad, la obtención de datos de albedos de superficies es un campo de investigación vigente para el desarrollo de módulos fotovoltaicos bifaciales. Producto de esto, se evidencian en la literatura numerosas fuentes del albedo o reflectancia de superficies para aplicaciones solares. No obstante, los datos reportados difieren ampliamente en términos de la cobertura geográfica y la resolución espaciotemporal y espectral, así como el detalle angular de la ubicación del panel y el método de determinación [7]. Además, aunque las características del albedo de una superficie se pueden obtener con una alta precisión espaciotemporal, no necesariamente corresponden a las condiciones particulares y las configuraciones geométricas de una instalación específica [16]; por lo tanto, se recomienda la caracterización particular del albedo en el lugar de instalación de los paneles para el correcto dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico [7].

La orientación e inclinación de los módulos fotovoltaicos es dependiente de la latitud del lugar de instalación, de modo que su definición correcta afectará en mayor o menor medida a la producción de energía eléctrica. En el caso de la orientación óptima o la desviación respecto al Sur (ángulo azimut), se recomienda que los paneles que sean instalados en países del Hemisferio Norte se orienten al Hemisferio Sur, mientras que los países que se encuentran en el Hemisferio Sur es ideal que los paneles fotovoltaicos sean orientados al Norte [17]. Por otro lado, el objetivo de definir la óptima inclinación del panel consiste en lograr la máxima perpendicularidad de este con respecto a la irradiación recibida, consiguiendo la optimización de la energía eléctrica generada por el panel. Además de la latitud del lugar, la inclinación óptima está relacionada con la época del año en la cual estará en operación el panel. En consecuencia con lo anterior, la inclinación óptima de los paneles no debería ser permanente, sino variable a lo largo de cada hora del día y cada día del año. En este sentido, se recomienda instalar los paneles en una estructura de soporte cuya inclinación y orientación se pueda adaptar progresivamente a lo largo del día y del año, con el fin de conseguir que la superficie del panel esté siempre perpendicular a la irradiación solar incidente [18]. Esto se puede conseguir mediante el uso de seguidores solares de uno o dos ejes, los cuales realizan un trabajo de seguimiento del punto óptimo de inclinación en cada momento del día [11], [18]. Sin embargo, debido al alto costo de inversión inicial y de mantenimiento de estos dispositivos, lo más habitual es utilizar estructuras de paneles solares fijas con un ángulo de inclinación constante, espe-

cialmente en países ubicados cerca en la línea ecuatorial. En la literatura existen diversos modelos para calcular el ángulo de inclinación óptimo (β_{opt}) de los módulos fotovoltaicos en función de la latitud del lugar y el ángulo de declinación solar [19]. (β_{opt}) oscila entre la latitud del lugar de instalación y una corrección de 5 a 15° [20].

Adicionalmente al establecimiento correcto de la orientación e inclinación del módulo fotovoltaico, para optimizar la captación de energía solar utilizando paneles bifaciales, la altura de los módulos respecto al suelo juega también un papel fundamental [9]. Cuanto más alto está el panel, más difusa y clara es su sombra, con lo que la irradiación que obtiene de la superficie que está debajo de él es mayor [12], [21]. Sin embargo, a medida que la elevación del panel respecto de la superficie de soporte aumenta, la pérdida debido al autosombreado disminuye gradualmente hasta que su efecto es completamente insignificante. Por lo tanto, es importante definir la elevación óptima conservando suficiente rendimiento de electricidad con miras a minimizar el costo de la instalación.

En este trabajo se estima la altura óptima del panel fotovoltaico bifacial que permita alcanzar la máxima producción de energía en función de las características de la superficie de soporte. Para ello, bajo condiciones ambientales y con base en la metodología de superficie respuesta, se traza experimentalmente la curva de corriente versus (vs.) voltaje para varias configuraciones de panel bifacial, las cuales consisten en la variación del ángulo de incidencia (ϕ) de la irradiación solar sobre el panel y la elevación del módulo (H) respecto de cuatro superficies reflectantes con diferentes albedos.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos bifaciales y de los paneles monofaciales depende de la orientación e inclinación del panel fotovoltaico. Adicionalmente, en las instalaciones con paneles bifaciales deben tenerse en cuenta otros factores como el albedo de la superficie reflectante, (ϕ), (H) y la relación entre estas variables. Por lo tanto, durante el montaje de paneles bifaciales es crucial hacer una correcta selección de la superficie reflectante que presente un alto albedo. De hecho, Sun et al. evidenciaron que para los módulos fotovoltaicos bifaciales instalados sobre el suelo y con albedo bajo (0,25), el aumento de la energía eléctrica generada estaría por debajo del 10 %. De igual manera, los autores concluyeron que si el valor del albedo es el doble, elevando los paneles fotovoltaicos 1 m sobre el suelo, la energía eléctrica generada se podría ver influenciada positivamente con un incremento alrededor del 30 % [2].

Para contribuir en este campo de estudio, y determinar la configuración geométrica óptima de paneles fotovoltaicos monofaciales y bifaciales que conduzca a una mayor generación de energía eléctrica, se utilizó la metodología de superficie respuesta (RSM, por su sigla en inglés) y el diseño de experimentos central compuesto (CCD, por su sigla en inglés). Debe resaltarse que el objetivo del CCD consiste en seleccionar los puntos donde la respuesta será evaluada con el fin de planificar y ejecutar estratégicamente un experimento. Adicionalmente, el CCD puede proporcionar una

gran cantidad de información sobre el efecto en una variable de respuesta debido a uno o más factores [22]. Para este caso en particular, los factores o variables independientes tenidos en cuenta en el diseño experimental fueron (ϕ) y (H). La variable (H) se estableció como un porcentaje del ancho del panel (b). Cada uno de estos dos factores fueron evaluados a tres niveles codificados como bajo (-1), medio (0) y alto (+1), como se presenta en la tabla I. Del CCD resultaron once tratamientos para evaluar el efecto de cada uno de los parámetros de interés y su interacción sobre la variable respuesta considerada en el estudio, que fue la ganancia de potencia (Δp) del panel bifacial respecto de la configuración monofacial, en el que la potencia generada (p) fue la variable respuesta. Se evaluaron cuatro superficies reflectantes (espejo, tierra, agua y concreto). Durante el estudio de cada superficie, se llevó a cabo un análisis estadístico de varianza (ANOVA, por su sigla en inglés) para identificar la significancia de cada factor, individual, cuadrático y de interacción, sobre la variable respuesta.

Tabla I. Niveles experimentales de los factores analizados

Variable independiente	Valores		
	-1	0	1
Altura del panel (H)	15 % b	57,5 % b	100 % b
Ángulo de incidencia (ϕ)	0°	30°	60°

A partir del CCD y el ANOVA, se desarrolló un modelo de regresión de segundo orden para cada superficie reflectante evaluada. En este sentido, durante el análisis de resultados se estimaron los coeficientes del polinomio de segundo orden que representa la variable respuesta (Δp), expresión que es mostrada en la ecuación (1). Adicionalmente, se realizó la verificación de la aceptabilidad de los modelos construidos.

$$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 H + \beta_2 \phi + \beta_{12} H \phi + \beta_{11} H^2 + \beta_{22} \phi^2 \quad (1)$$

Donde β_0 representa el intercepto; β_1 y β_2 hacen referencia a los coeficientes lineales; β_{12} es el coeficiente de interacción; y β_{11} y β_{22} representan los coeficientes cuadráticos.

Tomando como base lo expuesto anteriormente, en el presente estudio, además de los efectos principales y cuadráticos, se evaluaron los efectos sobre la variable respuesta de las interacciones entre los factores, seleccionando los valores óptimos de los parámetros estudiados para obtener una mayor generación de energía con el panel fotovoltaico. Para discernir sobre la variabilidad de los datos obtenidos que son explicados por los modelos de regresión construidos, se calculó el coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{ajustado}$) de cada modelo. Además, se verificaron los supuestos de autocorrelación entre los factores, de normalidad y de varianza constante u homocedasticidad, en aras de validar cada uno de los modelos de regresión construidos. Así mismo, se determinó el valor-P asociado a los modelos de regresión con el fin de detectar su significancia en la representación de los resultados experimentales obtenidos. Los análisis estadísticos de los resultados se llevaron a cabo en el software R con un intervalo de confianza del 95 %.

A lo largo de la experimentación se empleó la metodología descrita en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4405, relativa a la evaluación del rendimiento de las configuraciones geométricas de los paneles que resultan para cada tratamiento experimental. Para este fin, se usó el montaje mostrado en la figura 1, el cual cuenta con una lámpara halógena de 150 W para garantizar condi-

ciones de irradiación estables durante todos los corridos experimentales. La variable β representa el ángulo de incidencia formado por la normal a la superficie del panel y el haz de radiación de la lámpara que incide sobre la superficie del módulo. El módulo fotovoltaico empleado fue un panel de silicio amorfo de 1 W, con un ancho y una longitud iguales a 100 mm y 200 mm, respectivamente.

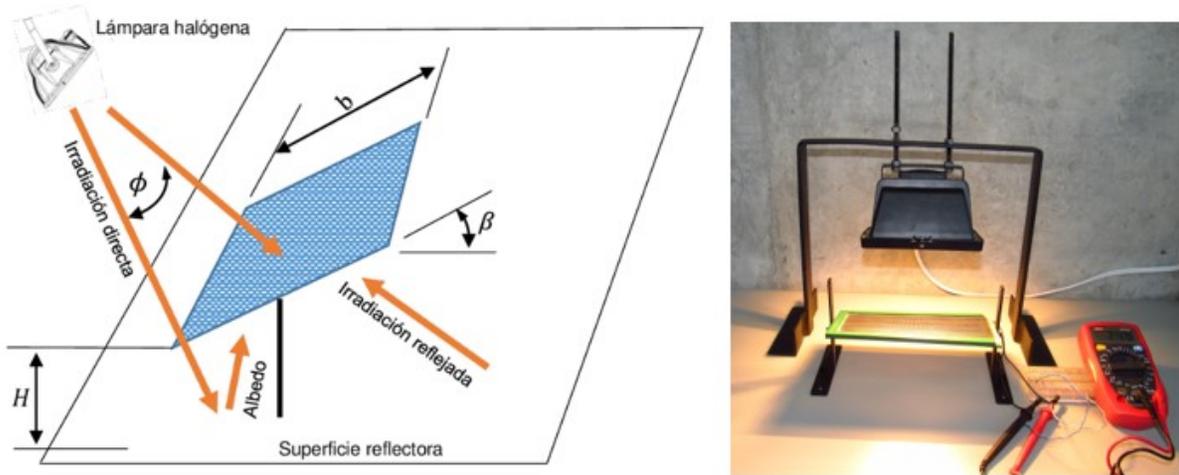


Figura 1. Montaje experimental

Dado que el panel transforma una fracción de la irradiación incidente (GA) en potencia útil para cada tratamiento experimental, se trazó la curva de corriente (I) vs. voltaje (V). A partir de las curvas, se determinó la potencia máxima que puede ser obtenida con cada configuración geométrica que resulta de los tratamientos. Para ello, se usó un multímetro UT33C capaz de medir el voltaje y la corriente. En la figura 2 se detalla el circuito implementado para la caracterización del panel. Cabe resaltar que se usó una carga variable resistiva correspondiente a valores de 68, 180, 270 y 680 (Ω).

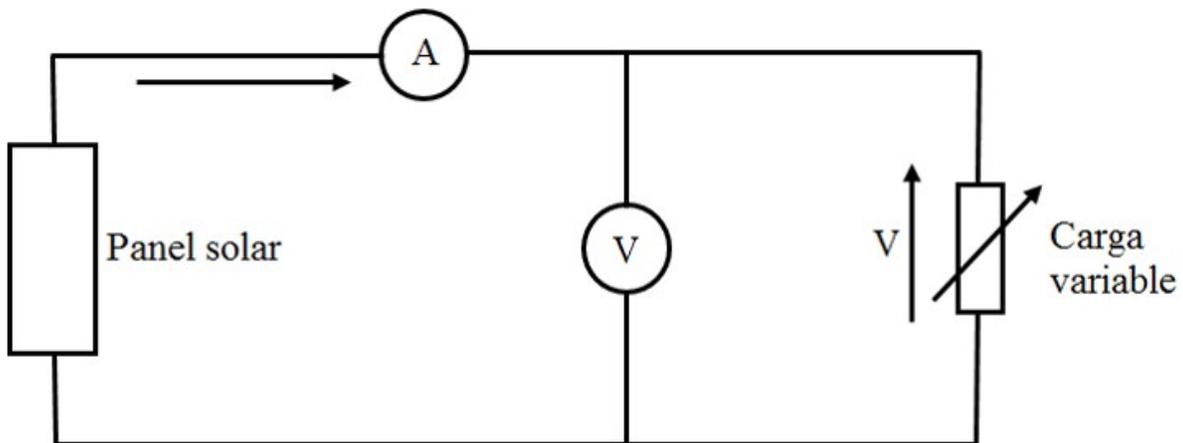


Figura 2. Esquema de mediciones de voltaje y corriente

2.2. Estimación del ángulo de inclinación de la superficie del panel

El ángulo de inclinación del panel (β) es el ángulo formado entre el plano de la superficie de la celda fotovoltaica y la horizontal. (β) se considera óptimo cuando la irradiación es perpendicular al plano de la superficie del módulo fotovoltaico. Para calcular (β) es importante considerar la latitud del lugar (α) donde se instalarán los paneles; generalmente, el valor de (β) se encuentra entre α y una corrección comprendida entre 5 y 15°. Cabe destacar que en la literatura existen muchas relaciones para determinar el (β) óptimo [19]. En el presente estudio se utilizó la ecuación (2) para determinar el (β) óptimo (β_{opt}), donde (δ) se refiere a la declinación solar, la cual hace referencia al ángulo entre el plano ecuatorial celeste y la línea Sol-Tierra. Se recomienda que (β) sea igual a (α) en cada uno de los equinoccios. Los signos + y - en la ecuación (2) se usan para el solsticio de verano y el de invierno, respectivamente. Por otro lado, (δ) puede calcularse usando la ecuación (3) [20] [21].

$$\beta = \alpha \pm \delta \quad (2)$$

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 \frac{284 + \delta_n}{365}\right) \quad (3)$$

Donde δ_n puede ser cualquiera de los 365 días del año. Es importante mencionar que para la determinación de δ se ha fijado un día de cada mes correspondiente a un día a mitad del mes; por ejemplo, para el mes de enero se empleó un δ_n igual a 16. En la figura 3 se presenta una distribución de los valores óptimos de inclinación del panel de acuerdo con la localización. Estos valores han sido obtenidos con el modelo numérico propuesto por Nicolas-Martín et al. [23].

3. Resultados

3.1. Determinación del ángulo de inclinación óptimo de los paneles

Para fijar el (β_{opt}) de los paneles, se determinó el promedio de los mostrados en la tabla II para cada mes. Para la estimación del (β_{opt}) se ha seleccionado un sitio de la Universidad de Antioquia, sede central, ubicado a una longitud y latitud de -75,568669 y 6,268386, respectivamente. De acuerdo con los valores reportados en la tabla II para (β), se determina un valor fijo para (β_{opt}) igual a 15,55°. El valor de este ángulo está en el rango de los valores óptimos mostrados en la figura 3 para la latitud del lugar elegida para la realización de las pruebas experimentales.

