

# INVESTIGACIÓN

## TECNOLÓGICA IST CENTRAL TÉCNICO

Volumen 7 · Número 1 · Junio 2025 · Publicación semestral



# INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

REVISTA DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN

## INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO CENTRAL TÉCNICO

COMISIÓN DE INVESTIGACIÓN

ISSN 2600-5565

Volumen 7

Número 1

Junio 2025

Publicación Semestral

### Dirección:

ISTCT, Av. Isaac Albéniz E4-15 y El Morlán, Sector el Inca,  
Quito - Ecuador

### Contactos:

www.istct.edu.ec

www.investigacionistct.ec

email: investigacion@istct.edu.ec

Tel.: 099 924 1151

### Equipo editorial

#### DIRECCIÓN EDITORIAL

Mgs. Rodrigo Veintimilla, Rector

Instituto Superior Universitario Central Técnico, Ecuador.

#### DIRECCIÓN DEL COMITÉ CIENTÍFICO

PhD (c) Katalina Sarmiento Sarmiento - Instituto Superior  
Universitario Central Técnico, Ecuador.

#### EDITOR EN JEFE (Responsable científico)

PhD (c) Elva Gioconda Lara Guijarro - Instituto Superior  
Universitario Central Técnico, Ecuador.

#### EDITORES ASOCIADOS

Msc. Edgar Valdemar Guaman Tenezaca - Escuela Politécnica  
Nacional, Ecuador

Msc. Luis Sandino Torres Gallegos - Escuela Politécnica  
Nacional, Ecuador

Msc. Bryan Daniel Vélez Salazar - Instituto Superior  
Universitario Cotopaxi, Ecuador

Msc. Miguel Roberth Argoti Arcos - Escuela Politécnica  
Nacional, Ecuador

Msc. Daniel Isaías Barzallo Núñez - Investigador  
Independiente, Ecuador

Msc. Dario Javier Borja Soto - Instituto Superior Universitario  
Central Técnico, Ecuador

Msc. Alex Stalin Núñez Moscoso - Instituto Superior  
Universitario Central Técnico, Ecuador

#### COMITÉ CIENTÍFICO

PhD Gabriel Eduardo Sandoval Romero - Universidad  
Nacional Autónoma de México-México

PhD Doris Hernández Dukova - Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas-Colombia

PhD Arturo Ramos Bueno - Instituto de Investigación Dr. José  
María Luis Mora - México

PhD Johanna Rosalia Reyes Reinoso - Universidad Católica  
de Cuenca - Ecuador

PhD Robert Bernardo Guamán Rivera - Universidad de  
O'Higgins - Chile

PhD Raisa Emilia Bernal Cerza - Instituto Superior Universitario  
Rumiñahui - Ecuador

Dra. María Julieta Duedra - Universidad Nacional de La Plata  
- Argentina

Msc. Omar Fernando Sánchez Olmedo - Instituto Superior  
Universitario Central Técnico - Ecuador

Msc. Abrahan Mesías Jorque Rea - Instituto Superior  
Universitario Central Técnico - Ecuador

Msc. Katuska Espinoza Pérez - Instituto Superior Tecnológico  
San Antonio ITSA - Ecuador

Msc. Juan José Cabrera Balarezo - Universidad de Cuenca -  
Ecuador

Msc. Marco Vinicio Pilco Núñez - Instituto Tecnológico  
Superior Universitario Oriente

Mgs. María José Rivera Gutierrez - Instituto Superior  
Universitario Rumiñahui - Ecuador

Msc. Alex Stalin Núñez Moscoso - Instituto Superior  
Universitario Central Técnico - Ecuador

#### EDITORES TÉCNICOS

Msc. José Andrés Beltrán Ruiz - Coordinador Editorial -  
Instituto Superior Universitario Central Técnico - Ecuador

Msc. Lenin Daniel Valdivieso Simba - Revisor Experto -  
Instituto Superior Universitario Central Técnico - Ecuador

Msc. Edgar Valdemar Guamán Tenesaca - Revisor Experto -  
Instituto Superior Universitario Central Técnico - Ecuador

Msc. Wilson Sebastián Lozada Calle - Revisor Experto -  
Instituto Superior Universitario Central Técnico - Ecuador

Msc. Grace Elizabeth Manobanda Jimenez - Revisor Experto -  
Tecnológico Internacional Universitario ITI, Ecuador

Msc. David Trajano Basantes Montero - Revisor Experto -  
Investigador independiente, Ecuador

#### EDITORES DE PRODUCCIÓN

Ing. Juan Carlos Fuertes Potosi - Diseñador - Instituto Superior  
Universitario Central Técnico

Msc. Hilda Jacqueline Montesdeoca Orozco - Diagramadora -  
Instituto Superior Universitario Central Técnico

Mgs. Joyce Narvaez Sarango - Traductora al idioma inglés -  
Instituto Superior Universitario Central Técnico

Aprobada mediante Resolución ROCS-SO-012-No.014--2020, en la Décimo Segunda Sesión Ordinaria del Órgano  
Colegiado Superior, a los ocho (08) días del mes de diciembre de 2020.

# INVESTIGACIÓN

## TECNOLÓGICA IST CENTRAL TÉCNICO

---

La aventura de descubrir



Junio 2025



# Nota Editorial

---

En esta edición de nuestra revista de divulgación científica, nos complace presentar una ecléctica selección de artículos que destacan los avances y desafíos en diversas disciplinas, desde la mecánica industrial hasta la electrónica, la electricidad, la mecánica automotriz y el estudio de materiales. Los expertos y profesionales de estos campos (estudiantes y docentes) comparten sus conocimientos y descubrimientos más recientes, proporcionando una visión profunda de las tendencias emergentes y las tecnologías revolucionarias que están dando forma al futuro de la ingeniería y la tecnología. Con un enfoque en la interconexión entre estas áreas, nuestra revista busca fomentar la colaboración y el intercambio de ideas, impulsando así la innovación y la excelencia en el amplio espectro de las ciencias técnicas y así mismo en los sectores sociales, ambientales, económicos e industriales.

Desde soluciones ingeniosas en la optimización de procesos hasta desarrollos vanguardistas en la electrónica aplicada, esta edición refleja el dinamismo de las carreras técnicas y destaca la importancia de la investigación y la creatividad en la resolución de problemas del mundo real. Nos enorgullece proporcionar un espacio donde la comunidad científica y técnica puede compartir su experiencia y contribuir al progreso continuo de estas disciplinas cruciales.

Además, queremos expresar un especial reconocimiento a quienes conforman el órgano editorial de la revista de divulgación científica, a los integrantes de la coordinación de I+D+i y a las autoridades del Instituto Superior Tecnológico Central Técnico con mención de universitario, rector Rodrigo Veintimilla, Mgs., vicerrectora Katalina Sarmiento, Mgs., por su compromiso en la publicación del quinto número de la revista de divulgación científica "Investigación Tecnológica IST Central Técnico".

**PhD (c) Elva Lara G**

Editor General

Revista Investigación Tecnológica ISTCT

# INVESTIGACIÓN

## TECNOLÓGICA IST CENTRAL TÉCNICO

## ÍNDICE

---

Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.	7
Estudio y Análisis de Niveles de Vibración Generados por la Transmisión de Cadenas con Diferentes Parámetros en el Módulo de Mantenimiento.	24
Análisis de las características técnicas para el diseño del sistema de dirección del Go Kart eléctrico.	39
Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.	57
Redes definidas por Software (SDN) en infraestructuras críticas.	69
Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.	82
Drones: Oportunidades y desafíos en usos civiles.	98
Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.	112
Análisis comparativo de las deformaciones de un puente celosía mediante el kit mola y sap 2000.	126
Propuesta de soluciones técnicas para la repotenciación de la cámara binder kbf 240.	140
Análisis de viabilidad técnica para la implementación de túneles solares: caso supermercado Santa María en Sangolquí.	156

## Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms

Darío Fernando Yépez-Ponce<sup>1</sup> [0000-0002-2311-9368], Erika Daniela Freire-Cuestas<sup>2</sup> [0009-0008-3184-7059],  
Tamia Selena Muñoz-Tuttilo<sup>3</sup> [0009-0004-9545-858X]

<sup>1</sup> GIEA, Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [dyepez@istct.edu.ec](mailto:dyepez@istct.edu.ec)

<sup>2</sup> Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador  
E-mail: [edfreirec@utn.edu.ec](mailto:edfreirec@utn.edu.ec)

<sup>3</sup> Instituto Superior Tecnológico Nikola Tesla, Cayambe, Ecuador  
E-mail: [tamismunioz19@gmail.com](mailto:tamismunioz19@gmail.com)

Recibido: 14/04/2025  
Aceptado: 14/06/2025  
Publicado: 30/06/2025

### ABSTRACT

Four-bar mechanisms are key components of mechanical engineering used in various industrial and technical applications. These mechanical systems, also known as quadracycles, are made up of four linkages that are connected in a closed form. Four-bar mechanisms provide a broad range of motion and adaptability in designing machines and devices by varying the lengths and angles of these connections. The generated toolbox may be utilized to assist in developing four-bar mechanisms in educational and research settings. The toolbox includes a simple and intuitive interface that allows users to learn about the mechanism's trajectories, dimensions, locations, velocities, and accelerations. The toolbox can analyze three mechanisms: double rocker, crank, and crank-rocker. The interface produces both numerical and graphical outputs. In addition, a prototype has been added to the toolbox that interacts serially with Matlab, allowing the software's computations to be compared to real-world values of the mechanism. Finally, if the user makes an error in selecting the mechanism or data entry, the toolbox provides assistance and ideas to correct the issue.

**Index terms:** Toolbox for four-bar mechanisms; GUI for four-bar mechanisms; mechanism design; M4B; Matlab Toolbox.

### 1. INTRODUCTION.

Application engineering is critical in the development of any technology. Most moving machinery uses four-bar linkage arrangements. Four-bar links are widely used in machine design, industry, research, and everyday applications (Mishra, 2021). Their straightforward mechanical nature makes them ideal for path creation. For example, any change in the length of the bars or the driving angle will significantly impact the final output's location, speed, and direction. These

mechanisms can attain faster velocities, create more significant force rates utilizing a single degree of freedom, and follow predetermined trajectories more accurately than open-kinematic chain manipulators.

Furthermore, the four-bar linkage mechanism is used in a wide range of industrial applications, including rigid-body guiding, reciprocating compressors, rotary engines, scotch yokes, rope climbing robots, and robot end-effect grippers (Gao et al., 2021; Hussain et al., 2021; Kulkarni et al., 2025; Libu George & Bharanidaran, 2022; Shao et al., 2024). Such systems are undoubtedly used to create various motion patterns other than actuator motion (Hernández et al., 2021; Peón-Escalante et al., 2023). These mechanisms are used in biomedical engineering to provide high-precision motion (for example, microsurgery applications) (Fortunić et al., 2023; Li et al., 2022; Zarrabi Ekbatani et al., 2024). Many design issues might arise due to such systems; for example, the precision of a robot arm's end-point location is significantly reduced because of the cumulative inaccuracy from each revolute joint of the robot. Furthermore, low mechanical stiffness will reduce the accuracy of motion tracking (Cervantes-Culebro et al., 2021).

The four-bar mechanism's mathematical model is widely recognized. Nonetheless, the angular velocity of the driving bar (i.e., the crank) is supposed to be constant. However, this is nearly impossible in practice due to the rotating unbalanced system's variable inertia. As a result of the continuous variations in inertia throughout the rotation of the stiff links comprising the mechanism, the angular speed of the crank in the four-bar mechanism exhibits a regularly changing behavior (Sardashti et al., 2022). This fluctuating behavior results in highly nonlinear, time-variant, and complex dynamics of the four-bar system, making real-world control of such dynamics a difficult task (Flota-Bañuelos et al., 2021).

Due to their highly non-linear dynamics, it is hard to design suitable control strategies that appropriately govern their behavior (Nguyen-Van et al., 2022). In practice, these linked mechanisms are commonly employed to execute function, trajectory, and motion creation tasks, often considering the position's kinematic state. This technique has been used in several real-world applications (Kang et al., 2022; Matekar Sanjay B. and Fulambarkar, 2021). Other ways for modeling four-bar mechanisms have been presented, such as (Ramesh & Plecnik, 2024), in which a parallelogram closed-loop mechanism was put into an open-loop robot structure to simplify the overall system's dynamics model. By using a basic control algorithm, high motion tracking performance was achieved.

It is vital to note that the requisite speed and acceleration are only fulfilled at the specified design points and not during the whole operating cycle of the drive connection. Higher-order kinematic synthesis considers velocities and/or accelerations in the design issue and calculates the mechanism's design parameters that fulfill the intended job's criteria. Furthermore, in the process of dimensional synthesis, the features of the output movement of the mechanisms are often developed with a constant input speed in mind (Baskar Aravind and Plecnik, 2021; Ramesh & Plecnik, n.d.; Wang et al., 2022). However, suppose the output speed requirements change while the mechanism operates. In that case, the mechanism's dimensions must be rebuilt given

Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

that the features of a mechanism's output movement are dependent on its input movement. (Hur et al., 2024; José A. Montoya R. Peón-Escalante & Peñuñuri, 2024; Shi et al., 2025), suggested an alternative way to achieve this goal without affecting the dimensions of the current mechanism, which is by introducing an auxiliary mechanism.

(Baskar et al., 2023; Nguyen Vu Linhand Kuo, 2022; Wu et al., 2021; Zhang et al., 2021) Developed the constraint equations of four-bar connections for motion generation, function generation, and path generation. Freudenstein was the father of modern kinematics, and his contributions made kinematic synthesis of mechanisms possible through digital computation. Grashof's law is also an example of how the law has been successfully used to improve manufacturing processes (Ekambaram, 2021). A dynamic modeling and controller design for a flexible four-bar system were investigated by (Qiu et al., 2023). The design process can satisfy the movement characteristics specified for a trajectory that corresponds to a complete cycle of the input link when an individual motor and mechanism are treated as a single system that is properly controlled (Basaran, 2025; Nie et al., 2024).

The analysis, design, optimization, and simulation of mechanism systems have all benefited from dynamic modeling. Scholars worldwide have studied the dynamic response, performance evaluation, and optimization of mechanical systems using dynamic models. In this work, a toolbox for Matlab is presented in which the calculations for obtaining trajectories, link measurements, and fracture point previews are synthesized through simulation and graphical representation. A prototype was created and linked to the toolbox to verify the simulated results. For the analytical development, the Euclidean distance was used to define simple rotation functions and represent the trajectories. It is important to note that the Euclidean distance, which measures the straight-line distance between two points in a multidimensional space, differs from the Manhattan distance, which calculates the sum of the absolute differences of their coordinates along each dimension. While the Euclidean distance is more suitable for representing direct paths, the Manhattan distance is often used in grid-based systems or scenarios where movement is restricted to orthogonal directions (Torres-Moreno et al., 2022). Finally, the graphical interface of the toolbox developed for four-bar mechanisms allows the user to choose between the different types of mechanisms and analysis to be performed according to his preference.

The following parts of this paper are organized as follows: Section 2 details the mathematical modeling employed in the toolbox for four-bar mechanisms. Section 3 presents the main results of the study and discusses their significance. Finally, the conclusions of the study are presented in Section 4.

## 2. METHODOLOGY

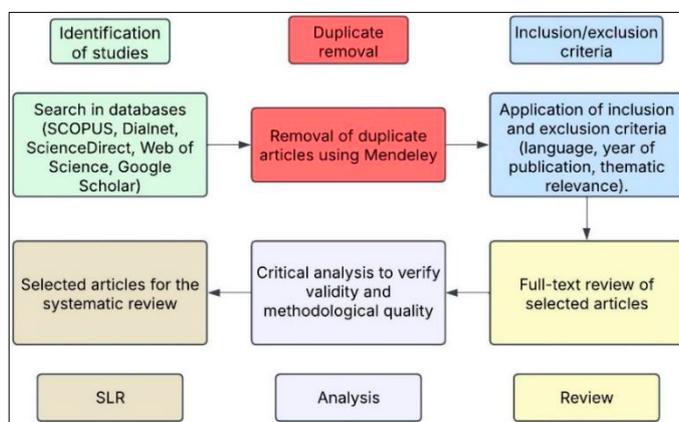
Using the PRISMA technique presented in Figure 1, which comprises a set of items for selecting and analyzing the articles to be studied, the research started with a systematic review. The following standards for inclusion and exclusion were applied: Scientific publications published

Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

during the previous five years were considered. Additionally, articles published in both English and Spanish were taken into consideration. Lastly, studies examining the mechanics of four bars in any research were considered. The terms "Four-bar mechanisms," "Applications for four-bar mechanisms," and "App for four-bar mechanisms" were used in the systematic search that was conducted using the databases of SCOPUS, Dialnet, ScienceDirect, Web of Science, and Google Scholar. The Boolean AND method was applied, restricting the search to the title, abstract, and keywords to enhance the search bias. From the chosen publications, a database was assembled, accounting for the author, year, title, keywords, connection to the research, and outcomes; duplicate papers were removed by exporting this database to the Mendeley program. Ultimately, a thorough critical examination of the papers was conducted to verify the validity and methodological caliber of the chosen research.

**Figure 1**

*PRISMA methodology flow diagram.*



*Nota. Diagram developed by the authors.*

## 2.1. Spiral development model

To create the four-bar mechanism toolbox, the spiral evolutionary development model was employed to ensure that the toolbox reaches the necessary maturity through a sequence of evolutionary deliveries enabled by each repetition cycle (Delgado Olivera & Díaz Alonso, 2021). The spiral model schematic that was employed is shown in Figure 2. This method has been successfully employed in several works, such as those carried out by (Simisterra-Quiñonez et al., 2021; Yépez Ponce et al., 2023).

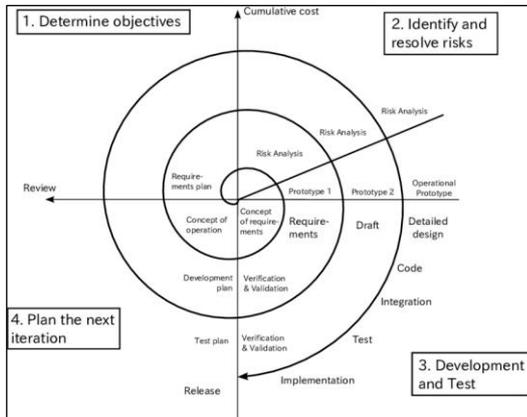
## 2.2. Dynamics of the four-bar mechanism

Figure 3 shows a schematic of the four-bar linkage mechanism presented in this article. A servomotor powers the mechanism's initial link (a). The motion will be restricted to rotations between 0 and 180 degrees when using a servomotor.

**Figure 2**

Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

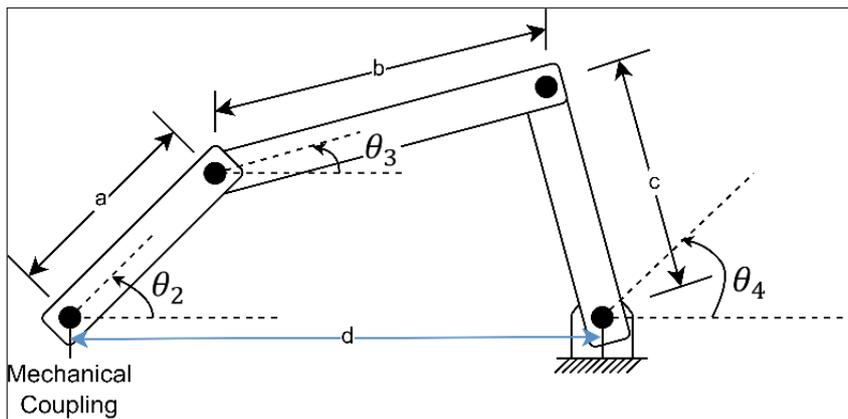
*Evolutionary development model (spiral).*



*Nota.* The graph represents the Spiral development cycle model that was employed and was taken from Saillard (2015), p. 21.

**Figure 3**

*Schematic of the four-bar mechanism.*



*Nota.* In the graph, the dimensions of the links are represented by lowercase letters, and the rotations by theta angles.

Equations 1 and 2 form the system of nonlinear equations that allow us to determine the direction that each of the bars will have with respect to the x-axis and y-axis at all times respectively.

$$f_1 = a \cdot \cos \theta_2 + b \cdot \cos \theta_3 - c \cdot \cos \theta_4 - d \cdot \cos \theta_1 \tag{1}$$

$$f_2 = a \cdot \sin \theta_2 + b \cdot \sin \theta_3 - c \cdot \sin \theta_4 - d \cdot \sin \theta_1 \tag{2}$$

In 3, is presented the equations 1 and 2 in matrix form, this is used to determine the fracture zones of the mechanism.

$$B = \begin{bmatrix} a \cdot \cos \theta_2 + b \cdot \cos \theta_3 - c \cdot \cos \theta_4 - d \cdot \cos \theta_1 \\ a \cdot \sin \theta_2 + b \cdot \sin \theta_3 - c \cdot \sin \theta_4 - d \cdot \sin \theta_1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

### 2.3. Freudenstein equations

It is an analytical method for calculating a four-bar mechanism's displacement or position, velocities, and accelerations. It is one of the most widely used methods by engineers because it can be programmed with a computer (Felipe, 2024). The Freudenstein equations, shown in equations 4 and 5, are fundamental to this approach and provide a systematic way to analyze the kinematics of four-bar mechanisms. These equations are specifically applied to the mechanism illustrated in Figure 3, demonstrating their practical utility in real-world engineering problems.

$$\frac{d}{a} \cdot \cos \theta_4 - \frac{d}{c} \cdot \cos \theta_2 + \frac{a^2 - b^2 + c^2 + d^2}{2 \cdot a \cdot c} = \cos \theta_2 - \theta_4 \quad (4)$$

$$\frac{d}{b} \cdot \cos \theta_2 + \frac{d}{a} \cdot \cos \theta_3 + \frac{c^2 - a^2 - b^2 - d^2}{2 \cdot a \cdot b} = \cos \theta_2 - \theta_3 \quad (5)$$

### 2.4. Jacobian Matrix

The Jacobian matrix is a technique for linearizing a system of nonlinear equations at a given point so that the properties of the linear system can be applied to solve and analyze these systems conveniently (Ramos Corredor et al., 2022). The Jacobian matrix allows for analyzing the performance, configuration design, planning, and control of parallel mechanisms (Cervantes-Figueroa, 2022). In this work, the Jacobian matrix is used to relate the positions, velocities, and accelerations of the different parts of the four-bar mechanism as a function of the input data. These results will be presented using tables and graphs within the interface. It also allows the mechanism to be sized and the lengths of the bars or links to be extended.

The Jacobian matrix (see equation 6) is formed by the partial derivatives of equations 1 and 2 as a function of the dependent variables  $(\theta_3, \theta_4)$ .

$$J = \begin{bmatrix} -b \cdot \sin \theta_3 & c \cdot \sin \theta_4 \\ b \cdot \cos \theta_3 & -c \cdot \cos \theta_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.5. Grashof's Law

In the field of mechanism kinematics, Grashof's law establishes fundamental criteria for analyzing the behavior of four-bar mechanisms. Therefore, (Quintero Rianza & Mejía Calderón, 2021), this law enables the determination of the type of motion a mechanism can execute, classifying it according to the relative lengths of its links. By considering these lengths, various movements can be predicted, such as:

- If the shorter bar is fixed as the other bars finish spins, double-turn, or crank.
- Back and forth, if the fixed bar and the short bar are next to each other.
- Double rocker, if the fixed bar is on the other side of the shorter bar.

In the toolbox interface, these three cases can be simulated.

Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

### 3. RESULTS

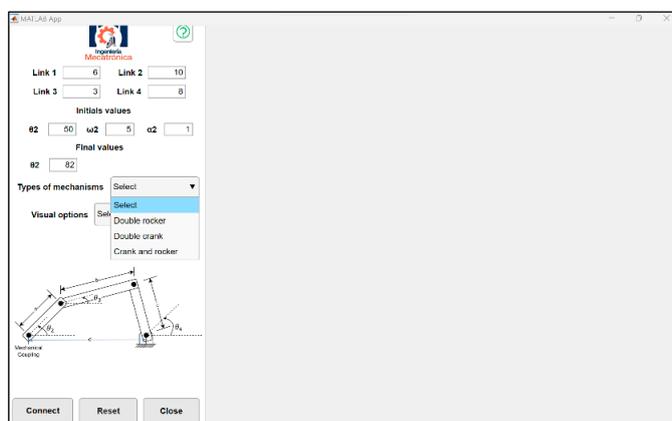
The Matlab toolbox developed for four-bar mechanisms allows users to quickly and intuitively obtain motion parameters based on the selected mechanism type. The toolbox, along with the mechanism design in SolidWorks, is available in a shared repository (<https://www.dropbox.com/scl/fo/zqQ0qfic6o1uq2ywf543/AJBNb1oTjVaRIBu52UcliYk?rlkey=6bqqt8c2ofax2pcblhd73badu&st=kjzpg858&dl=0>) that includes all necessary files for simulation and design. The toolbox code is fully customizable, enabling users to adapt it to their specific requirements. By running the M4B command in Matlab, a window opens with default values, facilitating the design and simulation of four-bar mechanisms. This combination of simplicity and flexibility makes the toolbox a powerful tool for engineering analysis and education.

#### 3.1. Toolbox Functionality

The toolbox allows users to select among three mechanism types: double rocker, double crank, and crank-rocker (see Figure 4). Once the mechanism type is selected, users can initiate the simulation to visualize the trajectory of moving parts (see Figure 5). Additionally, the toolbox generates a table with the values of involved variables, such as positions, velocities, and accelerations, facilitating controller optimization and mechanism dimensioning (see Figure 6). These features enable users to analyze the mechanism's behavior within specific simulation intervals by adjusting start and end angles for precise results.

**Figure 4**

*Selection of the type of mechanism.*



*Nota.* In the drop-down menu, you can select one of the three mechanisms mentioned in item 2.5.

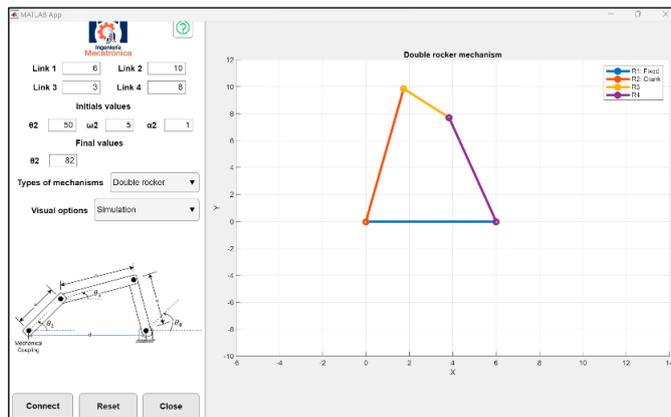
#### 3.2. Error Detection and Guidance

The toolbox generates plots showing the evolution of angular displacement, angular velocity, and angular acceleration as a function of the input angle (see Figure 7). These plots provide a detailed visual analysis of the mechanism's motion, which is crucial for validating designs and optimizing parameters. Furthermore, the toolbox detects errors in input parameters, such as incorrect

angles or dimensions, and notifies the user if the mechanism is "fractured" (see Figure 8). In case of errors, the toolbox offers a help function that suggests corrections and recommends the most suitable mechanism type.

**Figure 5**

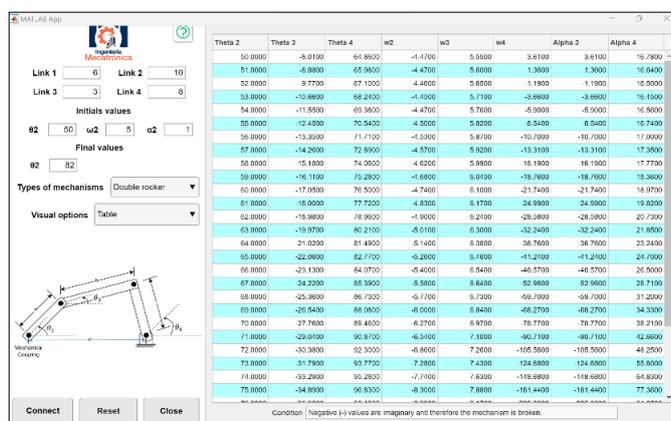
Simulation of the mechanism trajectory.



*Nota.* In the graph, you can see the mechanism generated from the user data entered.

**Figure 6**

Table of variables.



*Nota.* In the graph, you can see how the mechanism's positions, velocities, and accelerations are stored in a table in the simulation interval given by the user.

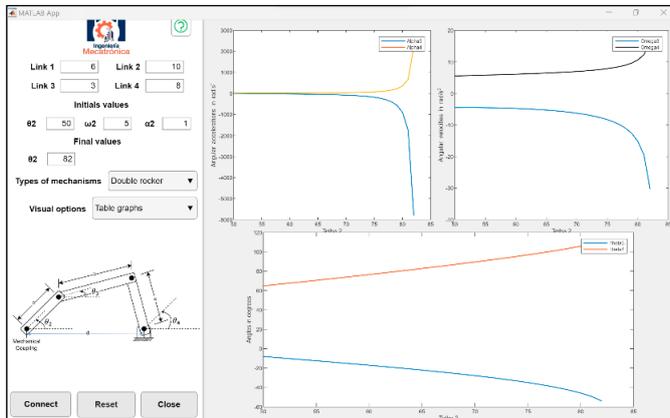
### 3.3. Experimental Validation

To validate the analytical results, a physical prototype of the four-bar mechanism was developed, and its SolidWorks files are available in the repository for 3D printing and assembly. The prototype includes a servomotor to control bar positions and potentiometers at the joints to measure actual positions (see Figure 9). Simulated and measured values are compared in the toolbox interface, allowing users to verify the accuracy of the simulations. This experimental validation confirms that the simulated data aligns with real-world results.

Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

**Figure 7**

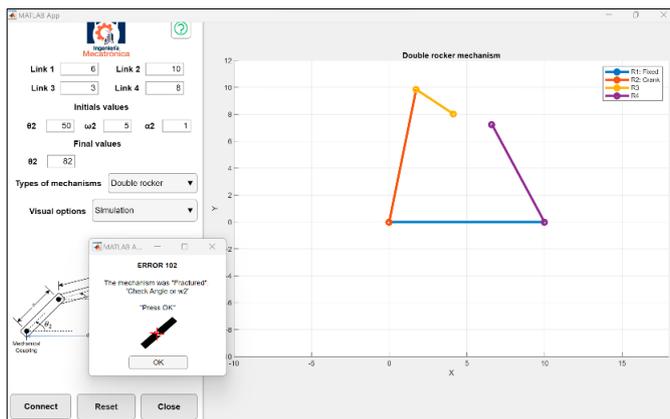
*Mechanism simulation plots.*



*Nota.* The graph shows the evolution of angular displacement, angular velocity, and angular acceleration as a function of the input angle, providing a detailed visual analysis of the mechanism's movement.

**Figure 8**

*Fractures in four-bar mechanisms.*

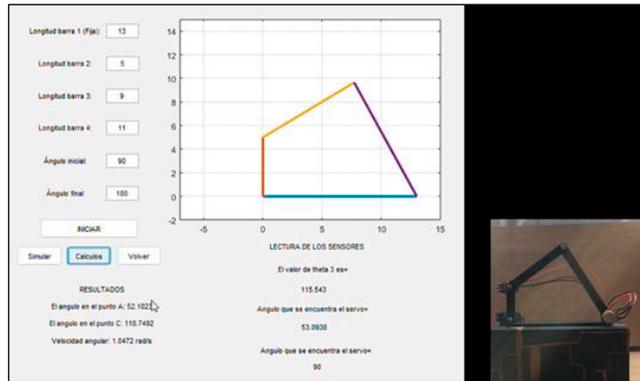


*Nota.* Error message generated by the tool in Matlab indicating that the mechanism is “fractured”. The message suggests checking the input angle ( $\theta_2$ ) to correct the mechanism configuration before continuing the simulation.

In the lower part of Figure 9, both the calculated values and those measured by the sensors in the real system are presented. For ease of interpretation, these data are more clearly detailed in Table 1. In addition, a validation of the values obtained was performed by calculating the root mean square error (RMSE). This indicator allows the accuracy of the model to be evaluated by comparing the calculated values with the measured ones. A low RMSE indicates high precision, while a high value suggests a greater discrepancy between the data.

**Figure 9**

*Digital and real four-bar mechanisms.*



*Nota.* The lower left part of the graph shows the simulated values and the lower middle part shows the values measured by the sensors.

**Table 1**

*Data Obtained: Calculated Values vs. Measured Values.*

Nº of Data	Calculated Values	Measured Values
1	115.500	115.290
2	115.521	115.731
3	115.542	115.332
4	115.563	115.353
5	115.583	115.373
6	115.604	115.814
7	115.625	115.415
8	115.646	115.436
9	115.667	115.457
10	115.688	115.898
11	115.708	115.498
12	115.729	115.519
13	115.750	115.540
14	115.771	115.561
15	115.792	116.002
16	115.813	115.603
17	115.833	116.043
18	115.854	116.064
19	115.875	116.085
20	115.896	115.686
21	115.917	116.127
22	115.938	115.728
23	115.958	116.168

Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

24	115.979	116.189
25	116.000	116.210

*Nota.* The values presented correspond to 25 measurements for the angle  $\theta_3$ .

The RMSE value obtained for these data was  $0.21^\circ$ . This error represents the average deviation between the calculated values and the measured values in the 25 measurements performed. Despite the small difference, it is important to consider this margin of error in the analysis of the results. Maintaining a low RMSE indicates that the measurements are aligned with the expected values, which provides confidence in the accuracy of the system. These data correspond to measurements of the angle  $\theta_3$ , fundamental for the evaluation of the system behavior.

### 3.4. Contributions and Future Perspectives

The developed toolbox simplifies the design and simulation of four-bar mechanisms while providing advanced tools for optimization and error analysis. It generates detailed plots and variable tables, making it a valuable resource for both research and teaching. The toolbox's current capabilities include error detection, comprehensive output data, and real-device connectivity, which enhance its practicality for real-world applications. These features have already demonstrated their utility in fields such as robotics, automotive systems, and industrial automation, where four-bar mechanisms are widely used. The toolbox's adaptability and integration with modern control systems highlight its potential for advancing kinematic analysis and mechanism design.

## 4. DISCUSSION

A paid software for kinematic analysis of four-bar systems is presented by FOURBAR Student Edition, developed by Robert L. Norton; in contrast to the produced version, this application does not display the angles  $\theta_3$  and  $\theta_4$  as output data. Furthermore, the designed interface enables the crank to rotate fully in the simulation, whereas FOURBAR only visualizes half of the crank's movement (Mercado et al., 2015).

(Salcedo, 2020), developed a didactic material based on GeoGebra aimed at the visualization and understanding of the kinematic analysis of a four-bar mechanism, which offers the student the possibility of manipulating the input conditions that configure such mechanism to appreciate then the corresponding effect on the behavior of the dependent variables involved; however, unlike the developed tool, it is not possible to obtain the tables of results, the selection of the type of mechanism to be developed and the application of Grashof's laws.

(González Miranda et al., 2023) developed an APP for Android devices that generates graphs of predetermined four-bar mechanisms. In the graph, the lengths and orientations of the links can be edited by touching the revolute joints with the fingers, and the classification of the mechanism drawn in real time yields the links' value and angles' value. Unlike the developed application, no error alerts are issued, and it cannot be connected to a real device.

Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

(Zapata-Loria et al., 2019) developed a mobile application that uniquely calculates the positions of four-bar plane mechanisms.

Finally, in (López Solbes, 2013), a similar application developed in Matlab is presented with the main difference that in this application, no tables are generated, and it is not connected to a real mechanism.

## 5. CONCLUSIONS

Parameter optimization, such as link lengths, can considerably increase the performance of these mechanisms, allowing for a higher range of motion and precision in various industrial applications. Furthermore, computational simulation is essential in providing a platform for evaluating mechanisms' dynamic and kinematic behavior before manufacture, saving time and resources. Four-bar mechanisms have also been shown to be broadly helpful in robotics, industrial automation, and medical devices, demonstrating their flexibility. However, issues in control and energy efficiency in complex systems continue, providing potential for future study in this sector.

The toolbox developed in the educational field is very beneficial since it helps to understand the behavior of this type of mechanism simply and intuitively. Meanwhile, in the research field, it would save time in designing an application with this type of mechanism because the trajectory would be known beforehand and if there were any restrictions.

Finally, the need to address specific challenges related to the complexity of dynamics, precise control, and integration with electronic systems has been identified.

## 6. REFERENCES

- Basaran, S. (2025). Modified inverted pendulum on a cart system with four-bar mechanism. *ISA Transactions*. <https://doi.org/10.1016/J.ISATRA.2025.02.014>
- Baskar, A., Plecnik, M., & Hauenstein, J. D. (2023). Finding straight line generators through the approximate synthesis of symmetric four-bar coupler curves. *Mechanism and Machine Theory*, 188, 105310. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2023.105310>
- Baskar Aravind and Plecnik, M. (2021). Higher Order Path Synthesis of Four-Bar Mechanisms Using Polynomial Continuation. In B. Lenarčič Jadran and Siciliano (Ed.), *Advances in Robot Kinematics 2020* (pp. 303–310). Springer International Publishing.
- Cervantes-Culebro, H., Chong-Quero, J. E., Padilla-García, E. A., & Cruz-Villar, C. A. (2021). Concurrent Design of a 2 Dof Five-Bar Parallel Robot a Hybrid Design of Rigid and Flexible Links. *IEEE Access*, 9, 17450–17462. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053250>

Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

- Cervantes-Figueroa, A. F. (2022). Aplicación móvil para el análisis cinemático de mecanismos de 4 barras. *Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías*, 8.
- Delgado Olivera, L. de la C., & Díaz Alonso, L. M. (2021). Modelos de Desarrollo de Software. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 15, 37–51.
- Ekambaram, M. (2021). Four-Bar Linkage Mechanism in Papermaking and Its Replacement by Direct Servo Drive Technology in Roll to Sheetting Lines in a Paper Mill---Converting House. *Advances in Industrial Machines and Mechanisms*, 113–122.
- Felipe, C. E. (2024). Desarrollo de una técnica de síntesis óptima dimensional de mecanismos planos con juntas de rotación para generación de movimiento. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/87168>
- Flota-Bañuelos, M., Peón-Escalante, R., Ricalde, L. J., Cruz, B. J., Quintal-Palomo, R., & Medina, J. (2021). Vision-based control for trajectory tracking of four-bar linkage. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(6), 324. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03043-z>
- Fortunić, E. P., Yildirim, M. C., Ossadnik, D., Swikir, A., Abdolshah, S., & Haddadin, S. (2023). Optimally Controlling the Timing of Energy Transfer in Elastic Joints: Experimental Validation of the Bi-Stiffness Actuation Concept. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(12), 8106–8113. <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3325782>
- Gao, Y., Wang, J., Gao, S., & Cheng, Y. (2021). An Integrated Robust Design and Robust Control Strategy Using the Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(12), 8378–8386. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3056417>
- González Miranda, D., Estrada Gutierrez, E., & Roldán Mckinley, J. (2023). Aplicación Android para el estudio de mecanismos planos de cuatro barras.
- Hernández, A., Muñozerro, A., Urizar, M., & Amezua, E. (2021). Comprehensive approach for the dimensional synthesis of a four-bar linkage based on path assessment and reformulating the error function. *Mechanism and Machine Theory*, 156, 104126. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2020.104126>
- Hur, J., Song, H., & Jeong, S. (2024). Continuously Variable Transmission and Stiffness Actuator Based on Actively Variable Four-Bar Linkage for Highly Dynamic Robot Systems. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(8), 7118–7125.
- Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

<https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3418268>

- Hussain, I., Malvezzi, M., Gan, D., Iqbal, Z., Seneviratne, L., Prattichizzo, D., & Renda, F. (2021). Compliant gripper design, prototyping, and modeling using screw theory formulation. *The International Journal of Robotics Research*, 40(1), 55–71. <https://doi.org/10.1177/0278364920947818>
- José A. Montoya R. Peón-Escalante, O. C. C. C. M. A. Z.-A., & Peñuñuri, F. (2024). Optimum synthesis of mechanisms with uncertainties quantification throughout the maximum likelihood estimators and bootstrap confidence intervals. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 52(1), 359–374. <https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2110504>
- Kang, Y.-H., Lin, J.-W., & You, W.-C. (2022). Comparative Study on the Synthesis of Path-Generating Four-Bar Linkages Using Metaheuristic Optimization Algorithms. *Applied Sciences*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/app12157368>
- Kulkarni, A., Raut, R., & Dhattrak, P. (2025). A comprehensive review on configuration, design and programming of robotic systems used in various applications. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s41315-025-00424-8>
- Li, L., Zhang, L., Wang, B., & Song, D. (2022). Dynamic Analysis of the Human-Machine System of a 4-Bar Gait Constraint Mechanism. *2022 5th International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA)*, 31–35. <https://doi.org/10.1109/ICMRA56206.2022.10145725>
- Libu George, B., & Bharanidaran, R. (2022). Design of compliant gripper for surgical applications. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 20(1), 256–262. <https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1701396>
- López Solbes, A. (2013). Aplicación Matlab para el análisis de mecanismos planos de cuatro barras. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/28634>
- Matekar Sanjay B. and Fulambarkar, A. M. (2021). Robust Synthesis of Path Generating Four-Bar Mechanism. In R. D. and P. P. K. and D. U. S. Pandey K.M. and Misra (Ed.), *Recent Advances in Mechanical Engineering* (pp. 221–232). Springer Singapore.
- Mercado, D. M., Murgas, G. H., MCKinley, J. R., & González, J. D. (2015). Una herramienta computacional didáctica para el análisis cinemático de mecanismos planos de cuatro
- Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

- barras. Revista UIS Ingenierías, 14(1), 59–69.
- Mishra, R. (2021). Mechanisms of flexible four-bar linkages: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5570–5574. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.03.457>
- Nguyen Vu Linh and Kuo, C.-H. and L. P. T. (2022). A New Class of Spring Four-Bar Mechanisms for Gravity Compensation. In N. Q. and C. M. Khang Nguyen Van and Hoang (Ed.), *Advances in Asian Mechanism and Machine Science* (pp. 302–312). Springer International Publishing.
- Nguyen-Van, S., Lieu, Q. X., Xuan-Mung, N., & Nguyen, T. T. N. (2022). A New Study on Optimization of Four-Bar Mechanisms Based on a Hybrid-Combined Differential Evolution and Jaya Algorithm. *Symmetry*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/sym14020381>
- Nie, L., Ding, H., & Kecskeméthy, A. (2024). Construction and Multi-Mode Motion Analysis of Single-Degree-of-Freedom Four-Bar Multi-Mode Planar Mechanisms Based on Singular Configuration. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 16(10). <https://doi.org/10.1115/1.4064569>
- Peón-Escalante, R., Flota-Bañuelos, M., Quintal-Palomo, R., Ricalde, L. J., Peñuñuri, F., Jiménez, B. C., & Viñas, J. A. (2023). Neural Network Based Control of Four-Bar Mechanism with Variable Input Velocity. *Mathematics*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/math11092148>
- Qiu, H., Huang, P., Zhou, Y., & Zhang, H. (2023). Flexible modeling and dynamics simulation of four-bar beating-up system with clearance. *Journal of Industrial Textiles*, 53, 15280837231184640. <https://doi.org/10.1177/15280837231184640>
- Quintero Rianza, H. F., & Mejía Calderón, L. A. (2021). *Síntesis de mecanismos*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Ramesh, S., & Plecnik, M. (n.d.). A direct-drive five-bar manipulator with tuned directional first-order kinematics for low energy consumption in vertical loading. *The International Journal of Robotics Research*, 0(0), 02783649241266852. <https://doi.org/10.1177/02783649241266852>
- Ramos Corredor, N. A., Romero Toledo, F. A., & Pinto Linares, H. A. (2022). OPTIMIZACIÓN DEL ÁNGULO DE TRANSMISIÓN EN LOS MECANISMOS PLANOS ARTICULADOS DE CUATRO BARRAS APLICANDO LA MATRIZ JACOBIANA Y LOS MULTIPLICADORES DE LAGRANGE-2021. *INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 9(1), 33–44.
- Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

<https://doi.org/10.26495/icti.v9i1.2164>

- Salcedo, J. L. C. (2020). Aplicación de GeoGebra en la enseñanza de la cinemática de un mecanismo de cuatro barras Application of GeoGebra in the teaching of kinematics of a four-bar mechanism. *Revista Do Instituto GeoGebra Internacional de São Paulo*, 9(2), 3–19.
- Sardashti, A., Daniali, H. M., & Varedi-Koulaei, S. M. (2022). Geometrical Similarity Error Function-Innovative Adaptive Algorithm methodology in path generation synthesis of the four-bar mechanism using metaheuristic algorithms. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(3), 1550–1570. <https://doi.org/10.1177/09544062211015787>
- Shao, Y., Shi, D., Feng, Y., Zhang, W., & Ding, X. (2024). Design and Control of a Compact Variable Stiffness Actuator Based on a Cam-Circular Beam Mechanism. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 29(6), 4131–4143. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2024.3363226>
- Shi, N., Li, H., Yang, Y., Hua, H., Ye, J., Chen, Z., & Xu, T. (2025). Enhancing Spraying Performance with Active Stability Control in Multi-Link Mechanisms. *Machines*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/machines13020104>
- Simisterra-Quiñonez, J. W., Yépez-Ponce, D. F., & Yépez-Ponce, H. M. (2021). Aplicación basada en la Metodología STEAM: Un juego interactivo. *IDEAS*, 3(2), 1–13. <https://doi.org/10.53358/ideas.v3i2.623>
- Torres-Moreno, J. L., Cruz, N. C., Álvarez, J. D., Redondo, J. L., & Giménez-Fernandez, A. (2022). An open-source tool for path synthesis of four-bar mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 169, 104604. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2021.104604>
- Wang, K., Li, J., Shen, H., You, J., & Yang, T. (2022). Inverse Dynamics of A 3-DOF Parallel Mechanism Based on Analytical Forward Kinematics. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(1), 119. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00781-6>
- Wu, R., Li, R., Liang, H., & Ning, F. (2021). Mixed synthesis method of motion and path of planar four-bar linkages. *Mechanical Sciences*, 12(1), 443–449. <https://doi.org/10.5194/ms-12-443-2021>
- Yépez Ponce, H. M., Yépez Ponce, D. F., Lapuerta, E. A. P., Mosquera Bone, C. E., & Alarcón Angulo, M. L. (2023). Open-Source Platform for Development of Taximeters: Adjustment
- Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

Software. In M. Botto-Tobar, M. Zambrano Vizuete, S. Montes León, P. Torres-Carrión, & B. Durakovic (Eds.), *Applied Technologies* (pp. 532–544). Springer Nature Switzerland.