Tabla II. Ángulo de inclinación óptima (β_{opt})

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Días del mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Día del año δ_n	16	45	75	105	136	166	197	228	258	289	319	350
Declinación δ	-21,1	-13,62	-2,62	9,42	18,91	23,31	21,44	13,62	2,22	-9,78	-19,15	-23,35
Inclinación óptima (β_{opt})	27,36	19,89	8,89	3,15	12,64	17,05	15,17	7,35	4,05	16,05	25,42	29,62

3.2. Desempeño del panel bifacial

Con el fin de evaluar el desempeño del panel, y siguiendo los lineamientos establecidos en la NTC 4405, el panel debe instalarse de tal forma que reciba la irradiación a varios valores de ϕ con re-

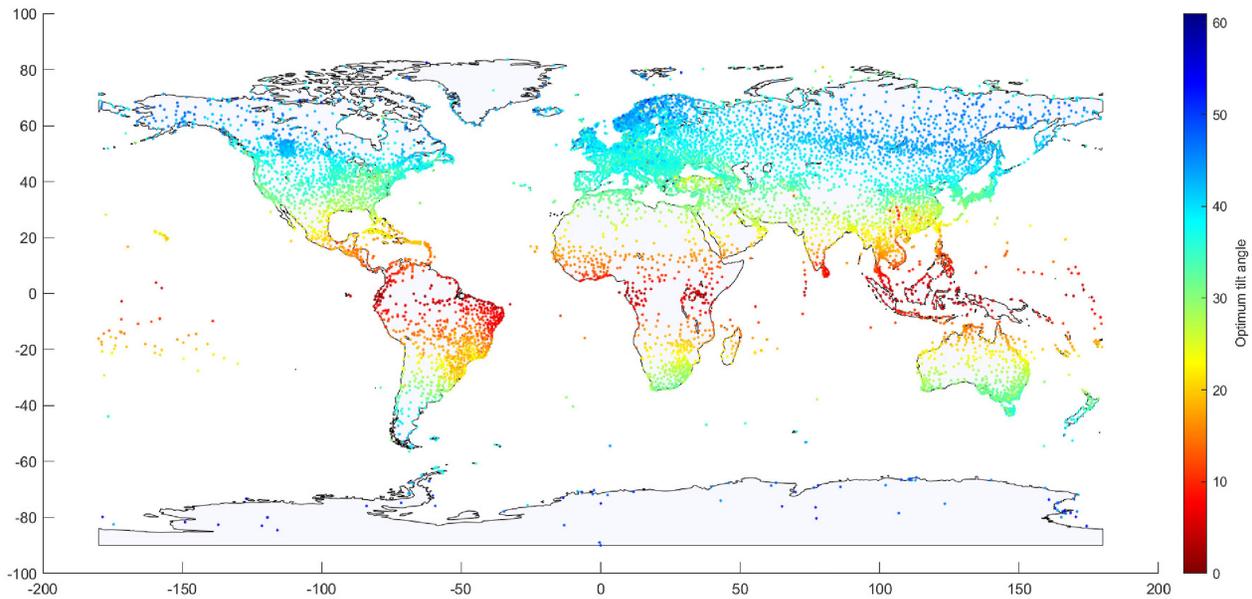


Figura 3. Ángulo óptimo de inclinación (β_{opt}) de los módulos fotovoltaicos. Fuente: [23]

specto de la normal a su superficie. En este sentido, en la norma se contempla hacer las mediciones de las características I vs. V del panel para valores de ϕ de 0° ; 30° y 60° . En el este estudio, el panel fotovoltaico se inclinó a $15,55^\circ$ respecto de la horizontal y se trazó la curva de I vs. V para los tres valores de ϕ recomendados. La figura 4 muestra las curvas experimentales de I vs. V y de P vs. V para el montaje monofacial.

En la figura 4 se evidencia que existe una reducción de los valores de V y de I generados por el módulo fotovoltaico a medida que incrementa ϕ con respecto de la normal del panel. A partir de los resultados experimentales obtenidos para cada tratamiento de la matriz experimental definida por el CCD, se determinó P y ΔP con la configuración monofacial y bifacial, respectivamente, para cada superficie reflectante evaluada. Estos valores se reportan en la tabla III

Los resultados del ANOVA para las configuraciones monofacial (M), bifacial con superficie reflectante de espejo (B-E), tierra (B-T), agua (B-A) y concreto (B-C) se muestran en la tabla IV.

La significancia del valor-F implica la importancia del efecto principal y cuadrático de cada uno de los parámetros estudiados, así como del efecto de la interacción. En este sentido, cuanto mayor sea el valor-F observado, más significativo es el efecto asociado [22]. Por otro lado, el valor-P debe estar por debajo de 0,05 para concluir estadísticamente si el factor y sus interacciones generan un efecto significativo sobre la variable respuesta [22]. Para el análisis de la configuración monofacial, se observa que el término independiente ϕ es significativo en el modelo, al igual que el término ϕ^2 . Los términos H , $H*\phi$ y H^2 resultaron no ser significativos; de modo que puede concluirse que estos no afectan la potencia de salida del sistema. Por su parte, H es un factor que influye sobre las configuraciones bifaciales que aprovechan el albedo de la superficie para generar potencia adicional al sistema. Para el caso de la configuración bifacial con superficie reflectante de espejo, se observa que los valores-P para los términos H y ϕ son los más pequeños e inferiores a 0,05, lo cual significa que tanto H como ϕ son determinantes en la generación de energía eléctrica.

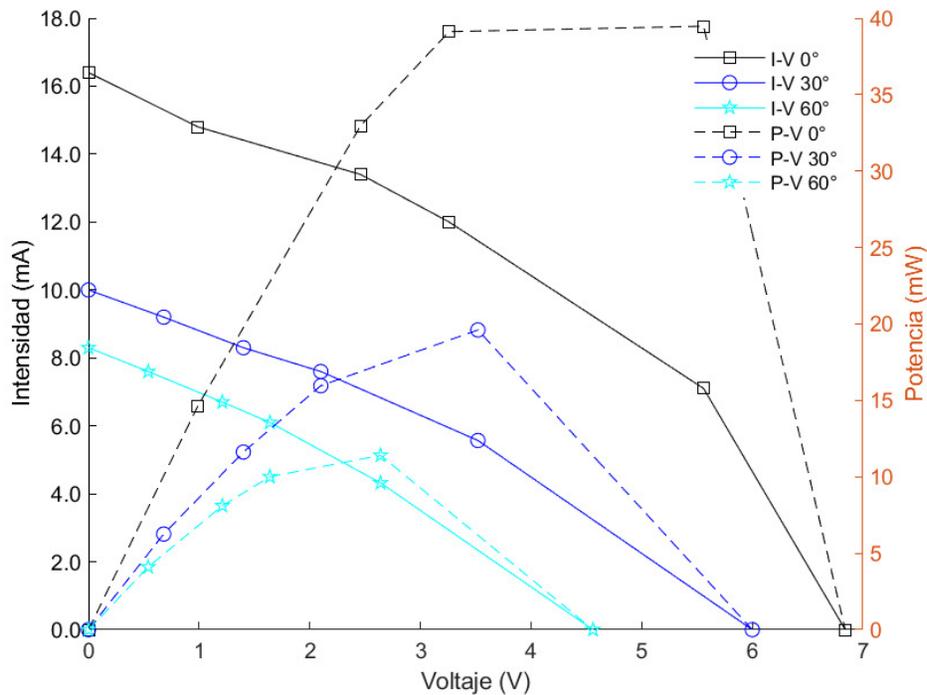


Figura 4. Corriente (I) vs. voltaje (V) y potencia generada (P) vs. voltaje (V) del montaje del panel monofacial a 0, 30 y 60°

Tabla III. Resultados experimentales obtenidos con el diseño de experimento central compuesto (CCD)

Ángulo de incidencia (°), ϕ	Altura, H	Monofacial	Espejo	Tierra	Concreto	Agua	Pmax				
							P	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP
							(mW)	(mW)	(mW)	(mW)	(mW)
0	0,15b	39,6750	0,0504	0,0008	0,0085	0,0021					
0	1b	39,1422	1,2480	0,0192	0,1430	0,0247					
0	0,575b	39,4760	0,8910	0,0204	0,1037	0,0150					
30	0,15b	19,4400	0,5760	0,0018	0,0169	0,0085					
30	1b	19,4180	2,0400	0,0314	0,3114	0,0339					
30	0,575b	19,1520	1,7550	0,0310	0,2120	0,0310					
30	0,575b	18,9750	1,7680	0,0325	0,2040	0,0328					
30	0,575b	19,6064	1,8020	0,0315	0,2208	0,0307					
60	0,15b	11,2400	1,1830	0,0021	0,0089	0,0260					
60	1b	11,4048	2,6000	0,0440	0,2296	0,0800					
60	0,575b	11,3820	2,2500	0,0389	0,1400	0,0359					

Asimismo, los términos H^2 , ϕ^2 y $H*\phi$, también desde el punto de vista estadístico, tienen un efecto significativo sobre ΔP para el intervalo de confianza definido. Para la configuración bifacial con superficie reflectante de tierra, se observa que los factores H y ϕ son, adicionalmente, los más significativos sobre la variable respuesta; al igual que los términos H^2 y $H*\phi$; si bien, el efecto de estos últimos es menor. En el ANOVA para la configuración bifacial con superficie reflectante

Tabla IV. Análisis de varianza (ANOVA) de las configuraciones de panel estudiadas

Factor	Valor-F					Valor-P				
	M	B-E	B-T	B-A	B-C	M	B-E	B-T	B-A	B-C
Modelo	4943	182,3	175,5	9,676	19,48	3,16E-9	1,187E-5	1,305E-5	0,01315	0,002713
Altura, H	0,24	4707,12	2309,15	22,79	69,37	0,6733	0,0002	0,0004	0,0050	0,0004
Ángulo ($^{\circ}$), ϕ	11156,5	4180,32	568,33	21,95	2,50	0,0001	0,0002	0,0018	0,0054	0,1748
H^*H	0,07	618,41	856,65	0,02	3,17	0,8166	0,0016	0,0012	0,8896	0,1352
$H^*\phi$	1,15	20,43	236,68	3,24	1,83	0,3963	0,0456	0,0042	0,1318	0,2339
$\phi^*\phi$	875,28	58,56	4,30	0,40	15,16	0,0011	0,0167	0,1739	0,5566	0,0115

de agua, también se evidencia que los factores H y ϕ tienen efectos significativos sobre la variable respuesta; sin embargo, los términos H^2 , ϕ^2 y $H^*\phi$ no son significativos. Finalmente, para el caso correspondiente a la configuración bifacial con superficie reflectante de concreto, los factores H y ϕ^2 tienen efectos significativos sobre la variable respuesta; en cuanto al efecto ejercido por los términos ϕ , H^2 y $H^*\phi$, se observa que no es significativo sobre el rendimiento del sistema. En general, en el sistema bifacial, la irradiación de la superficie posterior del panel se hace más uniforme a medida que aumenta H y, en consecuencia, se obtiene un incremento de la energía eléctrica generada. En la figura 5 se presenta la influencia de H sobre P para la configuración bifacial con superficie reflectante de espejo.

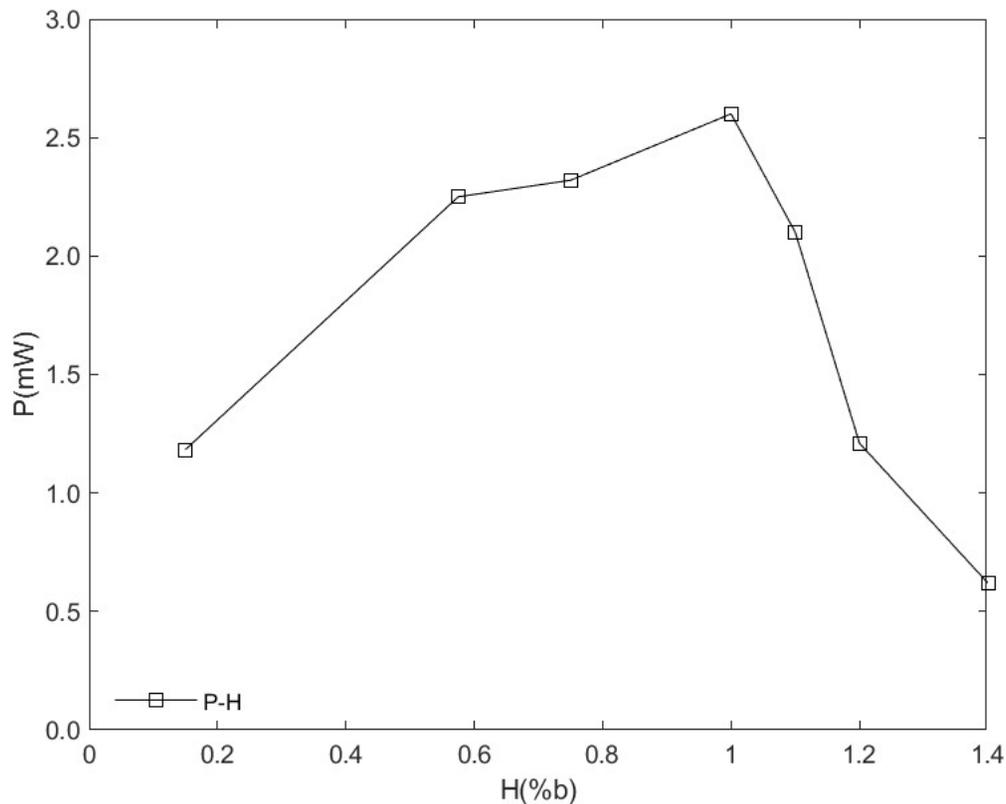


Figura 5. Influencia de la altura del panel (H) sobre la potencia de salida (P) para la configuración bifacial con superficie reflectante de espejo (B-E)

Tabla V. Resultados estadísticos de los modelos de regresión de segundo orden obtenidos

	R^2	$R^2_{ajustado}$	Valor-P
Monofacial (M)	99,9798	99,9595	3,16E-09
Espejo (B-E)	99,4545	98,909	1,19E-05
Tierra (B-T)	99,4333	98,8667	1,31E-05
Agua (B-A)	90,6334	81,2668	0,0132
Concreto (B-C)	95,118	90,236	0,002713

Tabla VI. Validación de supuestos de los modelos de regresión para las configuraciones estudiadas

Supuesto	Prueba	Valor-P				
		M	B-E	B-T	B-A	B-C
Normalidad	Shapiro - Wilk	0,82089	0,23433	0,15058	0,17173	0,71848
Independencia	Durbin - Watson	0,38910	0,07370	0,33720	0,33160	0,84120
Varianza constante	Breusch - Pagan	0,29750	0,32820	0,20240	0,30650	0,16080

Una vez realizado el ANOVA, se construyó el modelo de regresión de segundo orden para cada configuración estudiada. Los polinomios cuadráticos para la configuración monofacial y bifacial con superficie reflectante de espejo, tierra, agua y concreto se expresan mediante las ecuaciones (4), (5), (6), (7) y (8), respectivamente. En la tabla V se presenta el valor-P y el coeficiente de correlación (R^2) y el ($R^2_{ajustado}$) de cada modelo construido. De los resultados obtenidos se puede concluir que los modelos son significativos y se ajustan satisfactoriamente a los datos experimentales; por lo tanto, son adecuados para representar el comportamiento de la variable respuesta.

$$P = 39,8178 - 0,907033H - 0,879611\phi + 0,0136784H * \phi + 0,29804H^2 + 0,00672665\phi^2 \quad (4)$$

$$\Delta p = -0,556964 + 3,88458H + 0,0266587\phi + 0,00430196H * \phi - 2,09929H^2 - 0,000129649\phi^2 \quad (5)$$

$$\Delta p = -0,0152014 + 0,110851H + 0,0000491426\phi + 0,000460784H * \phi - 0,0777563H^2 - 0,00000110526\phi^2 \quad (6)$$

$$\Delta p = -0,000622895 + 0,0266228H + 0,0000279085\phi + 0,000615686H * \phi - 0,00442907H^2 - 0,00000383333\phi^2 \quad (7)$$

$$\Delta p = -0,0737183 + 0,430786H + 0,004907\phi + 0,0016902H * \phi - 0,1971370,00442907H^2 - 0,0000865643\phi^2 \quad (8)$$

Los supuestos de varianza constante u homocedasticidad, normalidad e independencia de los residuales fueron verificados para cada uno de los modelos de regresión construidos para todas las configuraciones estudiadas. En la tabla VI se evidencia que, de acuerdo con el nivel de significancia del 5 %, los modelos de regresión desarrollados cumplen con los supuestos referidos.