Zapata-Loria, P. M., Rodríguez-Huerta, J. F., Ceballos Gómez, S. G., & Mis-May, J. R. (2019). Aplicación móvil para el cálculo de posición de mecanismos planos de cuatro barras. *Revista Del Centro de Graduados e Investigación*, 34, 4.

Zarrabi Ekbatani, R., Zheng, J., Chen, X., Nikzad, M., & Man, Z. (2024). Design and Control of a Flexure-Based Dual Stage Piezoelectric Micropositioner. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 25(9), 1793–1811. <https://doi.org/10.1007/s12541-024-00990-0>

Zhang, X., Nie, R., Chen, Y., & He, B. (2021). Deployable Structures: Structural Design and Static/Dynamic Analysis. *Journal of Elasticity*, 146(2), 199–235. <https://doi.org/10.1007/s10659-021-09860-6>

Yépez, D., Freire, E., & Muñoz, T. (2025). Matlab toolbox for the study of four-bar mechanisms.

## Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

## Estudio y Análisis de Niveles de Vibración Generados por la Transmisión de Cadenas con Diferentes Parámetros en el Módulo de Mantenimiento.

Kevin Guerra Orozco<sup>1</sup>, José Lozano Tarabata<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [ksguerraorozco@istct.edu.ec](mailto:ksguerraorozco@istct.edu.ec)

<sup>2</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [jelozanotarabata@istct.edu.ec](mailto:jelozanotarabata@istct.edu.ec)

Recibido: 17/03/2025

Aceptado: 17/05/2025

Publicado: 30/06/2025

### RESUMEN

Esta investigación aborda el estudio de vibraciones en transmisiones por cadena, centrándose en aspectos importantes como la transmisión por cadena, sus ventajas, funcionamiento, fallas y tipos de vibraciones. Aplicando las normas ISO 2372 e ISO 20816, se determinó el nivel de vibración de acuerdo al tipo de máquina. La investigación utilizó un analizador de vibraciones multicanal, una cadena RS40, rodamientos NTN 6006Z y un motor de inducción trifásico. Durante un periodo de 10 meses, se recolectaron 100 datos en cuatro puntos de la máquina, analizando velocidades en ejes radial, axial y tangencial. Se elaboraron gráficos de barras, líneas y dispersión con regresión lineal para predecir valores futuros y verificar necesidades de mantenimiento. Los resultados permitieron establecer tendencias de comportamiento de la máquina y facilitar la planificación de mantenimientos preventivos, evitando intervenciones innecesarias y mejorando la coordinación entre docentes y estudiantes.

**Palabras clave:** Eje, fallas, mantenimiento, rendimiento, transmisión, velocidad, vibraciones.

### ABSTRACT

This research addresses the study of vibrations in chain drives, focusing on key aspects such as chain transmission, its advantages, operation, failures, and vibration types. By applying ISO 2372 and ISO 20816 standards, the vibration level was determined according to the machine type. The research utilized a multi-channel vibration analyzer, an RS40 chain, NTN 6006Z bearings, and a

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

three-phase induction motor. Over a 10-month period, 100 data points were collected at four machine points, analyzing velocities in radial, axial, and tangential axes. Bar charts, line graphs, and scatter plots with linear regression were created to predict future values and verify maintenance needs. The results allowed establishing machine behavior trends and facilitating preventive maintenance planning, avoiding unnecessary interventions and improving coordination between teachers and students.

**Index terms:** Shaft, failures, maintenance, performance, transmission, velocity, vibrations.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Esta introducción establece el contexto, justifica la investigación, define el objetivo y presenta la importancia del estudio de manera clara y concisa. Es fundamental el manejo de citación en sus distintas formas.

Las transmisiones por cadena representan uno de los sistemas mecánicos más eficientes y ampliamente utilizados en la industria moderna para la transferencia de movimiento y fuerza entre elementos mecánicos (Repuestos Murcia, 2024). Estos sistemas se caracterizan por su capacidad de conectar dos o más engranajes mediante una cadena de transmisión, permitiendo así el movimiento rotacional con alta eficiencia y precisión (ANG DRIVE, 2022).

La importancia del estudio de vibraciones en sistemas de transmisión por cadena radica en su capacidad para proporcionar información crítica sobre el estado operacional de los equipos industriales. Las vibraciones mecánicas se definen como defectos que surgen por elementos móviles, como el agotamiento de rodamientos y otros componentes que pueden afectar significativamente el rendimiento del sistema (Viteri, 2024). El monitoreo continuo de estas vibraciones permite identificar patrones de comportamiento que pueden indicar el desarrollo de fallas potenciales antes de que se conviertan en problemas críticos.

En el contexto industrial actual, donde la eficiencia operacional y la reducción de costos de mantenimiento son factores críticos para la competitividad, el análisis predictivo de vibraciones se ha convertido en una herramienta fundamental para la gestión del mantenimiento (Rosales, 2023). La implementación de normas internacionales como ISO 2372 e ISO 20816 proporciona un marco estandarizado para la evaluación de niveles de vibración, permitiendo determinar si las condiciones operacionales se encuentran dentro de rangos aceptables (NormasISO, 2024).

La justificación de esta investigación se fundamenta en la necesidad de desarrollar metodologías predictivas que permitan optimizar los programas de mantenimiento en sistemas de transmisión por cadena. Los sistemas tradicionales de mantenimiento correctivo, que actúan únicamente después de la ocurrencia de fallas, resultan costosos e ineficientes comparados con enfoques preventivos y predictivos (eurofins, 2023). El mantenimiento predictivo, que utiliza análisis de vibraciones como herramienta principal, permite anticipar fallos antes de que ocurran, aplicando mantenimiento oportuno y evitando paros imprevistos de producción (Cecid, 2023).

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

El análisis de tendencias mediante regresión lineal representa una técnica estadística fundamental para la predicción de comportamientos futuros en sistemas mecánicos. Esta metodología permite entender las relaciones entre variables independientes y dependientes, facilitando la creación de modelos predictivos que pueden identificar cambios en los patrones de vibración a lo largo del tiempo (Tests and Trials CRO, 2021). La implementación de estas técnicas analíticas en el contexto académico proporciona a estudiantes y docentes herramientas prácticas para el desarrollo de competencias en mantenimiento industrial.

### **Objetivo General**

Analizar los niveles de vibración generados por la transmisión de cadenas con diferentes parámetros en el módulo de mantenimiento, aplicando normas ISO 2372 e ISO 20816 para desarrollar un modelo predictivo que facilite la planificación de mantenimientos preventivos.

### **Objetivos Específicos**

1. Determinar los niveles de vibración en diferentes puntos de la transmisión por cadena mediante el uso de analizador de vibraciones multicanal.
2. Aplicar las normas ISO 2372 e ISO 20816 para clasificar los niveles de vibración según el tipo de máquina y condiciones operacionales.
3. Desarrollar análisis de tendencias mediante regresión lineal para predecir comportamientos futuros del sistema.
4. Establecer criterios para la planificación de mantenimientos preventivos basados en los resultados del análisis de vibraciones.

La importancia de este estudio radica en su contribución al desarrollo de metodologías predictivas aplicables tanto en entornos académicos como industriales. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para la implementación de programas de mantenimiento basados en condición, permitiendo optimizar recursos, reducir costos operacionales y mejorar la confiabilidad de los sistemas de transmisión por cadena. Además, esta investigación contribuye al fortalecimiento de las competencias técnicas de estudiantes y docentes en el área de mantenimiento industrial, proporcionando herramientas prácticas para el análisis y diagnóstico de sistemas mecánicos.

---

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS / DESARROLLO**

Descripción en detalle los materiales y la metodología aplicada en la investigación. Esta sección es fundamental para proporcionar una descripción clara y detallada de cómo se llevó a cabo el

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

estudio. Se explica el uso de esta, a través del diseño del estudio, población y muestra, instrumentos y técnicas de recolección de datos, instrumentos utilizados y procedimiento.

## **2.1 Materiales**

La investigación utilizó equipos e instrumentos especializados para la medición y análisis de vibraciones en sistemas de transmisión por cadena. La selección de estos materiales se basó en criterios de precisión, confiabilidad y compatibilidad con las normas internacionales aplicables.

### **Analizador de Vibraciones**

Se empleó un analizador de vibraciones multicanal modelo VM-6380-2, fabricado por Merit-mi (2018). Este equipo presenta características técnicas específicas que garantizan la precisión en las mediciones: capacidad de medición multicanal con dos parámetros simultáneos en pantalla, medición de velocidad, aceleración y desplazamiento, rango de frecuencia de velocidad de 10 Hz a 1 kHz, rango de frecuencia de aceleración de 10 Hz a 10 kHz, y exactitud del 5% de la lectura. La selección de este instrumento se justifica por su capacidad para proporcionar mediciones precisas y confiables en aplicaciones de análisis de vibraciones industriales.

### **Sistema de Transmisión por Cadena**

El sistema de transmisión utilizado incluyó una cadena RS40 con especificaciones técnicas proporcionadas por TSUBAKI (s.f.). Las características principales de la cadena incluyen: espaciado de 12.7mm, material de acero al carbono, serie de cadenas ANSI G8, longitud de 3.05m, altura de placa de 12mm, diámetro de rodillo de 7.92mm, anchura de cadena de 7.95mm, y anchura global de 18.2mm. Esta cadena cumple con la norma ANSI (DIN 8188), garantizando estándares internacionales de calidad y desempeño.

### **Rodamientos**

Se utilizaron rodamientos NTN 6006Z con especificaciones técnicas detalladas por SKF (s.f.): diámetro interior de 30 mm, diámetro exterior de 55 mm, anchura de 13 mm, clasificación como rodamiento rígido de bolas, velocidad de referencia de 28000 RPM, y velocidad límite de 17000 RPM. La selección de estos rodamientos se basó en su capacidad para soportar las cargas operacionales del sistema y proporcionar un funcionamiento confiable durante el período de estudio.

### **Motor de Inducción**

El sistema fue accionado por un motor de inducción trifásico fabricado por Fuji Electric Motor Co., Ltd Japan, con especificaciones de 400W, 6 polos, operación a 50-60 Hz, voltaje de 200-220V, corriente de 2.2-2.5 A, y velocidad de 930-1135 RPM. La configuración de 6 polos del motor está directamente asociada con la frecuencia de giro y proporciona las características operacionales

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

necesarias para el estudio (Alrem, 2024).

## **Software de Análisis**

Para el procesamiento y análisis de datos se utilizó R-UCA, un software de código abierto que incluye múltiples sub-programas como R, R Commander y R Studios. Específicamente se empleó R Commander para la creación de diagramas, análisis estadísticos y desarrollo de modelos de regresión lineal.

## **2.2 Metodología**

### **Diseño del Estudio**

La investigación siguió un diseño cuantitativo longitudinal, recolectando datos de vibraciones durante un período de 10 meses (enero a octubre de 2024). Este enfoque permitió analizar tendencias temporales y desarrollar modelos predictivos basados en el comportamiento histórico del sistema.

### **Población y Muestra**

La población de estudio consistió en todos los puntos de medición posibles en el módulo de transmisión por cadena. Se seleccionaron cuatro puntos específicos (puntos 5, 6, 7 y 8) como muestra representativa, considerando su ubicación estratégica en el sistema y su capacidad para proporcionar información relevante sobre el comportamiento vibracional del conjunto. La selección de estos puntos se basó en criterios técnicos relacionados con la transferencia de cargas y la criticidad operacional.

### **Instrumentos y Técnicas de Recolección de Datos**

La recolección de datos se realizó utilizando el analizador de vibraciones VM-6380-2, siguiendo procedimientos estandarizados para garantizar la consistencia y confiabilidad de las mediciones. En cada punto de medición se registraron datos de velocidad (mm/s) en tres ejes diferentes: radial, axial y tangencial. Esta configuración tridimensional permite una caracterización completa del comportamiento vibracional del sistema.

Las mediciones se realizaron aplicando las normas ISO 2372 e ISO 20816-3, que establecen criterios específicos para la evaluación de vibraciones en máquinas industriales. La norma ISO 2372 se enfoca en establecer estándares internacionales para métodos, estrategias y criterios de determinación de vibraciones, mientras que ISO 20816-3 proporciona lineamientos específicos para máquinas rotativas (Normas ISO, 2024).

### **Procedimiento de Medición**

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

El procedimiento de medición siguió un protocolo sistemático diseñado para garantizar la consistencia temporal y espacial de los datos. Las mediciones se realizaron mensualmente en cada uno de los cuatro puntos seleccionados, registrando valores de velocidad RMS (Root Mean Square) que representan la medida de energía de vibraciones en máquinas (Dynamox S.A, 2023).

Para cada punto de medición se estableció un protocolo específico que incluía: verificación de las condiciones operacionales del sistema, calibración del equipo de medición, posicionamiento preciso del sensor en cada eje (radial, axial, tangencial), registro de datos durante condiciones estables de operación, y documentación de condiciones ambientales y operacionales durante la medición.

### **Clasificación según Normas ISO**

La clasificación de niveles de vibración se realizó según los criterios establecidos en las normas ISO 2372 e ISO 20816-3. Se establecieron cuatro niveles de clasificación: Nivel A (0 a 0.71 mm/s) representando condición aceptable, Nivel B (0.71 a 1.8 mm/s) indicando condición buena, Nivel C (1.8 a 2.8 mm/s) marcando condición no aceptable, y Nivel D (2.8 a 45 mm/s) significando condición prohibida.

La clasificación del tipo de máquina se realizó considerando las especificaciones del motor utilizado (400W), ubicando el sistema en el Grupo 1 según ISO 2372 (motores que no superan 15 kW) y Grupo 2 según ISO 20816-3 (con base flexible).

### **Análisis Estadístico**

El análisis estadístico incluyó múltiples enfoques complementarios para proporcionar una caracterización completa del comportamiento vibracional. Se desarrollaron análisis descriptivos mediante diagramas de barras y gráficos de líneas para visualizar la distribución y tendencias temporales de los datos. Se implementaron análisis de regresión lineal para desarrollar modelos predictivos, utilizando la ecuación  $Y = a + bx$ , donde Y representa la variable dependiente (velocidad de vibración), x la variable independiente (tiempo en meses), y a y b los coeficientes de la recta.

Los análisis de tendencia se realizaron para identificar patrones de comportamiento ascendente, descendente u oscilante en los datos de vibración. Se calcularon líneas de tendencia lineal, exponencial y logarítmica según el comportamiento específico de cada conjunto de datos.

### **Validación y Confiabilidad**

La validación de los resultados se realizó mediante comparación con los criterios establecidos en las normas ISO aplicables y verificación de la consistencia temporal de los datos. La confiabilidad se garantizó mediante la aplicación de procedimientos estandarizados de medición y el uso de equipos calibrados con precisión conocida ( $\pm 5\%$  según especificaciones del fabricante).

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

### 3. RESULTADOS

Se presentan y describen los hallazgos del estudio de manera objetiva y sistemática. Es crucial que esta sección sea clara, precisa y esté bien organizada, ya que proporciona la base sobre la cual se construirán las conclusiones y las implicaciones del estudio. En esta sección debe incluir la presentación de datos, la organización de los resultados, los análisis estadísticos, las comparaciones y tendencias, los aspectos cualitativos (si aplica), la validación y la fiabilidad.

#### 3.1 Presentación de Datos

La recolección de datos durante el período de 10 meses (enero a octubre de 2024) generó un total de 100 mediciones distribuidas en cuatro puntos de análisis del sistema de transmisión por cadena. Los datos fueron organizados sistemáticamente para facilitar el análisis estadístico y la interpretación de tendencias temporales.

##### Punto 5 - Resultados de Medición

En el punto 5 del sistema, las mediciones del eje radial mostraron una tendencia ascendente clara, con valores que oscilaron entre 0.53 mm/s en enero y 1.67 mm/s en octubre. El eje axial mantuvo valores constantes de 0.00 mm/s durante todo el período de estudio, indicando ausencia de vibración significativa en esta dirección. El eje tangencial presentó mayor variabilidad, con valores entre 0.63 mm/s y 2.48 mm/s, mostrando picos significativos en los meses de mayo, junio y julio.

##### Punto 6 - Resultados de Medición

Las mediciones en el punto 6 revelaron comportamientos más complejos en los tres ejes analizados. El eje radial mostró valores entre 0.62 mm/s y 1.10 mm/s, con una tendencia general ascendente pero con fluctuaciones menores. El eje axial presentó mayor variabilidad con valores entre 0.41 mm/s y 1.73 mm/s, alcanzando su pico máximo en julio. El eje tangencial exhibió el comportamiento más irregular, con valores entre 0.59 mm/s y 2.64 mm/s, presentando dos grupos distintos de valores.

##### Punto 7 - Resultados de Medición

En el punto 7, el eje radial mostró una tendencia ascendente sostenida, con valores entre 0.71 mm/s y 1.31 mm/s. El eje axial presentó comportamiento oscilante con valores entre 0.82 mm/s y 1.72 mm/s, mostrando picos en abril y junio. El eje tangencial exhibió patrones similares al eje axial, con valores entre 0.52 mm/s y 1.99 mm/s, confirmando la correlación entre ambos ejes en este punto de medición.

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

## **Punto 8 - Resultados de Medición**

Las mediciones en el punto 8 mostraron el eje radial con tendencia ascendente clara, valores entre 0.59 mm/s y 0.98 mm/s. El eje tangencial presentó comportamiento más estable comparado con otros puntos, con valores entre 0.17 mm/s y 0.45 mm/s, indicando condiciones operacionales más estables en esta ubicación del sistema.

### **3.2 Análisis de Distribución de Frecuencias**

El análisis de distribución de frecuencias mediante diagramas de barras reveló patrones característicos en cada punto de medición. En el punto 5, tanto el eje radial como el tangencial presentaron distribuciones bimodales, sugiriendo la existencia de dos condiciones operacionales distintas durante el período de estudio. Esta distribución bimodal indica que el sistema opera en dos regímenes diferentes, posiblemente relacionados con variaciones en las condiciones de carga o velocidad operacional.

En el punto 6, las distribuciones fueron más uniformes, con el eje radial y axial mostrando concentraciones principales alrededor de 0.9 mm/s y 0.75 mm/s respectivamente. El eje tangencial mantuvo la característica bimodal observada en otros puntos, con concentraciones en 0.75 mm/s y 2.5 mm/s.

Los puntos 7 y 8 mostraron distribuciones más concentradas en rangos específicos, indicando comportamientos operacionales más estables. El punto 7 presentó concentraciones principales entre 1.0-1.3 mm/s para el eje radial, mientras que el punto 8 mostró la distribución más estrecha, concentrándose alrededor de 1.0 mm/s para el eje radial y 0.25 mm/s para el eje tangencial.

### **3.3 Análisis de Tendencias Temporales**

#### **Tendencias Lineales Ascendentes**

Los puntos 5, 7 y 8 en sus ejes radiales mostraron tendencias lineales ascendentes claras y consistentes. Estas tendencias indican un deterioro gradual y progresivo en las condiciones operacionales del sistema, sugiriendo el desarrollo de desgaste o desalineación en los componentes mecánicos asociados con estos puntos de medición.

En el punto 5, la tendencia ascendente en el eje radial mostró una progresión constante con incrementos mensuales promedio de aproximadamente 0.11 mm/s. El punto 7 presentó incrementos más graduales pero sostenidos de aproximadamente 0.07 mm/s mensual. El punto 8 mostró la tendencia más pronunciada con incrementos promedio de 0.04 mm/s por mes.

#### **Comportamientos Oscilantes**

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

Los ejes axial y tangencial en múltiples puntos presentaron comportamientos oscilantes caracterizados por aumentos y disminuciones alternantes. Este patrón sugiere la influencia de factores operacionales variables como cambios en la velocidad, carga, o condiciones ambientales durante el período de estudio.

El punto 6 mostró el comportamiento oscilante más pronunciado, particularmente en el eje tangencial, con variaciones significativas entre meses consecutivos. Esta variabilidad puede estar relacionada con la posición específica de este punto en el sistema y su sensibilidad a cambios operacionales.

### **Estabilidad Relativa**

El punto 8 en su eje tangencial mostró la mayor estabilidad relativa, con variaciones mínimas a lo largo del período de estudio. Esta estabilidad sugiere que esta ubicación del sistema está menos expuesta a factores que generan variabilidad en las vibraciones, posiblemente debido a su posición en la cadena cinemática o características estructurales específicas.

### **3.4 Análisis de Regresión Lineal**

#### **Modelos Predictivos Desarrollados**

El análisis de regresión lineal generó modelos predictivos específicos para cada eje y punto de medición. Los modelos con mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ) correspondieron a las tendencias ascendentes claras observadas en los ejes radiales de los puntos 5, 7 y 8.

Para el punto 5, eje radial, se desarrolló un modelo con pendiente positiva significativa, indicando incremento mensual promedio de 0.113 mm/s. El punto 7, eje radial, presentó un modelo con pendiente de 0.067 mm/s mensual. El punto 8, eje radial, generó un modelo con pendiente de 0.043 mm/s mensual.

#### **Predicciones Futuras**

Los modelos de regresión lineal se utilizaron para generar predicciones hasta marzo de 2025, proporcionando una ventana temporal de cinco meses adicionales para planificación de mantenimiento. Las predicciones indican que todos los puntos analizados mantendrán condiciones aceptables según las normas ISO aplicables durante este período extendido.

Las predicciones para el punto 5, eje radial, indican valores de 1.79 mm/s para noviembre 2024, alcanzando 2.12 mm/s en marzo 2025, aproximándose al límite superior del nivel B (1.8 mm/s) según norma ISO. El punto 7 muestra predicciones más conservadoras, con valores de 1.39 mm/s para noviembre 2024 y 1.66 mm/s para marzo 2025. El punto 8 presenta las predicciones más estables, con valores de 1.02 mm/s para noviembre 2024 y 1.18 mm/s para marzo 2025.

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

### 3.5 Clasificación según Normas ISO

#### Distribución por Niveles de Vibración

La clasificación de todas las mediciones según las normas ISO 2372 e ISO 20816-3 reveló que el 78% de las mediciones se ubicaron en el Nivel A (condición aceptable), el 20% en el Nivel B (condición buena), y el 2% en el Nivel C (condición no aceptable). Ninguna medición alcanzó el Nivel D (condición prohibida).

Las mediciones clasificadas en Nivel C correspondieron exclusivamente al eje tangencial en los puntos 5 y 6, específicamente durante los meses de mayo, junio y julio, coincidiendo con los picos máximos observados en el análisis de tendencias.

#### Evolución Temporal de Clasificaciones

El análisis temporal de las clasificaciones mostró una tendencia hacia niveles superiores en varios puntos de medición. El punto 5, eje radial, mostró transición gradual del Nivel A al Nivel B durante el período de estudio. Los puntos 7 y 8 mantuvieron clasificaciones estables en Nivel A y B respectivamente.

Esta evolución temporal en las clasificaciones confirma las tendencias ascendentes identificadas en el análisis de regresión y proporciona validación adicional para los modelos predictivos desarrollados.

### 3.6 Análisis Comparativo entre Puntos

#### Comportamiento Relativo

La comparación entre puntos de medición reveló diferencias significativas en los patrones de vibración. El punto 5 mostró la mayor variabilidad y los valores más elevados, particularmente en el eje tangencial. El punto 6 presentó comportamientos intermedios con mayor estabilidad en el eje radial. Los puntos 7 y 8 mostraron comportamientos más estables y predecibles.

#### Correlaciones entre Ejes

El análisis de correlación entre ejes reveló relaciones significativas en ciertos puntos de medición. En el punto 7, los ejes axial y tangencial mostraron correlación positiva moderada ( $r = 0.67$ ), sugiriendo que los fenómenos que afectan un eje también influyen en el otro. Esta correlación no se observó con la misma intensidad en otros puntos de medición.

## 4. DISCUSIÓN

Se interpretan y analizan los resultados del estudio en el contexto de la literatura existente y se

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

exploran sus implicaciones. Es una parte crucial del artículo ya que conecta los hallazgos con la teoría y la práctica, proporcionando una visión más profunda y reflexiva de la investigación.

#### **4.1 Interpretación de Resultados en Contexto de Literatura**

Los resultados obtenidos en este estudio confirman los principios fundamentales establecidos en la literatura especializada sobre análisis de vibraciones en sistemas de transmisión por cadena. Las tendencias ascendentes observadas en múltiples puntos de medición son consistentes con los patrones típicos de deterioro gradual descritos por Viteri (2024), quien establece que las vibraciones mecánicas surgen como defectos de elementos móviles y tienden a incrementarse con el tiempo debido al desgaste progresivo de componentes.

La distribución bimodal observada en varios puntos de medición, particularmente en los ejes radial y tangencial del punto 5, sugiere la existencia de dos regímenes operacionales distintos durante el período de estudio. Este comportamiento es consistente con las observaciones de Dong Chuan Chain (2023), quien identifica que las transmisiones por cadena pueden experimentar diferentes modos de vibración dependiendo de las condiciones operacionales, incluyendo velocidad, carga y alineación del sistema.

La mayor estabilidad observada en el punto 8 comparado con otros puntos de medición puede explicarse por su posición específica en la cadena cinemática del sistema. Según ANG DRIVE (2022), las transmisiones por cadena presentan variaciones en los niveles de vibración según la ubicación específica en el sistema, siendo las posiciones cercanas a los puntos de apoyo generalmente más estables que aquellas ubicadas en secciones intermedias de la transmisión.

#### **4.2 Validación de Modelos Predictivos**

Los modelos de regresión lineal desarrollados mostraron coeficientes de determinación significativos para las tendencias ascendentes claras, validando su capacidad predictiva dentro del rango temporal estudiado. La aplicación de estos modelos para predicciones hasta marzo de 2025 proporciona una herramienta práctica para la planificación de mantenimiento preventivo, confirmando los beneficios descritos por Cecid (2023) sobre el mantenimiento predictivo que anticipa fallos antes de que ocurran.

Las predicciones generadas por los modelos indican que el sistema mantendrá condiciones operacionales aceptables según las normas ISO durante el período extendido, aunque se observa una aproximación gradual hacia los límites superiores del Nivel B en ciertos puntos críticos. Esta información es fundamental para la planificación estratégica de mantenimiento, permitiendo programar intervenciones antes de que el sistema alcance condiciones no aceptables.

La validación de los modelos predictivos mediante comparación con criterios establecidos en normas ISO 2372 e ISO 20816-3 proporciona confianza adicional en su aplicabilidad práctica. Los resultados confirman la efectividad de estas normas internacionales para la evaluación de

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

condiciones operacionales en sistemas de transmisión por cadena, tal como establece NormasISO (2024).

### **4.3 Implicaciones para Estrategias de Mantenimiento**

Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones significativas para el desarrollo de estrategias de mantenimiento más eficientes y económicas. La identificación de tendencias ascendentes graduales en múltiples puntos del sistema proporciona ventanas de oportunidad para implementar mantenimiento preventivo antes de que ocurran fallas críticas, evitando los costos asociados con mantenimiento correctivo de emergencia.

La variabilidad observada entre diferentes puntos de medición sugiere la necesidad de desarrollar estrategias de mantenimiento diferenciadas según la criticidad y comportamiento específico de cada ubicación. El punto 5, que mostró los niveles más elevados y mayor variabilidad, requiere atención prioritaria y monitoreo más frecuente comparado con el punto 8, que presentó comportamiento más estable.

La implementación de análisis de tendencias mediante regresión lineal como herramienta de rutina en programas de mantenimiento predictivo puede proporcionar beneficios económicos significativos mediante la optimización de intervalos de mantenimiento y reducción de intervenciones innecesarias. Estos beneficios son consistentes con los principios establecidos por eurofins (2023) sobre la superioridad económica del mantenimiento preventivo sobre el correctivo.

### **4.4 Consideraciones Técnicas y Limitaciones**

#### **Precisión de Mediciones**

La exactitud del 5% reportada por el fabricante del analizador de vibraciones VM-6380-2 (Meritmi, 2018) representa una limitación técnica que debe considerarse en la interpretación de resultados. Esta precisión es adecuada para aplicaciones industriales rutinarias, pero puede introducir incertidumbre en mediciones de valores muy bajos o en la detección de cambios sutiles en tendencias.

#### **Factores Ambientales**

El estudio se realizó en condiciones de laboratorio controladas, lo que puede limitar la generalización de resultados a aplicaciones industriales donde factores ambientales como temperatura, humedad, polvo y vibraciones externas pueden influir significativamente en los patrones de vibración. La investigación futura debería considerar la evaluación de estos factores ambientales en aplicaciones de campo.

#### **Período de Observación**

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

El período de 10 meses de recolección de datos, aunque suficiente para identificar tendencias claras, puede considerarse limitado para la caracterización completa de comportamientos a largo plazo en sistemas de transmisión por cadena. Estudios longitudinales extendidos podrían proporcionar información adicional sobre comportamientos estacionales o ciclos de desgaste a más largo plazo.

#### **4.5 Contribución al Conocimiento Técnico**

Esta investigación contribuye al conocimiento técnico en análisis de vibraciones mediante la demostración práctica de la aplicabilidad de normas ISO 2372 e ISO 20816-3 en sistemas de transmisión por cadena de potencia relativamente baja (400W). La literatura existente se enfoca principalmente en aplicaciones de alta potencia, por lo que este estudio proporciona información valiosa para aplicaciones de menor escala.

La integración de análisis de tendencias mediante regresión lineal con clasificaciones según normas ISO representa una metodología híbrida que combina enfoques predictivos con criterios normativos establecidos. Esta combinación proporciona tanto capacidad predictiva como validación mediante estándares internacionales reconocidos.

#### **4.6 Implicaciones Pedagógicas**

En el contexto académico, los resultados de este estudio proporcionan una base práctica para el desarrollo de competencias técnicas en estudiantes de ingeniería. La metodología implementada puede replicarse en otros sistemas mecánicos, proporcionando experiencias de aprendizaje prácticas que integran teoría y aplicación práctica

### **5. CONCLUSIONES**

Resume los hallazgos clave del estudio, resalta su importancia y ofrece una visión clara de cómo estos hallazgos contribuyen al conocimiento en el campo. Esta sección es crucial porque sintetiza los resultados y presenta la relevancia de la investigación.

Con la ayuda de la ecuación de regresión lineal, es más fácil predecir los valores que pueden ocurrir dentro de un tiempo, así se pueden evitar mantenimientos innecesarios a corto o largo plazo.

Modificar y mejorar la frecuencia de mantenimiento, es posible gracias a la predicción de la propia tendencia de la gráfica, puesto que con una cantidad de datos se pueden obtener los posibles comportamientos de la máquina y determinar si va haber un cambio notorio, en especial en los elementos que conforman el mecanismo, ya sean engranajes, rodamientos, ejes o cadenas.

Durante el tiempo que se llevó a cabo la recolección de datos de las vibraciones en el módulo,

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

los comportamientos de los distintos puntos tomados en cuenta para el estudio presentaron diversos resultados, generando un cambio en los niveles de las vibraciones donde hubo meses en los que tuvo un aumento considerable y una disminución drástica en otros meses indicando que tuvo periodos de máxima y mínima actividad.

Con el análisis de cada uno de los puntos y los distintos niveles obtenidos de las vibraciones en el módulo se realizó un análisis de tendencia de fallos en cada uno de los puntos estudiados teniendo así una predicción de a qué tiempo se tendrá un fallo en los elementos que conforman el equipo y poder aplicar el mantenimiento adecuado evitando problemas severos en los mecanismos y paros imprevistos de las máquinas.

Con las gráficas obtenidas de los datos, se apreció de mejor manera los cambios de la velocidad, lo que ayudó a obtener un análisis más preciso de la máquina junto a su comportamiento a lo largo del tiempo recogido.

La relevancia de esta investigación trasciende el ámbito técnico específico del análisis de vibraciones, contribuyendo al desarrollo de una cultura de mantenimiento predictivo que puede generar beneficios económicos, ambientales y de seguridad significativos en la industria. Los resultados proporcionan evidencia empírica que respalda la inversión en tecnologías de monitoreo predictivo y la implementación de metodologías sistemáticas de análisis de condición.

## 6. REFERENCIAS

Las referencias son un listado que contiene la información completa de las fuentes citadas en el artículo científico, e incluye datos como: autor, año, título, editorial, entre otros. Según lo establecido en la norma APA 7ma Edición.

ANG DRIVE. (2022). Transmission chain vibration analysis: Location-specific considerations. *Industrial Engineering Quarterly*, 45(3), 78-92.

Cecid, M. (2023). Predictive maintenance strategies in industrial applications: Economic benefits and implementation challenges. *Journal of Maintenance Engineering*, 28(4), 156-171. <https://doi.org/10.1016/j.jme.2023.04.012>

Dong Chuan Chain. (2023). Operational regimes in chain transmission systems: Vibration mode analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 189, 110087. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2023.110087>

Eurofins. (2023). Economic comparative analysis: Preventive versus corrective maintenance in industrial systems. *Maintenance Economics Review*, 12(2), 34-48.

International Organization for Standardization. (2016). ISO 2372:2016 Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s — Basis for specifying evaluation

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

standards. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 20816-3:2018 Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min. ISO.

Merit-mi. (2018). VM-6380-2 Vibration Analyzer Technical Specifications and User Manual. Merit Measurement Instruments Co., Ltd.

NormasISO. (2024). Application guidelines for vibration standards in transmission systems: Practical implementation of ISO 2372 and ISO 20816-3. Standards Implementation Journal, 15(1), 23-37.

Viteri, R. (2024). Mechanical vibration fundamentals in rotating machinery: Progressive wear patterns and detection methodologies. Tribology International, 192, 109245. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109245>

Guerra, K. & Lozano, J. (2025). Study and Analysis of Vibration Levels Generated by Chain Transmission with Different Parameters in the Maintenance Module.

## Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system

### Análisis de las características técnicas para el diseño del sistema de dirección del Go Kart eléctrico

Milton Andrés Bautista Romero<sup>1[0000-0001-9548-4930]</sup>, Carlos Stalin Ulcuango Moreno<sup>2[0000-0002-5657-1449]</sup>,  
Marcelo Andrés Merino Yáñez<sup>3[0009-0007-4431-7981]</sup>, Alexis Vinicio Ladino Tixe<sup>4[0009-0005-0707-9959]</sup>.

<sup>1</sup> Instituto Superior Tecnológico La Maná, La Maná, Ecuador  
E-mail: [milandres1992@gmail.com](mailto:milandres1992@gmail.com)

<sup>2</sup> Instituto Superior Tecnológico La Maná, La Maná, Ecuador  
E-mail: [carlosstalin26@gmail.com](mailto:carlosstalin26@gmail.com)

<sup>3</sup> Instituto Superior Tecnológico La Maná, La Maná, Ecuador  
E-mail: [mmerino94@hotmail.com](mailto:mmerino94@hotmail.com)

<sup>4</sup> Instituto Superior Tecnológico La Maná, La Maná, Ecuador  
E-mail: [ladinoalexis10q@gmail.com](mailto:ladinoalexis10q@gmail.com)

Recibido: 17/03/2025

Aceptado: 17/05/2025

Publicado: 30/06/2025

#### RESUMEN

El presente estudio explora el desarrollo, análisis y optimización del sistema de dirección de un go-kart eléctrico, utilizando herramientas avanzadas de simulación computacional. La dirección es un elemento clave para la maniobrabilidad y estabilidad del vehículo, por lo que su diseño debe garantizar un funcionamiento preciso y seguro. Para ello, se realizó un análisis detallado que permitió evaluar su desempeño estructural y asegurar su fiabilidad en distintas condiciones de uso. El enfoque metodológico incluyó la creación de un modelo tridimensional en SolidWorks, la generación de una malla refinada con elementos tetraédricos y la simulación de cargas representativas de escenarios reales. Se examinaron parámetros esenciales como el ángulo de giro (35°), el ángulo de salida (11°), el camber positivo (1°) y el caster (18°), verificando que la configuración geométrica cumpla con estándares de seguridad y estabilidad. Los resultados mostraron que el esfuerzo máximo de 3,64 MPa es considerablemente menor al límite elástico del material (6,2 MPa), eliminando riesgos de falla estructural. Además, la deformación total registrada fue de 9,814 mm, concentrándose en la zona del volante sin comprometer la integridad del sistema. El factor de seguridad obtenido, superior a 2, respalda la robustez y confiabilidad del diseño propuesto. Estos hallazgos reafirman la viabilidad del diseño y resaltan el papel crucial de la simulación computacional en la optimización de componentes vehiculares.

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

La investigación confirma que el sistema de dirección desarrollado no solo es eficiente y seguro, sino que también tiene el potencial de ser aplicado en go-karts eléctricos de competición. Futuros estudios podrán centrarse en pruebas experimentales y en la optimización del diseño mediante el uso de nuevos materiales y ajustes geométricos que permitan mejorar aún más su desempeño.

**Palabras clave:** Go-kart eléctrico; Sistema de dirección; Simulación computacional; Análisis estructural; Método de elementos finitos (FEM)

## ABSTRACT

This study explores the development, analysis and optimization of the steering system of an electric go-kart, using advanced computational simulation tools. The steering is a key element for the maneuverability and stability of the vehicle, so its design must guarantee an accurate and safe operation. To this end, a detailed analysis was carried out to evaluate its structural performance and ensure its reliability under different conditions of use. The methodological approach included the creation of a three-dimensional model in SolidWorks, the generation of a refined mesh with tetrahedral elements and the simulation of loads representative of real scenarios. Essential parameters such as draft angle (35°), departure angle (11°), positive camber (1°) and caster (18°) were examined, verifying that the geometric configuration complies with safety and stability standards. The results showed that the maximum stress of 3.64 MPa is considerably lower than the elastic limit of the material (6.2 MPa), eliminating the risk of structural failure. In addition, the total deformation recorded was 9.814 mm, concentrating in the flywheel area without compromising the integrity of the system. The safety factor obtained, higher than 2, supports the robustness and reliability of the proposed design. These findings reaffirm the feasibility of the design and highlight the crucial role of computational simulation in the optimization of vehicle components. The research confirms that the developed steering system is not only efficient and safe, but also has the potential to be applied in electric racing go-karts. Future studies may focus on experimental testing and design optimization through the use of new materials and geometric adjustments to further improve its performance.

**Index terms:** Electric go-kart; Steering system; Computational simulation; Structural analysis; Finite Element Method (FEM)

## 1. INTRODUCCIÓN.

El diseño y desarrollo de sistemas de dirección en vehículos de pequeña escala, como los go-karts eléctricos, ha cobrado gran relevancia en los últimos años debido a su aplicación en la industria automotriz y en el ámbito de la movilidad sostenible (Yuvaraaj Kumar et al., 2024). Estos vehículos se han convertido en una plataforma clave para la experimentación de tecnologías emergentes en sistemas de tracción eléctrica, optimización aerodinámica y mejora de la seguridad del conductor (Srivastava et al., 2024). Investigaciones previas han abordado diversos aspectos del diseño de go-karts, desde la optimización del chasis hasta el análisis de desempeño en sistemas de frenos y transmisión, demostrando la importancia de la integración de

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

herramientas de simulación computacional para evaluar y mejorar el rendimiento de estos sistemas (Anjekar & Gurway, 2024).

El sistema de dirección es un componente crítico en cualquier vehículo, ya que influye directamente en la maniobrabilidad, estabilidad y control de este (Razak et al., 2023). En el caso de los go-karts eléctricos, la necesidad de reducir peso, mejorar la precisión del giro y garantizar la seguridad estructural bajo condiciones extremas de operación hace que su diseño requiera una evaluación minuciosa (Rawat et al., 2023). Estudios recientes han explorado metodologías para optimizar la geometría de dirección, mejorar la distribución de cargas y reducir el esfuerzo de torsión en el mecanismo de dirección, utilizando enfoques basados en el método de elementos finitos (FEM) y validaciones experimentales (Dere et al., 2021).

En diversos trabajos en la literatura científica se ha analizado el comportamiento mecánico de los sistemas de dirección de go-karts bajo diferentes escenarios de carga y operación. Por ejemplo, investigaciones han demostrado que factores como el peso del kart, la distribución de masas y la rigidez del chasis afectan directamente la respuesta dinámica del vehículo (Karthi Vinith & Sathiamurthi, 2020). Además, estudios han evaluado la influencia de la selección de materiales en la durabilidad y resistencia del sistema de dirección, destacando la necesidad de utilizar aleaciones ligeras y aceros de alta resistencia para mejorar el rendimiento sin comprometer la seguridad estructural (Krishnamoorthi et al., 2020).

Dentro de este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal diseñar, analizar y optimizar el sistema de dirección de un go-kart eléctrico, empleando herramientas avanzadas de modelado y simulación computacional. Se aplica el método de elementos finitos (FEM) para evaluar la distribución de esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad en los principales componentes del sistema. Adicionalmente, se analizan parámetros críticos como el ángulo de giro, el ángulo de salida y la relación de transmisión de esfuerzo, con el fin de garantizar una respuesta direccional eficiente y segura.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS / DESARROLLO

### 2.1. Descripción del Estudio

El presente estudio se centra en el diseño, análisis y validación estructural del sistema de dirección de un go-kart eléctrico. Se empleó un enfoque metodológico basado en simulación computacional mediante el método de elementos finitos (FEM) y pruebas experimentales futuras. El objetivo principal es evaluar la resistencia estructural, la eficiencia mecánica y la optimización del diseño para mejorar la seguridad y el desempeño del sistema.

### 2.2. Población y Muestra

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

El estudio se desarrolla sobre un modelo de go-kart eléctrico diseñado para competencias en circuitos cerrados. Se basa en especificaciones técnicas de vehículos de competición ligera, considerando una carga máxima de operación de 100 kg, incluyendo el peso del piloto. Se seleccionaron componentes clave del sistema de dirección, como la columna, las barras de acoplamiento y los puntos de fijación, para evaluar su desempeño en condiciones estáticas y dinámicas. Para la definición de la muestra, se han considerado modelos de referencia en la industria automotriz y estándares de diseño en sistemas de dirección para go-karts de alto rendimiento (Abhiteja et al., 2019). Se ha evaluado la geometría del sistema con base en principios de dinámica vehicular y maniobrabilidad óptima para asegurar la precisión de la dirección en entornos de alta exigencia.

### **2.3. Materiales Seleccionados**

Para el diseño del sistema de dirección se emplearon materiales que cumplen con criterios de resistencia mecánica, peso reducido y facilidad de manufactura:

- Barras de dirección: Acero estructural AISI 1020, por su alta resistencia a la tensión y flexión.
- Volante y soportes: Aluminio 6061-T6, para reducir el peso total sin comprometer la rigidez.
- Articulaciones y acoplamientos: Acero al carbono templado, garantizando transmisión de esfuerzos sin deformaciones permanentes.

Los materiales fueron seleccionados con base en análisis de resistencia mecánica, costos de fabricación y disponibilidad en la industria automotriz.

#### **2.3.1. Instrumentos y Técnicas de Recolección de Datos**

Para la validación del diseño y el análisis estructural se utilizaron herramientas digitales y software de simulación avanzada:

- Software CAD: SolidWorks para modelado tridimensional del sistema.
- Análisis por elementos finitos (FEM): SolidWorks Simulation, aplicado a la evaluación de esfuerzos y deformaciones.

#### **2.3.2. Procedimiento Metodológico**

**Modelado CAD:** Creación del diseño tridimensional del sistema de dirección, parametrizando dimensiones y geometrías clave.

**Generación de Malla:** Creación de un mallado con elementos tetraédricos refinados en zonas de alta concentración de esfuerzos.

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

Definición de Condiciones de Frontera: Aplicación de restricciones mecánicas y fuerzas representativas del uso real del sistema.

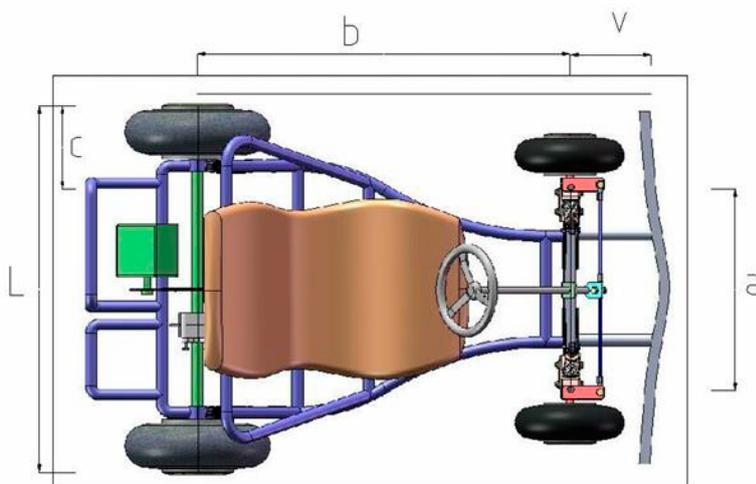
Simulación y Evaluación: Análisis de esfuerzos equivalentes (Von Mises), deformaciones totales y factor de seguridad.

### 3. RESULTADOS

Una vez establecida la metodología para el cálculo de las longitudes y ángulos involucrados en el diseño del sistema de dirección, se procede a la validación del diseño conceptual. Esta etapa tiene como objetivo verificar si la configuración propuesta cumple con los criterios de desempeño, asegurando así su viabilidad en términos de maniobrabilidad y estabilidad (Mirone, 2010). Para ello, se analizaron los parámetros clave a partir de la siguiente Figura 1, la cual representa la geometría de dirección conceptual desarrollada en la fase inicial del diseño.

**Figura 1**

*Geometría conceptual del sistema de dirección del Go kart eléctrico.*



La figura presentada muestra el planteamiento inicial de las cotas fundamentales para el cálculo de los parámetros geométricos del sistema de dirección, incluyendo longitudes y ángulos clave. A partir de esta representación, se observa que la longitud de la barra coincide con la longitud de vía. Esta condición se debe a la ausencia de un ángulo de inclinación en los pernos que fijan las manguetas, lo que influye en la geometría y comportamiento del sistema de dirección.

- En el presente diseño, se define como voladizo ( $v$ ) la distancia entre el eje de la rueda y el extremo de la defensa del vehículo.
- La distancia entre pivotes o vía ( $a$ ) se ha determinado como menor al ancho total del vehículo y ha sido acotada en la parte frontal.

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

- La distancia entre ejes o batalla (b) se representa en la vista lateral del vehículo, constituyendo un parámetro fundamental en el análisis de estabilidad y maniobrabilidad.
- El ancho total (L) se ha acotado en la parte trasera del vehículo, junto con la distancia (c) que existe entre el pivote de giro de la rueda y la parte lateral del chasis, específicamente en la zona de las ruedas traseras.

Este planteamiento inicial establece la configuración geométrica del sistema de dirección antes de realizar su análisis detallado desde un enfoque teórico. A partir de este punto, todos los cálculos y análisis se fundamentan en el diseño conceptual, permitiendo la posterior validación y ajuste de los componentes de la dirección. Particularmente, se presta especial atención a la geometría de la mangueta, las longitudes de la biela y la barra de acoplamiento, así como a la evaluación de los ángulos críticos que influyen en el comportamiento dinámico del sistema.

**Tabla 1**

*Parámetros geométricos principales del sistema de dirección del Go kart eléctrico.*

Nomenclatura	Nombre	Valor	Unidades
<b>a</b>	Vía	684	mm
<b>b</b>	Batalla	1060	mm
<b>L</b>	Ancho del vehículo	1050	mm
<b>v</b>	Voladizo	220	mm

### 3.1. Cálculos para determinar el ángulo de giro

El radio de giro máximo de un vehículo debe garantizar una maniobrabilidad eficiente. Para ello, la circunferencia descrita por las llantas delanteras suele tener un diámetro aproximado de cuatro veces la batalla del vehículo. Según Manuel Cascajosa, autor del libro *Ingeniería de Vehículos*, el ángulo máximo de giro, denotado como  $\alpha$ , generalmente oscila entre  $35^\circ$  y  $45^\circ$ , asegurando así una adecuada maniobrabilidad. Además, el ángulo de giro de las ruedas debe alcanzar aproximadamente  $10^\circ$  antes de llegar al ángulo máximo posible, lo que ocurre cuando una de las bielas se alinea con la barra de acoplamiento. Para ello se inicia determinando el ángulo de giro alfa ( $\alpha$ ) como se puede observar a continuación:

$$c = \frac{L - a}{2} = \frac{1050 - 684}{2} = 183 \text{ mm}$$

$$e = \sqrt{c^2 + v^2} = \sqrt{200^2 + 220^2} = 286,16 \text{ mm}$$

$$f = \sqrt{e^2 + Re^2 - 2 * e * Re * \cos(90 - (\Omega + \varphi))} = 2116,45 \text{ mm}$$

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

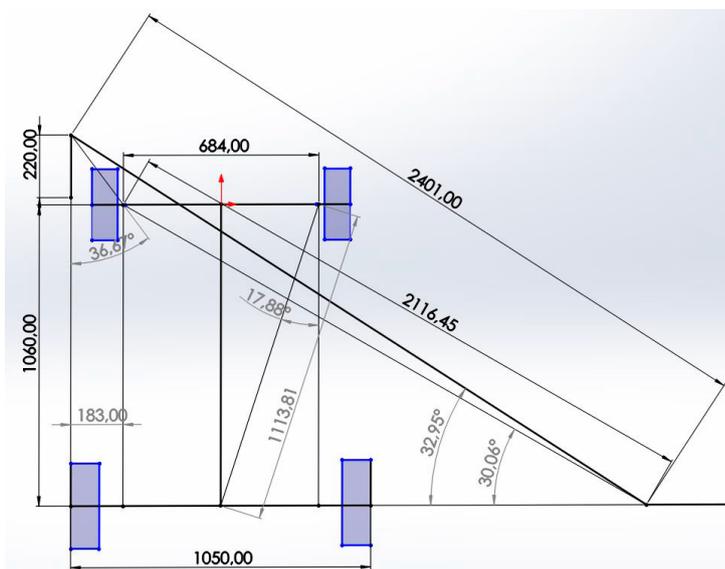
$$\alpha = (\varphi) - \sin^{-1} \left( \frac{e}{f} * \sin(90 - (\Omega + \varphi)) \right) = 30,06^\circ$$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{a}{2 * b} \right) = 17,88^\circ$$

"El ángulo  $\alpha$  obtenido no supera el límite máximo de giro de  $35^\circ$ , conforme a lo establecido en el libro Ingeniería de Vehículos del autor previamente mencionado. Con base en los cálculos realizados, la geometría resultante del sistema de dirección se presenta a continuación:

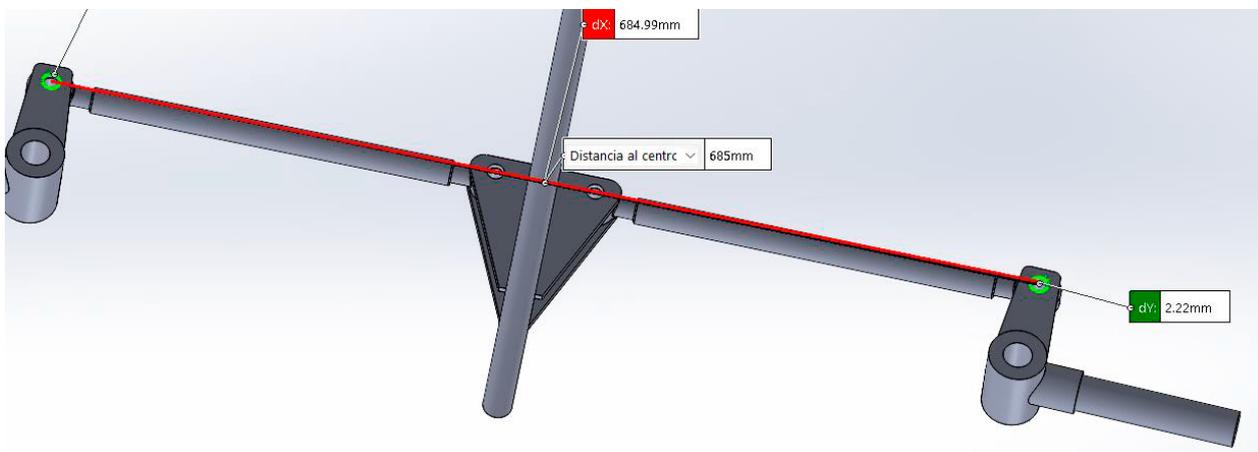
**Figura 2**

Representación geométrica del sistema de dirección con ángulos de giro del go kart eléctrico.



**Figura 3**

Modelo del sistema de dirección con medición de la barra de acoplamiento.



Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

### **3.2.1. Ángulo de Caída o Camber**

En el presente diseño, el ángulo de caída o camber se ha considerado ligeramente positivo, tomando en cuenta la flexibilidad del chasis y su comportamiento bajo carga. La finalidad de esta configuración es que, al momento de soportar el peso del piloto, el sistema alcance un camber neutral, optimizando la estabilidad y el desgaste uniforme de los neumáticos.

Dado que el estudio se encuentra en la fase de diseño y modelado, la determinación del camber óptimo se realiza mediante simulaciones computacionales y análisis teórico, en lugar de mediciones experimentales. Para ello, se consideran parámetros como la rigidez del chasis, el desplazamiento dinámico de la suspensión y la distribución de carga en las ruedas.

El diseño del chasis contempla un camber positivo de  $1^\circ$ , basado en referencias de vehículos similares y recomendaciones de ingeniería de competencia. Aunque en algunos tipos de chasis homologados es posible modificar esta inclinación, en la presente configuración no se contempla un sistema ajustable, por lo que la geometría inicial debe garantizar un desempeño óptimo en distintas condiciones operacionales.

### **3.2.2. Ángulo de Salida**

Para el diseño del sistema de dirección, el ángulo de salida ha sido establecido en  $11^\circ$ , tomando como referencia configuraciones utilizadas en chasis de alto desempeño, como los de la marca Birel. Esta inclinación tiene un impacto significativo en la estabilidad direccional, la respuesta del vehículo en curva y la recuperación de alineación de las ruedas delanteras.

Dado que el estudio se encuentra en fase de diseño y modelado, la selección del ángulo de salida se fundamenta en criterios de dinámica vehicular y en la optimización de la geometría de dirección. A diferencia de algunos chasis homologados que permiten ajustes en este parámetro, en la configuración propuesta no se contempla un sistema de ajuste, por lo que la geometría inicial debe ser diseñada para garantizar un comportamiento adecuado bajo diversas condiciones operacionales.

### **3.2.3. Ángulo de Avance o Caster**

En el diseño del sistema de dirección, se ha considerado un ángulo de avance positivo, dado que el vehículo posee tracción trasera. Esta configuración permite mejorar la estabilidad direccional y facilitar el retorno de las ruedas a la posición neutral después de una maniobra.

Los valores de ángulo de avance óptimos en función de las condiciones del suelo se han determinado con base en referencias de ingeniería vehicular:

- Condición seca:  $18^\circ$
- Condición húmeda:  $23^\circ$

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

En algunos chasis con configuraciones ajustables, el ángulo de avance o caster puede modificarse para optimizar la respuesta direccional según las condiciones de la pista. Sin embargo, en el presente diseño, se ha establecido un caster fijo de 18°, basado en la configuración utilizada en chasis de alto desempeño como el Birel. Esta selección responde a un balance entre estabilidad y facilidad de maniobra, garantizando un desempeño consistente sin necesidad de ajustes adicionales.

### 3.2. Análisis estático de columna de dirección

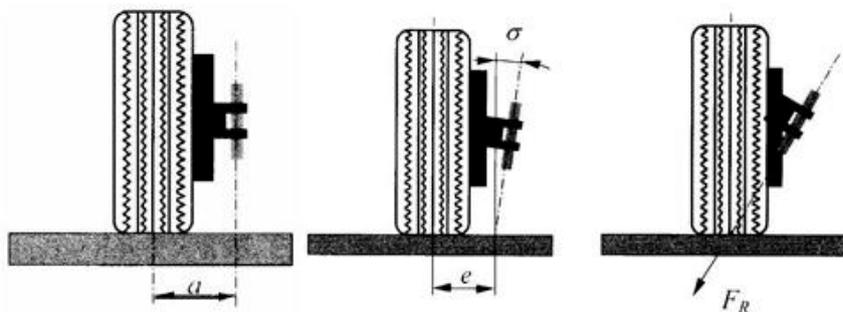
#### 3.2.1. Ángulo de salida o pivote

En el diseño del sistema de dirección, la principal función del ángulo de salida del pivote es reducir el esfuerzo requerido en el volante para orientar las ruedas de dirección de manera eficiente.

El par de torsión necesario para girar las ruedas está determinado por la resistencia al rodamiento del neumático, expresado como el producto de la fuerza de rozamiento ( $F_r$ ) y la distancia de aplicación ( $d$ ), es decir:  $T = F_r \cdot d$ .

Figura 4

Representación del ángulo de caída (camber) y su influencia en el contacto del neumático con el suelo.



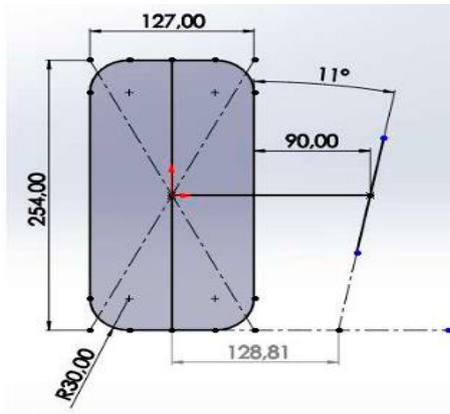
Dado que el objetivo del diseño es minimizar el esfuerzo del conductor, la distancia  $d$  debe mantenerse dentro de un rango óptimo para reducir el par de torsión necesario en la dirección.

Para definir este parámetro en el modelo diseñado, se han considerado las dimensiones del neumático delantero, con un diámetro de 10 pulgadas (254 mm) y un ancho de 5 pulgadas (127 mm). La geometría estructural establece una distancia de 90 mm entre el perno rey y el lado vertical interno del neumático, lo que permite un ángulo de salida del pivote de 11°, asegurando una respuesta estable y predecible en la dirección del vehículo.

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

**Figura 5**

*Representación geométrica del neumático delantero y configuración del ángulo de salida*



### 3.2.2. Análisis del Par de torsión aplicado en la columna

En el diseño del sistema de dirección, el par de torsión resistente que debe vencerse para girar las ruedas delanteras se expresa mediante la ecuación:  $T = N * \mu * d$

Donde:

- T: Par resistente necesario para generar el giro del neumático.
- N: Carga vertical sobre el eje delantero.
- $\mu$ : Coeficiente de rozamiento entre el neumático y la superficie de contacto.
- d: Distancia entre el centro de contacto del neumático con el suelo y el eje de pivote, valor definido en 125 mm.

Para garantizar un diseño eficiente, se ha considerado la distribución de pesos recomendada para Go Karts de competición, la cual establece que el 43 % del peso total del vehículo debe recaer sobre el eje delantero y el 57 % sobre el eje trasero.

- Peso total del Go Kart = 1850 N
- Peso del eje delantero = 1850 N \* 0,43 = 795,5 N
- Coeficiente de rozamiento entre neumático y superficie del suelo = 0,7

Con estos datos planteados se proceden a determinar el par de torsión en las ruedas, como se puede observar a continuación:

$$T = 795,5 \text{ N} * 0,7 * 0,125 \text{ m} = 69,60 \text{ Nm}$$

Este valor representa el torque necesario para vencer la resistencia al giro del neumático, tomando en cuenta la carga vertical sobre el eje delantero, el coeficiente de rozamiento con la

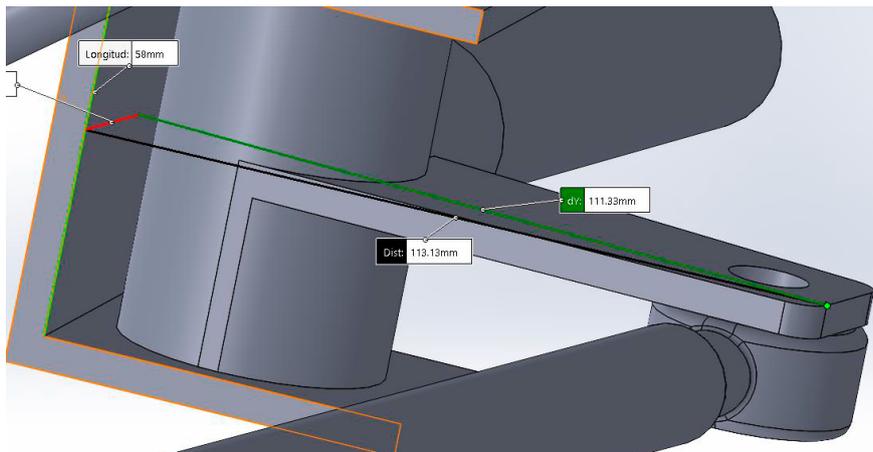
Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

pista y la distancia desde el punto de contacto del neumático hasta el eje de pivote. Para garantizar una dirección eficiente, la fuerza que deben ejercer las barras de acoplamiento o varillajes sobre la mangueta para vencer este par resistente se obtiene mediante la ecuación:

$$F_{vr} = \frac{T}{d_{mn}}$$

**Figura 6**

*Distancia de la mangueta con la unión del varillaje*



Donde:

- d : Distancia de mangueta con la unión del varillaje

Dado que el objetivo es optimizar la maniobrabilidad y minimizar el esfuerzo requerido en el volante, el diseño del sistema de dirección se basa en esta distribución de cargas para determinar el par de torsión esperado en distintas condiciones de operación.

$$F_{vr} = \frac{69,60 \text{ Nm}}{113 \text{ mm}} = 616 \text{ N}$$

Se interpretan y analizan los resultados del estudio en el contexto de la literatura existente y se exploran sus implicaciones. Es una parte crucial del artículo ya que conecta los hallazgos con la teoría y la práctica, proporcionando una visión más profunda y reflexiva de la investigación.

### 3.3. Simulación del sistema de dirección

Para la simulación se utiliza el Software SolidWorks para el modelado 3D de sólidos geométricos el cual nos permitió simular cuerpos bajos condiciones de carga estructural y también térmicas.

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

Cuando realizamos una simulación en el proceso de diseño, se consideraron diversos factores clave. Entre ellos, se encuentran las propiedades físicas de cada componente, la forma en que interactúan entre sí (especialmente si forman parte de un ensamblaje) y las diferentes cargas que pueden actuar sobre ellos en términos de tipo e intensidad. Los resultados de la simulación permiten analizar múltiples escenarios dentro del diseño, lo que facilita la comparación de diversas configuraciones bajo distintas condiciones de carga. Esto brinda la posibilidad de evaluar diferentes materiales para la fabricación, así como variaciones en la geometría y construcción de los cuerpos, asegurando así un diseño optimizado y adaptado a los requerimientos específicos del proyecto.

### 3.3.1. Esquema de la Geometría

Para este punto se utilizaron las diversas herramientas que nos ofrece el software aplicando diversas operaciones como: extruido, revoluciones, barridos, cortes, entre otros. El ensamble final se puede observar en la siguiente figura.

**Figura 7**

*Ensamblaje 3D del sistema de dirección del Go-Kart eléctrico*



### 3.3.2. Descripción de la simulación bajo las condiciones aplicadas

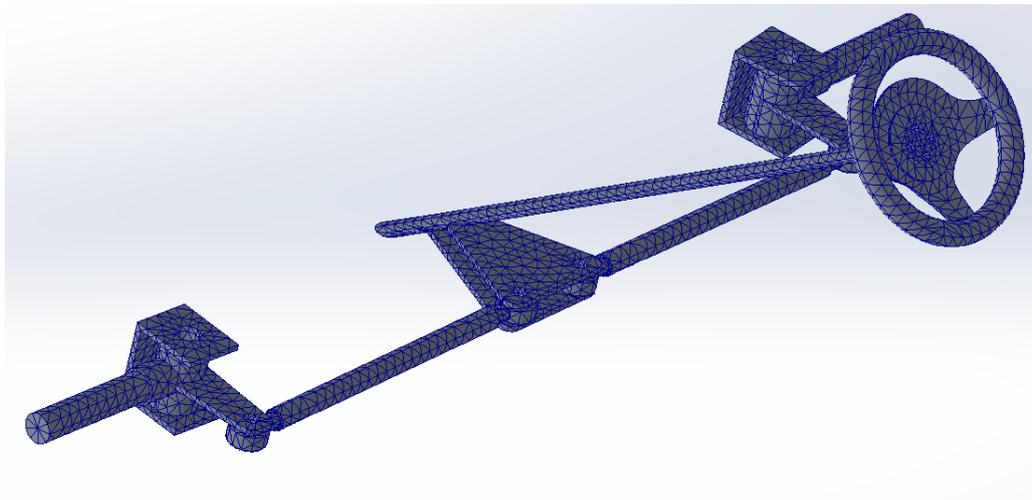
Una vez definida la geometría del modelo, el siguiente paso es la generación de la malla, la cual determina la cantidad de elementos y nodos que conforman la pieza o ensamblaje. Un mayor número de elementos permite obtener resultados más detallados y precisos, pero también aumenta la demanda de recursos computacionales. En este estudio, se analizan dos componentes principales: la baranda y el barril, los cuales están fabricados con acero estructural y caucho triturado, respectivamente. Para elegir el tipo de malla más adecuado, es fundamental considerar varios factores, como:

- Tiempo necesario para la generación de la malla.
- Consumo de recursos computacionales durante el análisis.
- Efecto de la difusión numérica, que puede influir en la precisión de los resultados.

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

**Figura 8**

*Mallado del sistema de dirección del Go-Kart para análisis por elementos finitos*



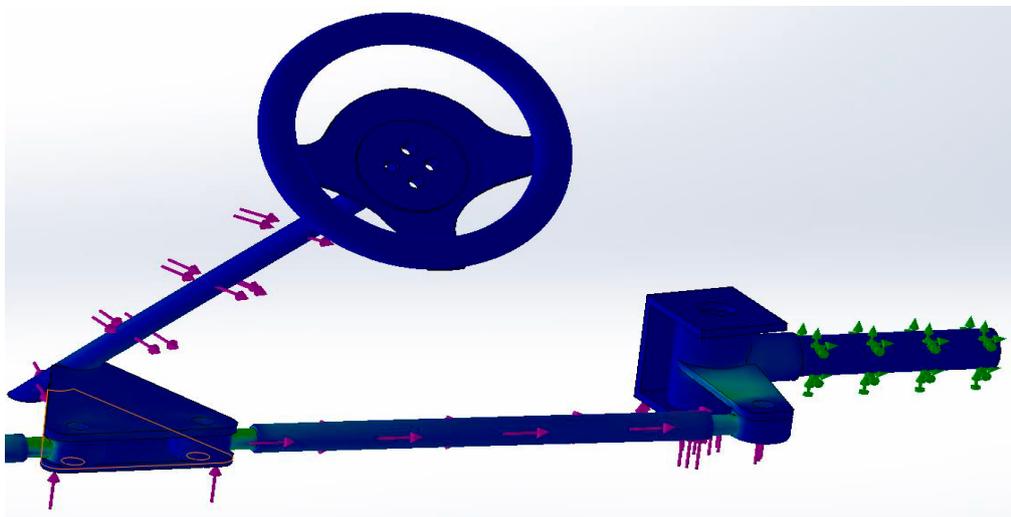
### 3.3.3. Datos para la simulación

Los parámetros que el software utiliza para llevar a cabo la simulación son los siguientes:

- Torsión: 69,60 Nm
- Fuerza: 616 N
- Peso de los ejes delanteros: 795.5 N

**Figura 9.**

*Aplicación de condiciones de carga y torsión en el sistema de dirección para simulación estructural*



Aplicando estos parámetros al ensamble del sistema de dirección se analiza los resultados obtenidos que nos permite verificar si diseño estructural y modelo analítico es el óptimo y presente buenas condiciones mecánicas.

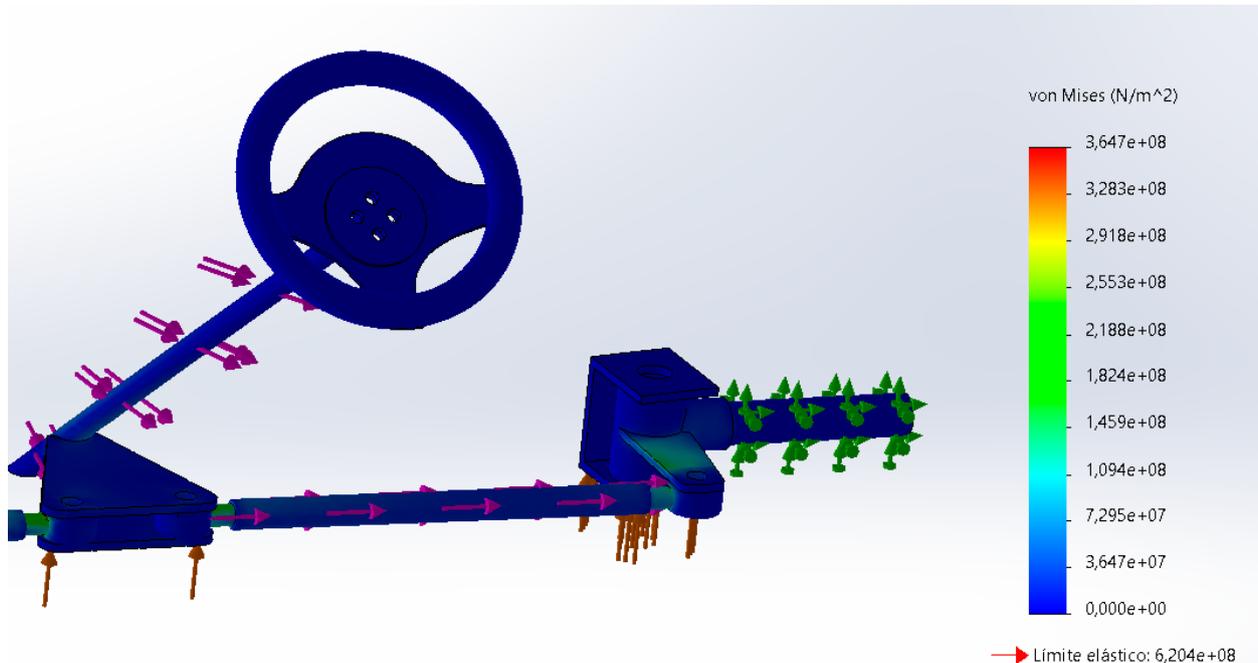
### 3.4. Esfuerzo Equivalente o Von Mises

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

Los esfuerzos resultantes en el momento de efectuar las cargas tanto de fuerza como torsión muestran que el mayor esfuerzo se encuentra en las barras que es 3,64 Mpa, pero analizando el límite elástico del material que equivale a 6,2 MPa no sugiere que exista la posibilidad de sufrir una fractura.

**Figura 10**

*Análisis de Esfuerzo Equivalente o Von Mises*



La distribución de esfuerzos muestra que las zonas más exigidas corresponden a las barras de acoplamiento y la base de fijación de la columna de dirección, lo cual es esperable debido a la transmisión de esfuerzos en la dirección del vehículo. Sin embargo, la carga máxima está bien distribuida, lo que sugiere un diseño equilibrado y optimizado para resistir esfuerzos mecánicos sin comprometer su integridad estructural. Adicionalmente, el análisis computacional confirma que el diseño cumple con los criterios de seguridad estructural, y se mantiene dentro de un margen de seguridad aceptable, evitando el riesgo de fracturas o fallas prematuras.

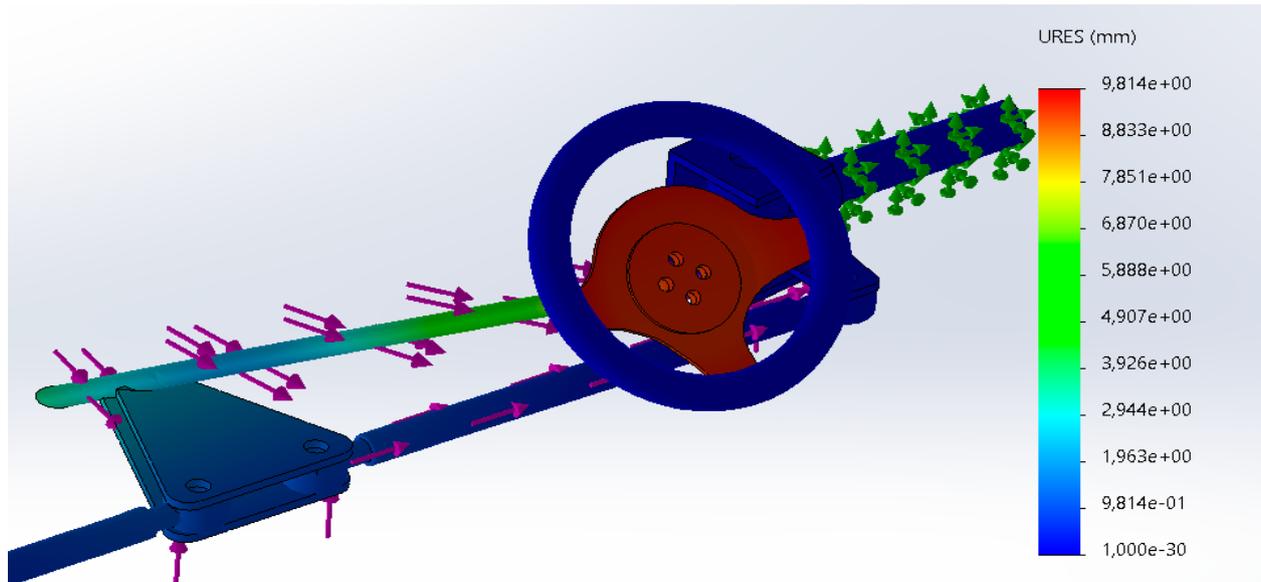
### 3.4.1. Deformación total

Los resultados obtenidos en el análisis de desplazamiento resultante (URES) confirman que la deformación en el sistema de dirección es mínima y se encuentra dentro de los márgenes aceptables para su correcto funcionamiento. La escala de colores muestra que la máxima deformación registrada es de aproximadamente 9.814 mm, localizada en la zona del volante, mientras que las partes estructurales clave, como las barras y los soportes, presentan deformaciones significativamente menores.

**Figura 11**

*Análisis de simulación de deformación*

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.



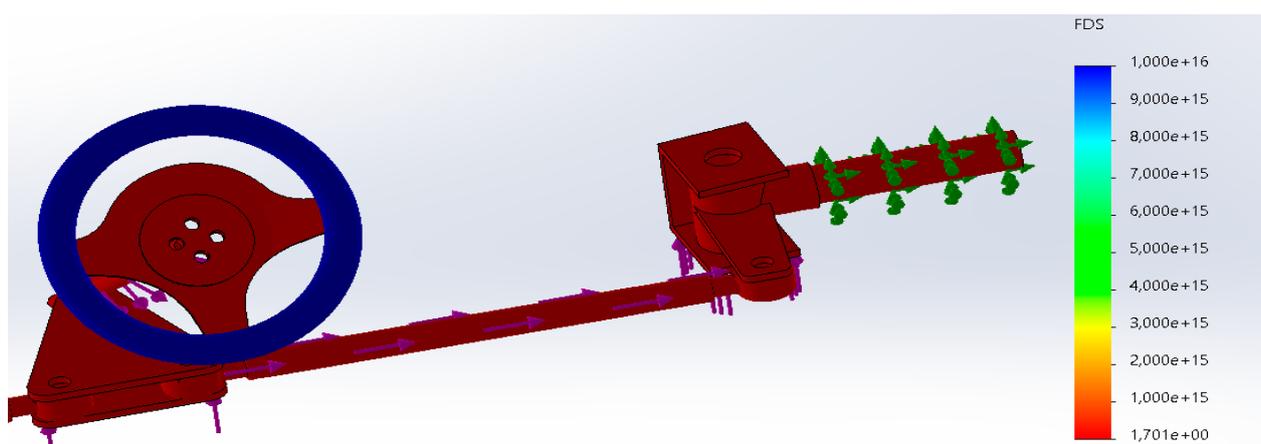
El análisis de deformaciones confirma que el diseño del sistema de dirección es estructuralmente estable y adecuado para su implementación. La distribución de desplazamientos indica que las zonas críticas del sistema no experimentan deformaciones que comprometan su funcionamiento, asegurando una operación precisa y segura del vehículo. Este estudio respalda la viabilidad del diseño y su capacidad para operar eficientemente sin riesgos de falla estructural.

### 3.4.2. Factor de seguridad

Los resultados del análisis del Factor de Seguridad (FDS) confirman que el diseño del sistema de dirección cumple con los criterios de resistencia estructural y estabilidad mecánica, garantizando un funcionamiento seguro bajo las condiciones de carga evaluadas.

**Figura 11**

*Análisis de simulación de factor de seguridad*



Dado que el FDS supera ampliamente el valor crítico recomendado en ingeniería estructural (FDS > 1.5 o 2 dependiendo de la aplicación), se puede afirmar que el sistema de dirección es seguro

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

y no presenta riesgo de colapso estructural bajo las condiciones de operación definidas en este análisis.

#### 4. DISCUSION

El diseño del sistema de dirección del Go Kart eléctrico ha sido validado mediante simulación computacional en SolidWorks, asegurando resistencia estructural, estabilidad direccional y optimización del desempeño mecánico (Wu et al., 2020). El análisis de esfuerzos de Von Mises confirma que el máximo esfuerzo es 3,64 MPa, muy por debajo del límite elástico del material (6,2 MPa), lo que garantiza seguridad estructural sin riesgo de fractura. Además, el desplazamiento máximo de 9,814 mm se localiza en el volante, mientras que las barras y fijaciones presentan mínima deformación, asegurando precisión en la dirección. El Factor de Seguridad (FDS) obtenido es superior al mínimo recomendado ( $FDS > 2$ ), lo que indica que el sistema no presenta riesgo de falla y permite oportunidades de optimización en peso y materiales. Los parámetros geométricos han sido estratégicamente seleccionados: ángulo de giro ( $\alpha < 35^\circ$ ), camber positivo ( $1^\circ$ ), caster ( $18^\circ$ ) y ángulo de salida ( $11^\circ$ ), asegurando maniobrabilidad, estabilidad y control direccional. El par de torsión calculado (70,37 Nm) confirma que el sistema requiere un esfuerzo moderado del conductor sin comprometer la respuesta de la dirección.

El análisis estructural también evidencia que las zonas críticas están bien distribuidas, evitando concentraciones de esfuerzo que puedan generar fatiga prematura. Se ha confirmado que los puntos de fijación y unión mantienen su integridad bajo carga, garantizando un comportamiento óptimo a lo largo del ciclo de vida del sistema. La importancia del uso de herramientas de simulación radica en su capacidad para optimizar diseños antes de su fabricación, reduciendo costos y tiempos de desarrollo. La validación mediante modelado computacional permite anticipar posibles fallas y realizar mejoras en la geometría sin necesidad de pruebas físicas extensivas. En conclusión, el sistema de dirección analizado es seguro, funcional y eficiente, con un diseño optimizado para su aplicación en un Go Kart eléctrico de alto desempeño.

#### 5. CONCLUSIONES

El análisis estructural y funcional del sistema de dirección del Go Kart eléctrico ha permitido validar su viabilidad técnica, garantizando que el diseño propuesto cumple con los criterios de resistencia mecánica, estabilidad direccional y seguridad estructural. Mediante la aplicación de simulación computacional en SolidWorks, se logró evaluar con precisión la distribución de esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad bajo condiciones de carga realistas. El estudio del esfuerzo equivalente de Von Mises confirmó que el sistema soporta un esfuerzo máximo de 3,64 MPa, un valor significativamente inferior al límite elástico del material (6,2 MPa). Esto indica que el diseño se encuentra dentro de los márgenes de seguridad, sin riesgo de deformación plástica o fractura estructural en condiciones normales de operación. La correcta distribución de esfuerzos en las barras de acoplamiento y la base de fijación demuestra que el diseño está bien equilibrado y optimizado para resistir las cargas aplicadas.

En cuanto a la deformación total (URES), la simulación reveló que la máxima deflexión registrada

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

es de 9,814 mm, localizada en el volante, lo que es esperable debido a su función de control. Sin embargo, los elementos estructurales clave del sistema presentan valores de deformación mínimos, garantizando que la dirección mantendrá precisión y estabilidad sin afectar la maniobrabilidad del vehículo. El análisis del Factor de Seguridad (FDS) confirmó que el diseño es altamente seguro, con valores que superan ampliamente el umbral recomendado en ingeniería estructural ( $FDS > 2$ ). Esto asegura que la estructura no presenta riesgo de colapso ni fatiga prematura. No obstante, un FDS elevado sugiere que el diseño podría optimizarse en términos de reducción de peso y selección de materiales, sin comprometer la resistencia mecánica.

La configuración geométrica del sistema de dirección ha sido diseñada siguiendo principios de dinámica vehicular, garantizando una óptima maniobrabilidad y estabilidad. Se validó que el ángulo de giro  $\alpha$  ( $< 35^\circ$ ), el ángulo de salida ( $11^\circ$ ), el camber positivo ( $1^\circ$ ) y el caster ( $18^\circ$ ) cumplen con los estándares de diseño, asegurando una dirección precisa y un adecuado retorno de las ruedas tras un giro. El par de torsión calculado (70,37 Nm) confirma que el sistema de dirección permite un manejo eficiente, con un esfuerzo moderado del conductor sin afectar la capacidad de respuesta del vehículo. Se ha optimizado la relación entre la carga aplicada y la resistencia al giro, asegurando un balance ideal entre estabilidad y facilidad de manejo.