A partir de los modelos de regresión de segundo orden y mediante el software MATLAB, se pueden obtener las superficies de respuestas mostradas en la figura 6. Adicionalmente, a partir de

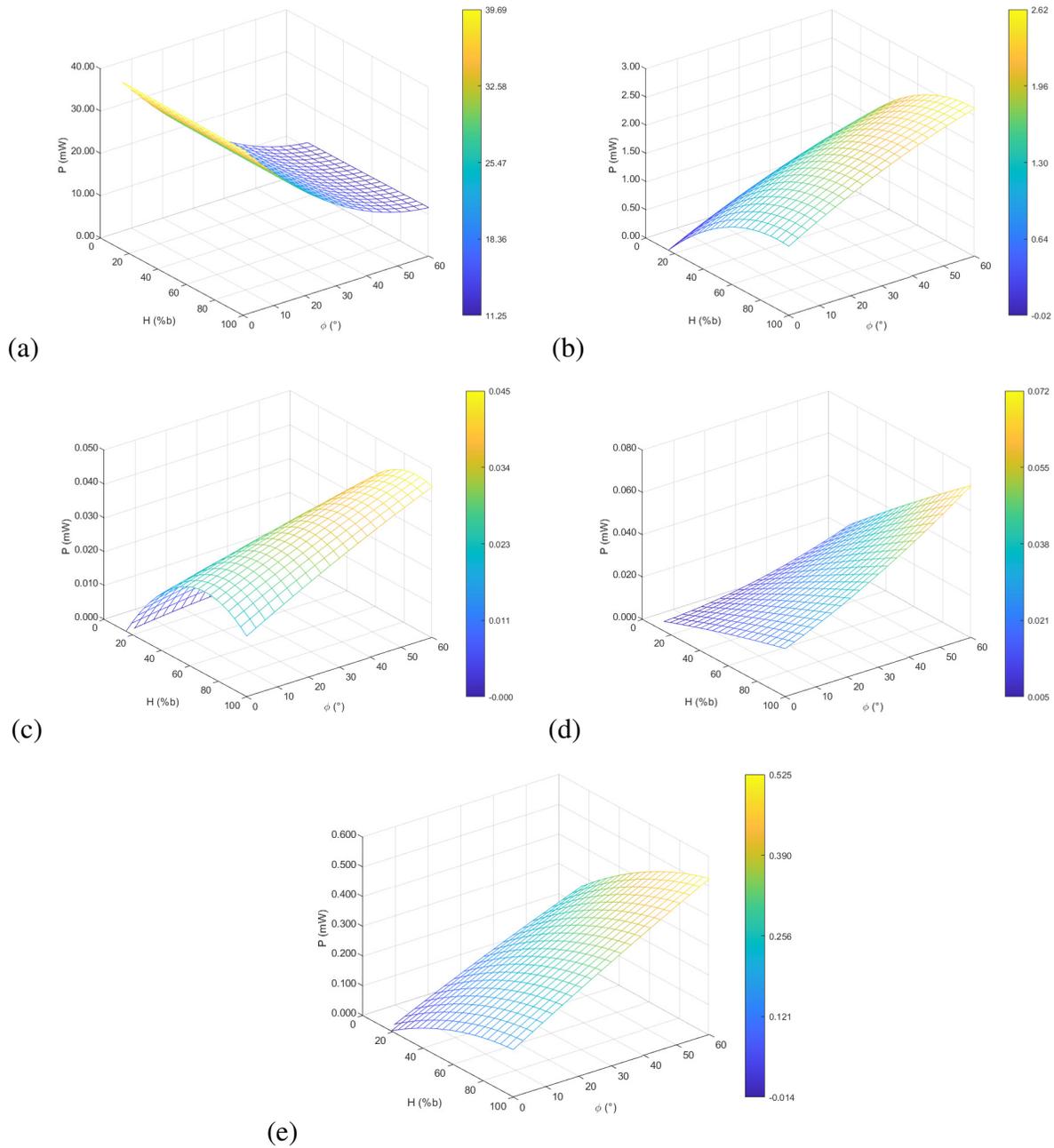


Figura 6. Superficie de respuesta. a) Configuración monofacial, b) Configuración bifacial con superficie reflectante de espejo (B-E), c) Configuración bifacial con superficie reflectante de tierra (B-T), d) Configuración bifacial con superficie reflectante de agua (B-A), e) Configuración bifacial con superficie reflectante de concreto (B-C)

la optimización de la respuesta, en la tabla VII se muestran las condiciones de operación óptimas en cuanto a los factores seleccionados para cada una de las configuraciones estudiadas (monofacial y bifacial con superficie reflectante de espejo, tierra, agua y concreto).

Los resultados arrojados por la figura 6 concuerdan con el ANOVA reportado en la tabla IV, donde es evidente que, para el montaje monofacial, la altura respecto a la superficie no es un factor significativo en cuanto a la potencia de salida del sistema, debido a que, independientemente de

Tabla VII. Condiciones de operación óptimas para cada configuración estudiada

Factor en su valor óptimo	M	B-E	B-T	B-A	B-C
Altura, H	0,15	0,98661	0,890516	1	1
Ángulo de incidencia ($^{\circ}$), ϕ	0	60	60	60	38,1032
Potencia (mW)	39,6885	2,61959	0,045409	0,0718833	0,285626

cuál sea el valor para la altura, la potencia de salida es la misma para cada ángulo de incidencia evaluado. En cuanto a los montajes bifacial con superficie de espejo, tierra, agua, y concreto, se marca un comportamiento similar en las superficies de respuesta obtenidas, en las cuales la ganancia bifacial aumenta a medida que aumenta la altura del panel respecto a la superficie y el valor del ángulo de incidencia. Sin embargo, la potencia de salida empieza a caer después de llegar a valores para la altura cercanos a una vez el ancho del panel.

En general, los resultados obtenidos muestran que la irradiancia sobre la parte posterior del panel fotovoltaico bifacial aumenta siempre y cuando se incrementa la reflectividad de la superficie, con el subsiguiente aumento de la generación de energía eléctrica por parte del panel fotovoltaico. Al comparar los resultados alcanzados para la tierra (con un rango de 0,15-0,45 de albedo) y el concreto (con albedo entre 0,25 y 0,7), se podría concluir que los valores óptimos de son inferiores para valores altos de albedo, ya que en la superficie posterior del panel es menor la heterogeneidad de la irradiación, por lo que incrementa su rendimiento energético. Esta misma observación se encuentra soportada por la investigación realizada por Yusufoglu et al. [12]. Los resultados del presente estudio también muestran que con la configuración bifacial con superficie reflectante de espejo se logra una ganancia de potencia de aproximadamente 2,62 mW; lo cual representa un aumento del 6,6% de potencia con respecto a la configuración monofacial. Este valor de ganancia difiere del estudio llevado a cabo por Lim et al. [24], quienes evidenciaron que se puede lograr un incremento en la generación de energía eléctrica del 38% empleando como superficie reflectante un espejo plano ubicado debajo de los módulos solares bifaciales; 45% empleando prismas triangulares adaptados al espejo plano; y del 46% empleando pequeños espejos ajustables. La diferencia entre los resultados alcanzados en este trabajo y los reportados en la literatura puede atribuirse al tipo de panel fotovoltaico usado y a las características del albedo del espejo empleado en los estudios referidos.

4. Conclusiones

A partir de los paneles solares bifaciales se puede conseguir un incremento en la generación de energía eléctrica en comparación con la obtenida con los paneles monofaciales, ya que tanto el lado del módulo fotovoltaico frontal como el posterior pueden absorber la irradiación solar, aprovechando la irradiación directa, difusa y reflejada. En el presente trabajo, mediante el uso de la RSM y el CCD, se estudiaron cinco configuraciones de montaje de paneles fotovoltaicos, las cuales corresponden a las configuraciones monofacial y bifacial con superficie reflectante de espejo, tierra, agua y concreto. Para cada una de las configuraciones referidas, se evaluó el efecto de H y ϕ sobre la variable respuesta considerada que fue la potencia generada (en la configuración monofacial) y la ganancia de potencia (en las configuraciones bifaciales). A partir del ANOVA de cada una de las matrices experimentales, se construyeron cinco modelos de regresión de segundo orden que permitieron describir el comportamiento de los datos obtenidos experimentalmente. Cada uno de los

modelos fue validado. Se logró identificar que el factor que mayor impacto tiene sobre la variable respuesta es H para todas las configuraciones bifaciales estudiadas. Sin embargo, se evidenció que para la configuración monofacial, el factor H no es un factor significativo.

Adicionalmente, se identificó que la superficie de espejo se constituye como la mejor superficie reflectante de las analizadas, entregando 57 veces la potencia del sistema con superficie de tierra; 36 veces la del montaje con superficie de agua y 9 veces la del sistema con superficie de concreto. Siendo evidente que con la superficie de espejo se logra un mayor aprovechamiento de la irradiación reflejada; seguida por el concreto, el agua y la tierra, respectivamente. En todas las configuraciones bifaciales estudiadas se obtuvo un incremento de la generación de energía a medida que aumenta H , con valores cercanos al 100 % del ancho de panel.

Como alternativa de aplicación de los paneles solares bifaciales, se encuentran los sistemas de baja concentración solar, que aprovechan el aumento en la irradiación incidente sobre la cara posterior del panel. Sin embargo, esto se vería reflejado en aumentos en la temperatura del módulo fotovoltaico y por consiguiente en pérdidas en la eficiencia del panel de entre 0,3 y 0,5 % por cada 1°C de aumento en la temperatura [25]. En este sentido, los sistemas híbridos fotovoltaicos-térmicos con paneles solares bifaciales se encuentran como alternativa de aplicación de paneles bifaciales y de concentración solar, en donde el aumento de la temperatura del módulo fotovoltaico puede ser aprovechado por un colector solar para calentar un fluido, disminuyendo de esta manera la pérdida de eficiencia fotovoltaica y aumentando la eficiencia global del sistema [26].

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto “Diseño de una metodología de valoración de proyectos de generación de energía eléctrica renovable”, financiado por el concurso de proyectos de investigación para estudiantes de pregrado de las Facultades de Ingeniería y Ciencias Económicas de la Universidad de Antioquia. Además, los autores reconocen el apoyo financiero de la Universidad de Antioquia (Estrategia de Sostenibilidad 2020-2021. ES84190067).

Referencias

- [1] P. G. V. Sampaio, and M. O. A. González, “Photovoltaic solar energy: Conceptual framework”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, , pp. 590-601, 2017. <https://doi:10.1016/j.rser.2017.02.081> ↑2
- [2] X. Sun, M. R. Khan, C. Deline, and M. A. Alam, “Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective”, *Appl. Energy*, vol. 212, no. pp. 1601-1610, 2018. <https://doi:10.1016/j.apenergy.2017.12.041> ↑2, 3, 4
- [3] A. Perez, and J. J. Garcia-Rendon, “Integration of non-conventional renewable energy and spot price of electricity: A counterfactual analysis for Colombia”, *Renew. Energy*, vol. 167, pp. 146-161, 2021. <https://doi:10.1016/j.renene.2020.11.067> ↑2
- [4] V. Durković, and Ž. urišić, “Extended model for irradiation suitable for large bifacial PV power plants”, *Sol. Energy*, vol. 191, pp. 272-290, 2019. <https://doi:10.1016/j.solener.2019.08.064> ↑2
- [5] W. Muehleisen et al., “Energy yield measurement of an elevated PV system on a white fl at roof and a performance comparison of monofacial and bifacial modules”, *Renew. Energy*, vol. 170, pp. 613-619, 2021. <https://doi:10.1016/j.renene.2021.02.015> ↑2

- [6] J. Appelbaum, “The role of view factors in solar photovoltaic fields”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 161-171, 2018. <https://doi:10.1016/j.rser.2017.07.026> ↑2
- [7] H. Ziar, F. F. Sönmez, O. Isabella, and M. Zeman, “A comprehensive albedo model for solar energy applications: Geometric spectral albedo”, *Appl. Energy*, vol. 255, 2019. <https://doi:10.1016/j.apenergy.2019.113867> ↑2, 3
- [8] G. Lobaccaro, A. Kamppinen, K. Miettunen, and S. Jouttijärvi, “Benefits of bifacial solar cells combined with low voltage power grids at high latitudes”, In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, Elsevier, 2022. <https://doi:10.1016/j.rser.2022.112354> ↑2
- [9] H. L. Cha, B. G. Bhang, S. Y. Park, J. H. Choi, and H. K. Ahn, “Power prediction of bifacial Si PV module with different reflection conditions on rooftop”, *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 10, 2018. <https://doi:10.3390/app8101752> ↑2, 3, 4
- [10] A. Cuevas, A. Luque, J. Eguren, and J. del Alamo, “50 Per cent more output power from an albedo-collecting flat panel using bifacial solar cells”, *Sol. Energy*, vol. 29, no. 5, pp. 419-420, 1982. [https://doi:10.1016/0038-092X\(82\)90078-0](https://doi:10.1016/0038-092X(82)90078-0) ↑2
- [11] E. D. Mehleri, P. L. Zervas, H. Sarimveis, J. A. Palyvos, and N. C. Markatos, “Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays”, *Renew. Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 2468-2475, 2010. <https://doi:10.1016/j.renene.2010.03.006> ↑3
- [12] U. A. Yusufoglu et al., “Simulation of energy production by bifacial modules with revision of ground reflection”, *Energy Procedia*, vol. 55, pp. 389-395, 2014. <https://doi:10.1016/j.egypro.2014.08.111> ↑3, 4, 13
- [13] Q. Wei et al., “The glass-glass module using n-type bifacial solar cell with PERT structure and its performance”, *Energy Procedia*, vol. 92, pp. 750-754, 2016. <https://doi:10.1016/j.egypro.2016.07.054> ↑3
- [14] Y. Kotak, M. S. Gul, T. Muneer, and S. M. Ivanova, “Investigating the impact of ground albedo on the performance of PV systems”, *CIBSE Tech. Symp.*, no. 16-17, 2015. ↑3
- [15] T. C. R. Russell, R. Saive, A. Augusto, S. G. Bowden, and H. A. Atwater, “The influence of spectral albedo on bifacial solar cells: A theoretical and experimental study”, *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 7, no. 6, pp. 1611-1618, 2017. <https://doi:10.1109/JPHOTOV.2017.2756068> ↑3
- [16] C. A. Gueymard, V. Lara-Fanego, M. Sengupta, and Y. Xie, “Surface albedo and reflectance: Review of definitions, angular and spectral effects, and intercomparison of major data sources in support of advanced solar irradiance modeling over the Americas”, *Sol. Energy*, vol. 182, pp. 194-212, 2019. <https://doi:10.1016/j.solener.2019.02.040> ↑3
- [17] M. Kacira, M. Simsek, Y. Babur, and S. Demirkol, “Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey”, *Renew. Energy*, vol. 29, no. 8, pp. 1265-1275, 2004. <https://doi:10.1016/j.renene.2003.12.014> ↑3
- [18] A. Awasthi et al., “Review on sun tracking technology in solar PV system”, *Energy Reports*, vol. 6, pp. 392-405, 2020. <https://doi:10.1016/j.egypr.2020.02.004> ↑3
- [19] A. Z. Hafez, A. Soliman, K. A. El-Metwally, and I. M. Ismail, “Tilt and azimuth angles in solar energy applications - A review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 147-168, 2017. <https://doi:10.1016/j.rser.2017.03.131> ↑4, 7
- [20] E. Calabrò, “An algorithm to determine the optimum tilt angle of a solar panel from global horizontal solar radiation”, *J. Renew. Energy*, vol. 2013, 2013. <https://doi:10.1155/2013/307547> ↑4, 7
- [21] C. Delineet et al., “Assessment of bifacial photovoltaic module power rating methodologies - inside and out”, *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 7, no. 2, pp. 575-580, 2017. <https://doi:10.1109/JPHOTOV.2017.2650565> ↑4, 7
- [22] D. C. Montgomery, *Statistical Quality Control: A Modern Introduction*, Wiley, 2013. ↑5, 8
- [23] C. Nicolás-Martín, D. Santos-Martín, M. Chinchilla-Sánchez, and S. Lemon, “A global annual optimum tilt angle model for photovoltaic generation to use in the absence of local meteorological data”, *Renew. Energy*, vol. 161, pp. 722-735, 2020. <https://doi:10.1016/j.renene.2020.07.098> ↑7, 8
- [24] Y. S. Lim, C. K. Lo, S. Y. Kee, H. T. Ewe, and A. R. Faiz, “Design and evaluation of passive concentrator and reflector systems for bifacial solar panel on a highly cloudy region - A case study in Malaysia”, *Renew. Energy*, vol. 63, pp. 415-425, 2014. <https://doi:10.1016/j.renene.2013.10.008> ↑13
- [25] H. Zhang, Y. Zhang, K. Liang, and H. Chen, “Performance study of a combined low-concentration bifacial photovoltaic/thermal system with glass channels”, *Renew. Energy*, vol. 171, pp. 947-957, 2021. <https://doi:10.1016/j.renene.2021.02.142> ↑14

- [26] S. K. Pathak et al., “A detailed review on the performance of photovoltaic/thermal system using various cooling methods”, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 51, 2022. <https://doi:10.1016/j.seta.2021.101844> ↑14

Juan Pablo Castaño Serna

Ingeniero Mecánico de la Universidad de Antioquia. Investigador del Grupo de Investigación Energía Alternativa de la Universidad de Antioquia.

Correo electrónico: juan.castano16@udea.edu.co

Ainhoa Rubio-Clemente

Doctora en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Antioquia. Doctora en Ciencias de la Salud de la Universidad Católica San Antonio de Murcia. Magíster en Educación Bilingüe de la Universidad Internacional de la Rioja. Licenciada en Ciencias Ambientales de la Universidad de Salamanca. Profesora de la Universidad de Antioquia.

Correo electrónico: ainhoa.rubioc@udea.edu.co

Edwin Lenin Chica Arrieta

Doctor en Ingeniería de la Universidad de Valladolid. Magíster en Ingeniería de la Universidad Eafit. Ingeniero Mecánico de la Universidad de Antioquia. Docente de la Universidad de Antioquia. Coordinador del Grupo de Investigación Energía Alternativa de la Universidad de Antioquia.

Correo electrónico: edwin.chica@udea.edu.co

Metodología para obtención y análisis de datos inmobiliarios usando fuentes alternativas: estudio de caso en tres ciudades intermedias de Colombia

Methodology for the Collection and Analysis of Real Estate Data Using Alternative Sources: Case Study in Three Medium-Sized Cities of Colombia

Andrés E. Rosso-Mateus¹, Yeimy M. Montilla-Montilla¹, Sonia C. Garzón-Martínez¹

¹Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica - CIAF

*Correspondence E-mail: sonia.garzon@igac.gov.co

Received: 01st-February-2021. Modified: 16th-November-2022. Accepted: 18th-March-2022

Abstract

Context: The Multipurpose Cadastre public policy needs to consolidate real estate information from different sources for analysis, such as offers, transactions, and construction costs, among others. Real estate websites are part of these sources of information, although they have not yet been included in commercial analysis. In light of the above, it is necessary to review a methodology that allows optimal access to these web platforms and facilitates the analysis of the variables provided therein, which are crucial to a property's commercial value. A study case was carried out in three Colombian cities: Fusagasugá, Manizales, and Villavicencio.

Method: The method is implemented in two stages: (i) web scraping, which allows obtaining the information links from real estate web pages and downloading their data, and (ii) analyzing real estate data by developing a workflow that starts with data exploration and cleaning, continues with pre-modeling, and ends by modeling the crucial variables in the determination of real estate value using machine learning techniques.

Results: By applying machine learning techniques, it was possible to automate the collection, cleaning, storage, and analysis of real estate data from web platforms, as well as to outline two models (Ridge Regression and Random Forest), which, according to their mean absolute percentage error (0,34 and 0,35, respectively), allow predicting the commercial value of a property while considering internal and external explanatory variables.

Conclusions: Obtaining and analyzing real estate data from alternative sources such as web platforms through machine learning techniques contributes significantly to addressing the high information demand of the country's cadastre. However, it is necessary to expand the supply of this information to rural areas, which have less access and availability to it.

Keywords: Multipurpose Cadastre, real estate dynamics, Real Estate Market, Commercial Value, web scraping

Language: Spanish.

Open access



Cite as: A. E. Rosso-Mateus, Y. M. Montilla-Montilla and S. C. Garzón-Martínez. "Metodología para obtención y análisis de datos inmobiliarios usando fuentes alternativas: estudio de caso en tres ciudades intermedias de Colombia". *Ing.*, vol. 27, no. 3, 2022. e17952. <https://doi.org/10.14483/23448393.17952>
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Resumen

Contexto: La política pública de Catastro Multipropósito necesita consolidar información inmobiliaria de diferentes fuentes para su análisis, tales como ofertas, transacciones y costos de construcción, entre otros. Las páginas web inmobiliarias forman parte de estas fuentes de información, aunque no han sido incluidas en el análisis comercial. Considerando lo anterior, es necesario revisar una metodología que permita acceder de forma óptima a estas plataformas web y facilite el análisis de las variables que allí se proveen, que son determinantes para el valor comercial de un inmueble. Se realiza un caso de estudio en tres ciudades colombianas: Fusagasugá, Manizales y Villavicencio.

Método: El método se desarrolla en dos etapas (i) web scraping, que permite obtener los enlaces de la información de páginas web inmobiliarias y descargar sus datos, y (ii) el análisis de datos inmobiliarios mediante el desarrollo de un flujo de trabajo que inicia con la exploración y la limpieza de los datos, continúa con el pre-modelado y finaliza con el modelado de las variables de interés en la determinación del valor de los bienes inmuebles usando técnicas de machine learning.

Resultados: A partir de la aplicación de técnicas de machine learning, fue posible automatizar la recolección, la limpieza, el almacenamiento y el análisis de datos inmobiliarios provenientes de plataformas web, así como delinear dos modelos (Ridge Regression y Random Forest) que, de acuerdo, con su error porcentual medio absoluto (0,34 y 0,35 respectivamente), permiten predecir el valor comercial de un inmueble considerando variables explicativas internas y externas.

Conclusiones: Obtener y analizar los datos inmobiliarios de fuentes alternativas como las plataformas web a través de desarrollos tecnológicos contribuye significativamente a atender la alta demanda de información del catastro del país. No obstante, es necesario ampliar el suministro de esta información a los ámbitos rurales, que cuentan con menos acceso y disponibilidad de la misma.

Palabras clave: Catastro Multipropósito, dinámica inmobiliaria, mercado inmobiliario, valor comercial, web scraping

Idioma: Español

1. Introducción

Las páginas web tanto en ámbitos científicos, políticos y de gobierno son hoy por hoy una fuente de datos rica e interesante para el desarrollo del análisis de grandes volúmenes de datos o “análisis de Big Data” [1]. El Web Scraping se dispone como una técnica de extracción automática de información textual de páginas web, donde se crea en primera instancia un árbol DOM (por sus siglas en inglés Document Object Model), para luego acceder a los datos necesarios por medio de este árbol. Otro método de Web Scraping, conocido como UzunExt, optimiza la labor de extracción de los datos mediante métodos de cadena que consiste en la búsqueda de un patrón dado, que permite luego el cálculo del número de elementos HTML de cierre para este patrón y finalmente la extracción de contenido del mismo [2].

Son varios los trabajos que proponen aplicaciones exitosas con el uso de Web Scraping, donde en el campo inmobiliario se busca extraer de sitios web información sobre el mercado de la vivienda para la generación de indicadores más precisos como el número de nuevas ofertas publicadas o la fluctuación de los precios a lo largo del tiempo para las ofertas existentes, así como avanzar con técnicas de aprendizaje de máquina para comparar los precios de venta de la oferta inmobiliaria versus los precios de negociación correspondientes y registrados por bases de datos notariales [3];

otros autores investigan sobre los precios de los alimentos, reconociendo en la técnica de Web Scraping un método efectivo para recopilar datos personalizados y de alta frecuencia en tiempo real, siempre y cuando se mantengan los registros de precios de alimentos en línea [4]; por otro lado, a la hora de planificar grandes infraestructuras es necesario comprender el impacto potencial de los desarrollos de terceros que pueden afectar las obras previstas, donde con esta información, disponible en el dominio público, se usa la técnica de Web Scraping basada en un algoritmo de árbol reforzado, que luego analiza los datos con algoritmos de aprendizaje de máquina [5]; finalmente, un trabajo que aprovecha los datos de usuarios de redes sociales como Facebook, Intagram y Twitter usa Web Scraping para buscar, combinar y presentar de una mejor manera la información de acuerdo con las preferencias de usuarios y eliminando aquella información redundante [6]. En suma, son múltiples las aplicaciones de los métodos de Web Scraping, no encontrando limitaciones en el ámbito tecnológico sino más bien en aquellos asociados con el acceso legal a los datos que se disponen de forma libre por los distintos proveedores de contenidos en la web [7].

Considerando, los casos de éxito en la aplicación de Web Scraping en diferentes campos e identificando para Colombia, en el marco de la reciente política pública de Catastro Multipropósito [8], la necesidad de recopilar la información del mercado inmobiliario como ofertas, transacciones, costos de construcción, entre otras, que alimenten los Observatorios Inmobiliarios Catastrales del país [?], el presente proyecto propone desarrollar una metodología para la obtención, la depuración, el almacenamiento y el análisis de datos provenientes de las plataformas web inmobiliarias, considerando como variable objetivo los valores de ofertas inmobiliarias y las correspondientes variables explicativas derivadas de un ejercicio exploratorio, basado en algoritmos de aprendizaje de máquina, que dé idea del potencial de la información disponible en línea junto con el proceso de valuación masiva del suelo.

Se reconoce, por tanto, en las páginas web inmobiliarias una valiosa disposición de datos que caracteriza las ofertas de venta y alquiler de bienes inmuebles, documentando en parte la dinámica comercial de este sector y suministrando variables propias y del entorno asociadas al valor comercial de los bienes [9]. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) propone aplicar métodos avanzados de levantamiento de datos, como Web Scraping, para permitir el uso de la información inmobiliaria disponible en línea y servir de insumo para los observatorios del mercado inmobiliario (OMI), los cuales podrán a su vez elaborar modelos de valuación masiva [9]. De acuerdo con el anterior planteamiento se hace necesario explorar el potencial de la información proveniente de las plataformas web, las cuales son indicio de la dinámica inmobiliaria, para generar información actualizada del suelo en forma masiva. En este proceso un agente programado o software que realiza tareas repetitivas, predefinidas y automatizadas se encarga de explorar varios sitios web con el fin de obtener, clasificar, organizar y formatear la información.

El uso de técnicas de Machine Learning como soporte de tareas manuales es cada vez más frecuente en diferentes dominios. En el caso particular de establecer los precios de los inmuebles, estas herramientas pueden ser de gran ayuda al generalizar patrones comunes que sirven como método de estimación cercano. Para lograr identificar estos patrones es necesario contar con muchos ejemplos que permitan al algoritmo de Machine Learning generalizar basado en la evidencia; estos datos pueden ser muy costosos de obtener, razón por la cual los métodos de extracción automática, también conocidos como métodos de Web Scraping tienen un rol importante [10].

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

El proyecto se desarrolló en tres áreas urbanas del país, como se observa en la figura 1:

- Manizales, Departamento de Caldas
- Villavicencio, Departamento del Meta
- Fusagasugá, Departamento de Cundinamarca

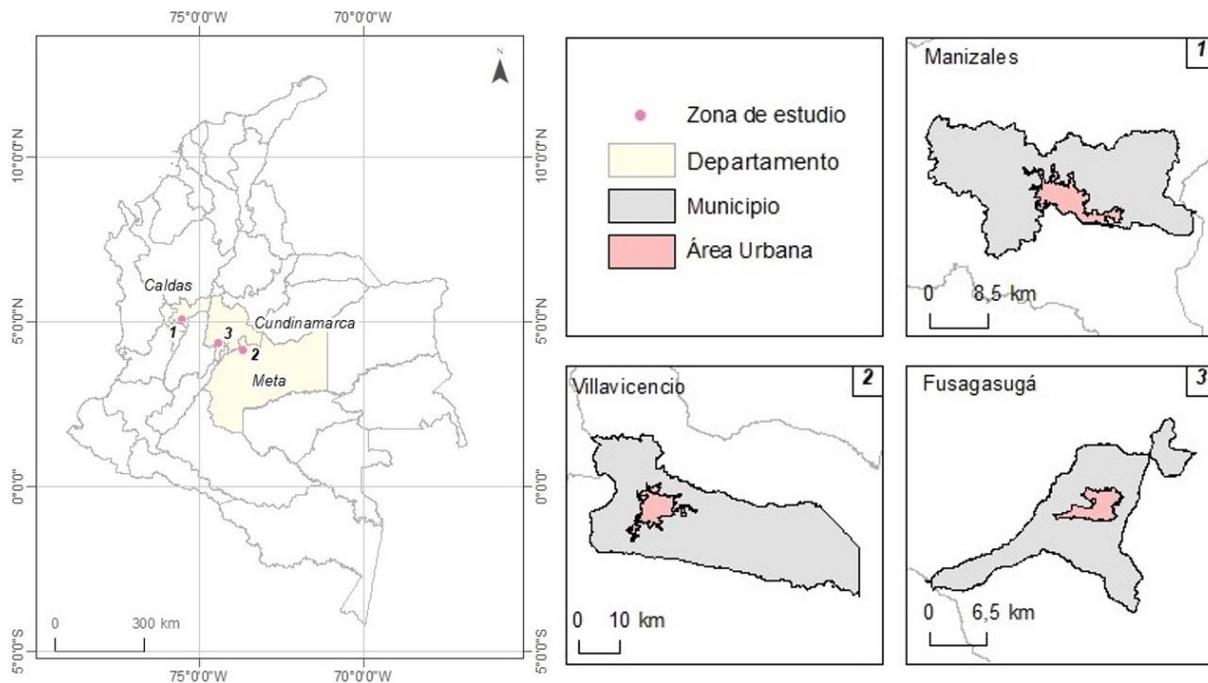


Figura 1: Área de estudio

Manizales es la capital del departamento de Caldas, se ubica en el centro occidente de Colombia, en la Cordillera Central y en las inmediaciones del Nevado del Ruiz a una altura de 2.150 msnm aproximadamente [11]. De acuerdo con las cifras del censo nacional de población y vivienda del 2018, Manizales cuenta con una población de 400.436 habitantes [12]. En el ámbito catastral, conforme a la consulta realizada en el registro 1 de la base de datos catastral con cobertura nacional, el municipio cuenta con 141.239 predios, de los cuales 131.820 pertenecen al área urbana y 9.419 pertenecen al área rural [13].