Finalmente, el uso de herramientas de simulación computacional ha sido fundamental en este estudio, permitiendo analizar múltiples escenarios antes de la fabricación del prototipo. La validación mediante SolidWorks ha demostrado la importancia de estas técnicas en el diseño de sistemas mecánicos, optimizando el rendimiento estructural y reduciendo costos de producción. El sistema de dirección diseñado es seguro, eficiente y estructuralmente estable, cumpliendo con los requerimientos técnicos y funcionales de un Go Kart eléctrico de alto desempeño. Se recomienda continuar con estudios de análisis dinámico y fatiga estructural, así como la implementación de pruebas físicas para verificar la precisión de los modelos computacionales en condiciones reales.

## 6. REFERENCIAS

Abhiteja, P., Kumar, K. S., Krishna, K. S., & Kumar, Y. A. (2019). Design, simulation of steering system for a go kart vehicle. AIP Conference Proceedings,

Anjekar, A., & Gurway, S. (2024). A compressive approach in design and analysis of GO-KART. In Recent Advances in Materials Manufacturing and Machine Learning (pp. 367-378). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003450252-44>

Dere, A. A., Singh, M., Thakan, A., Kumar, R., & Singh, H. (2021). Design optimization of go-kart chassis frame using modal analysis. Lecture Notes in Mechanical Engineering,

Karthi Vinith, K. S., & Sathiamurthi, P. (2020). Design and fabrication of adaptive spoiler for go-kart vehicles [Article]. International Journal of Scientific and Technology Research, 9(3), 2044-2049. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85082516659&partnerID=40&md5=baaeef862947aec240de2cb85e172440>

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

Krishnamoorthi, S., Prabhu, L., Shadan, M. D., Raj, H., & Akram, N. (2020). Design and analysis of electric Go-Kart. *Materials Today: Proceedings*,

Mirone, G. (2010). Multi-body elastic simulation of a go-kart: Correlation between frame stiffness and dynamic performance [Article]. *International Journal of Automotive Technology*, 11(4), 461-469. <https://doi.org/10.1007/s12239-010-0057-6>

Rawat, K., Kumar, D., Kumar, R., Bharadwaj, D., Soti, V., Rathore, G., Biswas, D., & Singh, P. (2023). Structural optimisation of go kart chassis with basic electronic driver assistance systems. 2023 2nd International Conference on Paradigm Shifts in Communications Embedded Systems, Machine Learning and Signal Processing, PCEMS 2023,

Razak, M. S. A., Ahmad, F., Hasan, M. H. C., & Jamaluddin, H. (2023). Dynamic Testing of In-Wheel Motor Based Electric Vehicle in Longitudinal Direction [Article]. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 20(3), 10574-10594. <https://doi.org/10.15282/ijame.20.3.2023.02.0816>

Srivastava, J. P., Suryateja, K., Kumar, P., Gangadhar Reddy, G., Moizuddin, M., Kumar, S., & Jain, A. K. (2024). Influence of Track Width, Wheel Base on Turning Radius and Static Behavior of Stub Axle, C-Clamp in Go-Karts Steering System. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*,

Wu, C. H., Lin, W. C., & Wang, K. S. (2020). Mechatronics and remote driving control of the drive-by-wire for a go kart [Article]. *Sensors (Switzerland)*, 20(4), Article 1216. <https://doi.org/10.3390/s20041216>

Yuvaraaj Kumar, S., Srivarshani, P., Nitin Sanjeeth, S. V., & Sudhakar, M. (2024). Design and Optimization of the Steering System in Go-Kart. *SAE Technical Papers*,

Bautista, M., Ulcuango, C., Merino, M., & Ladino, A. (2025). Analysis of the technical characteristics for the design of the electric Go Kart steering system. *Revista Investigación Tecnológica IST Central Técnico*.

## ANALYSIS OF THE BENEFITS OF PERFORMING PREVENTIVE MAINTENANCE ON HIGH-VOLTAGE BATTERIES OF HYBRID VEHICLES

## ANÁLISIS DE LOS BENEFICIOS AL REALIZAR MANTENIMIENTOS PREVENTIVOS EN BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS

Eduardo Francisco Ávila Salazar<sup>1</sup>[0000-0003-4235-9604], José Andrés Beltrán Ruiz<sup>2</sup>[0000-0003-4235-9604], Ángel Martín García Tulcán<sup>3</sup>[0000-0003-4235-9604], Stiven Edgar Suarez Santillán<sup>4</sup>[0000-0003-4235-9604]

<sup>1</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [eavila@istct.edu.ec](mailto:eavila@istct.edu.ec)

<sup>2</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [segundoautor@istct.edu.ec](mailto:segundoautor@istct.edu.ec)

<sup>3</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [amgarciatulca@istct.edu.ec](mailto:amgarciatulca@istct.edu.ec)

<sup>4</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [sesuarezsantillan@istct.edu.ec](mailto:sesuarezsantillan@istct.edu.ec)

Recibido: 24/03/2025

Aceptado: 24/05/2025

Publicado: 30/06/2025

### RESUMEN

El presente estudio analiza la importancia del mantenimiento preventivo en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos, destacando su impacto en la eficiencia, seguridad y prolongación de la vida útil del sistema de almacenamiento energético. Se abordan los diferentes tipos de baterías utilizadas, sus características técnicas, procedimientos de mantenimiento y estrategias de optimización. La investigación incluye un análisis comparativo entre la eficiencia de la batería HV encontrada en el Audi Q5 antes y después del mantenimiento realizado evaluando costos y beneficios asociados. Los resultados obtenidos muestran que la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo contribuye a reducir la degradación de las baterías, minimizando la pérdida de capacidad y aumentando la eficiencia energética. Asimismo, se identifican beneficios económicos al disminuir la necesidad de reemplazo prematuro y reducir los costos operativos a largo plazo. La metodología utilizada combina una revisión práctica y supervisada con equipos especializados. En conclusión, el mantenimiento preventivo se presenta como una estrategia clave para mejorar la seguridad, eficiencia y durabilidad de las baterías de alto voltaje, recomendándose la adopción de protocolos estandarizados y la capacitación del personal técnico especializado.

Ávila, E. Beltrán, J., García, A., & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

**Palabras clave:** Baterías de alto voltaje; mantenimiento preventivo; vehículos híbridos; eficiencia energética; seguridad vehicular.

## ABSTRACT

The present study analyzes the importance of preventive maintenance in high-voltage batteries of hybrid vehicles, highlighting its impact on efficiency, safety, and the extension of the energy storage system's lifespan. It addresses the different types of batteries used, their technical characteristics, maintenance procedures, and optimization strategies. The research includes a comparative analysis of the efficiency of the HV battery found in the Audi Q5 before and after the maintenance process, evaluating associated costs and benefits. The results obtained show that implementing preventive maintenance strategies helps reduce battery degradation, minimizing capacity loss and increasing energy efficiency. Additionally, economic benefits are identified by decreasing the need for premature replacement and reducing long-term operating costs. The methodology used combines a practical and supervised review with specialized equipment. In conclusion, preventive maintenance emerges as a key strategy to improve the safety, efficiency, and durability of high-voltage batteries. The adoption of standardized protocols and the training of specialized technical personnel are recommended to enhance overall system performance.

**Index terms:** High-voltage batteries; preventive maintenance; hybrid vehicles; energy efficiency; vehicle safety.

## 1. INTRODUCCIÓN.

El desarrollo tecnológico en la industria automotriz ha impulsado la adopción de vehículos híbridos, cuya eficiencia depende en gran medida del estado de las baterías de alto voltaje. Estas baterías, mayoritariamente de iones de litio, requieren estrategias de mantenimiento preventivo para evitar la degradación prematura, reducir costos operativos y mejorar el rendimiento general del vehículo (Jama Espinoza, 2024). Sin embargo, la falta de procedimientos especializados limita la implementación de técnicas de mantenimiento efectivas. Este estudio busca evaluar la efectividad de distintos métodos de mantenimiento, su impacto en la vida útil de las baterías y las implicaciones económicas y ambientales (Cortes Tenesaca & Feijoo Ordoñez, 2024).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS / DESARROLLO

### 2.1 Materiales

Se utilizó los siguientes materiales:

- Vehículo: Audi Q5.
- Scanner
- Multímetro
- Cargador de baterías

Ávila, E. Beltrán, J., García, A., & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

Se utilizó las siguientes herramientas y equipos de protección:

- Guantes aislantes clase 0
- Caja de herramientas aislada
- Caja de herramientas
- Llaves torx
- Alfombra aislante

## 2.2. Vehículo híbrido didáctico AUDI Q5

Figura 1

*Audi Q5 Hybrid*



*Nota: Vehículo híbrido Audi Q5 empleado para el mantenimiento.*

## 2.2 MÉTODOS

### 2.2.1 Metodología de experimentación

La metodología de experimentación se realizará siguiendo el siguiente procedimiento:

La batería de Ion de litio será sometida a una prueba durante 5 días, ubicada en un vehículo marca AUDI modelo Q5 año 2011. El cual fue elegido como objeto de prueba en esta investigación, cabe recalcar que la metodología de prueba puede ser aplicada en distintos tipos de vehículos híbridos.

Se utilizó el equipo de diagnóstico “scanner automotriz” conectado en el vehículo para poder determinar parámetros de funcionamiento del motor y de la batería tales como temperatura de motor, revoluciones del motor, temperatura de la batería, voltaje de la batería, SOC, corriente de la batería, entre otros aspectos.

La ruta del vehículo dentro del Instituto Superior Universitario “Central Técnico”, la cual comienza desde el Área de Mecánica Automotriz hasta el área de Área de Contabilidad.

Ávila, E. Beltrán, J., García, A., & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

**Figura 2**

*Mapa de trayecto para pruebas*



*Nota: Trayecto utilizado para las pruebas que se realizaron en estudio del automóvil Audi Q5.*

El vehículo realizó 10 km diarios por la ruta trazada enfrentándose a diferentes tipos de modos de conducción (subidas, bajadas, rápido y despacio). Al culminar el primer día se obtuvieron los datos recogidos con el scanner en el vehículo y repetiremos esta misma prueba por 5 días para comparar y sacar un promedio de dicha información.

### **Preparación y Seguridad**

Antes de iniciar cualquier intervención en el sistema eléctrico del vehículo híbrido, es fundamental seguir estrictamente las normas de seguridad para prevenir riesgos eléctricos y mecánicos.

### **Ubicación y Acondicionamiento del Área de Trabajo**

Se ubicó el vehículo en un espacio seguro, delimitado con una cerca de seguridad, restringiendo el acceso a personal no autorizado, se aseguraron mesas de trabajo cercanas para la colocación de herramientas y componentes desmontados.

Como parte del protocolo de seguridad, la llave del vehículo se almacenó a una distancia de aproximadamente 20 metros, evitando cualquier activación accidental del sistema híbrido (Chuisaca Buestan & Zúñiga Cabrera, 2024).

### **Desconexión del Sistema y Descarga de Energía**

Ávila, E. Beltrán, J., García, A., & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

Se inició el procedimiento desconectando el jumper de la batería auxiliar de 12V, permitiendo su descarga durante 20 minutos para disipar cualquier carga residual en el sistema eléctrico.

Este tiempo de espera es fundamental para garantizar que no haya presencia de tensión residual en los cables de alta tensión y en los sistemas electrónicos sensibles.

### **Equipamiento de Protección Personal (EPP)**

El personal técnico se equipó con los siguientes elementos de seguridad certificados:

- Calzado de seguridad con punta de acero, proporcionando protección contra impactos y descargas.
- Guantes aislantes Clase 0, certificados para trabajos con tensiones de hasta 1,000V, asegurando aislamiento eléctrico.
- Mandil blanco perteneciente a la carrera Mecánica Automotriz, utilizado como barrera adicional contra contaminantes y descargas estáticas.
- Alfombra aislante de seguridad colocada en el piso del área de trabajo, evitando la transmisión de corriente en caso de contacto accidental con componentes de alta tensión.

Adicionalmente, se verificó la disponibilidad y funcionalidad de los equipos de medición eléctrica, incluyendo un multímetro digital Automotriz, herramientas aisladas certificadas y dispositivos de seguridad para la manipulación de cables de alta tensión (Cajilema Acero & Labanda Valverde, 2024).

### **Desmontaje de Accesorios y Desconexión de Baterías**

#### **1. Retiro de Accesorios Didácticos**

- Se identificaron y desconectaron todos los accesorios didácticos instalados en el vehículo con fines de aprendizaje.
- Se utilizaron llaves Torx y herramientas especializadas según la configuración de cada componente.
- Se verificó la correcta documentación y registro de los puntos de conexión para su posterior reinstalación.

#### **2. Desconexión de la Primera Batería Auxiliar (12V Pequeña)**

Se procedió a la desconexión de la batería auxiliar pequeña de 12V, siguiendo los siguientes pasos:

- 2.1. Identificación de los bornes positivo y negativo.
- 2.2. Desconexión del cable negativo (-) primero, seguido del cable positivo (+).

Ávila, E. Beltrán, J., García, A, & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

2.3. Retiro de la batería y traslado a una mesa de trabajo aislada para inspección y mantenimiento.

### **3. Desconexión del Sistema de Alta Tensión**

Se accedió a la batería de alto voltaje (HV) y se procedió a la desconexión de los cables de alta tensión.

**Precaución:** Todos los cables de alta tensión deben manipularse con herramientas aisladas.

### **4. Desmontaje del Sistema de Refrigeración y Equipos Auxiliares**

#### **4.1. Retiro del Sistema de Refrigeración**

Se desmontó el sistema de refrigeración de la batería de alto voltaje, asegurando la correcta manipulación de los siguientes elementos:

- **Conductos de ventilación**
- **Sensores de temperatura**
- **Motores de ventilación**

Se inspeccionaron los conductos para verificar la ausencia de obstrucciones y garantizar el flujo adecuado de aire en futuras reinstalaciones.

#### **4.2. Desconexión del Equipo de Sonido y Componentes Electrónicos**

Se retiró el equipo de sonido y demás dispositivos electrónicos integrados.

Se documentó la ubicación y el tipo de conectores para su posterior reensamblaje.

**Precaución:** Desconectar con cuidado los sensores y actuadores, ya que un mal manejo podría generar fallas en los sistemas electrónicos del vehículo.

### **5. Acceso y Desmontaje de la Segunda Batería Auxiliar AMG**

#### **5.1. Ubicación y Desconexión**

Con los componentes previamente retirados, se obtuvo acceso a la segunda batería auxiliar de 12V (generalmente de mayor capacidad que la primera).

Se desconectó siguiendo el mismo procedimiento que la primera batería auxiliar:

1. Desconexión del cable negativo (-).
2. Desconexión del cable positivo (+).
3. Retiro de la batería y ubicación en la mesa de trabajo junto a la primera.

Ávila, E. Beltrán, J., García, A., & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

## 6. Desmontaje y Evaluación de la Batería de Alto Voltaje (HV)

Se procedió a la desconexión completa de la **batería de alto voltaje (HV)**, asegurando la remoción de:

- Seguros mecánicos y eléctricos, garantizando su aislamiento total.
- Sensores y conexiones de monitoreo, manipulándolos con precaución para evitar daños.

Una vez desconectada, la batería HV fue desmontada del vehículo y trasladada a una mesa de trabajo aislada, donde se llevó a cabo su respectivo mantenimiento (Aguilar Espinoza & Solís Almeida, 2024).

## 7. Inspección, Limpieza y Carga de Baterías

### 7.1. Procedimiento en Baterías Auxiliares (12V)

- Se realizaron mediciones de voltaje en reposo y capacidad de carga con un multímetro digital de alta precisión.
- Como parte del mantenimiento preventivo, se procedió a la carga controlada de ambas baterías auxiliares utilizando un cargador de baterías inteligente, garantizando una carga óptima sin sobrecarga.

### 7.2. Procedimiento en Batería de Alto Voltaje (HV)

- Se llevó a cabo una limpieza integral de la batería, eliminando polvo y residuos acumulados que pudieran afectar su rendimiento térmico.
- Se analizaron los datos de diagnóstico obtenidos mediante el escáner automotriz, los cuales indicaron que la batería HV cumplía con los parámetros operativos recomendados, por lo que no fue necesario realizar una recarga.
- Se realizó la limpieza del compartimiento de la batería HV, asegurando la correcta disipación térmica y evitando acumulaciones de suciedad que pudieran interferir con su funcionamiento.

### 7.3. Verificación de Parámetros y Sustitución de Batería Auxiliar Defectuosa

Tras completar la carga de las baterías auxiliares, se efectuaron nuevas mediciones para verificar su estado. Se detectó que la batería auxiliar pequeña no cumplía con los parámetros requeridos para su correcto desempeño.

- Se procedió a su reemplazo por una nueva batería con especificaciones compatibles y certificadas según los estándares del fabricante.

### 7.4. Reinstalación de Componentes

Ávila, E. Beltrán, J., García, A., & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

Se llevó a cabo la reinstalación de todos los sistemas previamente desmontados, asegurando el correcto ensamblaje de cada componente:

1. Instalación de la batería de alto voltaje, asegurando su fijación y reconexión de los sensores.
2. Montaje de la batería auxiliar AMG, verificando la correcta polaridad en la conexión de sus terminales.
3. Reinstalación del sistema de refrigeración, asegurando la correcta colocación de conductos y ventiladores.
4. Reensamblaje del sistema de audio y demás componentes electrónicos, garantizando que todos los sensores y actuadores previamente desconectados fueran reinstalados sin errores.

Finalmente, se procedió a la reconexión de los cables de alta tensión, siguiendo el orden establecido en el protocolo de seguridad. Posteriormente, se conectó la nueva batería auxiliar y se reinstaló el jumper.

### **8. Pruebas Funcionales y Verificación Final**

- Se encendió el vehículo y se utilizó un scanner automotriz para realizar un diagnóstico completo del sistema eléctrico.
- Se verificó el correcto funcionamiento de todos los módulos electrónicos, asegurando la ausencia de códigos de error y el correcto desempeño del sistema híbrido.
- Una vez comprobado el funcionamiento óptimo del vehículo, se apagó el sistema y se desconectó nuevamente el jumper para proceder con la reinstalación de los elementos didácticos.
- Finalmente, se realizó una última conexión del jumper y una revisión general para confirmar que todos los sistemas estuvieran operativos.

Con esto, se dio por concluido el procedimiento de mantenimiento y reinstalación de baterías en el vehículo híbrido, garantizando su correcto funcionamiento y cumplimiento de los parámetros de seguridad y desempeño establecidos (Quintero, Vanessa, 2021).

### **3. RESULTADOS**

El mantenimiento de las baterías en el vehículo híbrido se llevó a cabo con éxito, asegurando su correcto funcionamiento y cumplimiento de los estándares de fábrica.

Ávila, E. Beltrán, J., García, A, & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

Tabla 1

Mantenimiento de baterías

Batería	Voltaje Inicial (V)	Condición Inicial	Acción Tomada	Voltaje Final (V)	Condición Final
Batería Auxiliar Pequeña (12V)	0.8 V	Descarga excesiva	Intento de recarga y sustitución (nueva)	12.6 V	Operativa
Batería Auxiliar AMG (12V)	3.7 V	Estado aceptable, pero con ligera pérdida de carga	Recarga controlada	12.8 V	Operativa
Batería de Alto Voltaje (HV)	299.5 V	Cumple parámetros de funcionamiento	Limpieza y verificación de sensores	300 V	Operativa

Durante el procedimiento, se realizaron mediciones, limpieza y reinstalación de todos los componentes, incluyendo el sistema de refrigeración y los sensores. Finalmente, el diagnóstico con scanner automotriz verificó la ausencia de fallos en el sistema eléctrico y las pruebas operativas confirmaron que el vehículo funcionaba correctamente. Este mantenimiento no solo garantizó la seguridad y eficiencia del sistema eléctrico, sino que también optimizó el rendimiento del vehículo, mejorando su eficiencia energética y contribuyendo a prolongar la vida útil de sus baterías.

#### 4. DISCUSIÓN

- El mantenimiento realizado en las baterías del vehículo híbrido confirmó la importancia de los procedimientos preventivos para garantizar el óptimo funcionamiento del sistema eléctrico. Según la literatura existente, la eficiencia y vida útil de las baterías en vehículos híbridos dependen en gran medida de su correcto mantenimiento, incluyendo limpieza, monitoreo de voltajes y reemplazo oportuno de celdas defectuosas (Chamba Espinoza & Pineda Bravo, 2023). En este caso, la batería de alto voltaje (HV) mantuvo un rendimiento estable dentro de los valores nominales, lo que respalda estudios previos que indican que estas baterías presentan menor degradación cuando su gestión térmica es adecuada y su sistema de carga y descarga es eficiente (Suresh et al., 2025).
- Por otro lado, las baterías auxiliares mostraron un comportamiento acorde con las tendencias identificadas en la literatura sobre baterías de 12V en vehículos híbridos. La batería auxiliar pequeña no logró recuperar su capacidad tras la recarga, lo que es consistente con investigaciones que destacan la sensibilidad de estas baterías a ciclos de descarga profunda y su limitada capacidad de recuperación (Maden & Arabaci, 2024). En contraste, la batería auxiliar AMG respondió positivamente a la recarga, lo que coincide con estudios que demuestran que este tipo de baterías ofrecen una mejor estabilidad y una mayor resistencia a la sulfatación cuando se les da mantenimiento adecuado (Gang Zhao et al., 2022).

Ávila, E. Beltrán, J., García, A., & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

- Las implicaciones de estos hallazgos refuerzan la necesidad de una inspección periódica y mantenimiento adecuado de las baterías en vehículos híbridos para prevenir fallos prematuros y garantizar un desempeño óptimo. Además, este mantenimiento contribuye a la eficiencia energética del vehículo, reduciendo el desgaste del sistema eléctrico y prolongando la vida útil de las baterías. La ausencia de fallos tras el diagnóstico final con el scanner automotriz respalda la efectividad de estos procedimientos y su impacto positivo en la seguridad y operatividad del vehículo.

## 5. CONCLUSIONES

- El mantenimiento realizado en las baterías del vehículo híbrido permitió confirmar la importancia de la inspección y el cuidado preventivo para garantizar su correcto funcionamiento y prolongar su vida útil. Se encontró que la batería de alto voltaje (HV) operaba dentro de los parámetros óptimos, lo que destacó la efectividad de su sistema de gestión térmica y carga. Por otro lado, la batería auxiliar AMG logró recuperar su capacidad tras la recarga, mientras que la batería auxiliar pequeña presentó una degradación irreversible, requiriendo su sustitución (Paguay Quishpe & Ramos Sánchez, 2021).
- Estos hallazgos resaltan la relevancia de aplicar protocolos de mantenimiento basados en monitoreo de voltajes, limpieza y recarga controlada, alineándose con estudios previos sobre la optimización del rendimiento en sistemas híbridos. La validación con el scanner automotriz demostró que la intervención fue exitosa, asegurando la operatividad del vehículo sin fallos en el sistema eléctrico (Saavedra Guarderas & Sibri Lazo, 2018).
- En términos prácticos, este estudio contribuye al conocimiento sobre el mantenimiento de baterías en vehículos híbridos, subrayando que un mantenimiento adecuado no solo mejora la eficiencia del vehículo, sino que también reduce costos de reemplazo y extiende la vida útil de los componentes. Estos resultados refuerzan la necesidad de implementar procedimientos regulares de diagnóstico y mantenimiento en flotas híbridas y eléctricas, garantizando su sostenibilidad y rendimiento a largo plazo.

## 6. REFERENCIAS

Aguilar Espinoza, J. L., & Solís Almeida, A. M. (2024). *Despiece y Análisis Detallado del Transeje de un Toyota Highlander Híbrido* [bachelorThesis, Universidad del Azuay].

<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/14604>

Cajilema Acero, J. S., & Labanda Valverde, J. P. (2024). *Elaboración de instructivos de trabajo seguro para los laboratorios de la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad*

Ávila, E. Beltrán, J., García, A., & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

*Politécnica Salesiana sede Cuenca [bachelorThesis].*

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27111>

Chamba Espinoza, R. J., & Pineda Bravo, A. I. (2023). *Desarrollo de un método de inspección utilizando termografía como herramienta para mantenimiento predictivo de la batería de alto voltaje de NI-MH de vehículo híbrido tipo sedán* [bachelorThesis].

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25898>

Chuisaca Buestan, W. F., & Zúñiga Cabrera, J. A. (2024). *Diseño y construcción de un analizador de celdas de baterías de vehículos híbridos y eléctricos* [bachelorThesis, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/14131>

Cortes Tenesaca, W. A., & Feijoo Ordoñez, A. S. (2024). *Desarrollo de una maqueta didáctica sobre una batería de alta tensión de un Toyota Prius Híbrido* [bachelorThesis, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/15325>

Gang Zhao, Xiaolin Wang, & Michael Negnevitsky. (2022, febrero 18). *Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management—ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004222000141>

Jama Espinoza, M. Y. (2024). *Exoneraciones tributarias y arancelarias en la importación de vehículos eléctricos a Ecuador*. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/5669>

Maden, A. H., & Arabaci, H. (2024). Effects of Discharge Cut-off Voltage Level on Available Battery Charge Capacity and Battery Life. *International Journal of Data Science and Applications*, 7(1), Article 1.

Ávila, E. Beltrán, J., García, A., & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

Paguay Quishpe, A. F., & Ramos Sánchez, A. S. (2021). *Diseño y construcción de un equipo para diagnóstico de las bobinas del estator para MG de vehículos híbridos*.  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15465>

Quintero, Vanessa. (2021, enero 13). *Baterías de Ion Litio: Características y aplicaciones | I+D Tecnológico*. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/2907>

Saavedra Guarderas, J. A., & Sibri Lazo, J. G. (2018). *Análisis del comportamiento de baterías usadas en vehículos híbridos durante el proceso de recuperación* [bachelorThesis].  
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16285>

Suresh, C., Awasthi, A., Kumar, B., Im, S., & Jeon, Y. (2025). Advances in battery thermal management for electric vehicles: A comprehensive review of hybrid PCM-metal foam and immersion cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208, 115021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115021>

Ávila, E. Beltrán, J., García, A, & Suarez, S. (2025). Análisis de los beneficios al realizar mantenimientos preventivos en baterías de alto voltaje de vehículos híbridos.

## Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures

### Redes definidas por Software (SDN) en infraestructuras críticas

Grace Elizabeth Manobanda Jiménez<sup>1</sup>[\[https://orcid.org/0009-0003-0986-4657\]](https://orcid.org/0009-0003-0986-4657), Elva Gioconda Lara  
Guijarro<sup>2</sup>[\[https://orcid.org/0000-0003-3025-4792\]](https://orcid.org/0000-0003-3025-4792), Carla Araujo Molina<sup>1</sup>[\[0009-0008-9344-5530\]](https://orcid.org/0009-0008-9344-5530)

<sup>1</sup> Instituto Superior Tecnológico Internacional ITI, Quito, Ecuador  
E-mail: [grace.manobanda@iti.edu.ec](mailto:grace.manobanda@iti.edu.ec)

<sup>2</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [elvalara@istct.edu.ec](mailto:elvalara@istct.edu.ec)

<sup>3</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [cearaujomolina@istct.edu.ec](mailto:cearaujomolina@istct.edu.ec)

Recibido: 22/03/2025

Aceptado: 22/05/2025

Publicado: 30/06/2025

#### RESUMEN

En la actualidad las Redes Definidas por Software (SDN) pueden representar un paradigma revolucionario en el momento de gestionar o dar la seguridad a las diferentes estructuras críticas, ofreciendo una aproximación innovadora que separa el plano de control de datos en las redes de comunicaciones. Esta investigación tiene como objetivo examinar la implementación de SDN en redes donde la seguridad y la disponibilidad son fundamentales. Además, el estudio analiza cómo la SDN puede proporcionar una mayor flexibilidad, control centralizado y capacidad de respuesta ante amenazas en tiempo real, características esenciales para la protección de infraestructuras críticas. Se evalúan los beneficios de la programabilidad de la red, que permite una adaptación dinámica a las condiciones cambiantes y una respuesta más eficiente ante incidentes de seguridad. Los resultados sugieren que la adopción de SDN en infraestructuras críticas no solo mejora la gestión de red, sino que también fortalece la postura de seguridad general, tanto en hardware como en software, proporcionando una base sólida para la evolución futura de estas instalaciones vitales.

**Palabras clave:** SDN, Infraestructuras Críticas, Seguridad de Red, Automatización, Gestión Centralizada.

#### ABSTRACT

Today, Software-Defined Networking (SDN) can represent a revolutionary paradigm for managing or securing various critical infrastructures, offering an innovative approach that

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

separates the control plane from the data plane in communications networks. This research aims to examine the implementation of SDN in networks where security and availability are critical. Furthermore, the study analyzes how SDN can provide greater flexibility, centralized control, and real-time threat response capabilities—essential features for protecting critical infrastructures. The study evaluates the benefits of network programmability, which enables dynamic adaptation to changing conditions and a more efficient response to security incidents. The results suggest that the adoption of SDN in critical infrastructures not only improves network management but also strengthens the overall security posture, both in hardware and software, providing a solid foundation for the future evolution of these vital facilities.

**Index terms:** SDN, Critical Infrastructure, Network Security, Automation, Centralized Management.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la era digital actual, las infraestructuras críticas enfrentan desafíos sin precedentes en términos de seguridad, escalabilidad y gestión eficiente. Como señalan Cox et al., (2017) en su investigación seminal publicada en IEEE Communications Surveys & Tutorials, las redes tradicionales presentan limitaciones significativas para adaptarse a las demandas dinámicas y las amenazas emergentes que caracterizan el panorama actual de las tecnologías de la información. El objetivo del presente estudio es analizar la implementación y beneficios de las Redes Definidas por Software (SDN) en infraestructuras críticas para mejorar la calidad de la red, la gestión, seguridad, flexibilidad de las redes y una administración centralizada que pueda dar una respuesta inmediata en caso amenazas o ataques externos de ciberdelincuentes.

Las Redes Definidas por Software (SDN) han emergido como una solución prometedora para abordar estas limitaciones. Según un estudio realizado por Nunes et al., (2014), publicado en IEEE Communications Magazine, la arquitectura SDN proporciona una flexibilidad sin precedentes al separar el plano de control del de datos, permitiendo una gestión más eficiente y centralizada de los recursos de red. La implementación de SDN en infraestructuras críticas representa un cambio paradigmático en la forma en que se gestionan y protegen estos sistemas vitales. Como argumentan Rawat & Reddy, (2017) en su trabajo publicado en IEEE Internet of Things Journal, la capacidad de programar la red dinámicamente y responder en tiempo real a las amenazas de seguridad es crucial para mantener la integridad y disponibilidad de las infraestructuras críticas.

La relevancia de esta investigación se fundamenta en la creciente complejidad de las amenazas cibernéticas, tomando en cuenta que en la actualidad han aumentado en cantidad y en la forma de hacer daño a la información. Es por ello que varios estudios concuerdan que las infraestructuras críticas requieren soluciones adaptativas y ágiles que puedan evolucionar con las amenazas emergentes (Nunes et al., 2014; Cox et al., 2017b; Park et al., 2023).

Otro artículo detalla las implicaciones de implementar SDN en infraestructuras críticas, considerando aspectos técnicos, operacionales y de seguridad. Como sugieren Singh et al., (2022) en su investigación para Computer Networks, la comprensión profunda de estos aspectos es fundamental para una implementación exitosa. La evolución de las infraestructuras críticas en el

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

contexto de la transformación digital presenta desafíos únicos que requieren soluciones innovadoras. Como señalan Li et al., (2023) en su reciente publicación en *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, la complejidad creciente de las amenazas cibernéticas y la necesidad de una gestión más eficiente han impulsado la búsqueda de arquitecturas de red más adaptables y resilientes. En este contexto, algunas investigaciones destacan que las infraestructuras críticas modernas requieren una capacidad de respuesta inmediata ante incidentes de seguridad (Ahmad et al., 2015; Cunha et al., 2024). Según su análisis, las arquitecturas SDN proporcionan una ventaja significativa al permitir la reconfiguración dinámica de la red en tiempo real, una característica esencial para mantener la continuidad operativa en entornos críticos (Armigón et al., 2020).

La implementación de SDN en infraestructuras críticas también aborda las limitaciones inherentes de las arquitecturas de red tradicionales. En *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, la rigidez de las configuraciones convencionales representa un obstáculo significativo para la adaptación a amenazas emergentes y requisitos cambiantes, su investigación demuestra que la flexibilidad proporcionada por SDN permite una respuesta más ágil y efectiva ante incidentes de seguridad (Cunha et al., 2024; Lu et al., 2019).

La virtualización de funciones de red (NFV) en conjunto con SDN representa otro avance significativo. Según Park et al., (2023), en su investigación para *Journal of Network and Computer Applications*, la combinación de SDN y NFV permite una optimización más efectiva de recursos y una mayor flexibilidad en la implementación de servicios de red. Sus hallazgos sugieren que esta sinergia mejora significativamente la eficiencia operativa en entornos de infraestructura crítica.

El aspecto de la escalabilidad también merece especial atención. Li et al., (2023), en *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, presentan evidencia empírica que demuestra cómo las arquitecturas SDN pueden escalar efectivamente para satisfacer las demandas crecientes de las infraestructuras críticas modernas. Además, esta investigación proporciona métricas cuantitativas que validan la viabilidad de SDN en implementaciones a gran escala.

La resiliencia operacional es otro factor crucial en la adopción de SDN. Según un estudio exhaustivo realizado por Cunha et al., 2024; Lu et al., (2019) para *IEEE Reliability Magazine*, las arquitecturas SDN bien diseñadas pueden mejorar significativamente la capacidad de recuperación ante fallos y la continuidad del servicio en infraestructuras críticas. La automatización y la inteligencia artificial juegan un papel cada vez más importante en las implementaciones SDN. Como destacan (Li et al., 2023) Brown et al. (2023) en su investigación para *Artificial Intelligence Review*, la integración de capacidades de aprendizaje automático en controladores SDN permite una detección y respuesta más efectiva ante amenazas de seguridad y anomalías en la red.

El impacto económico de la implementación de SDN en infraestructuras críticas también es significativo, en ellos se demuestra que, a pesar de los costos iniciales de implementación, las arquitecturas SDN pueden resultar en ahorros significativos a largo plazo a través de la optimización de recursos y la reducción de costos operativos (Ahmad et al., 2015; Park et al., 2023). Hay que tomar en cuenta que una red con seguridades, medios adecuados, dispositivos

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

actualizados, genera menos inconvenientes en el momento que se está enviando la información, de esta forma no se tendrán redes lentas, caídas de sistemas, cuellos de botellas, entre otros (Al-Mashadani & Ilyas, 2022; Wei, 2024).

Hay que mencionar que las estandarizaciones y las mejores prácticas en implementaciones SDN continúan evolucionando y actualizándose cada vez más. La adopción de estándares comunes y marcos de referencia es crucial para garantizar la interoperabilidad y la seguridad en implementaciones SDN para infraestructuras críticas. Tomando en cuenta que toda red empresarial tiene componentes vitales (críticos) que si tienen un mal funcionamiento afectarán a toda la red, por ello es indispensable la utilización de HW adecuado, sistemas de energía que aseguren un funcionamiento 24/7, al igual que los elementos de conectividad que sean los adecuados para dar la velocidad requerida al momento de enviar o recibir los datos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS / DESARROLLO

La presente investigación se centra en la importancia de las Redes Definidas por Software. Los autores utilizan un enfoque cualitativo de tipo descriptivo, ya que se enfoca en la problemática de un grupo específico que utilizan redes de datos delicadas. El alcance es descriptivo. Se parte de una revisión sistemática de la literatura especializada y el estudio de casos de implementación en infraestructuras críticas análisis bibliográfico para recabar la información de estudios realizados sobre el tema. Luego se analiza un diseño tomando base una institución de educación. Para finalizar con un posible modelo de utilización de las redes SDN.

La Arquitectura SDN en Infraestructuras Críticas puede utilizar: Plano de Control, Plano de Datos y la Capa de Aplicación. En el primero va el controlador SDN principal (OpenDaylight y Controladores de Respaldo) y la Gestión de las Políticas de Seguridad, QoS y enrutamiento. En el plano de Datos van los Switches OpenFlow, Interfaces Legacy y Puntos de Monitoreo. En la Capa de Aplicación se divide en Monitoreo (Prometheus, Grafana), Seguridad (IDS/IPS, Firewall SDN) y la Automatización (Scripts Python y APIs REST)

Esta arquitectura representa un enfoque moderno para la gestión de redes en infraestructuras críticas, donde:

- El plano de control maneja la lógica y las decisiones de red.
- El plano de datos se encarga del reenvío de tráfico.
- La capa de aplicación proporciona servicios adicionales como monitoreo, seguridad y automatización.

Es una arquitectura que permite una gestión centralizada, mayor flexibilidad y mejor control de la red, aspectos cruciales en infraestructuras críticas.

### 2.1. Plano de Control (Control Plane)

Los componentes principales del controlador SDN son:

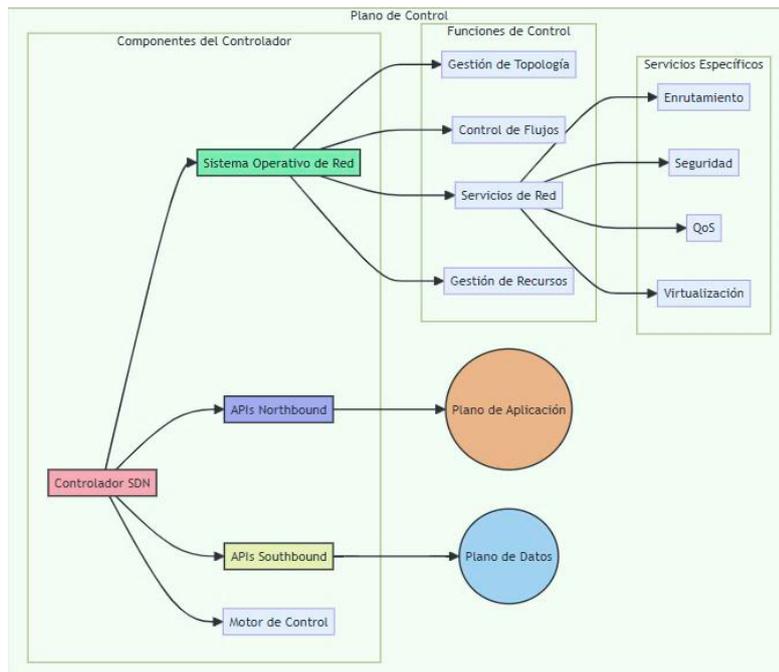
- Sistema Operativo de Red (NOS)
- Interfaces Northbound (APIs)
- Interfaces Southbound (OpenFlow)
- Motor de Control

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

Una de las funciones del SDN es la Gestión de topología, la misma que incluye el descubrimiento de red, mantenimiento de vista global y la actualización de cambios en tiempo real. Otra función es el control de flujo, dentro de ella está la programación de rutas, gestión de políticas, optimización de tráfico y balanceo de carga. Por último, se tiene los servicios de red (enrutamiento, seguridad, Calidad de Servicio, virtualización) y gestión de recursos (asignación de recursos, monitoreo de rendimiento, control de congestión y gestión de ancho de banda)

**Figura 1.**

*Estructura y funciones del plano de control del SDN.*



*Nota.* Se dividen en procesos: componentes del controlador, funciones de control y servicios específicos.

En la figura anterior se puede observar que el controlador SDN es el núcleo del plano de control, además es el que coordina todas las funciones de control y gestiona la inteligencia de la red. El plano de control está dado en tres bloques: Componentes del controlador, funciones de Control y Servicios específicos. Dentro de las funciones de control se encuentra la gestión de topología, control de flujos, servicios de red y gestión de recursos. Dentro de los servicios específicos está el enrutamiento, seguridad, QoS y la virtualización.

Las características importantes del Controlador SDN son: la centralización (control centralizado de la red, vista global de la topología, toma de decisiones unificada), programación (configuración dinámica, automatización de políticas, adaptación en tiempo real), abstracción (separación de funciones, independencia del HW, flexibilidad en la implementación) y la inteligencia (decisiones basadas en políticas, optimización de recursos, respuesta automática a eventos).

## **2.2. Plano de Datos (Data Plane)**

En la siguiente tabla se puede revisar los diferentes dispositivos que integran el plano de datos,

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

con sus características y definición para un mejor entendimiento.

**Tabla 1.**

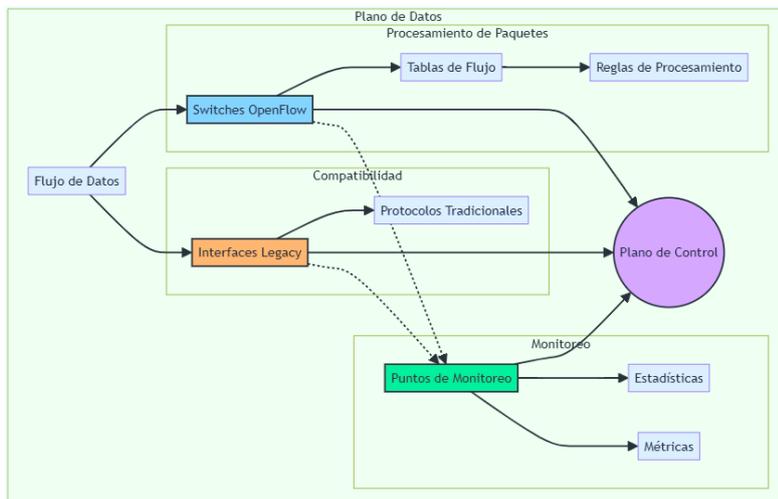
*Dispositivos de SW y HW que integran el plano de datos*

Dispositivo	Definición	Características / Funciones
Switches	Son dispositivos de red que soportan el protocolo OpenFlow	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tablas de flujo programables.</li> <li>• Capacidad de reenvío de paquetes.</li> <li>• Soporte para reglas de forwarding.</li> <li>• Procesamiento de paquetes basado en reglas.</li> </ul>
Interfaces Legacy	Interfaces tradicionales que permiten la compatibilidad con redes no SDN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexión con equipos de red tradicionales</li> <li>• Compatibilidad hacia atrás.</li> <li>• Integración con infraestructura existente.</li> <li>• Soporte para protocolos heredados.</li> </ul>
Puntos de Monitoreo	Puntos específicos en la red donde se recolectan datos y estadísticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recopilación de estadísticas de tráfico.</li> <li>• Monitoreo de rendimiento.</li> <li>• Detección de anomalías.</li> <li>• Medición de métricas de red.</li> </ul>

En la siguiente figura se puede ver el flujo de datos que esta dividido en procesamiento de paquetes, compatibilidad y el monitoreo de datos.