Villavicencio es la capital del departamento del Meta, se ubica a una altura aproximada de 467 msnm en el piedemonte de la Cordillera Oriental y al noroccidente del departamento, a una distancia de 86 km de la ciudad de Bogotá [14]. De acuerdo con las cifras del censo nacional de población y vivienda del 2018, Villavicencio cuenta con una población de 451.212 habitantes [12]. En el ámbito catastral conforme a la consulta realizada en el registro 1 de la base de datos catastral

con cobertura nacional, el municipio cuenta con 199.239 predios, de los cuales 142.977 pertenecen al área urbana y 54.515 pertenecen al área rural y 1.747 pertenecen a los centros poblados [13].

Fusagasugá es la capital de la provincia del Sumapaz en el departamento de Cundinamarca, se ubica a 59 km al suroccidente de la ciudad de Bogotá [15]. De acuerdo con las cifras del censo nacional de población y vivienda del 2018, Fusagasugá cuenta con una población de 134.658 habitantes [12]. En el ámbito catastral, conforme a la consulta realizada en el registro 1 de la base de datos catastral con cobertura nacional, el municipio cuenta con 71.318 predios, de los cuales 59.465 pertenecen al área urbana y 11.664 pertenecen al área rural y los 189 restantes pertenecen a los centros poblados [13].

2.2. Flujo metodológico

La propuesta metodológica, como se observa en la figura 2, se realiza en dos etapas organizadas de la siguiente forma: (i) Web Scraping; y (ii) análisis de datos inmobiliarios, usando métodos de Machine Learning. Para el desarrollo del componente de software de la primera etapa se sigue el modelo iterativo e incremental denominado Proceso Racional Unificado (RUP, Rational Unified Process por sus siglas en inglés) [16], caracterizado por la realización en paralelo de todas las etapas necesarias para la elaboración del software. Para la segunda etapa, donde se realiza el análisis de datos inmobiliarios se usan métodos de Machine Learning en el marco de la metodología CRISP-DM (por sus siglas en inglés, Cross-Industry Standard Process for Data Mining), la cual es empleada para llevar a cabo proyectos de minería de datos [17].

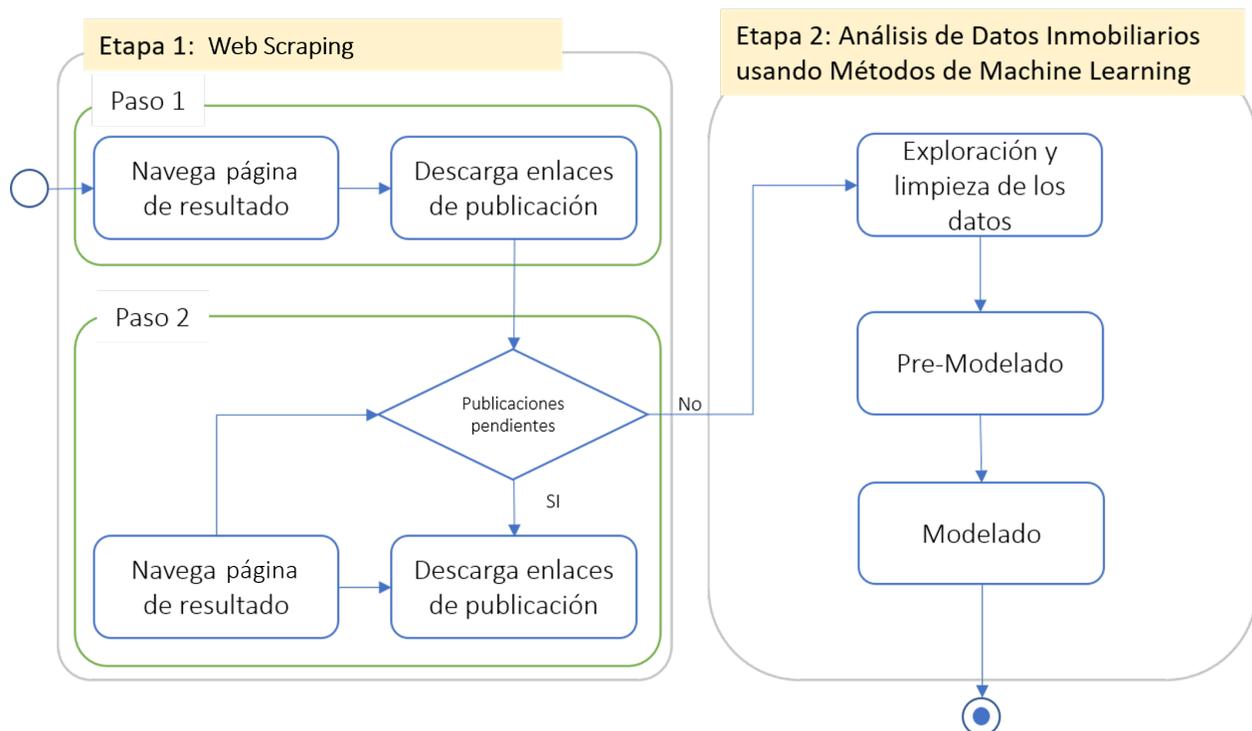


Figura 2: Flujo metodológico

2.3. Web Scraping

En la etapa 1 se realizan dos pasos [18] [19]: en el primero, el usuario hace manualmente la consulta en la plataforma web y el scraper se encarga de descargar uno por uno los enlaces a las páginas detalladas del anuncio conforme al resultado; en el segundo, con el listado de enlaces se realiza, para cada una de las publicaciones, la descarga de la página html con la información detallada de la oferta; posteriormente, se extraen las variables de interés, enunciadas en la tabla II y se almacenan de forma estructurada en un archivo plano, el cual se convierte en uno de los insumos para la segunda etapa.

La implementación del scraper se desarrolla con Javascript y Python. El script generado se carga en la página web usando las extensiones Witchcraft: JS/CSS injector y Web Server for Chrome. Este script se encarga de navegar por la páginas resultado de la búsqueda, de la misma forma en que lo haría un usuario. Por otra parte, este también extrae los enlaces de cada una de las publicaciones, para luego navegar por estas usando NodeJS y la interfaz remota de Chrome. Para cada publicación descarga la información usando el script antes mencionado. Finalmente, los resultados se limpian y estructuran de forma tabular usando Python.

2.3.1. Datos de descarga

En los últimos años, se ha fortalecido la comercialización de inmuebles mediante el uso de portales web, convirtiéndose este en el principal medio para la publicación de la oferta inmobiliaria, con el consecuente relegamiento de la publicación mediante medios impresos. Lo anterior, incide favorablemente en la cantidad de información que se encuentra disponible en la red para alimentar un proceso de Web Scraping. Existe una gran cantidad de portales dedicados a la publicación del negocio inmobiliario entre los que se destacan los descritos en la tabla I.

Tabla I: Plataformas Web

Nombre	Página web
Metrocuadrado	www.metrocuadrado.com
Fincaraiz	www.fincaraiz.com.co

Las características más importantes que impulsan el valor de una vivienda tipo casa son el área y la localización; sin embargo, hay otras variables que pueden determinarlo tales como: número de habitaciones, de estacionamientos, o de baños, proximidad a algún sitio de interés por la prestación de algún servicio, entre otros, pero sin lugar a duda, la mayor instancia del valor es la demanda [20]. Para el desarrollo de esta investigación se tomó como fuente de datos la plataforma web Fincaraiz, de la cual se seleccionaron las variables que se disponen en la tabla II. Se consideraron de este sitio las variables de latitud y longitud para tener la posibilidad de definir patrones espaciales y de forma particular; se aclara que la variable precio, reportada en la plataforma, corresponde al valor de la oferta más no al valor pactado dentro de la negociación del inmueble, situación que se encontraría para cualquier plataforma web inmobiliaria. Por otro lado, para identificar los factores asociados con el entorno, que pueden influir en el valor de los predios, se tuvieron en cuenta las plataformas de Open Street Maps y Google Places, de donde se extrajeron los sitios de interés.

Tabla II: Variables de interés

Clasificación	Datos de la oferta	Ubicación del inmueble	Descripción del inmueble
Variable	Fecha Publicación	Ciudad	Area construida
	ID publicación	Localización	Número de baños
	Precio	Longitud	Número de habitaciones
	Tipo de oferta	Latitud	Estacionamientos
	Tipo de propiedad		Estrato
	URL		Administración
			Antigüedad

2.4. Análisis de datos inmobiliarios usando métodos de Machine Learning

Para el desarrollo del proyecto se usó la metodología de desarrollo para proyecto de Machine Learning CRISP-DM [21]. Esta metodología proporciona un enfoque estructurado para la planificación del proyecto, siendo además una metodología robusta y bien probada.

Este modelo es una secuencia idealizada de etapas de un proyecto, pero a menudo las tareas pueden realizarse en un orden diferente o podría ser necesario volver a tareas anteriores y repetir ciertas acciones.

Las fases más relevantes o aquellas que requieren mayor trabajo son: (i) exploración y limpieza de los datos, (ii) pre-modelado, y (iii) modelado, que se aprecian en la figura 2.

2.4.1. Exploración y limpieza de los datos

En esta fase se realiza la exploración general de los datos, para luego avanzar con la limpieza de estos; posteriormente con los datos depurados se procede a la exploración geográfica y la exploración de la información secundaria.

Exploración de variables: corresponde a la revisión general de la calidad asociada a los datos que son recolectados mediante el Web Scraping, por el uso de tablas y gráficas que permiten:

- Exploración de datos faltantes en las publicaciones con el fin de identificar datos nulos en las variables de interés.
- Exploración de variables de texto, donde se revisa particularmente el campo de descripción del inmueble, el cual al ser un texto libre alimentado por el usuario puede arrojar información sobre aquellas palabras claves que con mayor frecuencia se usan para definir la oferta.
- Exploración de variables discretas, donde para cada variable discreta del conjunto de datos se realiza un diagrama de barras con el fin de identificar la frecuencia de los valores que estas toman.

Limpieza de los datos: este proceso consiste en la preparación de los datos para el pre-modelado y el modelado. Las principales tareas que se realizan son:

- Construcción de validadores, donde se plantean dos tipos: a. validador “builder” que contiene las coordenadas extremas de la ciudad objetivo con el propósito de corroborar la localización (latitud, longitud) de las publicaciones descargadas, b. validador “condition” que verifica el cumplimiento de ciertos criterios por parte de los registros, como por ej. la ciudad, la fecha, el tipo de oferta y el tipo de inmueble de interés.
- Imputación de valores vacíos por un valor lógico. Pueden existir varias publicaciones que no contienen algunos registros en ciertos campos, pero la ausencia no significa que se desconozca su valor. Para las variables “valor de la administración” y “número de garajes” se asume que el valor es cero (0) cuando existe ausencia del dato. Para la variable antigüedad en caso de ausencia del dato se asigna el valor de desconocido.
- Cálculo de la variable precio por m^2 “price m^2 ” la cual se deriva de la división del precio de la oferta sobre el área del predio.

Finalmente se obtiene el número de publicaciones que cumplen con los validadores definidos y se consideran adecuadas para ser trabajadas en el siguiente paso.

Exploración geográfica: considerando el componente espacial del conjunto de datos, se realiza la construcción de mapas que facilitan la identificación de zonas en la ciudad seleccionada, que son de especial importancia de acuerdo con la variable que se visualiza.

- Mapa de ubicación de las publicaciones: que posibilita la visualización geográfica del conjunto de ofertas depuradas para la ciudad seleccionada.
- Mapa de cantidad de publicaciones por zona: que presenta las publicaciones agrupadas, demarcando zonas con etiquetas que denotan el número de publicaciones en ese conjunto.
- Mapa de concentración de publicaciones: que facilita la identificación de los sitios de la ciudad donde se presenta la mayor densidad de publicaciones.
- Mapa de concentración de precios: que ayuda con la identificación de los sitios que en la ciudad tienen la oferta de precios más altos. Es precisamente en estos sitios donde se realiza la exploración de las variables de entorno suministradas por Google Places u Open Street Maps, derivando en consecuencia los siguientes mapas.
- Mapa de ubicación de sitios de interés o amenities: que muestra la ubicación de los sitios de interés en la ciudad seleccionada.
- Mapa de concentración de sitios de interés: que presenta las zonas de mayor concentración de sitios de interés en la ciudad seleccionada.

Exploración variables explicativas vs variable objetivo: este proceso tiene como propósito contrastar diferentes variables del conjunto de datos como variables explicativas con respecto al valor del inmueble. Se hace uso de histogramas y diagramas de caja para abordar la exploración estadística de las variables, que faciliten la identificación de relaciones entre el precio de los bienes inmuebles y algunas características como: número de garajes, número de habitaciones, número de baños, años de antigüedad y estrato.

2.4.2. Pre-modelado

En esta fase se identifican las características internas y externas con más relevancia en la explicación del valor asociado al precio de la oferta. A continuación las técnicas usadas dependiendo el tipo de característica:

Identificación de las características externas: se realiza la cuantificación de los sitios de interés o amenities en un radio de un kilometro en torno a la posición geográfica registrada de cada una de las publicaciones en la ciudad de análisis. Posteriormente, se tabula y analiza la tabla de frecuencias generada para estos sitios de interés.

Relevancia de las características internas y externas: para identificar las variables explicativas que influyen mayoritariamente en el valor de la oferta se consideran tres métodos: (i) selección univariada de características; (ii) eliminación recursiva de características; (iii) selección de características basada en árboles de decisión.

- Selección univariada de características: método estadístico mediante el cual se genera una regresión lineal univariada que prueba de forma individual el efecto de cada una de las variables explicativas sobre la variable objetivo. Se aplican dos estadísticos que permiten valorar la bondad de ajuste de los datos al modelo de regresión lineal simple:
 - Coeficiente de correlación lineal simple, que mide el grado de asociación lineal entre dos variables.
 - Análisis de varianza, que permite valorar hasta que punto es adecuado el modelo de regresión lineal para estimar los valores de la variable dependiente.
- Eliminación recursiva de características: permite identificar cuáles variables dentro del conjunto de datos son de mayor relevancia para explicar la variable objetivo, la cual dentro del presente estudio corresponde con el valor de la oferta. La importancia de cada una de las variables se determina mediante una regresión lineal.
- Selección de características basada en árboles de decisión: se implementa un metaestimador que se ajusta a varios árboles de decisión aleatorios (también conocidos como árboles extra) en varias submuestras del conjunto de datos y usa promedios para mejorar la precisión predictiva y el control de sobreajuste.

2.4.3. Modelado

El objetivo de esta fase es tener un algoritmo que pueda predecir el precio de un inmueble dadas sus características, entre estas se tienen: ubicación geográfica, número de habitaciones, área, antigüedad. En el modelado se manejan tres etapas, que son: (i) entrenamiento del modelo, (ii) predicción y (iii) evaluación del desempeño del modelo.