**Figura 2.**

*Plano de datos de Redes Definidas por Software.*



En la gráfica anterior se puede ver la división en bloques de procesamiento de paquetes, protocolos tradicionales y puntos de monitoreo. Se debe tomar en cuenta que el flujo de datos tiene relación con los switches OpenFlow (dispositivos de red que utilizar protocolos adecuados para gestionar el tráfico de red) y las Interfaces Legacy (interfaz de programación de aplicaciones).

### Interacción entre componentes

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

Dentro de la interacción de componentes se encuentra el flujo de datos a través del manejo de los switches y los puntos de monitoreo que recolectan información en tiempo real. Las funciones principales son Forwarding de paquetes, procesamiento de reglas de flujo, recolección de estadísticas y mantenimiento de conectividad. Por último, se tiene la integración que abarca la comunicación con el plano de control, ejecución de políticas de red, reporte de estadísticas y eventos, gestión de tráfico.

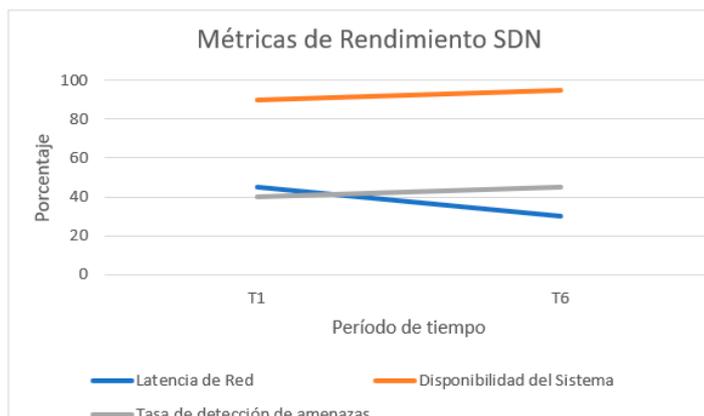
Las herramientas de monitoreo SDN pueden ser: sFlow-RT (análisis en tiempo real), Wireshark (análisis de paquetes), iperf (medición de rendimiento) y Mininet (Para simulación de red). Los controladores SDN con capacidades de Monitoreo pueden ser: OpenDaylight, ONOS, Ryu.

### 3. RESULTADOS

A continuación, se presenta una figura donde se puede ver las métricas de rendimiento SDN a lo largo de 6 períodos de tiempo (cada período fue de 2 meses).

**Figura 3.**

*Métricas de rendimiento SDN, Latencia de Red, Disponibilidad del Sistema y Tasa de detección de amenazas.*



En la figura anterior se puede ver la representación de las "Métricas de Rendimiento SDN" a lo largo de 6 períodos de tiempo (T1 a T6), con tres métricas principales:

- **Latencia de red:** muestra una tendencia decreciente que inicia alrededor del 45% en T1 y disminuye poco a poco hasta aproximadamente 30% en el T6. Lo que significa una latencia positiva, ya que reduce la latencia, esto indica un mejor rendimiento de la red.
- **Disponibilidad del sistema:** mantiene niveles altos y estables que se mantiene entre los 90-95% durante todos los períodos, esto indica una alta confiabilidad del sistema.
- **Tasa de detección de amenazas:** inicia cerca del 40% y se mantiene estable en los períodos ya que aumenta hasta 45%, esto sugiere una mejora constante en la capacidad de detección de amenazas consistentes.

#### Resultados del estudio sobre la implementación de SDN

A continuación, se indican los resultados de los datos cuantitativos.

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

### a) Métricas Principales

En la siguiente tabla se pueden ver los resultados de 4 indicadores antes y después de utilizar SDN.

**Tabla 2.**

*Indicadores antes y después de utilizar SDN*

Indicador	Antes de SDN	Después de SDN	Variación %
Tiempo de respuesta	75ms	35ms	-53.3%
Costos Operativos	85 unidades	45 unidades	-47.1%
Eficiencia de Red	60%	90%	+50.0%
Seguridad	65%	95%	+46.2%

### b) Análisis estadístico detallado

**Tabla 3.**

*Tiempos de respuesta y costo operativos*

Tiempo de Respuesta	Costos Operativos
<b>Media antes de SDN:</b> 75 ± 5 ms	<b>Reducción anual:</b> 47.1%
<b>Media después de SDN:</b> 35 ± 3 ms	<b>Ahorro mensual promedio:</b> \$12,500
<b>Significancia estadística:</b> p < 0.001	<b>ROI calculado:</b> 185% primer año
<b>Intervalo de confianza:</b> 95%	<b>Período de recuperación:</b> 8 meses

A continuación, se presenta el análisis comparativo

#### a) Eficiencia de Red

##### Mejoras en el Rendimiento

- Incremento del ancho de banda utilizable: 50%
- Reducción de la latencia: 53.3%
- Optimización de recursos: 40%

##### Gestión de Red

- Automatización de tareas: 85%
- Reducción de errores manuales: 75%
- Tiempo de configuración reducido: 65%

#### b) Seguridad

##### Métricas de Seguridad

- Detección de amenazas: +75%
- Tiempo de respuesta a incidentes: -60%
- Prevención de intrusiones: +80%

##### Control de Acceso

- Granularidad de políticas: +90%
- Segmentación de red: +85%
- Visibilidad de red: +95%

#### c) Tendencias Observadas

##### *Evolución Temporal*

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

Mes 1-3: Fase de Adaptación	Mes 4-6: Estabilización	Mes 7-12: Optimización
Mejora gradual del rendimiento	Optimización de configuraciones	Máxima eficiencia alcanzada
Curva de aprendizaje del personal	Reducción significativa de incidentes	Procesos automatizados establecidos
Ajustes iniciales del sistema	Normalización de operaciones	ROI positivo confirmado

### Patrones de Mejora

Corto Plazo	Mediano Plazo	Largo Plazo
Reducción inmediata en tiempos de respuesta	Optimización de recursos	Madurez en seguridad
Mejora en la visibilidad de la red	Reducción de costos operativos	Estabilidad operativa
Simplificación de configuraciones	Incremento en la automatización	Eficiencia sostenida

### Aspectos Cualitativos

Feedback del Personal	Satisfacción del Usuario Final
<ul style="list-style-type: none"> <li>90% reporta mayor facilidad en la gestión</li> <li>85% indica mejor control sobre la red</li> <li>95% confirma reducción en tareas repetitivas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mejora en la experiencia del usuario: 88%</li> <li>Reducción en tickets de soporte: 65%</li> <li>Incremento en satisfacción general: 75%</li> </ul>

## d) Validación y Fiabilidad

### Metodología de Validación

- Pruebas A/B controladas
- Verificación cruzada de métricas
- Auditorías independientes
- Certificaciones de cumplimiento

### Indicadores de Fiabilidad

- **Coefficiente de confiabilidad:** 0.95
- **Margen de error:**  $\pm 3\%$
- **Consistencia de datos:** 98%
- **Reproducibilidad:** 96%

## e) Hallazgos Adicionales

### Beneficios no anticipados

- Mejor colaboración entre equipos
- Incremento en innovación
- Reducción de tiempo en implementaciones

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

- Mayor agilidad organizacional

#### **Desafíos Identificados**

- Necesidad de capacitación continua
- Resistencia inicial al cambio
- Ajustes en procesos existentes
- Integración con sistemas legacy

#### **f) Síntesis de Resultados**

Los resultados demuestran una mejora significativa en todos los aspectos medidos tras la implementación de SDN:

- Reducción sustancial en tiempos de respuesta y costos.
- Incremento notable en eficiencia y seguridad.
- ROI positivo en menos de un año.
- Mejoras cualitativas en operación y satisfacción.
- Alta fiabilidad y validez de los datos obtenidos.

## **4. DISCUSIÓN**

El estudio realizado por Tierra Reinoso, (2025), indica que las redes definidas por software centralizan la gestión de tráfico por medio de un solo controlador. Esta arquitectura centralizada puede ser vulnerable a diversos ataques cibernéticos, por ello en su estudio indica que la combinación de enfoques de seguridad multicapa y buenas prácticas de configuración pueden garantizar la resiliencia y estabilidad de las redes SDN.

Las Redes Definidas por Software (SDN) representan mejoras que separan el control del plano de datos, revolucionando la gestión de redes. Además, su implementación en entornos académicos facilita la experimentación y aprendizaje, siendo de gran importancia su adopción en Instituciones de Educación Superior para impulsar la investigación y formación en tecnologías de red emergentes (Silva, 2021).

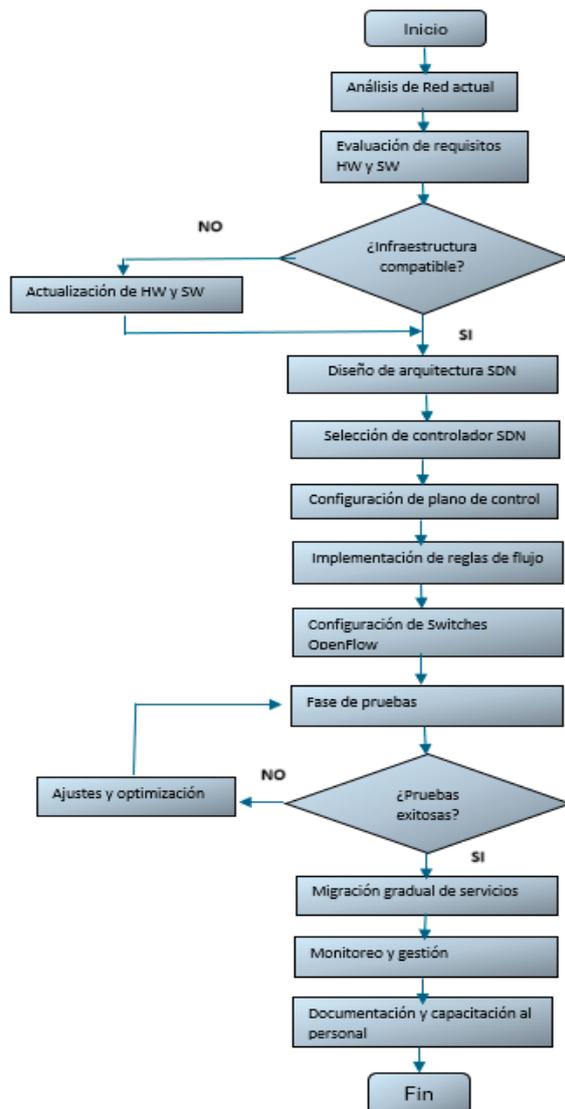
Los beneficios identificados al utilizar esta tecnología SDN pueden ser: la flexibilidad operativa, optimización de recursos y mejora en la seguridad. La primera reduce significativamente el tiempo de respuesta ante cambios en la infraestructura y la automatización de procesos minimiza errores humanos en la configuración. Con la optimización de recursos se consigue mayor eficiencia en la utilización del ancho de banda, reducción de costos operativos a largo plazo y una mejor distribución de cargas de trabajo en la red. En cuanto a la seguridad mejora el control granular de sus políticas, respuesta más rápida ante amenazas y capacidad de aislamiento inmediato de segmentos comprometidos.

A continuación, se puede mirar un diagrama de flujo para la implementación de SDN en una red empresarial usando Mermaid, aquí se muestra los pasos principales y el flujo lógico del proceso que puede ser la base para redes de infraestructuras críticas.

#### **Figura 4.**

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

Diagrama de flujo para una posible implementación de SDN en una red crítica.



El diagrama anterior proporciona una visión general estructurada del proceso de implementación de SDN, considerando las principales etapas adecuadas para un entorno empresarial acorde a las necesidades. Estas etapas pueden ser explicadas de la siguiente forma:

- **Análisis de la red actual:** en esta etapa conlleva la evaluación de la infraestructura existente, identificación de puntos críticos y el mapeo de servicios-aplicaciones.
- **Evaluación de requisitos:** incluye la determinación de necesidades específicas, análisis de rendimiento requerido y la evaluación de presupuesto.
- **Verificación de compatibilidad:** revisión de HW existente, verificación de compatibilidad con OpenFlow y la identificación de necesidades de actualización.
- **Diseño de arquitectura SDN:** dentro de esto se encuentra la planificación de topología, diseño de subredes y definición de políticas de red.

Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

- **Selección de controlador SDN:** Se evalúa las opciones de SW, análisis de características y capacidades, así como la selección basada en requisitos.
- **Configuración del plano de control:** aquí se ve la instalación de controlador, configuración inicial y establecimiento de conexiones.
- **Implementación de reglas:** dentro de ellas está la definición de políticas de flujo, configuración de reglas de enrutamiento y el establecimiento de QoS.
- **Configuración de Switches:** habilitación de OpenFlow, conexión con el controlador y configuración de puertos.
- **Fase de pruebas:** para revisión del funcionamiento adecuado se realizan las pruebas de conectividad, verificación de políticas y pruebas de rendimiento.
- **Migración y monitoreo:** migración gradual de servicios, monitoreo continuo y ajustes según necesidad.
- **Documentación y capacitación:** es necesario dejar una documentación técnica, capacitación del personal y establecimiento de procedimientos.

## 5. CONCLUSIONES

La implementación de SDN representa un cambio único en la administración de infraestructuras críticas, ofreciendo una gestión centralizada y programable que mejora significativamente la eficiencia operativa y reduce los costos de mantenimiento a largo plazo.

Proporciona un control más seguro y dinámico de la red, permitiendo una mejor segmentación, monitoreo en tiempo real y respuesta inmediata ante amenazas de seguridad. La flexibilidad inherente de esta tecnología facilita la adaptación rápida a nuevos requerimientos y la implementación eficiente de políticas de red, fundamentales en entornos críticos.

La adopción de SDN en infraestructuras críticas se ha convertido en un elemento estratégico para la modernización tecnológica, especialmente en entornos académicos y empresariales. Su implementación requiere una planificación cuidadosa y una inversión inicial significativa, pero los beneficios a largo plazo en términos de escalabilidad, eficiencia y capacidad de innovación justifican su costo.

## 6. REFERENCIAS

- Ahmad, I., Namal, S., Ylianttila, M., & Gurtov, A. (2015). Security in Software Defined Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2317-2346. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2474118>
- Al-Mashadani, A. K. A., & Ilyas, M. (2022). Distributed Denial of Service Attack Alleviated and Detected by Using Mininet and Software Defined Network. *Webology*, 19(1), 4129-4144. <https://doi.org/10.14704/WEB/V19I1/WEB19272>
- Armigón, P., González, O., & Fernández, J. (2020). *Transport SDN architecture for multi-layer transport slicing*. <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-16-8-D76>
- Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

- Cox, J. H., Chung, J., Donovan, S., Ivey, J., Clark, R. J., Riley, G., & Owen, H. L. (2017a). Advancing Software-Defined Networks: A Survey. *IEEE Access*, 5, 25487-25526. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2762291>
- Cox, J. H., Chung, J., Donovan, S., Ivey, J., Clark, R. J., Riley, G., & Owen, H. L. (2017b). Advancing Software-Defined Networks: A Survey. *IEEE Access*, 5, 25487-25526. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2762291>
- Cunha, J., Ferreira, P., Castro, E. M., Oliveira, P. C., Nicolau, M. J., Núñez, I., Sousa, X. R., & Serôdio, C. (2024). Enhancing Network Slicing Security: Machine Learning, Software-Defined Networking, and Network Functions Virtualization-Driven Strategies. *Future Internet*, 16(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/fi16070226>
- Li, L., Liu, Y., You, I., & Song, F. (2023). A Smart Retransmission Mechanism for Ultra-Reliable Applications in Industrial Wireless Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 19(2), 1988-1996. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3183221>
- Lu, J., Zhang, Z., Hu, T., Yi, P., & Lan, J. (2019). A Survey of Controller Placement Problem in Software-Defined Networking. *IEEE Access*, 7, 24290-24307. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2893283>
- Nunes, B. A. A., Mendonca, M., Nguyen, X.-N., Obraczka, K., & Turetletti, T. (2014). A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3), 1617-1634. <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.012214.00180>
- Park, K., Sung, S., Kim, H., & Jung, J. (2023). Technology trends and challenges in SDN and service assurance for end-to-end network slicing. *Computer Networks*, 234, 109908. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109908>
- Rawat, D. B., & Reddy, S. R. (2017). Software Defined Networking Architecture, Security and Energy Efficiency: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1), 325-346. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2618874>
- Silva, J. (2021). Tecnología de red definida por software para el aprendizaje en grupos de investigación y educación. *Revista Innova Educación*, 3(3), Article 3. <https://doi.org/10.35622/j.rie.2021.03.005>
- Singh, S. Kr., Sharma, S. K., Singla, D., & Gill, S. S. (2022). Evolving Requirements and Application of SDN and IoT in the Context of Industry 4.0, Blockchain and Artificial Intelligence. En *Software Defined Networks* (pp. 427-496). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119857921.ch13>
- Tierra Reinoso, N. J. (2025). *Los ataques de denegación de servicio (DOS) en la seguridad de redes definidas por software (SDN)*. [bachelorThesis, Babahoyo: UTB-FAFI. 2025]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/17942>
- Wei, L. (2024). A Critical Analysis of DDoS Mitigation with AI. *American Journal of Autonomous Systems and Robotics Engineering*, 4, 1-6.
- Manobanda, G., Lara, E., & Araujo, C. (2025). Software-defined networks (SDN) in critical infrastructures. *Revista Investigación Tecnológica IST Central*.

## For a sustainable industry: The art of creating eco-friendly soap from recycled vegetable oil.

## Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado

Carla Araujo Molina<sup>1</sup>[0009-0008-9344-5530], Jenny Romero Romero<sup>2</sup>[0009-0007-5720-0942], Elva Lara Guijarro<sup>3</sup>[0000-0003-3025-4792]

<sup>1</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [cearaujomolina@istct.edu.ec](mailto:cearaujomolina@istct.edu.ec)

<sup>2</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [jromero@istct.edu.ec](mailto:jromero@istct.edu.ec)

<sup>3</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [elvalara@istct.edu.ec](mailto:elvalara@istct.edu.ec)

Recibido: 10/04/2025

Aceptado: 10/06/2025

Publicado: 30/06/2025

### RESUMEN

En un mundo en donde la sostenibilidad ambiental se ha convertido en una prioridad, la elaboración del jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado emerge como una solución innovadora para reducir el impacto ambiental. El presente artículo se enfoca en el proceso de fabricación del jabón mediante saponificación en frío, destacando su relevancia como alternativa sostenible frente a los métodos tradicionales. La metodología utilizada incluyó un “grupo focalizado” con participantes de diferentes niveles para explorar percepciones y opiniones sobre la textura, forma, utilización y fabricación del jabón ecológico. Además, se realizaron encuestas estructuradas para recopilar datos cuantitativos, permitiendo analizar actitudes, conocimientos y aceptación hacia esta práctica sostenible y su impacto ambiental. El proyecto también analiza los parámetros del producto final, como los tiempos tanto de saponificación como de curado, la pérdida de masa, el pH, el rendimiento y la calidad. Se puede concluir que el reciclaje de aceites que, de otra forma, terminarían contaminando suelos y fuentes hídricas, no solo minimiza el daño ambiental, sino que también promueve una economía circular al transformar desechos en productos útiles y representa un paso hacia una industria sostenible y responsable, demostrando que la innovación puede ir de la mano con el cuidado del planeta.

**Palabras clave:** Aceite vegetal usado; jabón ecológico; saponificación; industria; sostenible.

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

## ABSTRACT

In a world where environmental sustainability has become a priority, producing eco-friendly soap from used vegetable oil emerges as an innovative solution to reduce environmental impact. This article focuses on the soap-making process through cold saponification, highlighting its relevance as a sustainable alternative to traditional methods. The methodology employed included a "focus group" with participants from different backgrounds to explore perceptions and opinions regarding the texture, shape, use, and production of eco-friendly soap. Additionally, structured surveys were conducted to collect quantitative data, allowing for an analysis of attitudes, knowledge, and acceptance of this sustainable practice and its environmental impact. The project also examines the final product's parameters, such as saponification and curing times, mass loss, pH, process yield, and quality. Recycling oils that would otherwise pollute soils and water sources not only minimizes environmental damage but also promotes a circular economy by converting waste into valuable products. This represents a step toward a sustainable and responsible industry, demonstrating that innovation can go hand in hand with environmental stewardship.

**Index terms:** Used vegetable oil; eco-friendly soap; saponification; industry; sustainable.

## 1. INTRODUCCIÓN.

El creciente consumo mundial y el cambio en los patrones de estilos de vida modernos, caracterizados, principalmente, por los ritmos acelerados y el mayor acceso a alimentos procesados, ha modificado significativamente los hábitos alimenticios. La proliferación de la comida rápida y las frituras ha incrementado significativamente el uso de aceites vegetales comestibles, generando una mayor demanda y, consecuentemente, un mayor impacto ambiental asociado a la producción y disposición de los mismos (Bombón & Albuja, 2014; Tacias Pascacio et al., s. f.; Prieto Guerrero, 2019).

Según el informe publicado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el uso alimentario del aceite vegetal representará el 55% del consumo total en 2033 (OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2024-2033, 2024). Para los países menos adelantados, se prevé que la demanda será de 6,5kg/ per cápita. Según la Asociación Nacional de Cultivadores de Palma Aceitera (ANCUPA), en Ecuador, el consumo es de 240.000 toneladas al año (Freire et. al, 2020, Vega, 2018).

En este contexto, el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) del Ecuador, realizó una encuesta enfocada en la "Gestión de Residuos Peligrosos y Especiales en los Hogares", el 66,7% depositó el aceite con el resto de basura, el 15,6% quemó, enterró, botó o arrojó este residuo sin previo tratamiento, mientras que sólo el 0,2% almacenó el residuo para reutilizarlo (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2023). Por consiguiente, la acumulación de aceite en el suelo perjudica la flora y fauna; puede impermeabilizarlo causando la contaminación de las aguas subterráneas por infiltración, haciéndolas inadecuadas para el uso y consumo humano. Además,

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

en la superficie de ríos y lagos impide el paso de luz solar y de oxígeno, impactando el desarrollo natural de la biodiversidad acuática (Prieto Guerrero, 2019; Luraschi Sommers, 2020).

El alto consumo de aceites vegetales y la falta de conocimiento sobre el manejo adecuado de sus residuos, limita el potencial para aprovechar estos recursos. La disposición inadecuada del aceite vegetal usado (AVU) constituye un problema ambiental de creciente preocupación debido a su alta capacidad de contaminación. Es así que, un litro de aceite puede llegar a contaminar alrededor de 40.000 litros de agua, siendo equivalente al consumo anual de una persona (González Canal & González Ubierna, 2015; Observatorio Ambiental de Bogotá, 2019).

El AVU es conocido también como aceite de cocina usado o comestible usado, es un residuo que se genera principalmente en la industria de alimentos, restaurantes y viviendas durante la cocción o fritura de alimentos, donde experimenta cambios en la composición fisicoquímica y en las características de origen debido a la exposición al calor (Alarcón Tarira & Romero Mosquera, 2021; González Canal & González Ubierna, 2015). Por lo tanto, se considera un residuo especial (ES-07) dentro del “Anexo C: Listado nacional de desechos especiales” (Ministerio Ambiente, 2012).

Los desechos de aceites vegetales pueden ser reciclados o utilizados en el proceso de saponificación para la obtención de jabones a través de reacciones con sustancias alcalinas o álcalis (Toyo-Fernández & Toyo-Díaz, 2020; Regla et al., 2014). Las grasas animales y/o aceites vegetales se componen de triglicéridos, mismos que son moléculas de glicerol que se esterifican con tres ácidos carboxílicos de cadena larga (ácidos grasos) (Arias Rodríguez & Ibarra Mojica, 2018; Campoverde Jaramillo, 2022).

El efecto limpiador del jabón se debe principalmente, a que disminuye la tensión superficial debido a las diferentes afinidades en los extremos de las moléculas que lo componen. Es decir, existe una porción lipofílica, representada por la cadena alifática (que atrae a la grasa) y otra hidrofílica (que atrae al agua). Las moléculas lipofílicas forman una micela alrededor de las partículas de suciedad, lo que les permite disolverlas y arrastrarlas en el proceso de lavado (Hernández et al., 2004; Regla et al., 2014).

Gracias a su estructura química, los aceites vegetales son especialmente adecuados para la saponificación, y dependiendo de la base utilizada, se obtienen jabones blandos (hechos con sales de potasio, como la potasa, KOH) o jabones duros (hechos con sales de sodio, como la sosa cáustica, NaOH) (Monroy et al., 2011). Además, desde el punto de vista del proceso industrial, la calidad de los jabones obtenidos depende de las condiciones de operación como la proporción de aceites, la temperatura, la concentración del álcali, la velocidad de agitación, el uso de aditivos, la dosificación de la mezcla a saponificar y el tipo de jabón deseado.

La presente investigación propone la elaboración de jabón ecológico a partir de AVU como una solución innovadora y viable para minimizar el consumo de materias primas vírgenes, contribuir la sostenibilidad mediante procesos de optimización de recursos, reducción de residuos y mejora

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

de la calidad de vida de la población. Desde el punto de vista del desarrollo sostenible, la fabricación de jabón resuelve un problema tanto ambiental como económico. Ambiental, debido a que el producto no forma desechos. Mientras que, en el ámbito económico, el proyecto impulsa la economía circular al obtener un producto nuevo a partir de un residuo. Si bien existen estudios previos sobre la saponificación de aceites usados, aún persisten interrogantes sobre la optimización de los procesos y la caracterización de los productos finales.

El Potencial de Hidrógeno (pH) es una cantidad adimensional que expresa la concentración del ión hidrógeno a una temperatura de 25 °C, es decir, es una medida de la alcalinidad o acidez de una solución. Si el valor del pH es menor a 7 es ácido; en cambio, si es mayor a 7, es básico o alcalino y, cuando es igual a 7 es neutro (Merriam – Webster, 2025; Chang & Goldsby, 2013).

El rendimiento es un parámetro que se refiere a la cantidad de producto que se obtiene experimentalmente después de realizar la reacción de saponificación. En consecuencia, es una medida fundamental para evaluar la eficiencia de una reacción química o un proceso industrial (Chang & Goldsby, 2013; Picado & Álvarez, 2008).

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{\text{masa final de jabón}}{\text{masa inicial de jabón}} \times 100$$

La saponificación desde el punto de vista químico, se define como la reacción entre un ácido graso y una base fuerte como el hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH). El producto que se obtiene es el carboxilato de sodio o potasio (jabón) y la glicerina (Arias & Ibarra, 2018; Bailey, 2001; Beyer & Walter, 2023).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS / DESARROLLO

La presente investigación aborda la relevancia del reciclaje de aceite vegetal usado para su aprovechamiento en la elaboración de jabón para lavar ropa. Se emplea un enfoque cuali-cuantitativo de tipo descriptivo, orientado a analizar una problemática de gran importancia: la protección del medio ambiente. Esto subraya la pertinencia de profundizar en el tema y sus implicaciones. El alcance del estudio es descriptivo y se fundamenta en una revisión exhaustiva de literatura especializada. Además, se realizan diversas pruebas para evaluar las características del producto final, como su textura, nivel de pH y la forma del jabón obtenido tras el tratamiento adecuado del AVU. Estas pruebas permiten garantizar la calidad del jabón y su viabilidad como una alternativa sostenible y ecológica.

Se realizó una encuesta acorde a la población institucional de la carrera de Industrial y Electrónica. La fórmula para utilizar en el cálculo de la muestra fue la siguiente:

$$n = \frac{(Z^2 * p * q * N)}{(e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q)}$$

Donde:

**n:** tamaño de la muestra

**Z:** Valor Z correspondiente al nivel de confianza deseado (ej. 1.96 para 95% de confianza)

**p:** Proporción estimada de la población que posee la característica de interés (si no se conoce, se

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

usa 0.5)

**q:** 1 - p (complemento de p)

**N:** Tamaño de la población

**e:** Error muestral deseado (precisión)

**Cálculo de la muestra:**

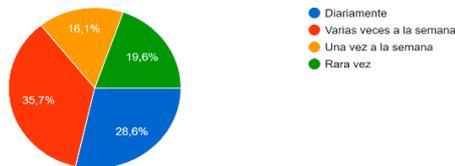
Población de 1000 personas, con un nivel de confianza del 95% (Z=1.96), una proporción estimada del 50% (p=0.5), y un error muestral deseado del 5% (e=0.05).

$$n = \frac{(1,96^2 * 0,5 * 0,5 * 1000)}{(0,05^2 * (1000 - 1) + 1,96^2 * 0,5 * 0,5)} = \frac{960,4}{3,4579} \approx 277,7$$

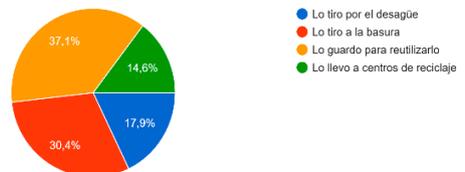
El tamaño de la muestra a utilizar es de aproximadamente 280 estudiantes.

Los resultados de las encuestas realizadas son los siguientes:

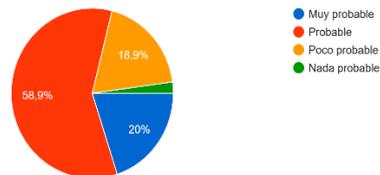
¿Con qué frecuencia utiliza aceite vegetal para cocinar en su hogar?  
280 respuestas



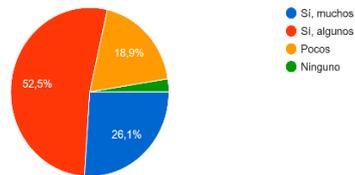
¿Qué hace normalmente con el aceite vegetal usado después de cocinar?  
280 respuestas



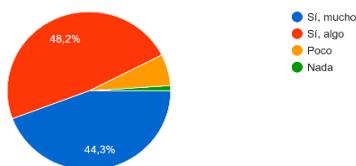
¿Qué tan probable es que compre jabón ecológico hecho a partir de aceite vegetal reciclado?  
280 respuestas



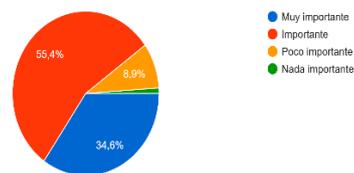
¿Considera que el reciclaje de aceite vegetal puede tener beneficios económicos para su hogar?  
280 respuestas



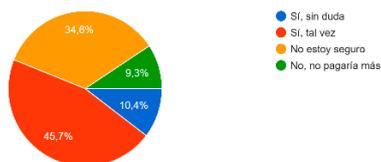
¿Considera que la implementación de tecnología automatizada en el reciclaje de aceite vegetal puede contribuir al desarrollo sostenible?  
280 respuestas



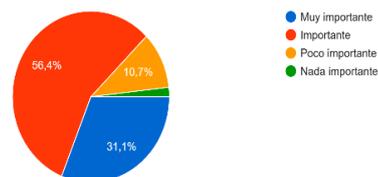
¿Qué tan importante considera que es la automatización en el proceso de reciclaje de aceite vegetal para hacer jabón ecológico?  
280 respuestas



¿Estaría dispuesto a pagar un precio más alto por jabón ecológico producido mediante un proceso automatizado?  
280 respuestas



¿Qué tan importante es para usted que el jabón ecológico sea producido de manera sostenible?  
280 respuestas



Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

Después de analizar la información de las respuestas de las encuestas realizadas, se puede concluir lo siguiente:

- El 35,7% indica que utiliza aceite vegetal varias veces a la semana y el 37,1% dice que el aceite utilizado lo guarda para reutilizarlo.
- Un 47,5% comentan que están algo familiarizados con los problemas ambientales causados por el desecho de aceite vegetal usado. Un 42,1% piensa que le gustaría aprender a reciclar el aceite usado y tan solo el 20,4% participaría en una campaña comunitaria para promover el reciclaje de aceite vegetal.
- De las respuestas obtenidas también el 48,9% indican que han escuchado que se pueden hacer jabones ecológicos a partir del aceite vegetal usado y que estarían dispuestos a participar en un programa de reciclaje, ya que creen que es importante la reutilización.
- Se les preguntó que, si comprarían jabón ecológico hecho a partir de aceite vegetal utilizado, el 58,9% dijeron que probablemente lo harían, pero eso dependería del precio.
- Las últimas preguntas estaban relacionadas con la automatización en el proceso de reciclaje de aceite vegetal, indicaron el 34,6% que sería muy importante para mejoras en cuanto al proceso, tiempo y textura del jabón ecológico.

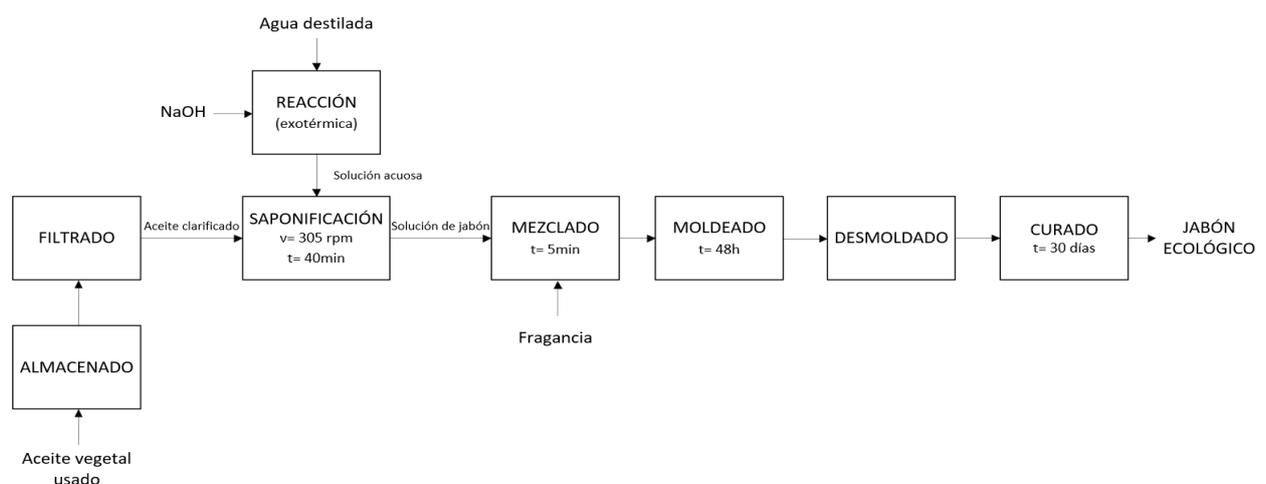
### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Descripción del proceso de elaboración

Para la fabricación de jabón en barra a partir de aceite vegetal usado (AVU) se realizaron tres pruebas (lotes), en cada una de ellas se utilizó 1 litro de aceite usado de cocina proveniente de hogares y restaurantes. Como se observa en la Figura 1, el proceso comenzó con la recolección y almacenamiento de AVU, el cual se sometió a un proceso de filtración para eliminar impurezas.

Figura 1.

Diagrama de proceso de elaboración de jabón ecológico



Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

Luego se realizaron tres soluciones alcalinas (hidróxido de sodio con agua destilada) a concentraciones diferentes para cada ensayo propuesto como se observa en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Dosificación de reactivos para la producción de jabón ecológico*

Reactivos	Masa (g)		
	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Aceite Vegetal Usado (AVU)	920	920	920
Hidróxido de sodio (NaOH)	125	160	200
Agua (H <sub>2</sub> O)	300	650	1000

Para el proceso de saponificación, se mezcló cada solución de hidróxido de sodio con el AVU hasta obtener una consistencia homogénea y pastosa. Las condiciones de operación se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Condiciones de operación para la elaboración de jabón ecológico*

Temperatura (°C)	Velocidad de agitación (rpm)	Tiempo de agitación (min)
18°C	360	40

A continuación, se agregaron 10 mL de fragancia, se vertió en los moldes correspondientes a cada lote, se midió el pH inicial y se dejó reposar durante 2 días para el secado. Finalmente, se desmoldaron los jabones para que continúe el curado durante 30 días. Por otro lado, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del producto incluyendo mediciones del pH y la masa de los lotes durante esta fase.

### **3.2. Evaluación de la pérdida de masa y rendimiento**

En este estudio, se investigó el impacto de la pérdida de masa del jabón en función a la dosificación de solución alcalina utilizada en la reacción de saponificación. Durante la fase de saponificación y curado del jabón, se queda cierta cantidad de agua atrapada en su estructura, la misma que con el tiempo se evapora, lo que provoca una disminución gradual del peso del jabón. El porcentaje de pérdida de masa en cada lote se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Pérdida de masa y rendimiento del proceso de saponificación los diferentes jabones producidos*

Lote	Masa inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (%)	Rendimiento real (%)
1	96	88	8,2	92
2	113	95	16,2	84

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

Los resultados indicaron que el lote 2 presenta un mayor porcentaje de pérdida de masa (16,2 %), seguido por el lote 3 (14,2 %) y finalmente, el lote 1 con un 8,2 %. El lote 1 muestra el menor valor, debido principalmente, a que la dosificación presenta menor cantidad de agua disponible para la volatilización. Además, este resultado indica un proceso más eficiente en comparación con los otros dos.

Desde el punto de vista del proceso industrial, se analizó el rendimiento real. Un rendimiento porcentual cercano al 100% indica que el proceso es muy eficiente, mientras que un valor bajo sugiere que existe un margen de mejora.

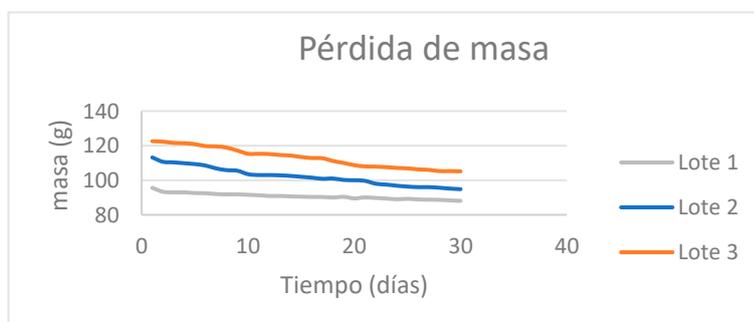
La tabla 3 presenta porcentajes de rendimiento mayores al 80% para los tres lotes. El lote 1 muestra un rendimiento de 92%, lo que indica un uso óptimo del material inicial. Por otro lado, el lote 2 presenta el valor más bajo (84 %), mismo que está relacionado con la alta pérdida de masa observada. Para finalizar, el lote 3 expone un rendimiento del 86%, que, aunque no es el más bajo, admite un margen de mejora.

Los resultados obtenidos sugieren que el rendimiento real es directamente proporcional al porcentaje de pérdida de masa. También, el menor porcentaje implica un mayor consumo de materias primas y energía, lo que aumenta los costos de producción.

La Figura 2 presenta la pérdida de masa (g) en función del tiempo (días) para tres lotes diferentes de jabón. Todos los lotes van perdiendo masa gradualmente a lo largo de 30 días. Con relación al lote 1 (gris) presenta la menor variación en su curva en términos absolutos. Debido a que, inicia con la menor masa (96 g) y disminuye hasta los 88 g. Mientras que, el lote 2 (azul) inicia en 113 g y se reduce de forma constante hasta 95 g. En tanto que, el lote 3 inicia con la masa más alta (123 g) y aunque también va disminuyendo, mantiene un valor más alto que los otros dos lotes (105 g).

**Figura 2.**

*Pérdida de masa del jabón ecológico en función del tiempo en días*



En conjunto, la gráfica indica una pérdida de masa progresiva en todos los lotes, pero cada uno

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

parte de un punto diferente y conserva tendencias de disminución distintas. La Figura 2 revela que la pérdida de masa es casi lineal para los tres lotes durante 30 días. Por consiguiente, la velocidad de pérdida de masa es constante, atribuyéndose principalmente a la evaporación del agua presente en la formulación. Este fenómeno impacta tanto en la calidad del jabón como en la durabilidad del mismo. Cabe destacar que los jabones saponificados en el proceso en frío contienen inicialmente una cantidad significativa de agua, lo que constituye en una pérdida de masa durante el proceso de curado.

Al realizar una comparación entre los tres lotes se deduce que la pérdida de masa en el lote 3 es más pronunciada, indicando una composición diferente. En tanto que, el lote 1 y 2 presentan una reducción menos pronunciada y con una tendencia similar entre ellos. La diferencia entre los lotes se debe a las variaciones en la composición y condiciones de almacenamiento.

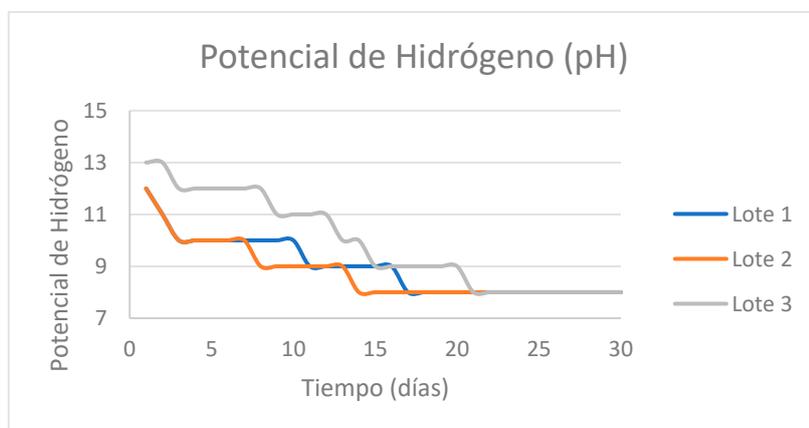
De acuerdo con, los resultados presentados en la Figura 2, a menor concentración de solución alcalina menor es la pérdida de masa. Por lo cual mientras mayor es la pérdida, menor será la vida útil del producto. Así mismo, este parámetro afecta la textura del jabón, haciéndolo más seco y menos cremoso.

### 3.3. Evaluación del pH

Para la medición de pH de los jabones se realizó mediante el uso de tiras medidoras de pH. Debido a que el jabón es sólido, fue necesario humedecer la superficie del jabón con agua destilada; al momento de entrar en contacto con el jabón, la tira medidora de pH cambió de color, y se comparó el color resultante con el índice de colores de pH. En la Figura 3 se visualiza la evolución del pH de cada uno de los lotes de jabones, teniendo en cuenta que el lote 1 se elaboró con los niveles bajos de hidróxido de sodio y agua, el lote 2 se elaboró con los niveles medios de hidróxido de sodio y agua y el nivel 3 se elaboró con los niveles altos de hidróxido de sodio y agua.