Entrenamiento del modelo: el proceso de entrenamiento de un modelo de aprendizaje de máquina (ML, Machine Learning) consiste en proporcionar a un algoritmo ejemplos de entrenamiento para identificar patrones en los datos y posteriormente encontrar los hiperparámetros de forma automática usando cross-validation; para el presente caso, las publicaciones inmobiliarias son la fuente de datos para el entrenamiento, donde se cuenta con el precio del inmueble (Y) junto a las características internas y externas del inmueble (X). Listo el entrenamiento, se genera un modelo de ML que captura dichos patrones y por medio de una función de mapeo ($X \rightarrow Y$) estos se transforman en un valor estimado (\hat{Y} = precio estimado).

En la etapa de entrenamiento es necesario que las características estén en la misma escala, por tanto se requiere usar técnicas de escalamiento o normalización como un paso previo al entrenamiento del modelo. Una vez encontrado el mejor modelo, se validan sus métricas contra los objetivos de modelado y si este es lo suficientemente efectivo se reserva para la fase de pruebas, de lo contrario, se debe iniciar el proceso de nuevo.

Modelo predictivo: en la fase de pruebas o predicción se toman las características del inmueble del que no se conoce el valor (Y), para ser escaladas y luego pasar por el modelo entrenado obtenido en el paso anterior. Se realizan por tanto varios experimentos para encontrar la combinación de variables y el mejor modelo que, basado en las características del inmueble, así como las características externas, logre predecir de mejor manera el precio asociado. Los parámetros de los modelos se ajustan por medio de la técnica "grid search", capaz de identificar los mejores hiperparámetros del modelo. Se prueban varios algoritmos de regresión, entre los cuales se encuentran:

- **Regresión lineal:** la regresión lineal (ajuste lineal) es un modelo matemático que aproxima la relación de dependencia entre una variable dependiente Y y las variables independientes X , más un término aleatorio ϵ .

El producto de la regresión es la estimación de una función de regresión dependiente de X . Con base en esta función estimada se pueden hacer predicciones sobre eventos futuros, ya que las variables están correlacionadas por medio de esta función.

- **Modelo de regresión Ridge:** tres de las limitaciones que aparecen en la práctica al tratar de emplear el modelo de regresión lineal son:
 - Se ven perjudicados por la incorporación de predictores correlacionados.
 - No realizan selección de predictores. Todos los predictores se incorporan en el modelo, aunque no aporten información relevante. Esto suele complicar la interpretación del modelo y reducir su capacidad predictiva.

- No pueden ajustarse cuando el número de predictores es superior al número de observaciones.

Una forma de atenuar el impacto de estos problemas es utilizar la estrategia de regularización Ridge, que fuerza a que los coeficientes del modelo tiendan a 0, minimizando así el riesgo de overfitting. Esto reduce la varianza, atenúa el efecto de la correlación entre predictores y disminuye la influencia en el modelo de los predictores menos relevantes. La regularización Ridge penaliza la suma de los coeficientes elevados al cuadrado. A esta penalización se le conoce como L2 y tiene el efecto de reducir de forma proporcional el valor de todos los coeficientes del modelo sin que estos lleguen a 0. El grado de penalización está controlado por el hiperparámetro λ . Cuando $\lambda = 0$, la penalización es nula y el resultado es equivalente al de un modelo lineal por mínimos cuadrados ordinarios.

- **Modelo Gradient Boosting:** Gradient Boosting o potenciación del gradiente es una técnica de aprendizaje automático utilizada para el análisis de la regresión y para problemas de clasificación estadística, la cual produce un modelo predictivo en forma de un conjunto de modelos de predicción débiles. Construye el modelo de forma escalonada como lo hacen otros métodos de boosting, y los generaliza permitiendo la optimización arbitraria de una función de pérdida diferenciable.
- **Modelo Random Forest:** en el método de Random Forest se entrenan diferentes modelos del tipo árbol de decisión. Se usan sobre diferentes particiones de los datos y la predicción se hace usando todos los modelos ajustados, los cuales al ser combinados tienen un rendimiento superior que si solo se usará un árbol de decisión.

Evaluación del desempeño del modelo: para comparar el desempeño de los modelos se usa la métrica de Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE), la cual entrega la desviación en términos porcentuales y no en unidades como las otras medidas. Esta se interpreta como el promedio del error absoluto o diferencia entre el valor real y el pronóstico, expresado como un porcentaje de los valores reales. En la ecuación 1 se muestra la expresión matemática correspondiente.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n 100|Real_i - Pronóstico_i|}{Real_i \cdot n} \quad (1)$$

3. Resultados

La presentación de resultados se muestra organizada de acuerdo con las dos etapas de desarrollo. La sección 3.1 indica los resultados obtenidos en la etapa de Web Scraping y la sección 3.2 describe los resultados de análisis de la data recolectada.

3.1. Web Scraping

El proceso de Web Scraping se realizó el 29 de septiembre del 2020 para las zonas urbanas de los municipios de Manizales, Fusagasugá y Villavicencio. Para cada una de estas zonas se consultaron

las casas y los apartamentos en arriendo y venta. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla III.

Tabla III: Resultados del proceso de Web Scraping

Ciudad	Tipo	No. Venta	No. arriendo	Total
Manizales	casa	2.352	119	2.471
	apto	3.267	1.180	4.447
Villavicencio	casa	958	67	1.025
	apto	390	172	562
Fusagasugá	casa	539	11	604
	apto	209	15	224
Total		7.715	1.564	9.333

Por otra parte, el estudio tuvo en cuenta variables externas (sitios de interés o amenities), las cuales fueron extraídas de Open Street Maps y Google Places. La tabla IV resume el número de puntos de interés considerados para cada una de las áreas de estudio.

Tabla IV: Número de sitios de interés por área de estudio

Ciudad	No. puntos
Manizales	2.588
Villavicencio	3.317
Fusagasugá	957

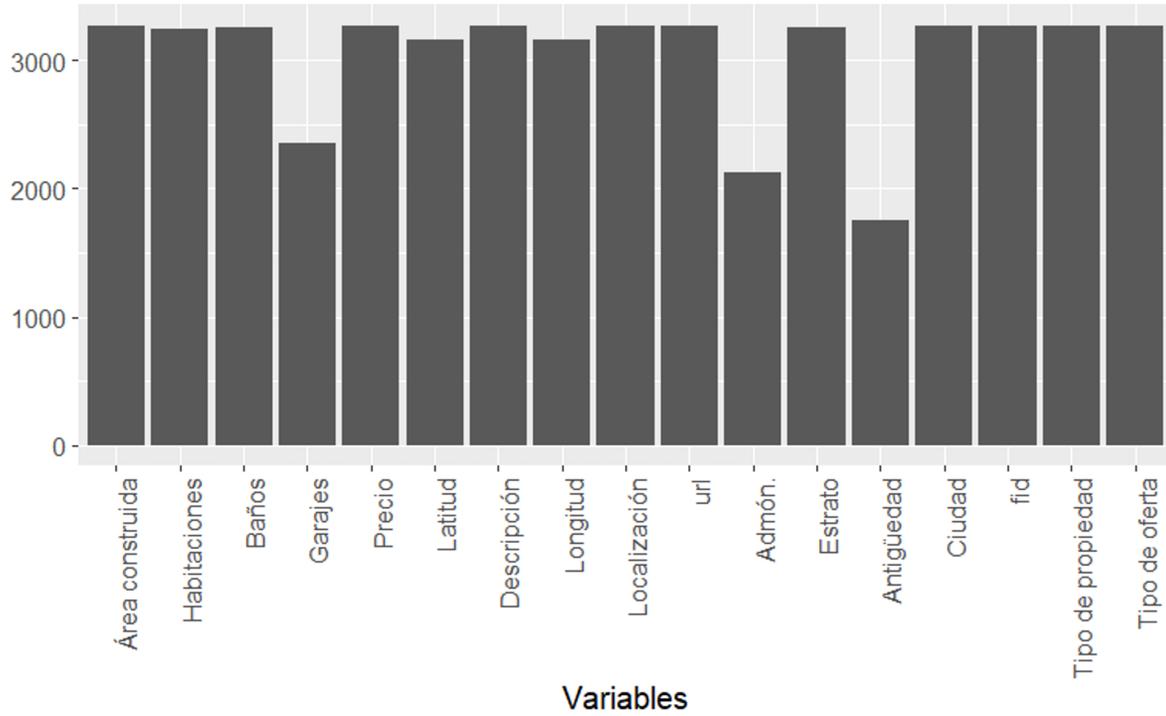
3.2. Análisis de datos inmobiliarios

Los resultados de esta etapa se presentan en consideración de los siguientes pasos metodológicos: (i) exploración y limpieza de los datos, (ii) pre-modelado y (iii) modelado.

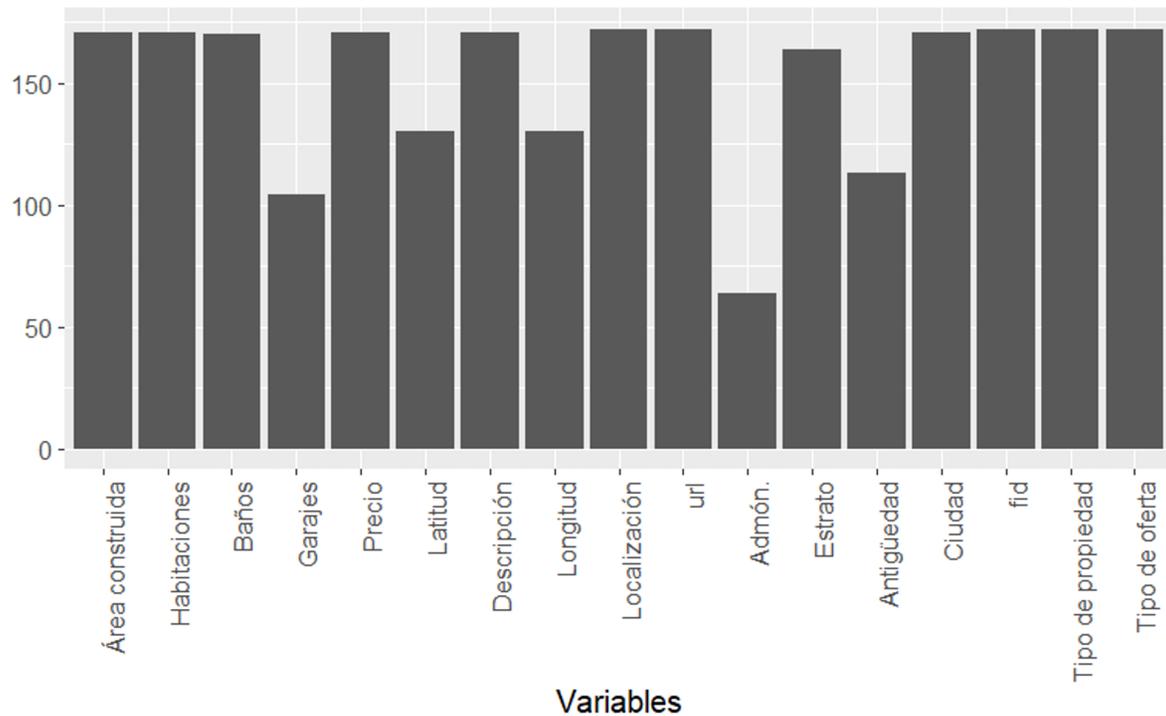
3.2.1. Exploración y limpieza de los datos

- **Exploración de variables:** se logró para cada área de estudio hacer la identificación de los datos faltantes, encontrando que las variables con mayor ausencia de datos en las publicaciones son: administración, garajes, antigüedad y las variables de carácter espacial longitud y latitud. Se observan en la figura 3 las gráficas de análisis de la completitud de variables para las ciudades de Manizales y Villavicencio.

De la exploración de las variables de texto, disponibles en las publicaciones inmobiliarias, se revisó específicamente el campo de descripción. Se identificó que las palabras que con mayor frecuencia se emplean en las ofertas de casas en venta, para las tres ciudades de estudio, fueron: cocina integral, sala comedor y baño privado. En la figura 4 se muestra la gráfica que representa el análisis de texto para las casas en venta de la ciudad de Villavicencio, donde el tamaño de las palabras es proporcional a la frecuencia de uso dentro de la descripción. El



a) Casas en venta en Manizales



a) Apartamentos en arriendo en Villavicencio

Figura 3: Completitud de variables

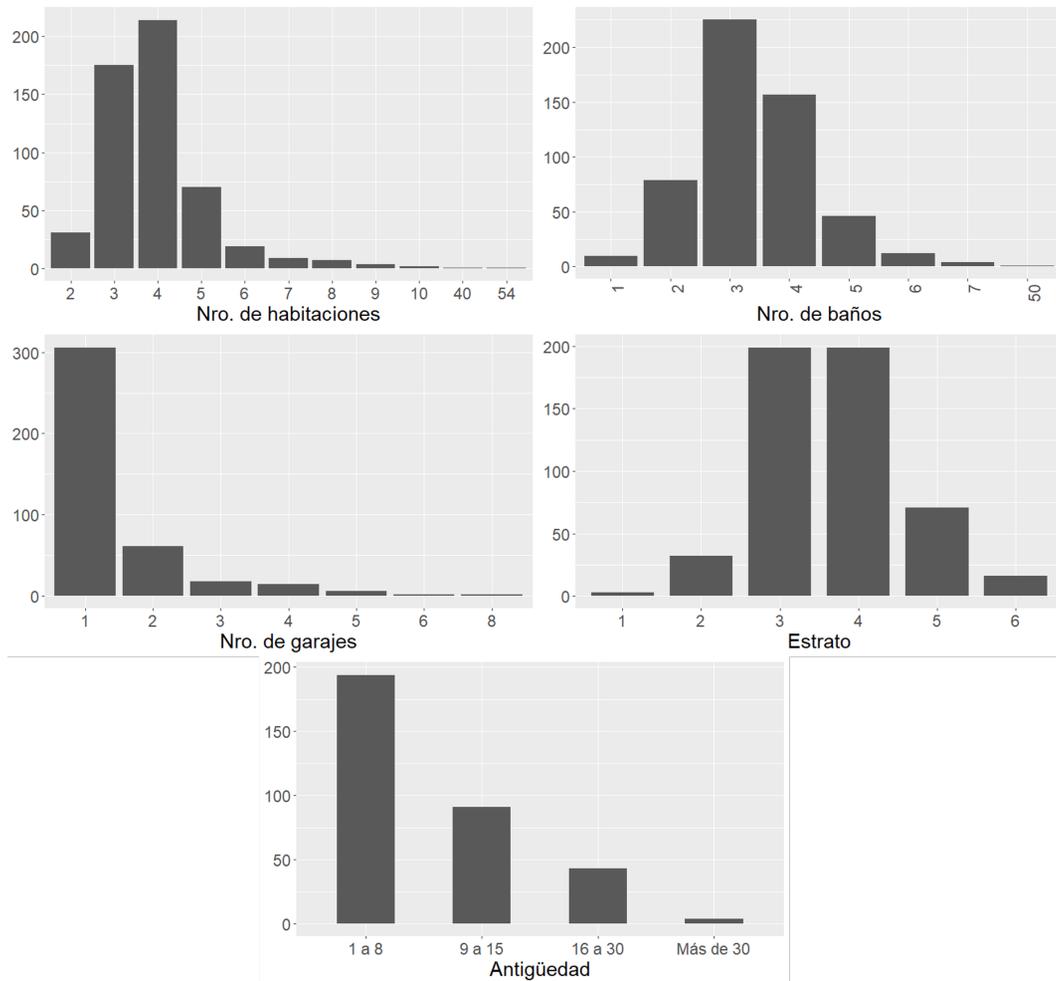


Figura 5: Exploración de variables discretas de casas en venta en Fusagasugá

no era suficiente; por tanto, los conjuntos de datos de casas en arriendo para la ciudad de Villavicencio, casas y apartamentos en arriendo en la ciudad de Fusagasugá no se tuvieron en cuenta.

- **Exploración geográfica:** en la figura 6.a se representa la distribución espacial del número de publicaciones de la ciudad de Manizales. En términos generales, para este caso, el número de ofertas de apartamentos en venta muestra una concentración que tiende a ubicarse en torno a las principales estructuras de movilidad vial, como es el caso de la Vía Panamericana, la Carrera 23 y la Carrera 14. Es importante mencionar que, si bien las vías atraviesan la ciudad de manera longitudinal y en sentido sur norte, el número de ofertas tiene un comportamiento radial, lo que implica que hay mayor número de ofertas hacia el centro de la ciudad, y disminuyen hacia la periferia de la misma, sobre todo en los extremos suroriental y noroccidental de Manizales.

El mapa de calor de la figura 6.b reafirma la relevancia de la estructura vial, los centros dotacionales y de comercio en la determinación de las zonas con mayor concentración de ofertas,

Tabla V: Resultados del proceso de limpieza

Ciudad	Tipo	No. Venta	No.arriendo	Total	Porc.Total datos
Manizales	casa	1.992	99	2.091	84,6
	apto	3.005	1.027	4.032	90,7
Villavicencio	casa	720	45	765	74,6
	apto	314	120	434	77,2
Fusagasuga	casa	310	3	313	51,8
	apto	137	8	145	64,7
Total		6.478	1.302	7.780	83,4

evidenciando mayor número de ofertas hacia el centro de la ciudad y alrededor de las Carreras 23 y 14.

De acuerdo con la figura 6.c, la concentración de los sitios de interés en Manizales se distribuye a lo largo de las Carreras 25, 23 y 14, presentando concentraciones cerca de las infraestructuras de servicios tales como las universidades, el estadio Palogrande, centros turísticos como las Termales Tierra Viva y los centros comerciales Galerías Plaza, Fundadores, Mallplaza Manizales y Parque Caldas.

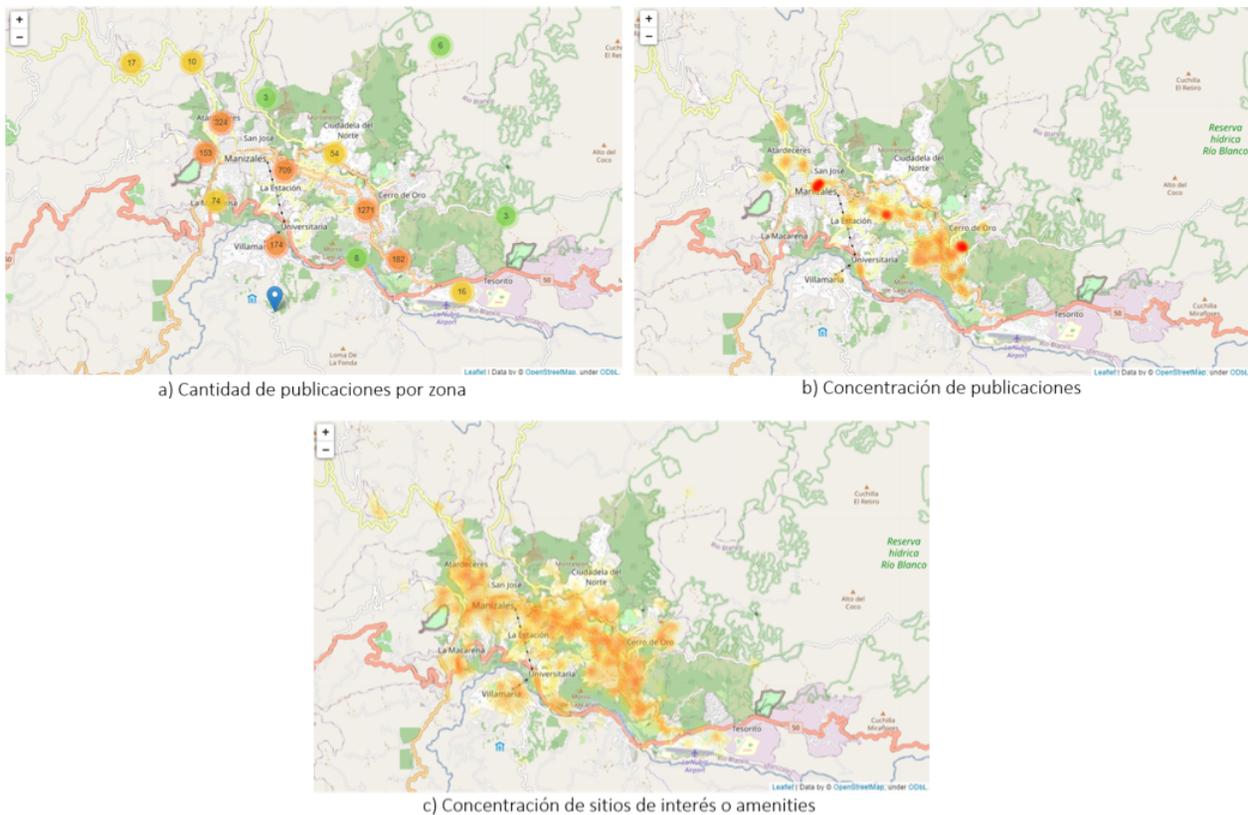


Figura 6: Exploración espacial de apartamentos en venta en la ciudad de Manizales

- **Exploración de variables explicativas vs variable objetivo:** producto de la exploración de variables para casas en venta de la ciudad de Fusagasugá se obtuvieron los resultados

resumidos en la figuras 7 y 8. Primero se realizó la exploración de la distribución de las variables objetivo como se observa en la figura 7, a partir de las cuales se resalta que:

- El precio de las ofertas se concentra alrededor de 64.600 dólares, existiendo otras ofertas cercanas a los 820.000 dólares.
- La mayoría de las publicaciones presenta un valor por m^2 entre 450 dólares y 600 dólares; sin considerar los datos atípicos, existen ofertas donde se tiene un valor por m^2 de 1.400 dólares.

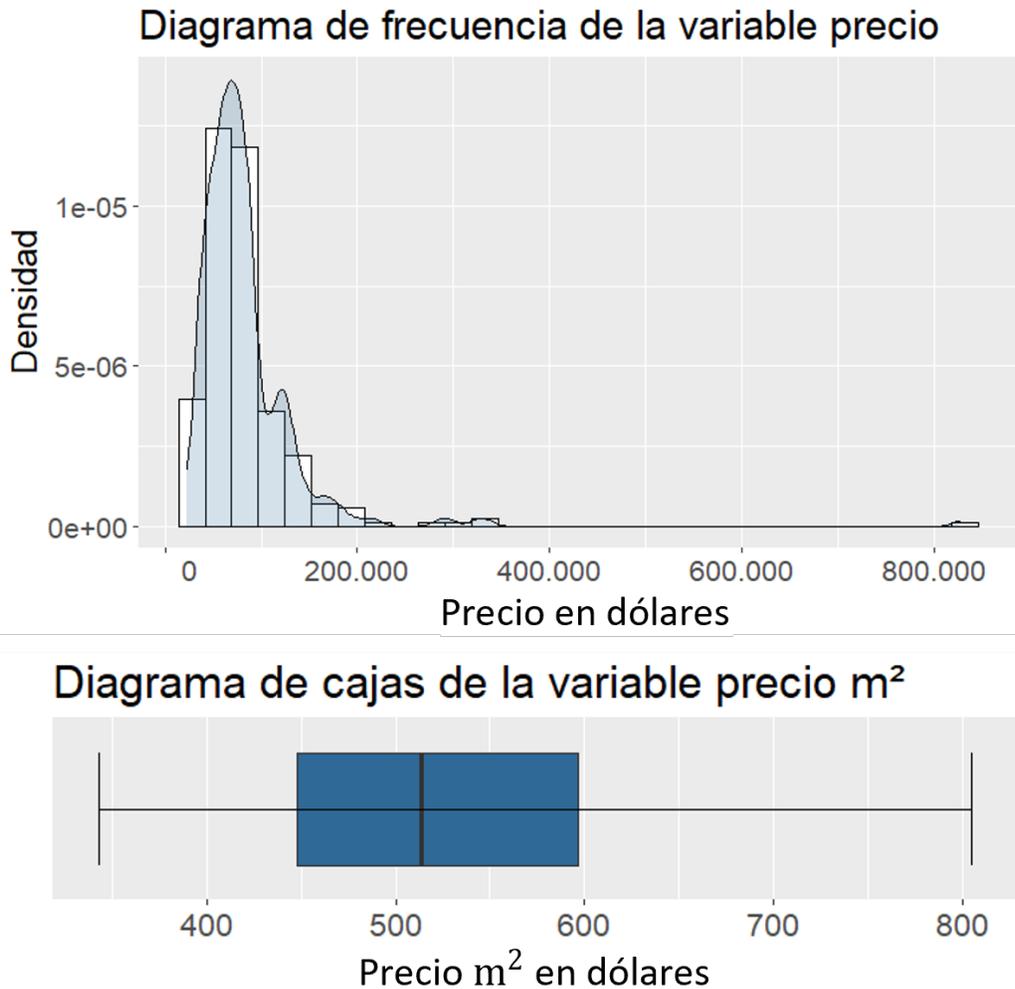


Figura 7: Distribución de precios para casas en venta en Fusagasugá

Posteriormente se realizó la exploración de las variables objetivo versus las variables explicativas, mediante diagramas de cajas como se observa en la figura 8, a partir de las cuales se destaca que:

- Las variables explicativas número de habitaciones, número de baños y número de garajes versus el precio del inmueble al parecer comparten una relación directamente proporcional, por tanto, a medida que aumentan en número, también aumenta el precio de la oferta.

- En cuanto a la antigüedad se refiere, aparentemente esta no influye en el costo del inmueble, aunque es especialmente llamativo el comportamiento de los inmuebles con más de 30 años, el cual está influido por un inmueble con un precio de más de 820.000 dólares.
- De acuerdo con los diagramas de cajas para el precio de los inmuebles y el precio del metro cuadrado normalizados por estrato y sin considerar datos atípicos, se puede suponer que la variable estrato comparte una relación directamente proporcional con el precio de la oferta.

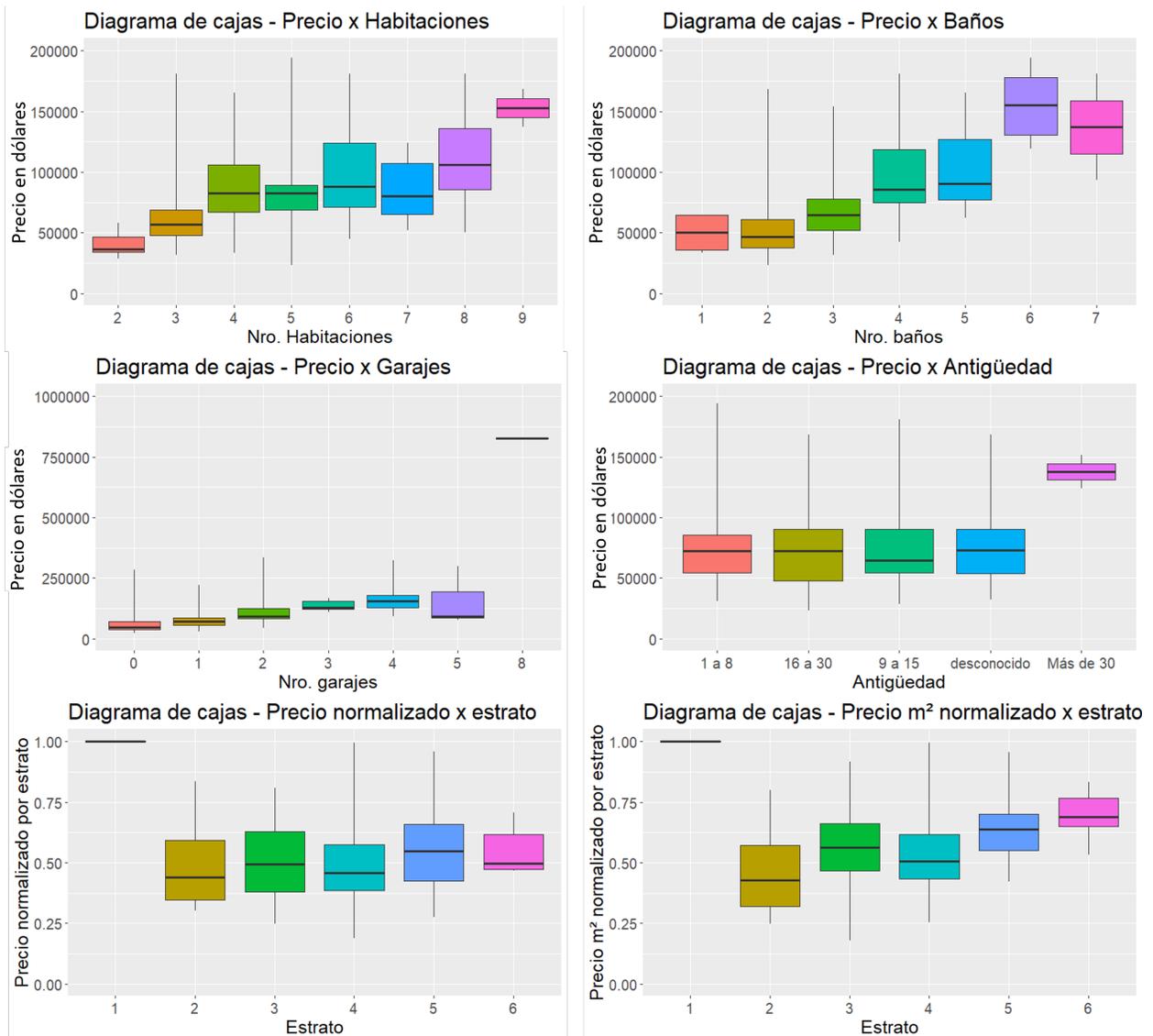
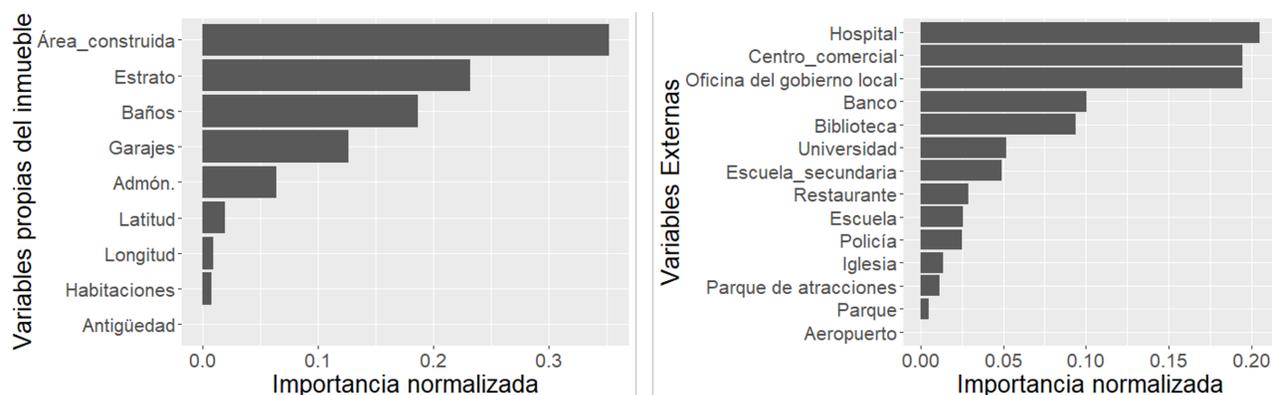
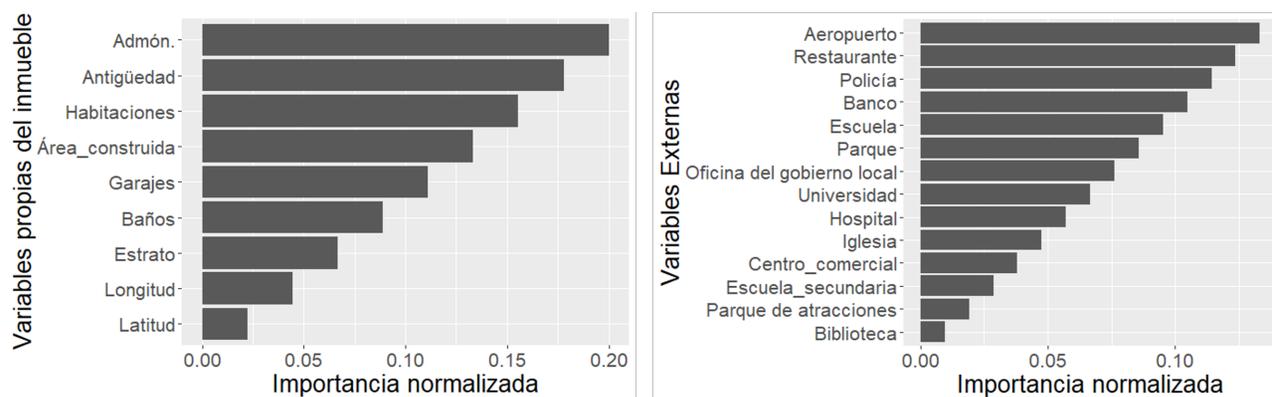