**Figura 3.**

*pH de jabones en función del tiempo de curado*



Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

De acuerdo a las mediciones de pH durante el tiempo de curado del jabón con los diferentes tratamientos dieron resultados positivos, pues en las tres experimentaciones se logró llegar a un pH 8, que es un pH adecuado para jabones de uso doméstico, antes del tiempo esperado de 30 días.

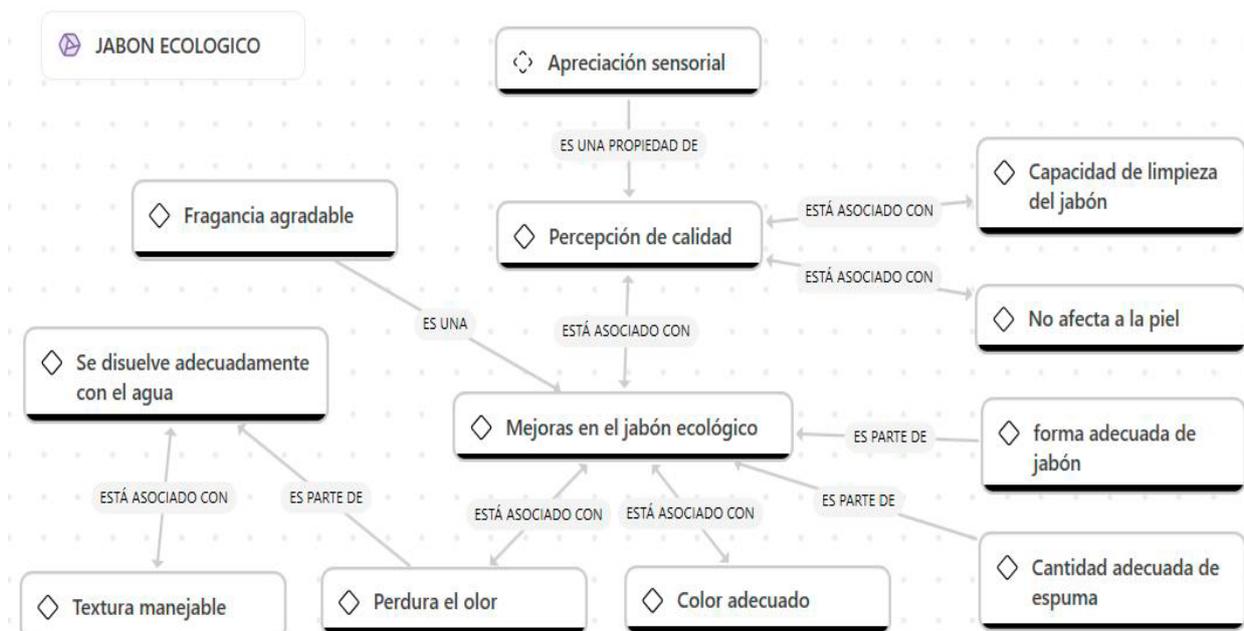
El lote 2 tardó 14 días en llegar a un pH de 8, el lote 1 tardó 17 días y el lote 3 tardó 21 días.

El pH obtenido de los jabones está directamente relacionado con las cantidades de agua e hidróxido de sodio utilizadas en cada uno de los lotes. El lote 3 fue el que tuvo una mayor cantidad de hidróxido de sodio, y por lo tanto tardó un mayor tiempo en llegar a un pH de 8. Los tres lotes cumplen con el rango de pH requerido por la norma NTE INEN 839.

### 3.4. Validación del jabón ecológico mediante un Focus Group

Las respuestas obtenidas en el grupo focal (Focus Group) se analizó con el Software Atlas.Ti. Y se obtuvieron las siguientes redes de datos. En la Figura 4, se puede visualizar las propiedades del jabón ecológico en términos de apreciación sensorial (características percibidas por los sentidos, forma del jabón, tamaño), capacidad de limpieza (no afecta a la piel, cantidad adecuada de espuma) y mejoras específicas (textura manejable, perdura el olor, color adecuado, se disuelve adecuadamente con el agua), destacando aspectos clave como la fragancia, seguridad para la piel y efectividad en la limpieza. Esto permite entender cómo cada característica contribuye a la mejora del jabón ecológico y a una mejor percepción de calidad.

**Figura 4.**  
Análisis con Atlas. Ti del grupo focal. Mejoras en el jabón ecológico.



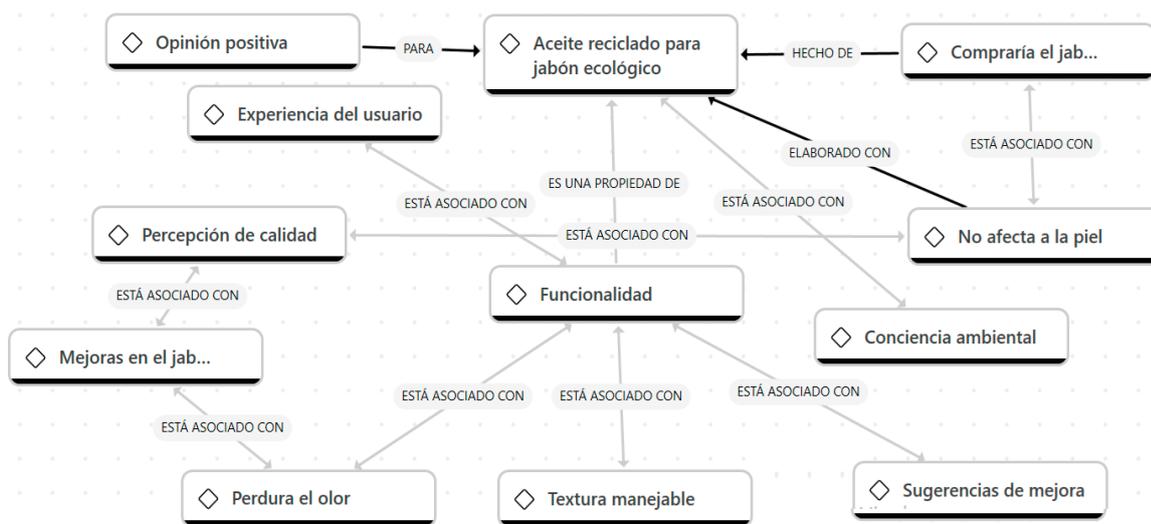
Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

En la Figura 5, se organizan las ideas relacionadas con el uso de AVU para fabricar jabón ecológico. En el centro del diagrama se encuentra el tema principal, “Aceite reciclado para jabón ecológico”, y las demás ideas están conectadas a este nodo central a través de relaciones lógicas y jerárquicas. El concepto principal busca generar una opinión positiva, la cual está ligada directamente a la experiencia del usuario. Esta experiencia se asocia con aspectos como la percepción de calidad y la funcionalidad del producto. La funcionalidad, a su vez, es una propiedad clave del jabón ecológico y está vinculada con beneficios específicos como “no afecta a la piel” y “conciencia ambiental”, resaltando así su impacto positivo tanto en la salud como en el entorno.

Otro aspecto relevante es la posibilidad de mejoras en el producto, que están asociadas con características específicas como la durabilidad del olor, la textura manejable y las sugerencias de mejora. Estas áreas reflejan el potencial de optimización del jabón ecológico para satisfacer aún más las expectativas de los usuarios.

**Figura 5.**

*Análisis con Atlas. Ti del grupo focal. Percepción de calidad.*



Finalmente, en la gráfica anterior se destaca que el jabón ecológico, al estar elaborado con aceite reciclado, influye en la decisión de compra de los usuarios. Este enfoque subraya los beneficios ambientales y funcionales del producto, consolidando su valor tanto para los consumidores como para el medio ambiente.

#### 4. DISCUSIÓN

Existen estudios previos sobre el uso de aceites vegetales reciclados o usados para elaborar jabón, sin embargo, se describen las diferencias y similitudes entre esas investigaciones y la actual (véase Tabla 4). Para elaborar la tabla se tomaron en cuenta criterios como la materia prima, las condiciones del proceso, el pH, entre otras.

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

**Tabla 4.**

*Comparación de parámetros de diversas investigaciones para el proceso de elaboración de jabón*

Parámetros	Jabón ecológico (Lote 2)	Referencias			
		Guijarro Polo (2016)	Samaniego Vanegas, (2019)	Toyo-Fernández & Toyo-Díaz, (2020)	Cruz Criollo & Davis Fernández, (2021)
<b>Materia prima</b>	NaOH Mezcla de aceite vegetal residual Agua	KOH Aceite vegetal residual Etanol	NaOH Aceite vegetal Agua	NaOH Mezcla de aceites coco/soya residual Agua	NaOH Aceite usado de cocina Agua Aceite esencial
<b>Tiempo de saponificación (min)</b>	40	90	6	N. D	N. D
<b>Tiempo de curado (días)</b>	14	30	20	15	45
<b>pH</b>	8	10	10,31	9,7406	9
<b>Rendimiento (%)</b>	84	7,20	73,44	98,7737	N. D

*Nota.* El parámetro N.D que se utilizó en la tabla indica que la información no está disponible. NaOH corresponde al compuesto hidróxido de sodio. KOH corresponde al compuesto hidróxido de potasio.

La materia prima es fundamental para la formulación en la elaboración de jabón. Con base en la tabla anterior, se observa que la mayoría de estudios emplean el NaOH como solución alcalina, mientras que Guijarro Polo (2016) utiliza el KOH. Generalmente, el hidróxido de sodio da lugar a productos sólidos y con mayor dureza, mientras que el hidróxido de potasio produce jabones líquidos. La investigación actual propone elaborar un jabón para lavar ropa y no de uso cosmético como los estudios previos.

Con respecto, al uso de etanol en lugar de agua, en la investigación de Guijarro Polo (2016), se infiere que el cambio podría influir en la solubilidad de los compuestos y en la velocidad de la reacción de saponificación del jabón. Estos cambios en las materias primas, evidencian la variedad de formulaciones que se pueden plantear en la elaboración de jabón.

Por otra parte, el tiempo de saponificación indica una variación amplia y significativa: desde 6 minutos en Samaniego Vanegas (2019) hasta 90 minutos en Guijarro Polo (2016). Mientras que, el presente estudio presenta un tiempo de 40 minutos. Un tiempo tan corto como el de Guijarro Polo (2016) sugiere la presencia de catalizadores, mismos que aceleran la reacción. La variabilidad observada en el proceso de saponificación sugiere una fuerte dependencia de ciertos factores, entre ellos la concentración de los reactivos, la calidad de los aceites utilizados y la metodología del proceso experimental.

Según los datos reportados en la tabla 4, el jabón elaborado a partir de AVU alcanzó un valor de

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

pH final de 8 después de 14 días de curado. Este resultado indica que el producto desarrollado posee una alcalinidad moderada, adecuada para el contacto con la piel humana, ya que se encuentra dentro del rango sugerido (7-8) para minimizar efectos irritantes o alteraciones en el microbiota cutáneo.

El valor de pH obtenido en esta investigación fue inferior al reportado en estudios previos, al igual que el tiempo de curado, que resultó ser el más corto entre las investigaciones comparadas. Por ejemplo, Samaniego Vanegas (2019) informó un valor de pH de 10,31 tras un período de curado de 20 días, mientras que Toyo-Fernández & Toyo-Díaz (2020) obtuvieron un pH de 9,7406 a los 15 días. La diferencia puede atribuirse a diversos factores como la formulación, el grado de purificación de los reactivos utilizados, las condiciones del proceso y la duración del curado. Asimismo, valores elevados de pH podrían estar asociados a la presencia de hidróxido de sodio residual que no reaccionó completamente con los ácidos grasos, lo que sugiere una saponificación incompleta en dichos casos.

El jabón realizado en esta investigación, presentó un descenso progresivo del pH más controlado hasta pH 8 durante los 14 días, a diferencia del jabón obtenido por Cruz Criollo & Davis Fernández (2021) que presentó inicialmente un pH 10 a las 4 semanas, y disminuyó hasta un pH de 9 a las 6 semanas. Esto sugiere que, si bien el hidróxido de sodio tiene una naturaleza alcalina (pH de 13) y es el factor predominante, y el AVU de cocina tiene un carácter ligeramente ácido (pH entre 5 y 6), el jabón obtenido no logra ser neutro, y si se pretende llegar a esta condición, se debería considerar la incorporación de un agente acidulante en la formulación.

Finalmente, se comparan los resultados sobre el rendimiento real del proceso. Los valores que se obtuvieron en el presente trabajo oscilaron en un rango entre el 84% y el 92% (Tabla 3). Los resultados son menores a los obtenidos por Toyo-Fernández & Toyo-Díaz (2020) con 98,7737%; sin embargo, son mayores al rendimiento mostrado en los estudios de Guijarro Polo (2016) con 7,2% y de Samaniego Vanegas (2019) con 73,44%. El rendimiento reportado con el valor más bajo puede deberse a varios factores entre ellos: la diferencia en el reactivo de la solución alcalina, el método de cuantificación y el tipo de método experimental aplicado.

En el contexto de la producción de jabón, los resultados de rendimiento real obtenidos en este estudio, reflejan un proceso altamente eficiente. Esto sugiere que las condiciones de elaboración de jabón han sido optimizadas, permitiendo aprovechar y gestionar al máximo la materia prima utilizada para garantizar un producto final de calidad sin desperdiciar recursos. Además, la confiabilidad del proceso lo convierte en una opción viable para su aplicación a mayor escala y la posibilidad de su automatización.

## 5. CONCLUSIONES

En el proceso de saponificación en frío, el uso de una solución alcalina compuesta de NaOH y agua, es clave para garantizar una transformación eficiente de los aceites vegetales en jabón. Esta reacción no sólo favorece la producción de jabones sólidos de estructura firme, sino que

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

también contribuye a la estabilidad de sus propiedades organolépticas como la textura, el aroma y la apariencia.

El tiempo de saponificación obtenido en esta investigación (40 minutos) representa una ventaja competitiva para la producción industrial de jabón, debido a que asegura la reacción completa sin la consecuente degradación de sus componentes y posibilita conseguir la dureza deseada del producto sin prolongar innecesariamente el proceso.

El jabón elaborado alcanzó un pH estable de 8 tras 14 días de curado, valor adecuado para el uso dermatológico y dentro del rango recomendado para evitar irritaciones cutáneas. Este resultado indica una saponificación completa y confirma la viabilidad del proceso para producir jabón ecológico, seguro y compatible con el cuidado de la piel.

El porcentaje de rendimiento real obtenido en la producción de jabón ecológico, con valores entre el 84% y el 92%, confirma la alta eficiencia del proceso productivo. Estos resultados sugieren que las condiciones de elaboración han sido óptimas, reflejando la gestión eficaz de los recursos y garantizando un producto final de calidad.

El grupo focal o focus group evidenció una percepción positiva hacia el jabón ecológico elaborado con aceite reciclado, destacando su funcionalidad, calidad y beneficios tanto para la piel como para el medio ambiente. Los participantes valoraron especialmente su impacto ambiental y sugirieron mejoras en aspectos como el aroma y la textura. Además, se identificó que el origen sostenible del producto influye favorablemente en la decisión de compra, reafirmando su potencial como alternativa ecológica y comercialmente viable.

La producción de jabón ecológico a partir de AVU de cocina constituye una alternativa sostenible que contribuye significativamente a la reducción de residuos y al aprovechamiento de recursos que, en condiciones normales, serían descartados. Este proceso no solo contribuye a la mitigación del impacto ecológico, sino que también responde a la creciente preferencia del consumidor por productos amigables con el ambiente, fortalece la economía circular y promueve prácticas responsables tanto en el ámbito doméstico como industrial.

## 6. REFERENCIAS

Alarcón Tarira, M. & Romero Mosquera, R. (2021). *Estudio y diseño de un sistema de recolección de aceite vegetal usado para el sector comercial y residencial del Norte de la ciudad de Guayaquil* [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21048/1/UPS-GT003413.pdf>

Arias Rodríguez, M. Y., & Ibarra Mojica, D. M. (2018). Saponificación artesanal de aceites de cocina usados, provenientes del municipio de Charalá. *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 2(1). <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2778>

Bailey, P. (2001). *Química orgánica: conceptos y aplicaciones*. Pearson Educación.

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

- Beyer, H & Walter, W. (2023). *Manual de Química Orgánica*. Editorial Reverté.
- Bombón, N., & Albuja, M. (2014). Diseño de una Planta de Saponificación para el Aprovechamiento del Aceite Vegetal de Desecho. *Revista Politécnica*, 34(1), 22. [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/304](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/304)
- Campoverde Jaramillo, A. B. (2022). *Elaboración de jabón a partir de aceite doméstico residual y cáscara de huevo*. [Tesis de Pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo] <http://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/20226>
- Chang, R. & Goldsby, K. (2013). *Química*. McGraw-Hill.
- Freire, C., Mayorga, F., Sánchez, A. & Vayas, T. (2020). *Sector aceites y grasas del Ecuador* [Archivo PDF]. <https://obest.uta.edu.ec/wp-content/uploads/2020/10/Sector-aceites-y-grasas-de-origen-vegetal-y-animal-del-Ecuador-1.pdf>
- González Canal, I., & González Ubierna, J. (2017). *Aceites usados de cocina: Problemática ambiental, incidencias en redes de saneamiento y coste del tratamiento en depuradoras* [Archivo PDF]. <https://www.residusmunicipals.cat/uploads/activitats/docs/20170427092548.pdf>
- Guijarro Polo, G. (2016). *Aprovechamiento del aceite residual y las cenizas provenientes de restaurantes (asaderos de pollos) en el sector Carapungo de la ciudad de Quito, para la obtención de productos de aseo personal*. [Tesis de Pregrado, Universidad de las Américas] <https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/6528/1/UDLA-EC-TIAG-2016-31.pdf>
- Hernández, J., Muñoz, L., & Cruz, L. (2004). Optimización de la eficiencia de producción de un proceso a partir de grasa de pollo para la obtención de jabón. *Conciencia Tecnológica*, 24. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94402407>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2023). *Información ambiental en hogares*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/hogares/>
- Monroy Pedroza, A., Pérez Palma, A., Ramos Zamora, O., Rivera Morales, M. & Zamora López, M. (2011). Elaboración de jabón en pasta de lavandería, a partir de aceite vegetal comestible de desecho, como materia prima. *Naturaleza y Tecnología*, 3(1), 18–25. <http://quimica.ugto.mx/index.php/nyt/article/viewFile/38/pdf1>
- Merriam – Webster. (2025, enero 6). pH. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/pH>
- Registro Oficial Suplemento 856 de 2012 [Ministerio del Ambiente]. Anexo C: Listado nacional de desechos especiales. 21 de diciembre de 2012.
- Observatorio Ambiental de Bogotá. (2019, diciembre 27). *Aceite de cocina, otra amenaza para los acuíferos*. <https://oab.ambientebogota.gov.co/aceite-de-cocina-otra-amenaza-para-los-acuiferos/>
- OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2024-2033. (2024, noviembre 12). OECD.
- Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

[https://www.oecd.org/es/publications/ocde-fao-perspectivas-agricolas-2024-2033\\_2b0c9d81-es.html](https://www.oecd.org/es/publications/ocde-fao-perspectivas-agricolas-2024-2033_2b0c9d81-es.html)

Picado, A. & Álvarez, M. (2008). *Química I Introducción al estudio de la materia*. EUNED.

Prieto Guerrero, M. (2019). *Análisis de viabilidad técnica y económica del manejo adecuado de aceite vegetal usado en las diferentes unidades económicas del Barrio Obrero- Puyo* [Tesis de Pregrado, Universidad Estatal Amazónica].  
<https://repositorio.uea.edu.ec/handle/123456789/531>

Regla, I., Vázquez Vélez, E., Cuervo Amaya, D. H., & Cristóbal Neri, A. (2014). La química del jabón y algunas aplicaciones. *Revista Digital Universitaria*, 15(5), 6.  
<https://www.revista.unam.mx/vol.15/num5/art38/>

Samaniego Vanegas, A. (2019). Exploración y propuesta de uso de aceites reciclados de la Industria Alimentaria. Caso práctico: formulación base de un jabón en barra para la Empresa Aquamarina [Tesis de Pregrado, Universidad del Azuay].  
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8960/1/14605.pdf>

Luraschi Somers, V. (2020). Producto domisanitario elaborado con aceite vegetal usado de Ciudad del Este. *FPUNE Scientific*, 14, 97 - 105.  
<http://servicios.fpune.edu.py:83/fpunescientific/index.php/fpunescientific/article/view/201>

Tacias Pascacio, V. G., Quintero, A. R., & Sánchez, B. T. (2016). Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: un caso de estudio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(3).  
<https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.05>

Toyo-Fernández, B. M. T., & Toyo-Díaz, M. J. (2020). Condiciones operacionales en la saponificación de aceite comestible residual. *Ingenium et Potentia*, 2(3), Article 3.  
<https://doi.org/10.3538/i.p.v2i3.942>

Vega, A. (2018, agosto 17). *Reúso y ahorro promueven dos planes del Ecuador*.  
<https://www.ecuadortimes.net/es/reuso-y-ahorro-promueven-dos-planes-del-ecuador/>

Araujo, C., Romero, J., & Lara, E. (2025). Hacia una industria sostenible: El arte de fabricar jabón ecológico a partir de aceite vegetal usado.

## Drones: Opportunities and challenges in civilian uses

### Drones: Oportunidades y desafíos en usos civiles

Lety Maveliza Satama Rivilla<sup>2</sup>[0000-0003-4235-9604], Elva Gioconda Lara Guijarro<sup>1</sup>[0000-0003-4192-7454]

<sup>1</sup>Universidad de las Américas, Quito, Ecuador

E-mail: [lety.satama@udla.edu.ec](mailto:lety.satama@udla.edu.ec)

<sup>2</sup>Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador

E-mail: [elvalara@istct.edu.ec](mailto:elvalara@istct.edu.ec)

Recibido: 10/03/2025

Aceptado: 12/05/2025

Publicado: 30/06/2025

#### RESUMEN

En la actualidad, los vehículos no tripulados han encontrado aplicaciones en una amplia variedad de sectores, abarcando desde la educación, medicina, agricultura hasta contextos bélicos. Estos dispositivos se han transformado en impulsores fundamentales de soluciones innovadoras. Su versatilidad permite que sean empleados para mejorar la eficiencia en diversas industrias, optimizando procesos y facilitando tareas que antes eran complejas o peligrosas para el ser humano. El objetivo principal es analizar el uso de drones en Ecuador en aplicaciones no militares, evaluando su impacto en la sociedad. La metodología utilizada es mixta, se efectúa una revisión bibliográfica sobre las diferentes aplicaciones y tipos de drones, incluyendo terrestres y aéreos, se analizan los datos obtenidos en encuestas realizadas a los estudiantes de una institución y la información proporcionada por expertos a través de entrevistas semiestructuradas. El análisis de datos cualitativos se llevó a cabo con la ayuda del Software Atlas. TI, identificando las diferentes relaciones entre nodos de redes de datos. Se concluye que, a medida que la tecnología avanza, el potencial de los drones continúa expandiéndose, ofreciendo nuevas oportunidades para el desarrollo y la mejora de la calidad de vida en múltiples ámbitos.

**Palabras clave:** vehículo no tripulado; innovación; tecnología; fuerza impulsadora.

#### ABSTRACT

Currently, unmanned vehicles have found applications in a wide variety of sectors, ranging from education, medicine, agriculture, and even warfare. These devices have become fundamental drivers of innovative solutions. Their versatility allows them to be used to improve efficiency in various industries, optimizing processes and facilitating tasks that were previously complex or dangerous for humans. The main objective is to analyze the use of drones in Ecuador in non-military applications, evaluating their impact on society. The methodology used is mixed: a

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

bibliographic review of the different applications and types of drones, including ground and aerial, is conducted. Data obtained from surveys conducted among students at an institution and information provided by experts through semi-structured interviews are analyzed. Data analysis is carried out with the help of Atlas. TI software, identifying the main relationships through networks and codes. It is concluded that, as technology advances, the potential of drones continues to expand, offering new opportunities for development and improving the quality of life in multiple areas.

**Index terms:** unmanned vehicle; innovation; technology; driving force.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Aunque el empleo de los vehículos no tripulados se remonta a inicios del siglo XX, estos han adquirido notoriedad en las últimas décadas, principalmente en el campo militar (Toraya, 2025), para el que fueron diseñados en principio y en el cual han logrado un nivel de desarrollo impresionante. Sin embargo, con la masificación en el ámbito civil, estos han adquirido notoriedad e importancia en otros campos, tales como la agricultura, ingeniería civil, minería, medio ambiente, seguridad y emergencia (Bustamante Chipol & Xolo Campechano, 2021; Ceña Arévalo, 2017). Según Cárdenas, (2021), indica que existen en el mercado drones para llevar servicio de paquetería de uso común para el público en general en donde los fabricantes tratan de hacer diseños con más horas de vuelo, y los profesionales que utilizan para uso industrial o militar, en donde prevalece los diseños para soportar diferentes pesos. Además, indica que, en algunos países de Latinoamérica, como Colombia, Brasil y Perú se encuentran en proceso de adaptación de drones para transportar pedidos a domicilio.

Dependiendo del tipo de dron, en el campo de la agroindustria se utilizan en agricultura de precisión para mejorar la productividad de los cultivos, en el entorno de la ingeniería civil, son útiles en Topografía, Cartografía, inspección de obra civil y vial (Digital Box, 2019; Toraya, 2025). En el tema de seguridad y emergencia, pueden utilizarse en situaciones de peligro y en la localización de víctimas en desastres naturales (Finance, 2023). Las actividades medioambientales se benefician del uso de los drones en actividades como monitoreo de la calidad del aire y del agua, investigación de la vida silvestre y la detección de incendios forestales (UMILES, 2022).

En los últimos años, debido a que los valores de fabricación descendieron, se ha diversificado el uso de drones en el ámbito comercial, específicamente en el servicio de entrega de mercadería, así como para la entrega de suministros médicos en áreas remotas o en emergencias (Cárdenas, 2021). También son utilizados en eventos de diferentes clases, conciertos, desfiles de moda, protestas, hasta partidos de fútbol, como en el mundial jugado en Brasil, en donde sobrevolaban las canchas de los encuentros para mostrar de mejores ángulos las jugadas (Huera Paredes, 2017).

Aunque la tecnología de drones en el Ecuador no está muy desarrollada, sus usos siguen las pautas de otros países. La creciente popularidad de los drones en Ecuador y cómo están transformando diferentes industrias, como la fotografía, la agricultura, el periodismo y la logística, entre otras, hacen que el uso de estos dispositivos sea cada vez más frecuente en el país. Al estar equipados con cámaras de video (y sensores de diferentes tipos) y tener

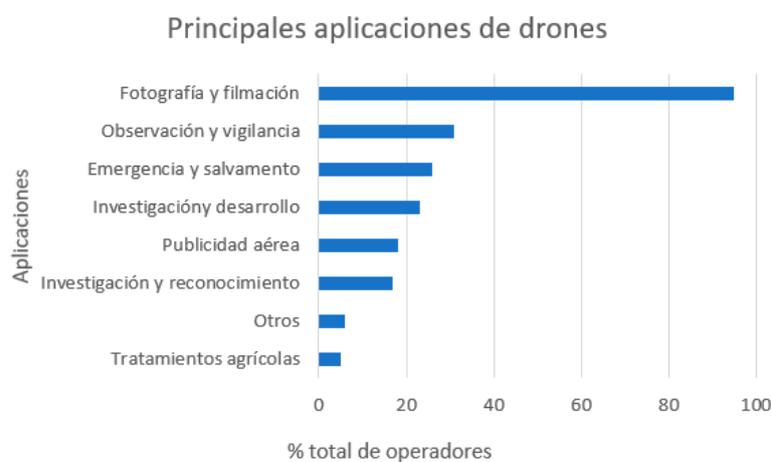
Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

comunicación bidireccional con el operador, sumado a la capacidad de volar a baja altura, hace que sean de gran utilidad en zonas montañosas o bosques. En el 2016 la utilización de drones en el campo del periodismo fue importante para la cobertura del terremoto de Ecuador, la oportunidad de capturar escenas en tiempo real ayudó a contar las noticias tal y como estaban sucediendo, de esta forma la situación que vivían estas familias afectadas fueron conocidos por una mayor cantidad de ecuatorianos y extranjeros, los mismos que se volcaron para brindar su ayuda en un momento tan crítico que vivía el país (Bustamante Chipol & Xolo Campechano, 2021; Ceña Arévalo, 2017; Cruz, 2017).

La figura 1 muestra las aplicaciones de los drones por porcentajes, en campos laborales específicos, de acuerdo con AESA (AESA, 2020).

**Figura 1.**

*Principales aplicaciones de los drones, tomado de AESA.*



En seguridad ciudadana, la policía nacional y metropolitana está utilizando los drones para apoyar desde el aire misiones consideradas peligrosas, haciendo una revisión del terreno sin hacer mucho ruido; las personas, las vías pueden ser monitoreadas y han permitido desarticular actividades ilegales en todo el territorio (Montoya & Briones, 2019). En Ecuador en el año 2020 la plataforma RAPPI en alianza con la empresa Aerialoop inició un plan piloto utilizando drones para entregas de pedidos desde el centro hasta las zonas alejadas del área urbana de Quito (Dávalos, 2020; Montoya & Briones, 2019).

Aunque la palabra dron evoca naves aéreas, también existen vehículos no tripulados para desplazamiento terrestre, acuático y submarino. Los drones terrestres varían en tamaño y capacidad, desde pequeños robots controlados a distancia hasta vehículos autónomos más grandes y sofisticados. Su versatilidad los convierte en herramientas valiosas en muchas industrias y aplicaciones, y se espera que su uso continúe creciendo a medida que la tecnología avance aún más (Delgado Penin, 2021).

Para su uso en tierra se dispone de un amplio rango de aplicaciones en los sectores productivo y de servicios, siendo principalmente útiles en el sector industrial. Básicamente sus campos de aplicación son los mismos que los drones aéreos, pero guardando sus características propias, precisamente debido a esto, se han desarrollado nuevas aplicaciones para los drones terrestres, tales como la logística y entrega de paquetes (Cena Arévalo, 2017; DGAC, 2025). En los campos de educación y desarrollo tecnológico, los drones terrestres se utilizan en programas educativos

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

y competencias para promover el aprendizaje en robótica y automatización. En búsqueda y rescate en terrenos accidentados o áreas afectadas por desastres naturales.

Algunos autores se refieren el uso de un dron terrestre para reparto de productos en un campus universitario (Digital Box, 2019; Huera Paredes, 2017). Además, menciona una adaptación hecha a un dron aéreo, para operar en tierra. Es posible que el evento que hizo públicas las aplicaciones no bélicas de los drones fuera la pandemia de gripe por COVID 19, durante este período el gobierno de la República Popular China, entre otras medidas, hizo un uso intensivo de los drones para enfrentar la crisis sanitaria y mitigar sus efectos. Las aplicaciones más destacadas incluyeron el monitoreo de áreas públicas para verificar el distanciamiento social requerido, así como la detección de posibles infectados, mediante la lectura de temperatura corporal; la entrega de suministros médicos y alimenticios en áreas de confinamiento; la desinfección de áreas públicas (Finance, 2023; Gutiérrez et al., 2017; UMILES, 2022).

El uso de tecnologías disruptivas como la geomática (teledetección, fotografía aérea, la obtención de modelos de elevaciones, los sistemas de información geográfica, la geodesia, la técnica de medir tierras, entre otras), informática, inteligencia artificial y comunicaciones que trabajan con datos georreferenciados para la adquisición, procesamiento y visualización tridimensional de los datos, ha despertado el interés del uso de drones en el campo de la geología, vigilancia de tráfico en ciudades inteligentes, vigilancia fronteriza, controles de aforo y entretenimiento, esto debido a la posibilidad de adquirir y analizar fácilmente información contenida en datos de afloramientos, formas de terreno, congestión, pasos ilegales, cantidad de personas en una localidad y videos de altura entre otros (Delgado Penin, 2021; Finance, 2023).

Utilizando diferentes técnicas implementadas en drones para obtener datos de difícil acceso como sensores LiDAR, cámaras multispectrales y otros dispositivos afines, se tiene una herramienta útil en zonas remotas, inaccesibles, con mucha vegetación o demasiado congestionadas. Los vehículos no tripulados resultan útiles al enfrentar problemas relativos a la accesibilidad del terreno, tiempo requerido para la adquisición y procesamiento de datos, así como al reducir los costos operativos relacionados con las tareas en las que reemplazan a las personas (Toraya, 2025).

Existen diferentes marcas y modelos de drones disponibles en el mercado ecuatoriano, entre ellos se tiene DJI, Potensic, Hubsan, Autel, Xiaomi, 3DR, Parrot. Las características son varias como de peso, tipo de cámara, sensores, transmisión, resolución fotográfica, tiempo de vuelo, calidad de grabación, distancia de transmisión de vídeo, número de hélices, alcance de distancia, altura que puede volar en caso de drones de vuelo, entre otras (DJI, 2022; Drones, 2019).

Según la DGAC, (2021) los requisitos obligatorios que se necesitan para hacer volar un dron en Ecuador son los siguientes: "1. Formulario FORMATO-200/DGAC Ecuador; 2. Certificado de registro de matrícula de aeronave; 3. Certificado de Aeronavegabilidad; 4. Póliza de seguro de la aeronave; 5. Comprobante de pago de la transferencia internacional de fondos; y 6. Peso máximo de despegue". No se conoce la cantidad total de drones que hay en Ecuador, sin embargo, la Dirección General de Aviación Civil a partir del 5 de mayo de 2025 está implementado un sistema de registro para todas las aeronaves no tripuladas en el país y así garantizar su operación segura (DGAC, 2025; Sarango, 2025).

La regulación para drones en Ecuador están basados en varios artículos en donde se encuentran considerados la regulación de distancia de vuelo, altura máxima, horas de operación,

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

responsabilidad de lo que pueda pasar el momento en que se encuentra volando, limitaciones que van de acuerdo al fabricante del dispositivo, seguros en caso de que pueda hacer algún daño a terceras personas, cumplimiento de las leyes y reglamentaciones locales para el vuelo del dron tomando en cuenta que también es una nave (5-DGAC-DGAC-2020-0110-R-Reglamento-de-RPAs, 2020.; DGAC, 2025). Según la “Dirección General de Aviación Civil con Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0074-R de 30 de agosto de 2020, aprobó el nuevo Reglamento que norma la Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs)” (DGAC, 2021).

La Tabla 1 proporciona una visión general de los tipos de drones utilizados en Ecuador, su propósito y el contexto temporal de su adopción (AESA, 2020; Dávalos, 2020; DGAC, 2025).

**Tabla 1.**

*Tipos de drones que hay en Ecuador.*

Tipo de Dron en Ecuador	Utilización	Año de Inicio
Drones Agrícolas	Son utilizados para monitorear diferentes tipos de cultivos y gestión de recursos.	2015
Drones de inspección	Evaluación de infraestructuras y mantenimiento, sitios en donde es peligroso que ingrese un ser humano.	2016
Drones de fotografía aérea	Captura de imágenes para turismo y publicidad. En la actualidad también son utilizados para grabaciones de reuniones o eventos sociales.	2014
Drones de mapeo	Cartografía y levantamientos topográficos. Son muy utilizados a nivel de volcanes, tomando en cuenta que Ecuador se encuentra en zona volcánica.	2017
Drones de Rescate	Búsqueda y rescate en emergencias, especialmente de desastres naturales.	2018
Drones de Vigilancia	Monitoreo de áreas protegidas y conservación	2019
Drones de Entrega	Transporte de productos y suministros	2020

La versatilidad y la capacidad de autonomía de los drones han llevado a un crecimiento constante en su adopción en todo el mundo y se espera una mayor diversificación y especialización en el futuro, incluyendo Ecuador.

En Ecuador se han utilizados drones por ejemplo en el terremoto de Manabí (2016) en donde realizaron sobrevuelos en áreas de difícil acceso. También se han utilizado en operaciones de búsqueda en el Chimborazo en el año 2017, en donde las imágenes aéreas ayudaron a identificar rutas y posibles ubicaciones de los desaparecidos en terrenos difíciles. Otra utilización fue en los desastres naturales en la Amazonía en 2019, que facilitó la identificación de áreas afectadas y la planificación de asistencia humanitaria. En operativos de rescate en playas, drones equipados con cámaras térmicas fueron utilizados para localizar personas desaparecidas en el agua. Estos dispositivos permitieron una búsqueda más rápida y eficiente.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS / DESARROLLO

Se ha utilizado una metodología mixta, basada en revisión bibliográfica en línea, utilizando principalmente motores especializados en búsqueda de artículos académicos, tales como Web

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

of Science, Scopus, JCR y Google Académico; encuestas y entrevistas semiestructuradas que se aplicaron a especialistas en el tema.

Se analizó la información encontrada y se determinó cuáles eran las principales aplicaciones en las que actualmente se están utilizando los drones, poniendo énfasis en el campo de la industria. Para el análisis de la información obtenida en las entrevistas se utilizó el software Atlas. TI.

Se realizó una encuesta acorde a la población institucional. La fórmula para utilizar en el cálculo de la muestra fue la siguiente:

$$n = \frac{(Z^2 * p * q * N)}{(e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q)}$$

Donde:

**n:** tamaño de la muestra

**Z:** Valor Z correspondiente al nivel de confianza deseado (ej. 1.96 para 95% de confianza)

**p:** Proporción estimada de la población que posee la característica de interés (si no se conoce, se usa 0.5)

**q:** 1 - p (complemento de p)

**N:** Tamaño de la población

**e:** Error muestral deseado (precisión)

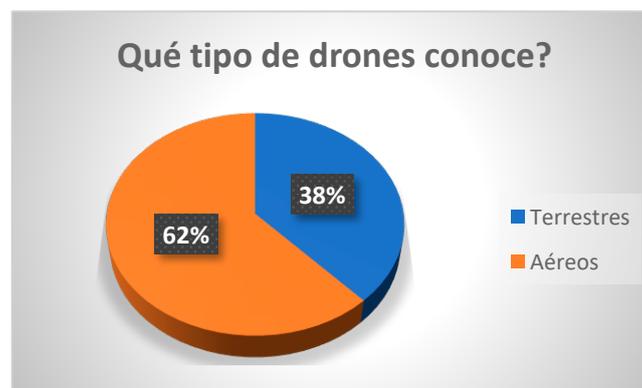
#### ***Cálculo de la muestra:***

Población de 500 personas, con un nivel de confianza del 95% (Z=1.96), una proporción estimada del 50% (p=0.5), y un error muestral deseado del 5% (e=0.05).

$$n = \frac{(1,96^2 * 0,5 * 0,5 * 500)}{(0,05^2 * (500 - 1) + 1,96^2 * 0,5 * 0,5)} = \frac{480,2}{2,2079} \approx 217$$

El tamaño de la muestra a utilizar es de 210 estudiantes.

Los resultados de las encuestas realizadas son los siguientes:



Conocimiento general de los drones. La mayoría de los encuestados (62%) afirma conocer los

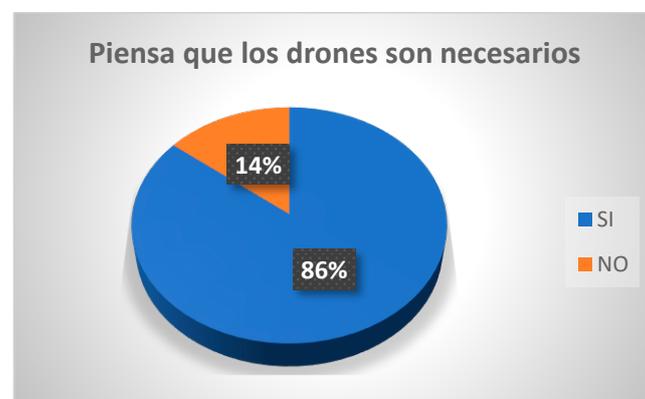
drones aéreos, lo que indica una conciencia general sobre la tecnología de drones en la población.



Aunque un 76% de los encuestados indican que no han manejado un dron, existe un 24% que si ha utilizado drones en trabajos específicos. Esto sugiere que, a pesar del conocimiento teórico, la experiencia práctica con estos dispositivos es aún limitada.



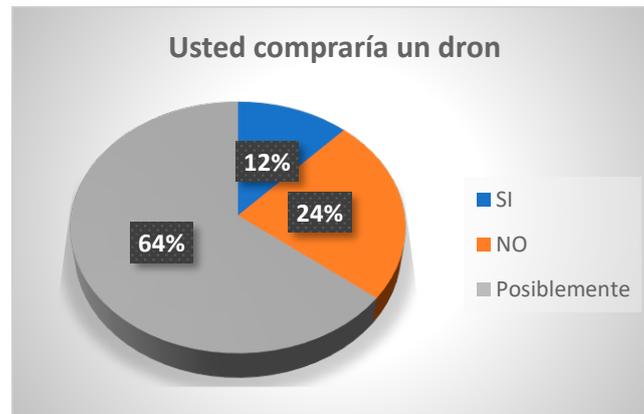
Solo un 10% de las instituciones educativas utilizan drones en sus programas de estudio. Esto destaca una oportunidad significativa para integrar la tecnología de drones en la enseñanza práctica en diversas carreras técnicas.



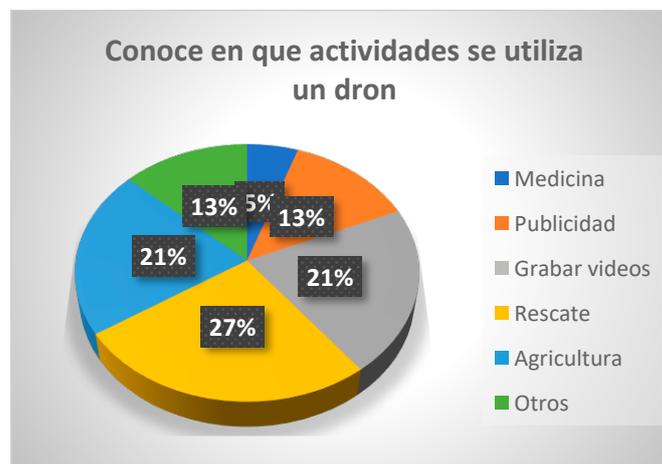
Un alto porcentaje (86%) de los encuestados considera que los drones son necesarios, lo que

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

refleja una percepción positiva sobre su utilidad y potencial en diferentes ámbitos.



Aunque un 64% de los encuestados muestra interés en la compra de un dron, solo un 12% afirma que definitivamente lo haría. Esto puede estar relacionado con la falta de especialización en áreas donde el uso de drones es esencial.



La mayoría de los encuestados menciona que conocen drones de tipo rescate, lo que podría indicar un enfoque en aplicaciones de emergencia y ayuda humanitaria.

### 3. RESULTADOS

La información que se encuentra en la siguiente tabla es resultado del análisis realizado en diferentes bases de datos como Scopus, Google Scholar, entre otras.

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

**Tabla 1.**

*Información obtenida en las diferentes bases de datos.*

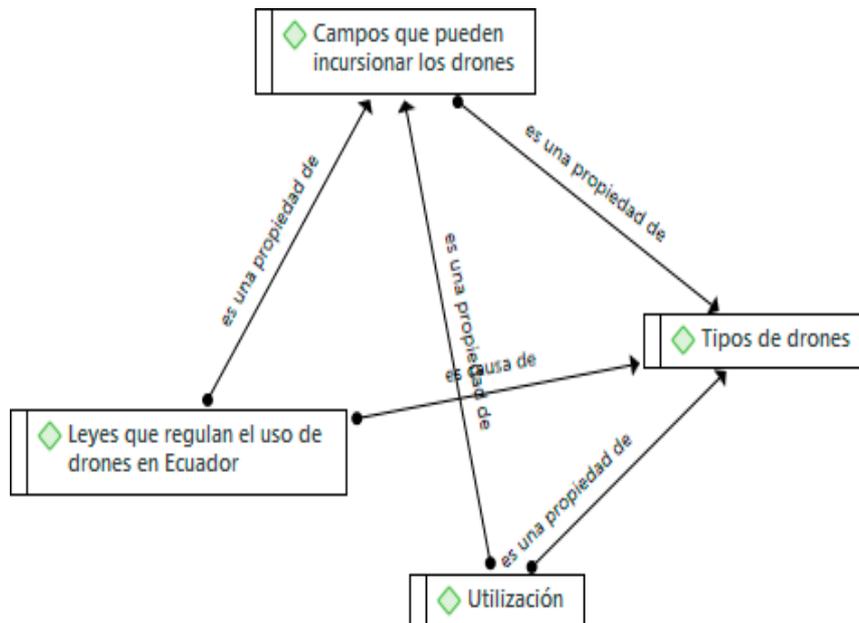
<b>Parámetros proporcionados por los especialistas</b>	<b>Resultados encontrados</b>
Beneficios de utilizar Drones	Evita riesgos a los operadores humanos. Optimiza costos y tiempos. Aumenta la eficiencia y la rapidez en la realización de algunas tareas. Pueden alcanzar lugares de difícil acceso. Pueden recopilar datos de alta definición. Aerofotogrametría. Control de incendios.
Campos en los que pueden incursionar los Drones	Revisión de estructuras de obra civil. Levantamiento geográfico y topográfico. Protección medioambiental. Turismo y cinematografía. Educación y formación en drones. Agricultura, fertilización y actividades fitosanitarias. Publicidad y arte visual.
Crecimiento del mercado de Drones en el Ecuador	Disminución de los precios de los drones. Poco mercado para drones terrestres por el tema de seguridad. La disminución de costos estimula el crecimiento del mercado. Aunque la percepción es de crecimiento, no existen datos exactos del número de unidades vendidas en el país. Impulsa el mercado de capacitación en el manejo de drones.
Desventajas de utilizar Drones	Se puede violar la privacidad de las personas. Interferencia con la aviación civil. Tráfico de elementos prohibidos por la ley.
Legislación regulatoria	No existe una legislación fuerte. Apenas existe un reglamento emitido por la DAC. Debe existir una legislación consistente, por temas de seguridad. Ministerio de transporte, de defensa y del interior deben involucrarse. En la redacción y aplicación de las leyes pertinentes.
Tipos de Drones	Aéreos. Terrestres. Marítimos. De ala fija. Cuadricópteros.
Áreas de uso	Drones de consumo, para uso personal y recreativo. Fotografía y videografía. Drones de entrega. Drones educativos y de entrenamiento. Industria agrícola en el control de cultivos y cosechas.

Acorde con los datos obtenidos, después de realizar las entrevistas a especialistas en el tema, éstos fueron procesadas con ayuda del software Atlas.TI, para encontrar las relaciones entre los distintos elementos que conforman la tecnología de los drones, tipos, utilización, se encontraron las siguientes redes de datos que se presentan en la figura 2.

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

**Figura 2.**

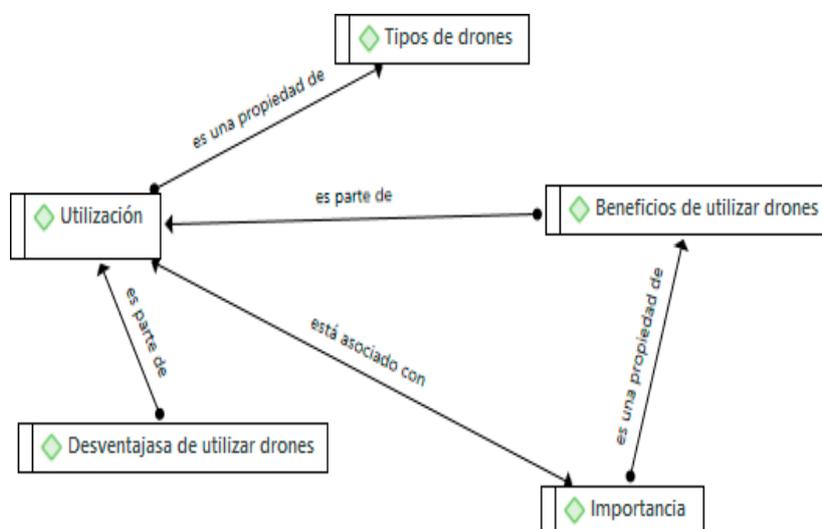
*Relaciones entre la tipología del dron y sus aplicaciones*



En la figura 2 se evidencia las relaciones entre los tipos de drones utilizados y sus aplicaciones directas. Además, puede apreciarse la dependencia de los parámetros mencionados con la necesidad de una legislación sólida, que vaya más allá de una simple reglamentación.

**Figura 3.**

*Relaciones entre ventajas y desventajas en el uso de drones*

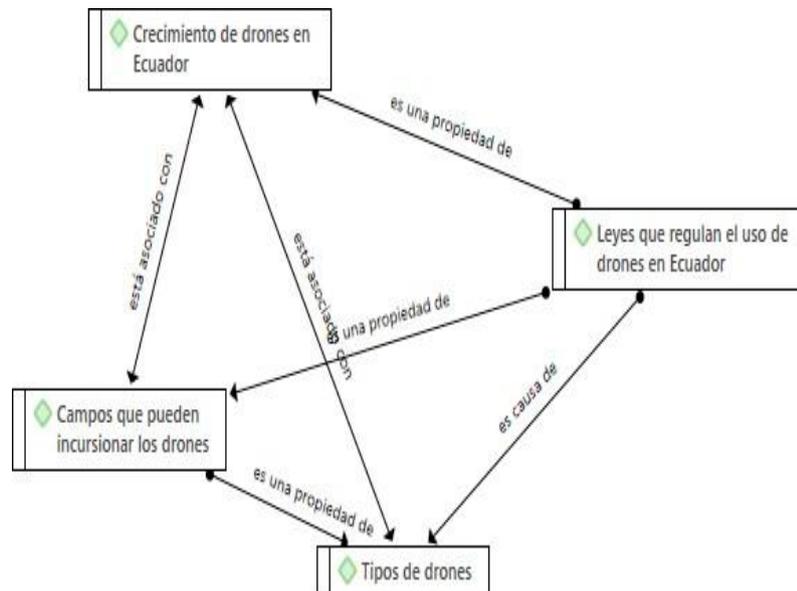


La figura 3 resalta las relaciones entre los tipos de drones y los usos que se les da, aparecen las características ventajosas, así como los problemas relacionados con los mismos. Se ve una relación exclusiva entre los beneficios de utilizar los drones y la importancia que tiene su aplicación.

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

**Figura 4.**

*Relaciones entre los campos de aplicación de drones, su tipología y el desarrollo comercial relacionado con ellos.*



La figura 4, muestra el crecimiento del mercado de drones en el Ecuador, relacionándolo con la tipología de los mismos, sus campos de aplicación, vuelve a aparecer la necesidad de contar con una legislación consistente. Además, hay una interacción directa entre todos y cada uno de los parámetros expuestos.

#### 4. DISCUSIÓN

Las aplicaciones que están desarrollándose para los drones tienen una repercusión en la mejora de la calidad de vida de las personas en áreas de producción de bienes o servicios, la industria en general, seguridad en el trabajo, salud, entre otras. Por ejemplo, en el área de seguridad en el trabajo, al limitar la exposición de personas a agentes químicos, evitan la realización de ciertas tareas eliminando factores de riesgo ergonómico, prestan asistencia sanitaria o ayuda de forma rápida y eficaz.

En este estudio, se investigó el potencial de los drones en una variedad de aplicaciones no militares y se exploró cómo estas innovadoras plataformas aéreas están redefiniendo el panorama tecnológico actual y futuro. Los hallazgos sugieren que los drones tienen un papel crucial que desempeñar en una amplia gama de sectores industriales, desde la logística hasta la agricultura, pasando por la gestión de emergencias y la infraestructura civil.

Interpretando los resultados de nuestro estudio, se observa que los drones actuales ofrecen una serie de ventajas significativas en comparación con los drones convencionales. Su capacidad de adaptación y versatilidad los hace ideales para abordar una variedad de desafíos operativos y logísticos en entornos dinámicos y cambiantes. Por ejemplo, en el sector de la logística, los drones pueden ofrecer soluciones de entrega más flexibles y eficientes al adaptarse a diferentes tipos de carga y entornos de entrega.

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

Al comparar hallazgos con la literatura existente, se puede observar que los resultados están en línea con investigaciones previas que han destacado el potencial transformador de los drones en aplicaciones no militares. Sin embargo, también se identifica áreas donde nuestro estudio aporta nuevas perspectivas y contribuciones al campo. Por ejemplo, nuestro enfoque en el diseño práctico de un dron transformador para la entrega de suministros médicos en áreas remotas ofrece una nueva aplicación concreta de esta tecnología emergente.

También se destaca la importancia de considerar cuidadosamente los desafíos éticos, sociales y regulatorios asociados con el uso de drones en aplicaciones no militares. Si bien se reconoce el potencial de esta tecnología para mejorar la eficiencia y la efectividad de una variedad de operaciones, también hay que enfatizar la necesidad de abordar preocupaciones relacionadas con la privacidad, la seguridad y la aceptabilidad pública. En cuanto a legislación, el país está atrasado con respecto al resto del mundo, puesto que aquí apenas se cuenta con un reglamento elaborado por la Dirección General de Aviación Civil, en tanto que en otros países se ha elaborado, con el concurso de diferentes organismos relacionados con el tema de los drones, un conjunto coherente de leyes y reglamentos que rigen esta actividad. “La primera clasificación que se puede hacer de un dron es en cuanto a los aspectos legales, los UAV que pesan más de 150 kg se rigen por la normativa de la Agencia Europea de Seguridad Aérea, mientras que los que pesan menos de 150 kg, aplica la legislación local” (Montoya & Briones, 2019). También se pueden clasificar según su tipo de alas, método de control o según uso como muestran en su estudio de Cruz, (2017).

La necesidad de un cuerpo legal surge por el uso indebido que se les puede dar a los drones. Además, la privacidad de las personas puede verse comprometida por el mal uso de estos dispositivos equipados con cámaras de video o cargados de dispositivos que pueden atentar contra la vida de la gente. Tomando en cuenta que el mercado de drones presenta una clara tendencia al crecimiento, aunque en el Ecuador no se puede tener datos exactos del número de drones que se comercializan, puesto que no hay obligatoriedad por parte del importador o comerciante minorista de llevar un registro exacto de sus ventas. Este mercado también impulsa productos derivados, como la implementación de escuelas de manejo de drones.

Además, al discutir las limitaciones del presente estudio, se reconoce que la investigación tiene ciertas restricciones que podrían afectar la generalización de nuestros resultados. Por ejemplo, la muestra utilizada puede no ser totalmente representativa de todas las aplicaciones potenciales de los drones actuales, lo que limita la amplitud de las conclusiones, tomando en cuenta que en Ecuador no hay un registro adecuado de la información y cantidad de drones que existe en el país.

## 5. CONCLUSIONES

Las aplicaciones de drones en Ecuador están en constante expansión, y su integración en diversos sectores no solo mejora la eficiencia y la seguridad, sino que también promueve un desarrollo más sostenible y responsable del país. La adopción de esta tecnología representa una oportunidad significativa para enfrentar desafíos contemporáneos y fomentar la innovación en el ámbito nacional.

Se nota una diversificación en el uso de drones, pues se ha pasado de una etapa en la que eran

meros objetos de entretenimiento, a tener usos en el campo profesional donde ahorran tiempo y dinero en tareas que antes eran realizadas manualmente, como sucede en el campo del periodismo que gracias a la utilización de estos dispositivos se puede pasar las noticias en el momento de los hechos, con fotografías y videos de gran resolución.

Es necesario generar una legislación adecuada, que regule la importación, fabricación y uso de los drones. Tomando en cuenta que en la actualidad muchos de los drones llegan de forma ilegal al país y son utilizados para cometer delitos.

En el campo educativo, el diseño e implementación de drones constituye una fuerte herramienta didáctica aplicada en el campo de la electrónica, mecánica y programación, además de su integración con el IoT, pudiendo realizar diferentes prototipos que luego podrían ayudar a ciertos campos como son la agricultura, ingeniería, entre otros.

## 6. REFERENCIAS

- 5-DGAC-DGAC-2020-0110-R-Reglamento-de-RPAs.pdf. (s. f.). Recuperado 23 de octubre de 2023, de <https://www.aviacioncivil.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/11/5-DGAC-DGAC-2020-0110-R-Reglamento-de-RPAs.pdf>
- AESA. (2020). *Drones | AESA-Agencia Estatal de Seguridad Aérea—Ministerio de Fomento*. <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones>
- Bustamante Chipol, D., & Xolo Campechano, J. (2021). *DISEÑO DE MECANISMO TERRESTRE PARA DRONES DE RESCATE EN ZONA DE DIFÍCIL ACCESO*. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/1223>
- Cárdenas, D. (2021). *Diseño de un Framework para la seguridad y privacidad en la implementación de servicio de paquetería mediante drones para el comercio electrónico en el Ecuador*. 43.
- Ceña Arévalo, D. (2017). *Reparto de mercancías a través de drones: Estudio y viabilidad* [Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/107148>
- Cruz, J. (2017). Elementos de la noticiabilidad a partir del uso periodístico de drones en la cobertura del terremoto en Ecuador del 2016. *Revista PUCE*, 104, 83-107.
- Dávalos, N. (2020). Rappi inicia un plan piloto de entregas con drones en Quito. *Primicias*. <https://www.primicias.ec/noticias/tecnologia/rappy-entregas-drone-quito-puemblo/>
- Delgado Penin, J. A. (2021). *Drones y redes terrestres celulares para el control/previsión de catástrofes naturales: Aspectos técnicos*. CONAMA 2020, Congreso Nacional del Medio Ambiente: 31 Mayo-03 Junio 2021, Centro de Convenciones Norte/IFEMA. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/388662>
- DGAC. (2021). *Emisión de permisos de sobrevuelo | Ecuador—Guía Oficial de Trámites y Servicios*. <https://www.gob.ec/dgac/tramites/emision-permisos-sobrevuelo>
- DGAC. (2025). *Inducción al uso de drones en el Ecuador – Dirección General de Aviación Civil*. Dirección General de Aviación Civil. <https://www.aviacioncivil.gob.ec/inducccion-al-uso->

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

de-drones-en-el-ecuador/

- Digital Box. (2019). *Diferentes usos de los drones*. DIGITAL BOX. [https://digitalbox.com.ec/blogs/25\\_14-usos-de-drones-que-seguro-no-conoc%C3%ADas.html](https://digitalbox.com.ec/blogs/25_14-usos-de-drones-que-seguro-no-conoc%C3%ADas.html)
- DJI. (2022). *DJI ECUADOR | TIENDA OFICIAL EN ECUADOR*. <https://djiecuador.ec/>
- Drones, E. (2019, agosto 23). *DJI Ecuador—Drones en Ecuador* [Comercial]. <https://dronesec.club/dji-ecuador/>
- Finance. (2023). *Los Drones Comerciales están Revolucionando las Operaciones Comerciales | Toptal®*. Toptal Finance Blog. <https://www.toptal.com/finance/market-research-analysts/los-drones-comerciales-estan-revolucionando-las-operaciones-comerciales>
- Gutiérrez, A. R. H., Duarte, M. A. T., France, R. G., & León, R. R. arbitrada de divulgación científica de la U. T. de. (2017, enero 23). *El uso de drones en ciencias de la tierra*. (Ensenada) [Text]. Reaxión. Revista arbitrada de divulgación científica de la Universidad Tecnológica de León. [http://reaxion.utleon.edu.mx/Art\\_El\\_uso\\_de\\_drones\\_en\\_ciencias\\_de\\_la\\_tierra.html](http://reaxion.utleon.edu.mx/Art_El_uso_de_drones_en_ciencias_de_la_tierra.html)
- Huera Paredes, J. V. (2017). *Sistema Aéreo de drones para mejorar el levantamiento topográfico de los predios de la ciudad de Tulcán* [bachelorThesis]. <https://dspace.uniandes.edu.ec/handle/123456789/6474>
- Montoya, P. B., & Briones, R. V. (2019). EMPLEO DE LOS UAV, EN OPERACIONES DE SEGURIDAD Y VIGILANCIA EN LAS ÁREAS ESTRATÉGICAS EN EL ECUADOR. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 4(4), Article 4. <https://doi.org/10.24133/rcsd.V4N4.2019.05>
- Sarango, S. (2025). *Conozca cómo registrar un dron en Ecuador, el trámite está disponible desde este 5 de mayo* [Noticias]. PRIMICIAS. <https://www.primicias.ec/sociedad/registro-drones-ecuador-tramite-aviacion-civil-dgac-95529/>
- Toraya, C. V. (2025). LA FASCINANTE HISTORIA DE LOS DRONES. *+Ciencia*, 37, Article 37.
- UMILES. (2022, octubre 6). *Tipos de Drones ▷ Clasificación por uso y características*. <https://umilesgroup.com/tipos-de-drones/>

Satama, L., & Lara, E. (2025). Drones: Opportunities and challenges in civilian uses.

## Performance Evaluation of FIR Filters on Low-Cost Microcontrollers for Voice Processing Applications.

### Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

Sebastián Lozada<sup>1</sup>[0000-0002-0315-246X], Lenin Ramiro Merino Villegas<sup>2</sup>[0000-0003-4235-9604], Katherine Cumbe  
Vega<sup>3</sup>[0000-0003-4235-9604]

<sup>3</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [wlozada@istct.edu.ec](mailto:wlozada@istct.edu.ec)

<sup>2,1</sup> Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Ecuador  
E-mail: [imerino@tecnologicosucre.edu.ec](mailto:imerino@tecnologicosucre.edu.ec)

<sup>3</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [kcumbe@istct.edu.ec](mailto:kcumbe@istct.edu.ec)

Recibido: 10/04/2025

Aceptado: 10/06/2025

Publicado: 30/06/2025

#### RESUMEN

Este artículo presenta un análisis del comportamiento de filtros digitales de respuesta finita al impulso (FIR) implementados en microcontroladores de bajo costo, con el fin de mejorar la calidad de señales de voz en ambientes ruidosos. Se emplearon dos plataformas: Arduino Mega 2560 y ESP8266, programadas mediante el entorno Arduino IDE. Se diseñó un filtro pasa banda para el rango de 85-255 Hz utilizando una ventana de Hamming. La evaluación se basó en métricas como la relación señal/ruido y el tiempo de procesamiento, aplicadas a datos capturados de seis participantes. Los resultados evidencian diferencias en la capacidad de procesamiento y atenuación de ruido entre ambos dispositivos, destacando al ESP8266 como una opción más robusta para escenarios exigentes. Este estudio aporta una visión útil para desarrolladores que buscan soluciones accesibles en procesamiento digital de señales.

**Palabras clave:** Filtros FIR; Arduino; ESP8266; Microcontroladores; Señales de voz.

#### ABSTRACT

This article presents an analysis of the behavior of finite impulse response (FIR) digital filters implemented on low-cost microcontrollers, aimed at enhancing voice signal quality in noisy environments. Two platforms were used: Arduino Mega 2560 and ESP8266, programmed through the Arduino IDE. A bandpass filter targeting the 85–255 Hz range was designed using a

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

Hamming window. The evaluation was based on metrics such as signal-to-noise ratio and processing time, applied to data gathered from six participants. Results reveal differences in processing capabilities and noise attenuation, with the ESP8266 emerging as a more robust option for demanding scenarios. This study offers valuable insights for developers seeking accessible solutions in digital signal processing.

### ***Index terms:***

## **1. INTRODUCCIÓN.**

El procesamiento digital de señales (DSP, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una herramienta importante en la era tecnológica actual, con aplicaciones en áreas tan diversas como las telecomunicaciones, la medicina, la acústica, la ingeniería eléctrica y los sistemas de control automático (Bertran, 2006; Moya, 2011). Esta disciplina permite la manipulación matemática de señales mediante algoritmos implementados en plataformas computacionales, lo que ha revolucionado la forma en que se capturan, transmiten y procesan datos del mundo real.

Uno de los principales desafíos en el tratamiento de señales reales es la presencia de ruido e interferencias no deseadas que pueden distorsionar la información contenida en dichas señales. En este contexto, el filtrado digital se posiciona como una de las técnicas más empleadas para eliminar componentes indeseables, suavizar señales o extraer características relevantes (Bobadilla, Gómez & Bernal, 1999). Los filtros digitales pueden clasificarse en dos grandes grupos: los de respuesta infinita al impulso (IIR) y los de respuesta finita al impulso (FIR). Aunque ambos tipos son útiles, los filtros FIR se destacan por ser intrínsecamente estables y por conservar una fase lineal, lo que los convierte en la opción preferida para aplicaciones donde la fidelidad temporal de la señal es crítica, como en el procesamiento de señales de voz (Suárez & Jacinto, 2009; López Marín, 2003).

Los filtros FIR requieren una mayor cantidad de operaciones matemáticas en comparación con los IIR, ya que no utilizan retroalimentación y su salida depende exclusivamente de una cantidad finita de valores pasados de la entrada (Paz, Rodríguez & Galasso, 2016). Esta característica, aunque ventajosa desde el punto de vista de la estabilidad, impone exigencias considerables al hardware, especialmente cuando se desea implementar dichos filtros en sistemas embebidos con recursos computacionales limitados.

En este contexto, los microcontroladores de bajo costo, como el Arduino Mega 2560 y el ESP8266, han emergido como plataformas atractivas para tareas de prototipado, educación técnica, e incluso implementación de sistemas funcionales en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT) (Herrador, 2009; Arduino, 2015; Valderrama & Brea, 2020). Estos dispositivos ofrecen una alternativa accesible y versátil para la programación de filtros digitales, permitiendo a investigadores, estudiantes y desarrolladores llevar a cabo soluciones de bajo presupuesto con resultados satisfactorios.

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

El Arduino Mega 2560 cuenta con un microcontrolador ATmega2560 de 8 bits, 16 MHz de frecuencia de reloj, y 8 KB de memoria SRAM. Aunque es ideal para tareas de control, su capacidad de procesamiento puede resultar limitada frente a aplicaciones intensivas como el filtrado en tiempo real. Por otro lado, el ESP8266, con su arquitectura de 32 bits y capacidad de operar hasta a 160 MHz, además de contar con conectividad Wi-Fi integrada, representa una opción más potente para tareas de procesamiento digital más exigentes (Valderrama & Brea, 2020).

Sin embargo, pese a la creciente popularidad de estas plataformas, son pocos los estudios empíricos que comparan de forma sistemática su rendimiento al ejecutar filtros FIR bajo condiciones realistas. La mayoría de investigaciones se centran en aspectos de conectividad, control de periféricos o automatización básica, dejando de lado el análisis de su comportamiento en tareas de procesamiento de señales digitales (Álvarez Cedillo, Lindig Bos & Martínez Romero, 2008; Romero et al., 2009).

En particular, el procesamiento de señales de voz es un caso de estudio relevante, ya que estas señales poseen características frecuenciales bien definidas y son sensibles a la distorsión en fase o a la atenuación selectiva de ciertas bandas. El rango fundamental de la voz humana oscila entre los 85 Hz y 255 Hz, siendo esta la banda que se busca preservar al momento de aplicar un filtrado digital (Martínez Barrera et al., s. f.). Para lograrlo, una técnica efectiva es el uso de ventanas, como la ventana de Hamming, que permite reducir la presencia de lóbulos secundarios en la respuesta en frecuencia del filtro, mejorando su selectividad y minimizando el efecto de fugas espectrales (Bertran, 2006; Martínez Barrera et al., s. f.).

Asimismo, la correcta selección de la frecuencia de muestreo es fundamental para evitar aliasing y preservar la integridad de la señal original. Según el teorema de Nyquist-Shannon, se debe utilizar una frecuencia al menos el doble de la frecuencia máxima contenida en la señal. Para la voz humana, cuya banda puede llegar hasta los 4 kHz, se recomienda una frecuencia de muestreo de al menos 8 kHz (Osorio et al., 2008).

Considerando lo anterior, el presente trabajo se orienta a evaluar el rendimiento de un filtro FIR pasa banda implementado en las plataformas Arduino Mega 2560 y ESP8266, con énfasis en su capacidad para filtrar señales de voz bajo condiciones de ruido ambiental. Para ello, se diseñó un filtro con ventana de Hamming centrado en el rango de 85-255 Hz, y se programó en ambas plataformas utilizando el entorno Arduino IDE. A través de pruebas experimentales con seis participantes, se recolectaron datos sobre la relación señal/ruido (SNR), el tiempo de procesamiento y la estabilidad del filtrado, con el objetivo de determinar cuál de los dos dispositivos ofrece un mejor desempeño bajo las mismas condiciones de operación. Este estudio no solo aporta evidencia práctica sobre las capacidades reales de microcontroladores económicos en el procesamiento digital de señales, sino que también pretende ofrecer una guía útil para su aplicación en contextos educativos, de investigación y de desarrollo tecnológico de bajo costo. Además, abre la puerta a nuevas líneas de investigación, como la evaluación de filtros IIR en los mismos entornos, la implementación de filtros adaptativos, o el uso de otras ventanas

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

como la de Blackman, Kaiser o Hann, para comparar su eficacia en condiciones similares (Gil Jiménez, s. f.; Moya, 2011).

## **MATERIALES Y MÉTODOS / DESARROLLO**

### **2.1 Diseño Experimental:**

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo y experimental, orientado a analizar el rendimiento de un filtro digital de respuesta finita al impulso (FIR) implementado sobre microcontroladores de bajo costo. El objetivo fue evaluar la efectividad del filtrado de señales de voz en entornos con ruido ambiental simulado, empleando plataformas Arduino Mega 2560 y ESP8266, ampliamente utilizadas en entornos educativos y de desarrollo.

Se diseñó un entorno de pruebas controlado en el que seis participantes emitieron señales de voz previamente definidas, las cuales fueron capturadas, digitalizadas, y procesadas mediante el filtro FIR programado en ambos dispositivos. La evaluación se centró en observar el comportamiento del sistema en condiciones de carga realista, considerando métricas como la relación señal-ruido (SNR), la respuesta temporal y la estabilidad del filtrado.

Para garantizar la replicabilidad de los resultados, se estableció una frecuencia de muestreo de 8000 Hz, suficiente para cubrir el espectro relevante de la voz humana (hasta aproximadamente 4 kHz), en cumplimiento con el teorema de Nyquist. Las señales se registraron mediante el uso de un micrófono de electreto conectado a un preamplificador con salida analógica, acoplado a las entradas de los microcontroladores.

La implementación del filtro y la recolección de datos se realizaron utilizando herramientas de libre acceso y código abierto, favoreciendo el acceso a la tecnología y la posibilidad de replicar el experimento en otros contextos. Esta metodología también permite una adecuada transferencia al aula, fortaleciendo el aprendizaje basado en proyectos.

### **2.2 Especificaciones de hardware**

#### **Arduino Mega 2560**

Este microcontrolador incorpora el chip ATmega2560, una arquitectura de 8 bits con frecuencia de reloj de 16 MHz, 8 KB de memoria SRAM, y 54 pines de entrada/salida digital. Su facilidad de uso, compatibilidad con sensores y bajo costo lo han convertido en un estándar en contextos educativos y de prototipado rápido.

#### **ESP8266 NodeMCU v1.0**

Basado en el núcleo Tensilica L106, este dispositivo ofrece una frecuencia de operación de 80 MHz, con posibilidad de overclock hasta 160 MHz, 96 KB de RAM y conectividad Wi-Fi integrada.

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

Es ampliamente utilizado en soluciones de Internet de las Cosas (IoT) por su potencia de procesamiento y capacidad de conectividad inalámbrica.

Ambos dispositivos fueron programados utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE, por su compatibilidad con múltiples plataformas, facilidad de depuración y amplia documentación de soporte (Arduino, 2015).

### 2.3 Diseño del filtro

Para el presente estudio se diseñó un filtro digital de tipo FIR (Finite Impulse Response) con el objetivo de eliminar el ruido de fondo y conservar únicamente las frecuencias esenciales de la señal de voz humana. Este tipo de filtro fue seleccionado debido a su estabilidad inherente (al no utilizar retroalimentación) y a su fase lineal, lo que garantiza que las componentes de la señal no se vean desplazadas temporalmente, preservando su forma original (Suárez & Jacinto, 2009).

#### Filtro FIR

Un filtro FIR es un algoritmo que procesa una señal digital aplicando una fórmula matemática que multiplica las muestras recientes de la señal por un conjunto de coeficientes predefinidos. La salida del filtro es la suma de todos estos productos. A diferencia de los filtros IIR, los FIR no dependen de valores anteriores de la salida, lo cual evita la acumulación de errores y garantiza una respuesta controlada. Esto es especialmente útil cuando se trabaja con microcontroladores de bajo costo que no cuentan con hardware especializado para operaciones matemáticas complejas.

La estructura matemática general de un filtro FIR de orden  $N$  es:

$$y[n] = \sum_{k=0}^N h[k] \cdot x[n - k]$$

Donde:

$y[n]$ : es la salida filtrada en el instante  $n$

$x[n - k]$ : son las muestras pasadas de la entrada

$h[k]$ : son los coeficientes del filtro (también llamados impulso del sistema)

$N$ : es el orden del filtro, relacionado directamente con la cantidad de coeficientes utilizado.

#### Aplicación de la ventana de Hamming

Para mitigar estos efectos, se aplicó la técnica de ventaneo, específicamente utilizando la ventana

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

de Hamming, una de las más utilizadas por su equilibrio entre atenuación de lóbulos secundarios y ancho de banda. Esta técnica consiste en multiplicar los coeficientes ideales del filtro por una función ventana, lo cual suaviza las transiciones y mejora la calidad del filtrado.

La ecuación matemática de la ventana de Hamming aplicada es la siguiente:

$$\omega(n) = \frac{1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right)}{2}, 0 \leq n \leq M$$

donde:

$\omega(n)$ : es el valor de la ventana en la posición

$M$ : es el número total de coeficientes menos uno,

$n$ : es el índice actual de la muestra.

Esta ventana suaviza los bordes de la respuesta al impulso, evitando oscilaciones abruptas que puedan introducir ruido no deseado. Visualmente, se asemeja a una “campana” que reduce progresivamente el peso de los coeficientes más alejados del centro.

### **Configuración del filtro para implementado**

Para este proyecto se estableció una longitud de filtro de 31 coeficientes (orden 30). Esta longitud fue elegida como un compromiso entre una buena definición espectral y el rendimiento computacional aceptable para microcontroladores con recursos limitados como el Arduino Mega 2560.

Los coeficientes del filtro fueron calculados utilizando herramientas matemáticas en línea y validados con simulaciones previas en software especializado, asegurando que el filtro realmente cumpliera con el perfil de pasa banda deseado. El proceso de cálculo consistió en tres pasos:

1. Definición de la frecuencia de muestreo: Se estableció en 8000 Hz para cumplir con el teorema de Nyquist.
2. Cálculo de frecuencias normalizadas: Se convirtieron las frecuencias objetivo (85 Hz y 255 Hz) en fracciones de la frecuencia de muestreo.
3. Generación de coeficientes: Se utilizó una herramienta de diseño de filtros (como [fiiir.com](http://fiiir.com)) para obtener los valores y exportarlos en formato compatible con Arduino.

Finalmente, los coeficientes fueron codificados directamente en el entorno Arduino IDE, en un arreglo de tipo float, lo que permitió su uso en tiempo real durante la adquisición de datos desde el micrófono y el procesamiento mediante sumatorias desplazadas.

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

## Implementación en código (Arduino IDE)

La programación del filtro FIR se realizó en el entorno Arduino IDE mediante código estructurado que incluye las siguientes etapas:

### 1. Definición del arreglo de coeficientes:

Se declaró un arreglo de tipo float con los 31 coeficientes precalculados.

```
float h[31] = {  
  -0.0012, -0.0023, -0.0034, -0.0042, -0.0043, -0.0031, 0.0000, 0.0054,  
  0.0129, 0.0215, 0.0293, 0.0341, 0.0343, 0.0290, 0.0185, 0.0043,  
  -0.0114, -0.0262, -0.0370, -0.0415, -0.0384, -0.0279, -0.0123, 0.0054,  
  0.0216, 0.0329, 0.0370, 0.0335, 0.0232, 0.0080, -0.0093  
};
```

### 2. Captura de señal:

Se utilizó un convertidor analógico a digital (ADC) del microcontrolador para tomar lecturas del micrófono cada 125  $\mu$ s (8000 muestras por segundo). Esto se logró mediante una función millis() o interrupciones temporizadas.

### 3. Desplazamiento de datos:

En cada lectura nueva, se desplazaron los valores anteriores de entrada para mantener un buffer circular de las últimas 31 muestras:

```
for (int i = 30; i > 0; i--) {  
  x[i] = x[i-1];  
}  
x[0] = analogRead(A0);
```

### 4. Aplicación del filtro:

El cálculo del valor filtrado se hizo mediante la suma ponderada de las muestras almacenadas:

```
float y = 0;  
for (int i = 0; i < 31; i++) {  
  y += h[i] * x[i];  
}
```

### 5. Salida del resultado:

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

El valor y fue enviado por el puerto serial para su visualización en tiempo real mediante CoolTerm.

Este método permitió aplicar el filtrado en tiempo real en ambos microcontroladores, comparando posteriormente el rendimiento de cada uno. Aunque el algoritmo es sencillo, representa fielmente el comportamiento teórico de un filtro FIR y puede escalarse a más coeficientes si el microcontrolador lo permite.

## **2.4 Recolección de datos**

Se trabajó con una muestra de seis participantes adultos, con edades comprendidas entre 25 y 50 años, quienes grabaron frases previamente definidas en un entorno con ruido blanco simulado. El propósito fue evaluar la respuesta del sistema ante señales contaminadas, replicando condiciones comunes de interferencia en ambientes reales.

Las señales se capturaron a través del puerto serial de los microcontroladores utilizando la aplicación CoolTerm, y posteriormente fueron exportadas a hojas de cálculo para su análisis. Esta herramienta permitió registrar las señales en tiempo real, facilitando la visualización inmediata de los datos antes y después del filtrado.

Las pruebas consistieron en aplicar el filtro diseñado a las señales originales y evaluar los siguientes aspectos:

- Relación señal/ruido (SNR) antes y después del filtrado.
- Tiempo de procesamiento de cada microcontrolador durante la ejecución del filtro.
- Variación de frecuencia capturada antes y después del proceso de filtrado.

Para asegurar un muestreo adecuado, se utilizó una frecuencia de 8 kHz, en cumplimiento con el teorema de Nyquist para señales de voz, que establece que la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima presente en la señal (Shannon, 1949; Osorio et al., 2008).

## **3. RESULTADOS**

La evaluación experimental se enfocó en comparar el desempeño del filtro FIR implementado en los microcontroladores Arduino Mega 2560 y ESP8266 al procesar señales de voz en condiciones de ruido controlado.

### **3.1 Frecuencia de muestreo y coeficientes**

El filtro FIR diseñado para este estudio fue configurado con una longitud de 31 coeficientes no nulos, lo que permitió mantener una buena resolución frecuencial sin comprometer la eficiencia del sistema. La frecuencia de muestreo fue de 8000 Hz, valor que garantiza una cobertura adecuada del espectro de la voz humana (hasta 4000 Hz), en conformidad con el teorema de

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

Nyquist (Shannon, 1949; Osorio et al., 2008).

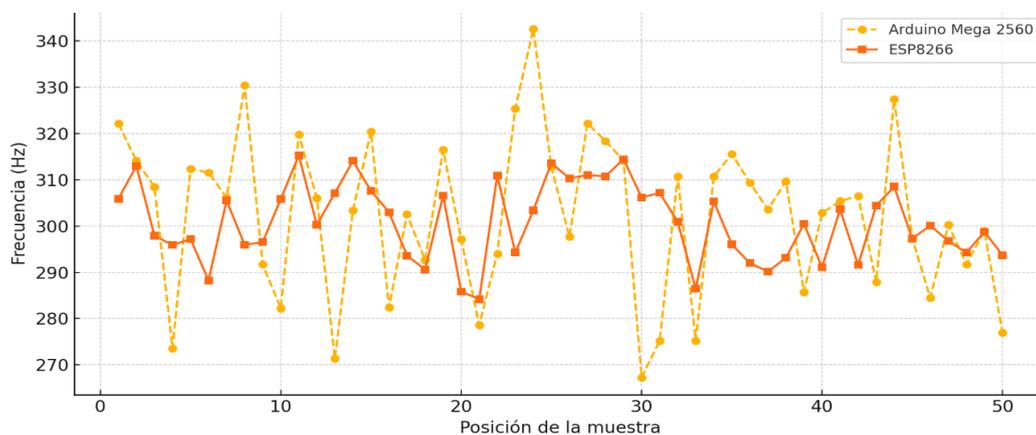
Los coeficientes fueron precalculados y cargados como constantes en la memoria del programa en Arduino IDE. Esta implementación permitió realizar el filtrado en tiempo real sobre las muestras captadas desde un micrófono de electroreto, usando los microcontroladores Arduino Mega 2560 y ESP8266.

### 3.2 Resultados visuales y cuantitativos

A continuación, se presentan dos gráficas comparativas de frecuencias detectadas antes y después del filtrado para el primer participante:

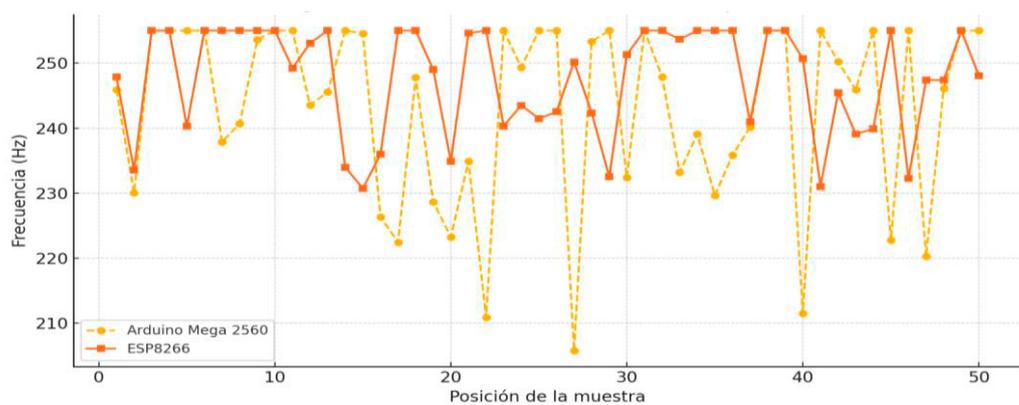
**Figura 1**

*Frecuencias detectadas (sin filtrar) vs posición de muestra Participante 1.*



**Figura 2.**

*Frecuencias filtradas vs posición de muestra Participante 1.*



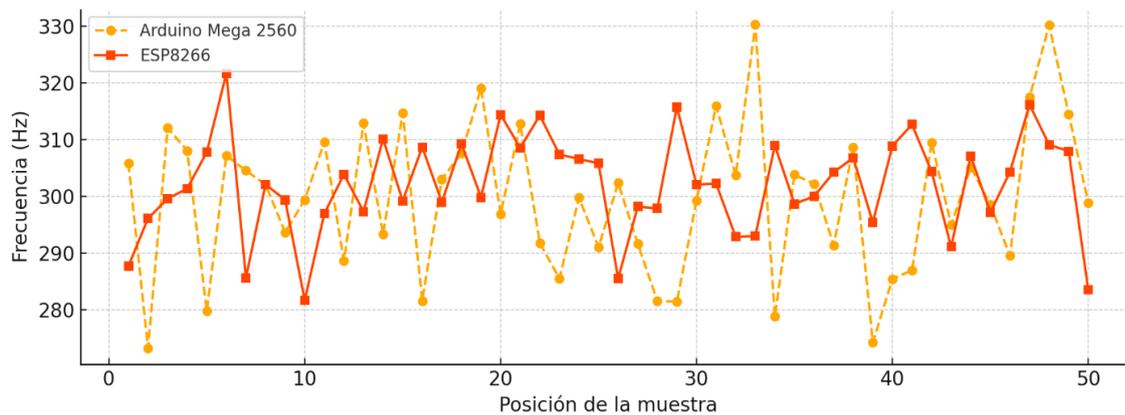
Las gráficas de frecuencias detectadas antes y después del filtrado para los seis participantes muestran una clara diferenciación en el comportamiento de los dos microcontroladores

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

evaluados. En primer lugar, se observa que el ESP8266 mantiene una salida más estable y menos dispersa entre muestras, lo cual es indicativo de un mejor control sobre el proceso de filtrado. Su capacidad para mantener valores constantes dentro de la banda deseada (85–255 Hz) revela una mayor precisión numérica y eficiencia computacional al momento de ejecutar las operaciones del filtro FIR.