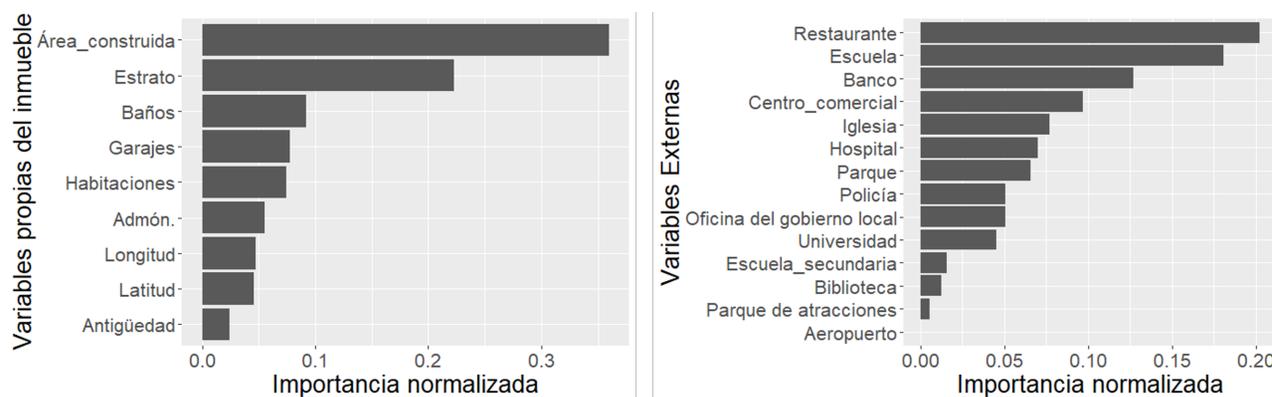
Figura 8: Exploración de variables explicativas vs Variable objetivo de casas en venta de Fusagasugá



(a) Método de selección univariada de características



(b) Método de eliminación recursiva de características



(c) Método de selección de características basado en árboles de decisión

Figura 9: Importancia estadística de las características propias del inmueble y las variables externas en el valor de la oferta de casas en venta en Manizales

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Pre-modelado

Con el fin de observar la contribución de cada variable explicativa, tanto interna como externa, con respecto al valor del inmueble, las figuras 9.a y 9.c evidencian que, para la venta de casas en Manizales, los métodos de selección univariada y basada en árboles de decisión coinciden en

que las variables área construida, estrato y número de baños, propias del inmueble, son las que mayor contribución generan al valor del mismo, en contraposición a la variable antigüedad que es la que menos contribución tiene. Los dos métodos anteriores se diferencian de la selección por eliminación recursiva de características (figura 9.b), en que este determinó que las variables administración, antigüedad y número de habitaciones son las que más influencia explicativa muestran.

En cuanto a las variables externas del inmueble no hay un consenso pleno; las técnicas de eliminación recursiva y selección basada en árboles de decisión son las únicas que coinciden en que la variable externa restaurante es una de las que mayor poder explicativo tiene, en contraste con la selección univariada que plantea que las tres variables externas que más contribuyen al modelo son hospital, centro comercial y oficina de gobierno local.

3.2.3. Modelado

Los resultados sobre la métrica definida obtenida por los modelos, luego del entrenamiento y ajuste de hiperparámetros, se muestran en la gráfica de barras de la figura 10.

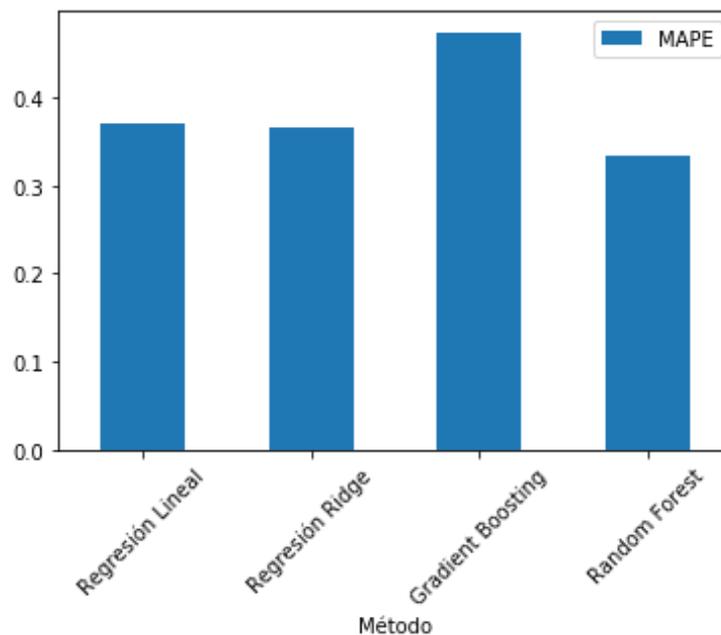


Figura 10: Comparación de modelos de predicción

Como se observa el mejor modelo fue el de Random Forest, seguido muy de cerca por el modelo de Regresión Ridge.

4. Principales contribuciones

Este proyecto tuvo como objetivo general establecer la metodología para la obtención, la depuración, el almacenamiento y el análisis de datos provenientes de plataformas web inmobiliarias, como fuente de información para Observatorios Inmobiliario Catastrales. Este propósito es consecuente con las necesidades que tienen los gestores catastrales de conocer la dinámica inmobiliaria

de un territorio, en el marco de Catastro Multipropósito. Por tanto, los resultados obtenidos contribuyen específicamente con los siguientes aspectos:

- Exploración de la viabilidad técnica para hacer operativa la adquisición, la limpieza y el análisis de datos de ofertas inmobiliarias, disponibles en la web, que sean fuente de información para los observatorios inmobiliarios catastrales, haciendo uso de Web Scraping.
- Adquisición de conocimiento sobre la dinámica inmobiliaria, mediante la automatización del proceso para colecta e integración de datos inmobiliarios y fuentes abiertas de variables prediales externas, con incidencia en el valor comercial del inmueble para una región determinada.
- Estimación del precio del inmueble por medio de técnicas de Machine Learning con base en las características propias y la ubicación geográfica. Los modelos se entrenaron con los datos obtenidos del Web Scraping. Cada uno de los anteriores aspectos están asociados a un componente de software que permite automatizar la exploración de los datos obtenidos del Web Scraping así como la generación de modelos predictivos.

Adicionalmente, este tipo de soluciones permiten la programación de procesos de sincronización con las fuentes de información, con lo cual se generan herramientas para la actualización permanente de los Observatorios Inmobiliarios Catastrales. Desde el ámbito metodológico, el IGAC estará incursionado en el uso de nuevas técnicas para la mejora de los procesos catastrales requeridos en el marco de la implementación de la política pública de Catastro Multipropósito.

5. Conclusiones

El estudio realizado perfiló una ruta para la gestión y el análisis automático de la información inmobiliaria y de su entorno, teniendo como fuentes diferentes sitios web, que complementan las fuentes oficiales al brindar disponibilidad de datos donde se carezca de estos; lo anterior gracias a un proceso metodológico que permitió identificar las características propias y las variables externas que afectan el precio de los inmuebles en el mercado. Por tanto, los modelos de Machine Learning derivados del análisis de variables permiten estimar el precio de otros inmuebles de características similares. Lo anterior se convierte en un punto de partida para el proceso de valuación masiva basada en información real del mercado.

La implementación de la técnica de Web Scraping para la recolección automática de los datos de ofertas inmobiliarias se convierte en una herramienta que facilita el acceso a la información para diferentes interesados, entre ellos los gestores catastrales y la ciudadanía en general. Este tipo de soluciones tecnológicas brinda, por tanto, transparencia al permitir oportunidad, actualidad y mayor nivel de detalle en la caracterización de los mercados inmobiliarios en las diferentes zonas del país. Igualmente, ofrece una fuente de datos completa para los observatorios inmobiliarios, mediante la cual se puede examinar el mercado de viviendas en venta y en arriendo. Adicionalmente, el conjunto de datos recolectados es de provecho para la planificación territorial e investigaciones que busquen entender la dinámica inmobiliaria incorporando el componente espacial.

Es importante aclarar que para tener una buena aproximación de las predicciones es necesario contar con datos suficientes que alimenten los modelos de Machine Learning, logrando capturar correctamente los patrones estadísticos inherentes.

Agradecimientos

Se agradece al equipo técnico del Observatorio Inmobiliario y Catastral del Instituto Geográfico Agustín Codazzi por sus aportes en la identificación de variables inherentes a los predios, así como a los proveedores alternativos de información inmobiliaria.

Referencias

- [1] L. Ulbricht, “Scraping the demos. digitalization, web scraping and the democratic project,” *Democratization*, vol. 27, pp. 426–442, 4 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/13510347.2020.1714595> 2
- [2] E. Uzun, “A novel web scraping approach using the additional information obtained from web pages,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 61 726–61 740, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984503> 2
- [3] J.-C. Bricongne, B. Meunier, and P. Sylvain, “Web scraping housing prices in real-time: the covid-19 crisis in the uk,” *SSRN Electr. Jour.*, 8 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2139/SSRN.3916196> 2
- [4] J. Hillen, “Web scraping for food price research,” *Br Food J*, vol. 121, pp. 3350–3361, 11 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/BFJ-02-2019-0081/FULL/XML> 3
- [5] R. Morshedi, B. Chu, and E. Huang, “Web scraping: Applications in infrastructure planning,” *New South Wales*, 2019. 3
- [6] L. C. Dewi, Meiliana, and A. Chandra, “Social media web scraping using social media developers api and regex,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 157, pp. 444–449, 1 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2019.08.237> 3
- [7] V. Krotov, L. Johnson, and L. Silva, “Tutorial: Legality and ethics of web scraping,” *Faculty & Staff Research and Creative Activity*, vol. 47, pp. 539–563, 12 2020. [Online]. Available: <https://digitalcommons.murraystate.edu/faculty/86> 3
- [8] DNP, “Conpes 3958,” p. 79, 2019. [Online]. Available: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/3919.pdf> 3
- [9] A. Eguino, Huáscar; Erba, Diego; Da Silva, Everton; De Oliveira, Augusto; Piumetto, Mario; Iturre, Teresa; Rodríguez Ramírez, *Catastro, valoración inmobiliaria y tributación municipal: Experiencias para mejorar su articulación y efectividad*. Inter-American Development Bank, jun 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18235/0002437> 3
- [10] A. V. Saurkar, K. G. Pathare, and S. A. Gode, “An overview on web scraping techniques and tools,” *Int. j. comput. sci. commun. eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 363–367, 2018. 3
- [11] Alcaldía de Manizales, “Información General – Alcaldía de Manizales,” 2020. [Online]. Available: <https://manizales.gov.co/informacion-general/> 4
- [12] Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, “¿Cuántos somos?” 2020. [Online]. Available: <https://sitios.dane.gov.co/cnpv/{#}!/> 4, 5
- [13] Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, “Datos Abiertos Catastro — GEOPORTAL,” 2020. [Online]. Available: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-catastro> 4, 5
- [14] Alcaldía de Villavicencio, “Presentación,” 2020. [Online]. Available: <http://www.villavicencio.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Presentacion.aspx> 4
- [15] Alcaldía de Fusagasugá, “Presentación,” 2020. [Online]. Available: <http://www.fusagasuga-cundinamarca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Presentacion.aspx> 5
- [16] S. Shafiee, Y. Wautelet, L. Hvam, E. Sandrin, and C. Forza, “Scrum versus Rational Unified Process in facing the main challenges of product configuration systems development,” *J. Syst. Softw.*, vol. 170, p. 110732, dec 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110732> 5

- [17] S. Huber, H. Wiemer, D. Schneider, and S. Ihlenfeldt, “DMME: Data mining methodology for engineering applications - A holistic extension to the CRISP-DM model,” in *Procedia CIRP*, vol. 79. Elsevier B.V., jan 2019, pp. 403–408. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.106> 5
- [18] E. L. Nylen and P. Wallisch, “Web Scraping,” in *Neural Data Science*. Elsevier, jan 2017, pp. 277–288. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804043-0.00010-6> 6
- [19] D. Glez-Peña, A. Lourenço, H. López-Fernández, M. Reboiro-Jato, and F. Fdez-Riverola, “Web scraping technologies in an API world,” *Brief. Bioinformatics*, vol. 15, no. 5, pp. 788–797, may 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/bib/bbt026> 6
- [20] A. Baldominos, I. Blanco, A. J. Moreno, R. Iturrarte, Ó. Bernárdez, and C. Afonso, “Identifying real estate opportunities using machine learning,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 11, p. 2321, nov 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app8112321> 6
- [21] R. Wirth and J. Hipp, “Crisp-dm: Towards a standard process model for data mining,” in *Proceedings of the 4th international conference on the practical applications of knowledge discovery and data mining*, vol. 1. Springer-Verlag London, UK, 2000. 7

Andrés Enrique Rosso Mateús

Ingeniero de Sistemas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y Doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Pontificia Universidad Javeriana; Doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: andres.rosso@igac.gov.co

Yeimy Maryuri Montilla Montilla

Ingeniera de Sistemas de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Especialista en Análisis Espacial de la Universidad Nacional de Colombia, estudiante de Maestría en Geomática de la Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: yeimy.montilla@igac.gov.co

Sonia Constanza Garzón Martínez

Ingeniera Catastral y Geodesta, Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: sonia.garzon@igac.gov.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

- 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>