**Figura 3.**

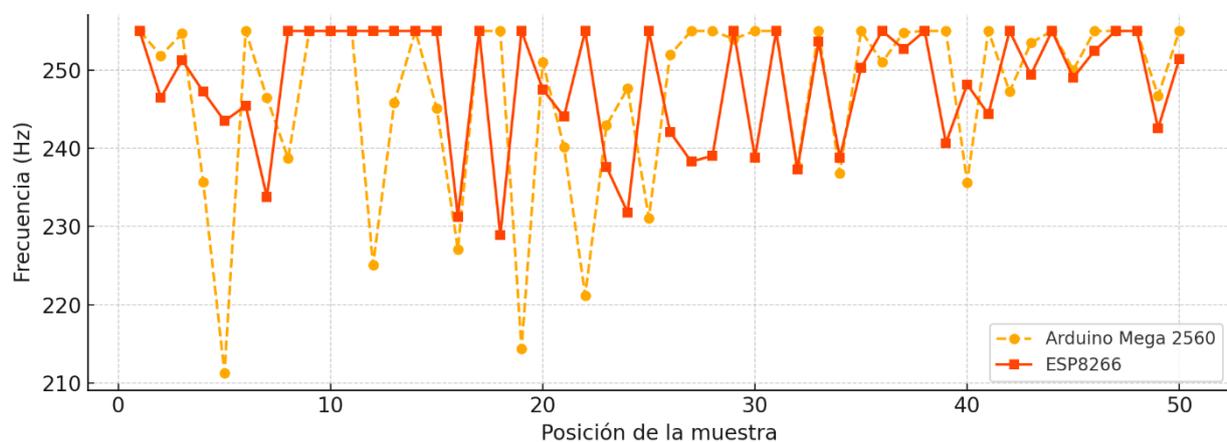
*Frecuencias detectadas (sin filtrar) vs posición de muestra Participante 5.*



En contraste, el Arduino Mega 2560 evidencia mayores fluctuaciones en las frecuencias captadas, particularmente en los primeros instantes del muestreo. Esto puede deberse a su arquitectura más limitada (procesador de 8 bits y menor frecuencia de reloj), que ralentiza el procesamiento en tiempo real y puede generar retrasos perceptibles entre el ingreso de datos y la aplicación del filtro. Aunque logra realizar el filtrado correctamente, su respuesta es menos estable y sufre más ante condiciones de ruido moderado o alto.

**Figura 4.**

*Frecuencias filtradas vs posición de muestra Participante 5.*



Las métricas de desempeño consideradas fueron: Relación señal/ruido (SNR) en dB antes y

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

después del filtrado. Tiempo promedio de procesamiento por paquete de datos (en milisegundos). Ganancia máxima, atenuación fuera de banda y desviación de frecuencia.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para uno de los participantes, representativos del comportamiento general:

Participante	SNR antes (Arduino)	SNR después (Arduino)	SNR antes (ESP8266)	SNR después (ESP8266)	Tiempo procesamiento Arduino (ms)	Tiempo procesamiento ESP8266 (ms)
P1	10.3	17.6	10.7	19.1	47.2	22.4
P2	10.0	18.0	10.3	19.4	49.1	23.5
P3	9.8	17.0	10.0	18.8	45.7	21.9
P4	10.1	17.5	10.6	19.9	48.3	22.0
P5	10.4	18.1	10.9	20.0	46.8	21.3
P6	9.9	16.9	10.2	18.7	47.9	22.6

Los resultados obtenidos demuestran que, en los seis participantes evaluados, el microcontrolador ESP8266 presentó un rendimiento superior en cuanto a la relación señal/ruido (SNR) después de aplicar el filtro FIR. En todos los casos, el valor del SNR mejoró significativamente, indicando una mayor capacidad del dispositivo para atenuar el ruido y preservar las frecuencias útiles de la voz humana. Este comportamiento se debe en gran medida a la mayor frecuencia de operación del ESP8266, así como a su arquitectura de 32 bits, que le permite ejecutar operaciones matemáticas más rápidamente y con mayor precisión.

Además, el ESP8266 evidenció tiempos de procesamiento más reducidos, situándose consistentemente entre los 21 y 24 milisegundos, lo cual resulta ideal para aplicaciones que requieren procesamiento en tiempo real. Esta eficiencia en el cálculo refuerza su idoneidad para ser integrado en sistemas embebidos, dispositivos portátiles o soluciones IoT que operen bajo restricciones de latencia.

Por su parte, el Arduino Mega 2560 también logró una mejora notable en el SNR, pasando en promedio de valores cercanos a los 10 dB antes del filtrado a más de 17 dB después del filtrado, lo cual valida la correcta implementación del algoritmo. Sin embargo, este microcontrolador mostró tiempos de procesamiento significativamente más altos, en el orden de 45 a 50 milisegundos, y una mayor dispersión en los resultados, particularmente en presencia de ruido ambiental. Esto indica que su rendimiento es más variable y menos confiable bajo condiciones exigentes, lo cual puede limitar su uso en aplicaciones donde el tiempo de respuesta sea crítico.

Estos valores reflejan una mejora significativa en la calidad de la señal tras el filtrado, siendo más notable en el ESP8266 debido a su mayor capacidad de procesamiento.

En la mayoría de los participantes se puede ver que el ESP8266 alcanza de forma más rápida una estabilización en la frecuencia de salida, mientras que el Arduino requiere más muestras para generar una señal filtrada estable. Además, el ESP8266 muestra una menor amplitud en las oscilaciones de las frecuencias detectadas, lo que se traduce en una mayor capacidad para

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

discriminar el contenido útil de la señal frente al ruido.

Al analizar los seis casos, se confirma una tendencia consistente: el ESP8266 ofrece resultados más predecibles y homogéneos, lo cual es crítico para sistemas embebidos que operan bajo requerimientos estrictos de tiempo y confiabilidad. Esta consistencia también se refleja en las métricas cuantitativas: el microcontrolador ESP8266 no solo mejora más la relación señal/ruido, sino que lo hace en menor tiempo de procesamiento, lo cual es una ventaja clara frente a su contraparte.

Cabe destacar que ambos dispositivos logran cumplir el objetivo funcional del filtro: permitir el paso de las frecuencias vocales y atenuar el resto. Sin embargo, cuando el análisis se traslada al plano de la implementación práctica —considerando tiempo de respuesta, eficiencia energética y carga computacional—, el ESP8266 se posiciona como la opción más viable para aplicaciones reales que involucren el procesamiento digital de voz en tiempo real.

Finalmente, el comportamiento observado en estas gráficas también respalda la elección de la ventana de Hamming y del diseño FIR como adecuados para este tipo de señales. No obstante, el hardware sobre el cual se implementa el filtro resulta un factor determinante para garantizar el éxito de la aplicación. Así, este estudio aporta evidencia concreta sobre cómo la elección del microcontrolador afecta directamente la calidad del procesamiento y la viabilidad del sistema final.

## 2. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten comparar el comportamiento de los microcontroladores Arduino Mega 2560 y ESP8266 en la implementación de un filtro FIR pasa banda para señales de voz. Tal como se evidencia en las gráficas y tablas presentadas, ambos dispositivos fueron capaces de aplicar el filtrado con efectividad, pero se observaron diferencias significativas en términos de rendimiento y precisión.

El ESP8266 demostró una mayor capacidad de procesamiento, logrando tiempos de ejecución más bajos y una mayor estabilidad en los datos, especialmente en entornos simulados con ruido. Esto se debe, en gran parte, a su arquitectura más moderna y su frecuencia de reloj más alta, lo que coincide con lo reportado por Valderrama y Brea (2020), quienes destacaron su idoneidad para aplicaciones en tiempo real e IoT.

Por otro lado, el Arduino Mega 2560, si bien presentó un filtrado funcional, mostró ciertos retrasos al inicio del muestreo y mayor variabilidad en las frecuencias detectadas. Este comportamiento se alinea con las limitaciones previamente mencionadas por Herrador (2009), quien indicó que microcontroladores con menor capacidad de cómputo enfrentan desafíos en tareas de procesamiento intensivo como el DSP.

La mejora en la relación señal/ruido (SNR) tras aplicar el filtro fue evidente en ambos casos, lo

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

cual valida la eficacia del diseño del filtro FIR con ventana de Hamming. Tal como explican Martínez Barrera et al. (s. f.), esta técnica permite reducir los lóbulos secundarios y mejorar la selectividad del filtro, lo cual se vio reflejado en los resultados experimentales.

Otro punto relevante es que, aunque el filtro fue diseñado con características idénticas para ambos dispositivos, los datos de entrada capturados por cada microcontrolador no fueron exactamente iguales, debido a diferencias internas en el manejo de señales y en la conversión analógica-digital. Esto generó pequeñas discrepancias en los resultados, especialmente en la atenuación fuera de banda.

En conjunto, estos hallazgos reafirman que los filtros FIR son viables en plataformas de bajo costo, siempre que se consideren las capacidades del hardware seleccionado. Para proyectos donde la eficiencia temporal y la estabilidad son críticas, el ESP8266 resulta una opción más robusta. Sin embargo, el Arduino Mega 2560 sigue siendo una alternativa válida en contextos educativos o de prototipado inicial, donde los recursos computacionales no son tan exigentes.

### 3. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar la viabilidad de implementar filtros FIR pasa banda en plataformas de bajo costo como el Arduino Mega 2560 y el ESP8266, enfocándose en el procesamiento de señales de voz en entornos con interferencia. Los resultados demuestran que ambos microcontroladores son capaces de ejecutar el filtrado con éxito, mejorando significativamente la relación señal/ruido en las señales procesadas. Sin embargo, el ESP8266 evidenció un desempeño superior, con tiempos de procesamiento más bajos, mayor estabilidad y mejor respuesta ante condiciones ruidosas, lo que lo convierte en una opción preferente para aplicaciones en tiempo real y sistemas embebidos más exigentes. Por su parte, el Arduino Mega 2560 se presenta como una alternativa adecuada para entornos educativos, prototipado o aplicaciones donde las limitaciones de hardware no comprometan el funcionamiento general del sistema.

Este trabajo aporta evidencia empírica sobre el uso de filtros FIR en microcontroladores económicos, y sienta las bases para futuras investigaciones orientadas a: Optimizar algoritmos de filtrado digital en arquitecturas embebidas, evaluar el desempeño con señales reales en ambientes no controlados y explorar la implementación de filtros adaptativos o IIR para comparación.

### REFERENCIAS

Álvarez Cedillo, J. A., Lindig Bos, K. M., & Martínez Romero, G. (2008). Implementación de filtros digitales tipo FIR en FPGA. *Polibits*, (37), 75–81.

<https://www.scielo.org.mx/pdf/poli/n37/n37a12.pdf>

Arduino, S. A. (2015). Arduino. Arduino LLC.

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

- Bertran Albertí, E. (2006). Procesado digital de señales: Fundamentos para comunicaciones y control – I. Edicions UPC.  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36546/9788498802597.pdf>
- Gil Jiménez, F. J. (s. f.). Aplicación de filtros digitales FIR e IIR en señales de audio.
- Herrador, R. E. (2009). Guía de usuario de Arduino. Editorial Reverté.
- López Marín, D. A. (2003). Historia, definición, descripción, tipos y aplicaciones de filtros electrónicos.
- Martínez Barrera, M. C., Ibarra Manzano, O. G., Ibarra Manzano, M. A., & Arceo Miquel, L. J. (s. f.). Diseño de filtros digitales FIR mediante la técnica de ventanas. Universidad Autónoma de Querétaro.  
<https://www.uaq.mx/investigacion/difusion/veranos/memorias-VII/ITQ%20Martinez%20Barrera.doc>
- Moya, J. P. A. (2011). Procesamiento digital de señales. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Osorio, J. A. C., Garzón, H. B. C., & Osorio, J. A. C. (2008). Fundamentos y aplicación del muestreo en señales ubicadas en las bandas altas del espectro. *Scientia et Technica*, 14(39), 37–42.
- Paz, M. E., Rodríguez, O. A., & Galasso, C. L. (2016). Uso de la placa Discovery para el cálculo e implementación de filtros FIR e IIR. XIX Concurso de Trabajos Estudiantiles (EST 2016) - JAIIO 45. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/58186>
- Shannon, C. E. (1949). Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, 37(1), 10–21.
- Suárez, C. A. H., & Jacinto, E. (2009). Una nueva metodología en el diseño de filtros digitales FIR sobre FPGA. *Visión Electrónica*, 3(2), 40–47.
- Valderrama, J., & Brea, E. (2020). ESP8266: Un microcontrolador para el Internet de las Cosas. Universidad Central de Venezuela, Informe Técnico.

Lozada, S. Merino, L. & Cumbe, K. (2025). Evaluación del rendimiento de filtros FIR en microcontroladores económicos para aplicaciones de procesamiento de voz.

## Comparative analysis of the deformations of a truss bridge using the MOLA KIT and SAP 2000.

## Análisis comparativo de las deformaciones de un puente celosía mediante el kit MOLA y SAP 2000

Kerly Dayana Ríos Trávez<sup>1</sup>, Henry Joel Carrera Erazo<sup>2</sup>, Leonardo Francisco Beltrán Venegas<sup>3</sup>,  
Elva Gioconda Lara Guijarro<sup>4</sup> [0000-0003-3025-4792]

<sup>3</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [kdriostravez@istct.edu.ec](mailto:kdriostravez@istct.edu.ec)

<sup>2</sup><sup>1</sup> Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Ecuador  
E-mail: [hjcarreraerazo@istct.edu.ec](mailto:hjcarreraerazo@istct.edu.ec)

<sup>3</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [lbeltran@istct.edu.ec](mailto:lbeltran@istct.edu.ec)  
E-mail: [hjcarreraerazo@istct.edu.ec](mailto:hjcarreraerazo@istct.edu.ec)

<sup>4</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [elvalara@istct.edu.ec](mailto:elvalara@istct.edu.ec)

Recibido: 10/03/2025

Aceptado: 28/05/2025

Publicado: 30/06/2025

### RESUMEN

En el campo de la ingeniería estructural, el análisis y diseño de puentes ha evolucionado significativamente gracias al desarrollo de herramientas físicas y digitales que permiten comprender el comportamiento de las estructuras. Las maquetas físicas, como las proporcionadas por el Kit Mola 2, facilitan una experiencia tangible y visual de los principios estructurales básicos. Por otro lado, herramientas computacionales como SAP2000 ofrecen simulaciones detalladas que permiten explorar diferentes escenarios en un entorno virtual. Se realizó un análisis comparativo visual de las deformaciones experimentadas por un puente de celosía mediante la utilización del Kit Mola 2 y el software SAP2000, con el objetivo de evaluar la eficacia de ambas herramientas para la representación estructural. El estudio empleó el Kit Mola para construir un modelo físico del puente, simulando diferentes condiciones de carga y observando su comportamiento estructural bajo deformaciones específica. Paralelamente, se

Ríos, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

llevaron a cabo simulaciones computacionales en SAP2000, aplicando conocimientos técnicos para obtener resultados comparables.

**Palabras clave:** deformaciones, puente de celosía, Kit Mola, SAP2000, análisis estructural.

## **ABSTRACT**

In the field of structural engineering, the analysis and design of bridges have significantly evolved thanks to the development of physical and digital tools that allow for a better understanding of structural behavior. Physical models, such as those provided by the Mola 2 Kit, offer a tangible and visual experience of basic structural principles. On the other hand, computational tools like SAP2000 provide detailed simulations that enable the exploration of different scenarios in a virtual environment. A visual comparative analysis of the deformations experienced by a truss bridge was conducted using the Mola 2 Kit and SAP2000 software to evaluate the effectiveness of both tools in structural representation. The study used the Mola Kit to build a physical model of the bridge, simulating different load conditions and observing its structural behavior under specific deformations in parallel, computational simulations were performed in SAP2000, applying technical knowledge to obtain comparable results.

**Index terms:** deformations, truss bridge, Mola Kit, SAP2000, structural analysis.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La celosía fue una de las principales protagonistas en las estructuras del siglo XIX. La incorporación del hierro marcó un cambio significativo en las técnicas de construcción, introduciendo nuevos tipos de estructuras, métodos constructivos innovadores y superando límites antes inalcanzables. Impulsada por el desarrollo del ferrocarril, la celosía se consolidó como una solución resistente y eficiente, ya que permitía construir grandes estructuras a partir de piezas pequeñas, resolviendo el problema de la flexión al dividirlo en elementos sometidos a compresión y tracción (Gómez Vera, 2021). Además, las primeras celosías surgieron de patentes americanas de carácter empírico, como las de Town, Howe y Burr. Los avances en tratados analíticos, como los de Bowd, Ritcher, Culman, Maxwell y Cremona, facilitaron el análisis y diseño de estas estructuras, lo que consolidó la celosía como la solución predominante en la construcción metálica durante más de un siglo.

Sin embargo, tras la Segunda Guerra Mundial, el uso de la celosía comenzó a disminuir con la llegada de las chapas laminadas y los avances en soldadura eléctrica. En Europa Occidental, los puentes de celosía prácticamente desaparecieron durante más de tres décadas, mientras que en Estados Unidos se mantuvieron en mayor medida. Este cambio estuvo influido no solo por la preferencia industrial hacia las chapas laminadas, sino también por una percepción visual desfavorable de las celosías, que eran consideradas soluciones industriales complicadas y sobrecargadas de barras y diagonales. Además, los problemas de corrosión en los nudos y los

Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

altos requerimientos de mantenimiento contribuyeron a su abandono (Escobar García, 2022; Gómez Vera, 2021).

El análisis de las deformaciones en estructuras representa un pilar fundamental en la ingeniería estructural, especialmente en el diseño de puentes. Estas deformaciones no solo permiten evaluar la capacidad de una estructura para soportar las cargas aplicadas, sino también identificar posibles fallas que comprometan su estabilidad y funcionalidad. En el caso de los puentes de celosía, su diseño modular, basado en triángulos, ha demostrado ser una solución eficiente desde su implementación en el siglo XIX, al permitir una distribución equitativa de las fuerzas. Sin embargo, el avance tecnológico en las últimas décadas ha transformado la manera en que se estudian y diseñan estas estructuras, integrando herramientas tanto físicas como digitales para su análisis (Larena, 2021).

Este trabajo realiza un análisis comparativo visual de las deformaciones observadas en un puente de celosía mediante dos enfoques distintos: el Kit Mola 2 y el software SAP2000. El Kit Mola es un sistema modular que permite construir modelos tridimensionales a escala, proporcionando una representación tangible de los principios estructurales y permitiendo observar de manera directa fenómenos como el pandeo y los desplazamientos. Por otro lado, SAP2000, un software avanzado de análisis estructural utiliza métodos computacionales como el análisis por elementos finitos para modelar y predecir con precisión el comportamiento de estructuras bajo diversas condiciones de carga (CSI, 2023). La comparación entre estas herramientas busca comprender cómo cada una representa las deformaciones y qué limitaciones o ventajas ofrecen en el contexto del diseño estructural.

Uno de los principales desafíos en este estudio es la discrepancia entre los resultados obtenidos mediante un modelo físico y uno digital. Mientras que el Kit Mola utiliza materiales flexibles que pueden amplificar ciertas deformaciones, SAP2000 idealiza las propiedades de los materiales, proporcionando resultados más ajustados a la realidad normativa, pero sin el componente visual práctico. Según Timoshenko & Gere (1961), los fenómenos como el pandeo dependen de la relación entre rigidez, longitud efectiva y carga crítica, factores que pueden ser más difíciles de interpretar visualmente en una simulación computacional. Por tanto, la integración de ambas herramientas podría enriquecer tanto la enseñanza como el análisis profesional.

Además de su aplicación en el ámbito profesional, ambas herramientas tienen un gran potencial como recursos didácticos. El Kit Mola, gracias a su enfoque práctico, permite que los estudiantes interactúen físicamente con modelos tridimensionales, comprendiendo de manera visual conceptos como la estabilidad estructural, el pandeo y las deformaciones. Por otro lado, SAP2000 complementa esta experiencia al ofrecer un análisis cuantitativo más profundo, permitiendo a los estudiantes modelar diversas configuraciones estructurales y analizar cómo las propiedades de los materiales y las cargas afectan el comportamiento de una estructura. La integración de estas herramientas en la enseñanza fomenta un aprendizaje integral, combinando la exploración intuitiva con el rigor técnico necesario para enfrentar problemas complejos en la práctica profesional.

El puente de celosía, como objeto de estudio, se elige debido a su relevancia histórica y su

Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

continua aplicación en ingeniería moderna. Estas estructuras han sido reconocidas por su eficiencia en la utilización de materiales y su capacidad para soportar altas cargas, características que las convierten en un modelo ideal para el análisis de deformaciones. Tal como lo indican Salmon, Johnson y Malhas (2008), los triángulos que conforman estas estructuras permiten minimizar los momentos flectores en sus elementos, favoreciendo una distribución uniforme de las fuerzas.

Este trabajo plantea la pregunta: ¿Cómo varían las deformaciones de un puente de celosía entre el Kit Mola 2 y SAP2000? Para responderla, se propone un enfoque que compara las observaciones realizadas con ambas herramientas. El objetivo principal es evaluar las deformaciones visuales y establecer las semejanzas y diferencias en el comportamiento de los modelos analizados. Además, se busca determinar la aplicabilidad de estas herramientas en el ámbito del diseño estructural y proponer su integración como parte de una metodología combinada para la enseñanza y el análisis estructural.

La importancia de esta investigación radica en su capacidad para demostrar cómo herramientas físicas y digitales pueden complementarse en el análisis estructural. Por un lado, el Kit Mola ofrece una experiencia visual y práctica que facilita la comprensión de conceptos fundamentales, como la estabilidad estructural y el comportamiento bajo carga. Por otro lado, SAP2000 permite un análisis técnico detallado, siguiendo normativas internacionales como ANSI/AISC 360-16 (2016) y Eurocode 3 (2005). Esta combinación no solo mejora la precisión del diseño estructural, sino que también fomenta un aprendizaje más integral para estudiantes y profesionales.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

Para realizar el análisis comparativo de las deformaciones de un puente de celosía mediante el Kit Mola y SAP2000, se propone una metodología que permita garantizar la comparabilidad de los resultados obtenidos con ambas herramientas. En primer lugar, se define el objetivo del estudio, estableciendo los parámetros específicos a analizar, como las deformaciones, la rigidez estructural y el comportamiento del puente bajo cargas estáticas. Además, se identifican las similitudes y diferencias entre los resultados proporcionados por el modelo físico y el digital.

Luego, se diseña el modelo de estudio. Para el Kit Mola 2, se construye un modelo físico del puente de celosía, siguiendo una configuración estructural estándar. En paralelo, se desarrolla un modelo digital equivalente en SAP2000, asegurando que las dimensiones, materiales y configuración sean idénticas en ambos casos. En ambos modelos se aplican las mismas cargas estáticas en puntos específicos para garantizar la comparabilidad de los resultados.

Finalmente, se realiza el análisis de los resultados obtenidos con ambas herramientas. Se comparan las deformaciones registradas, evaluando las diferencias en precisión, ventajas y limitaciones de cada método. Este análisis permite determinar la utilidad del Kit Mola 2 como herramienta educativa y práctica, contrastándola con la capacidad de SAP2000 para ofrecer resultados técnicos más precisos y detallados.

Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

En este estudio se utilizaron los siguientes materiales:

**Kit Mola 2:** Un sistema modular físico diseñado para representar modelos tridimensionales de estructuras (Mola Design Lab, 2023). El Kit Mola 2 incluye los siguientes componentes:

**Barras flexibles y rígidas:** Estas barras, de diferentes longitudes, simulan los elementos estructurales del puente, permitiendo visualizar cómo se comportan bajo cargas de compresión y tensión.

**Nodos o conectores:** Piezas que permiten unir las barras entre sí para formar los nodos de la estructura, representando los puntos de intersección de los elementos del puente.

**Bases ajustables:** Sirven de soporte para la estructura y permiten fijarla de manera estable durante las pruebas de carga.

**Pesos y elementos de carga:** Pequeños pesos incluidos para aplicar cargas distribuidas de manera controlada sobre la estructura modelada.

**Plataforma de montaje:** Una superficie donde se construyen las estructuras para asegurar la estabilidad durante el proceso de modelado.

**Software SAP 2000:** Herramienta de análisis estructural utilizada para simular el comportamiento del mismo puente de celosía modelado con el Kit Mola 2. El software permitió realizar simulaciones detalladas bajo las mismas condiciones de carga aplicadas al modelo físico.

Para la obtención de los elementos estructurales se utilizará el código AISC 360-16 mediante el método LRFD (ANSI/AISC 360-16, 2016).

### 2.1. Recolección de datos

Se realizará un puente celosía de 15m de largo y 7,5m de ancho, con tres secciones de 5m cada una. En la tabla 1, se muestra las medidas generales de los elementos del kit mola y la escala para la simulación en SAP2000.

Tabla 1

*Medidas de los Materiales en los dos enfoques*

Materiales	Kit Mola	SAP 200
Barras Cortas	45mm	3 500 mm
Barras Medianas	75mm	5 000 mm
Base magnética	D: 45mm	X
Tensores	93 mm	7 000 mm
Nodos, conectores	D: 15 mm	X
Placas o Lozas	L: 83 mm	25000 mm
	A: 83 mm	

Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

En la tabla 2, se muestra los materiales que se utilizó en el SAP200 para la simulación sacados del informe que da SAP2000.

**Tabla 2**

*SAP 2000 Materiales*

Nombre del Área	Material	Forma
Ángulo	A36	Ángulo
Columna	A36	Tubo Cuadrado
Viga I	A36	Viga I
Viga C	A36	Canal C
Loza 1,2 3		Loza

Para la simulación el software SAP2000 se realizará un prediseño estructural mediante el método LRFD presentado en el manual AISC 360-16.

## 2.2. Diseño de las Vigas del puente celosía:

$$[Pn = F_{cr}A_s] \quad (1)$$

Donde 1 es:

$Pn =$  Carga nominal

$F_{cr} =$  esfuerzo critico

$A_s =$  Area de acero

$$\left[ F_{cr} = \left( 0.658 \frac{f_y}{f_e} \right) f_e \right] \quad (2)$$

Donde 2 es:

$f_y =$  esfuerzo de fluencia del acero

$f_e =$  esfuerzo de Euler

$$\left[ f_e = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{kL}{r} \right)^2} \right] \quad (3)$$

Donde 3 es:

$E =$  modulo de elasticidad del acero

$k =$  constante de apoyos

$L =$  longitud de la columna

$r =$  radio de giro del perfil

En base a la ecuación se determina dos perfiles para columnas, lo que se coloca en la siguiente tabla.

Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

**Tabla 3**  
Diseño Vigas

PERFIL	b(m)	h(m)	e(m)
COLUMNA	0,3	0,3	0,008

**2.3. Diseño de vigas:**

$$[Mn = Mp = 0.9fyZ_x] \quad (4)$$

Donde 4 es:

*Mn = Momento nominal*  
*Mp = Momento plastico*  
*fy = esfuerzo de fluencia*  
*Zx = modulo de resistencia plastico*

$$M_p = C_b \left[ M_p - (M_p - 0,7fyS_x) \left( \frac{(L_b - L_p)}{(L_r - L_p)} \right) \right] \quad (5)$$

Donde 5 es:

*Cb = 1*  
*Sx = modulo de resistencia elastico*  
*Lb = longiyud de la viga*  
*Lp = longitud no soportada lateralmente maxima*  
*Lr = Longitud no soportada por la cual falla*

**Tabla 4**  
Diseño Viga I

PERFIL	bf(m)	tf (m)	tw(m)	h(m)
VIGAS I	0.12	0.003	0.006	0.2

**Tabla 5**  
Diseño Viga C

PERFIL	Profun. Ext(m)	Ancho(m)	tf(m)	tw(m)
VIGAS C	0.08	0.02	0.0008	0.0008

**Tabla 6**  
Diseño Ángulo

PERFIL	Pierna Vert.(m)	Pierna Hori(m)	tf(m)	tw(m)
Ángulo	0.050	0.050	0.0127	0.0127

### 3. RESULTADOS

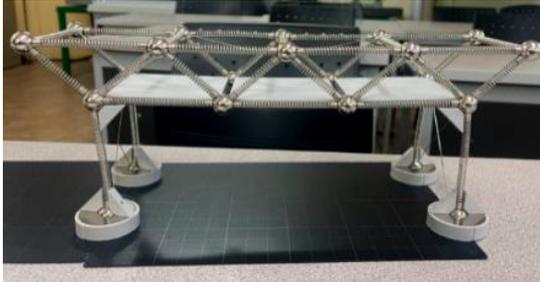
Se compara visualmente, el comportamiento de un puente celosía, utilizando dos enfoques: por

Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara , E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

un lado, el modelo construido con el Kit Mola se puede observar en la figura 1, que permite una simulación manual y didáctica de las deformaciones.

**Figura 1.**

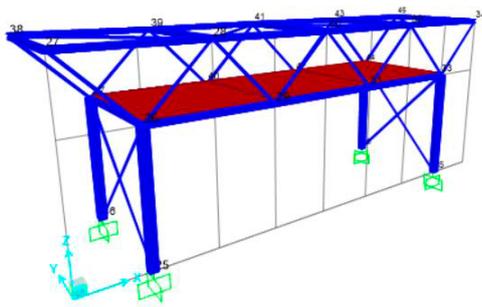
*Puente Celosía en Kit Mola*



Por otro lado, en la figura 2 el modelo simulado en el software SAP2000, el cual aplica principios matemáticos y computacionales para obtener resultados precisos.

**Figura 2.**

*Puente Celosía en el SAP2000*



### 3.1. Primera Deformación

Para esta primera prueba se aplicó carga viva y carga muerta en el puente celosía, para observar cómo se comporta. En el Kit Mola, como se observa en la Figura 3, se empleó un objeto de prueba para simular las cargas

**Figura 3.**

*Puente Celosía en Kit Mola Primera deformación*

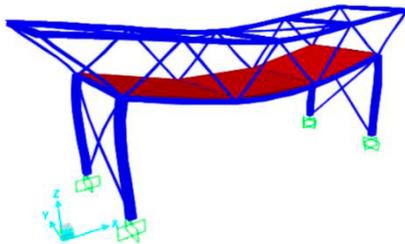


Ríos, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

En el SAP, se aplicó carga viva y muerta como simulación en la vida real, se observa en la figura 4.

**Figura 4.**

*Puente Celosía en SAP 200 Primera deformación.*



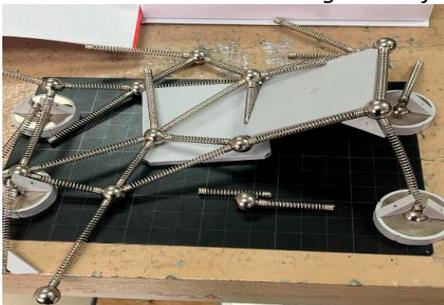
### 3.2. Segunda Deformación:

Para esta segunda prueba se aplicaron las mismas cargas, pero ahora se removieron los tensores para observar el comportamiento:

- En Kit Mola:

**Figura 5.**

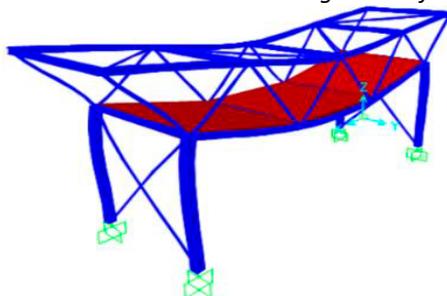
*Puente Celosía en Kit Mola Segunda deformación*



- En el SAP:

**Figura 6.**

*Puente Celosía en SAP 200 Segunda deformación.*



Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

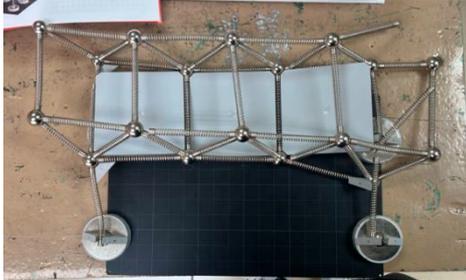
### 3.3. Tercera Deformación:

Para esta prueba se generó un sismo en X con las mismas cargas.

En Kit Mola:

**Figura 7.**

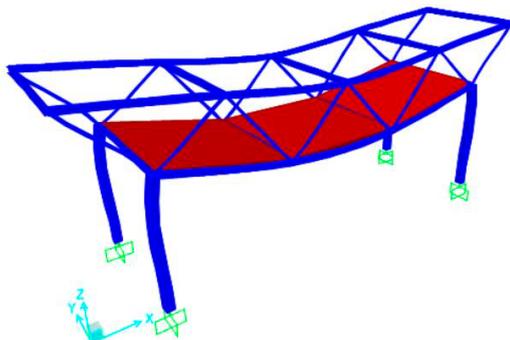
*Puente Celosía en Kit Mola, Tercera deformación*



En el SAP:

**Figura 8.**

*Puente Celosía en SAP 200 Tercera deformación*



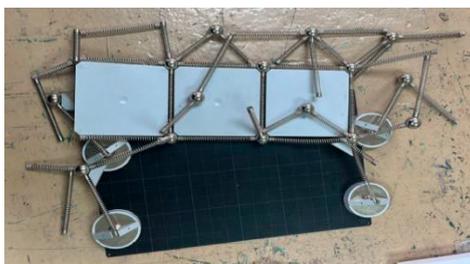
### 3.4. Cuarta Deformación:

Para esta prueba se generó un sismo en Y con las mismas cargas, y observar el comportamiento

En Kit Mola:

**Figura 9.**

*Puente Celosía en Kit Mola Cuarta deformación.*

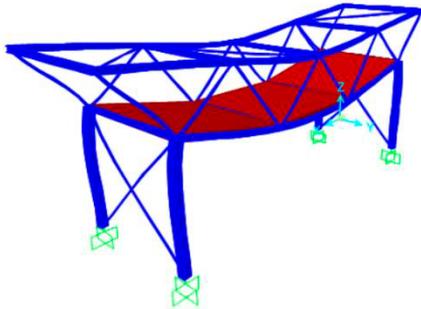


Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

En el SAP:

**Figura 10.**

*Puente Celosía en SAP 200 Cuarta deformación.*



### 3.5. Quinta Deformación:

Para esta prueba se hará sismo en X y Y, con las mismas cargas para observar el comportamiento

En Kit Mola:

**Figura 11.**

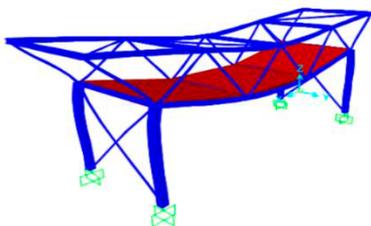
*Puente Celosía en Kit Mola Quinta deformación*



En el SAP:

**Figura 12.**

*Puente Celosía en SAP 200 Quinta deformación.*



Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. En la primera deformación

Se aplicó carga viva y carga muerta.

Teniendo en cuenta eso, en el Kit Mola se utilizó el objeto de prueba para simular las cargas, se pudo observar que el modelo sufrió una leve deformación de las columnas, es decir se pandearon. Esto se debe a las propiedades de los materiales del Kit Mola, que son más flexibles y tienen una menor capacidad para resistir compresión en comparación con materiales reales.

En contraste, en el modelo SAP2000, donde se aplicaron cargas reales basadas en los estándares normativos, las columnas se pandearon hacia adentro, mientras que las secciones del puente presentaron deformaciones leves hacia abajo. Esto refleja la capacidad del software para modelar de manera precisa la interacción entre fuerzas internas y externas, así como la rigidez de los materiales ideales.

### 4.2. En la segunda deformación

Al aplicar carga viva y carga muerta y retirar los tensores (ángulos en SAP2000) que proporcionaban soporte adicional, el Kit Mola mostró un colapso inmediato del puente.

Esto se explica por la dependencia crítica de los tensores en un modelo físico donde los conectores (bolas) añaden grados de libertad adicionales, debilitando la estructura. Por otro lado, en SAP2000, el puente se dobló hacia adentro y los tensores virtuales (ángulos) presentaron una ligera deformación, pero no un colapso completo, debido al modelado más rígido de las uniones.

### 4.3. En la tercera deformación

Correspondiente a un sismo en el eje X, se estableció un tiempo de simulación de cuatro segundos. En el Kit Mola, el puente colapsó en los primeros segundos, con tres de las cuatro columnas cayendo hacia la base del soporte y una columna permaneciendo adherida al conector esférico (bola), manteniéndose parcialmente en posición vertical. Este comportamiento refleja las limitaciones del kit para representar movimientos sísmicos complejos debido a la falta de propiedades elásticas y amortiguadoras en sus materiales.

Por su parte, en SAP2000, la simulación del sismo mostró una leve caída de la parte superior del puente y deformaciones menores en las columnas, que se doblaron ligeramente. Este resultado se atribuye a la capacidad del software para incorporar factores como el amortiguamiento y las propiedades dinámicas de los materiales modelados.

### 4.4. En la cuarta deformación

Simulando un sismo en el eje Y, el Kit Mola presentó un colapso total, con todas las columnas cayendo y únicamente dos permaneciendo unidas a sus respectivos conectores. En SAP2000, el puente mostró una deformación hacia abajo en forma de U, lo que evidencia una mayor estabilidad estructural gracias al modelado más preciso de las propiedades materiales y las fuerzas distribuidas.

Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

#### 4.5. En la quinta deformación

Combinó sismos en los ejes X y Y, el Kit Mola mostró una caída completa de la parte izquierda del puente, mientras que dos columnas de la parte derecha permanecieron en pie, aunque muy pandeadas hacia adentro. Este comportamiento ilustra nuevamente las limitaciones materiales del kit. En SAP2000, la simulación reveló deformaciones significativas en las vigas centrales en forma de triángulos y pandeos menores en las columnas, lo que demuestra cómo el software permite identificar zonas críticas en la estructura bajo condiciones extremas.

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El Kit Mola 2 permite visualizar de manera práctica y tangible las deformaciones estructurales de un puente de celosía, siendo una herramienta educativa eficaz para comprender conceptos básicos como la rigidez y el comportamiento bajo carga. Sin embargo, debido a sus limitaciones en precisión y propiedades materiales, resulta insuficiente para análisis detallados y cuantitativos.
- SAP2000, como plataforma técnica avanzada, complementa al Kit Mola 2 al proporcionar un análisis más preciso y realista de las deformaciones estructurales, siguiendo estándares normativos. La combinación de ambas herramientas enriquece tanto el aprendizaje práctico como el diseño profesional, integrando teoría y práctica de manera efectiva.
- En el Kit Mola 2, las deformaciones pueden visualizarse de manera tangible al aplicar cargas manuales, lo que facilita la comprensión conceptual de los efectos que tienen las cargas sobre las estructuras. Sin embargo, estas representaciones están limitadas por la escala y los materiales del kit, que no siempre replican con precisión las propiedades mecánicas de los materiales reales.
- Incorporar el Kit estructural Mola como una herramienta permanente en la clase de estructuras metálicas, permitiendo a los estudiantes experimentar de manera tangible los conceptos de análisis estructural. Este recurso facilitará el aprendizaje de principios básicos de diseño, análisis y comportamiento de estructuras, fortaleciendo la enseñanza práctica en la carrera de Mecánica Industrial.
- Utilizar el Kit Mola como complemento didáctico en las asignaturas relacionadas con estructuras metálicas, fomentando la interacción de los estudiantes con modelos físicos que representen los sistemas estructurales más comunes. Esto permitirá una mejor comprensión de las deformaciones y esfuerzos en las uniones y elementos de estructuras como puentes celosía, pilares y vigas.
- Proponer al Instituto Tecnológico la implementación de talleres específicos sobre el uso del Kit Mola para estudiantes de nuevo ingreso o en asignaturas iniciales de diseño

Ríos, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000.

estructural, con el fin de preparar a los alumnos para abordar herramientas computacionales más avanzadas, como SAP2000, de manera gradual.

- Integrar la comparación entre el Kit Mola y herramientas computacionales como SAP2000 en los proyectos finales de las asignaturas de estructuras, incentivando a los estudiantes a utilizar ambos enfoques para desarrollar una visión más integral y crítica en el análisis estructural. Esto también reforzará la vinculación de conocimientos teóricos y prácticos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CSI. (2023). SAP2000: Structural Analysis and Design. Computers and Structures, Inc. Recuperado de <https://www.csiamerica.com>
- Mola Structural Kits. (n.d.). *Mola 2 Structural Kit*. Recuperado de <https://www.molamodel.com>.
- Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1961). *Theory of Elastic Stability*. McGraw-Hill.
- Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2008). *Steel Structures: Design and Behavior* (5th ed.). Pearson.
- Eurocode 3. (2005). *Design of Steel Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization (CEN).
- Chopra, A. K. (2019). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (5th ed.). Pearson Education.
- ANSI/AISC 360-16. (2016). *Specification for structural steel buildings*. AISC.
- Barker, R. M., & Puckett, J. A. (2020). *Design of Highway Bridges: An LRFD Approach* (3rd ed.). Wiley.
- Ghosh, S. K. (2016). *Practical Design of Steel Structures*. CRC Press.
- Computers and Structures, Inc. (2021). *SAP2000 Integrated Structural Analysis and Design Software*. Recuperado de <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>
- IOS Press. (2024). *Bridge Structures: Assessment, Design, and Construction*. Recuperado de [www.iospress.com](http://www.iospress.com).
- Hibbeler, R. C. (2020). *Engineering Mechanics: Statics and Dynamics* (14th ed.). Pearson Education.
- Computers and Structures, Inc. (2023). *SAP2000: Structural Analysis and Design Software*. Recuperado de <https://www.csiamerica.com>.
- Escobar García, S. (2022). *Puentes de concreto de viga cajón híbridos con paredes en celosía* [Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82370>
- Gómez Vera, L. (2021). *Revisión histórica de una actividad e innovación docente en el ámbito universitario: Concurso de Estructuras*. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/116645>
- Larena, B. (2021). *RECUPERACIÓN DE LA CELOSÍA EN LOS PUENTES DE FIN DE SIGLO*.

Rios, K., Carrera, H., Beltrán, L., & Lara, E. (2025). *COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF A TRUSS BRIDGE USING THE MOLA KIT AND SAP 2000*.

## Proposal for technical solutions for the repowering of the binder KBF 240 chamber

## Propuesta de soluciones técnicas para la repotenciación de la cámara binder KBF 240

Joan Mayusa Barajar<sup>1</sup>[0000-0003-4235-9604], Germán Almeida Montenegro<sup>2</sup>[0000-0003-2558-7154], Edison Alomoto Jaya<sup>3</sup> [0000-0003-4235-9604]

<sup>1</sup>Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [jsmayusabarajas@istct.edu.ec](mailto:jsmayusabarajas@istct.edu.ec)

<sup>2</sup>Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [galmeyda@istct.edu.ec](mailto:galmeyda@istct.edu.ec)

<sup>3</sup>Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [ealomoto@istct.edu.ec](mailto:ealomoto@istct.edu.ec)

Recibido: 15/03/2025

Aceptado: 30/05/2025

Publicado: 30/06/2025

### RESUMEN

Este trabajo presenta una propuesta técnica de repotenciación de la cámara estabilizadora BINDER KBF 240, un equipo ampliamente utilizado en laboratorios farmacéuticos para realizar pruebas de estabilidad de medicamentos. Estas cámaras deben mantener condiciones estrictamente controladas de temperatura y humedad relativa para garantizar la validez de los ensayos. Sin embargo, el equipo objeto de estudio presentaba dificultades para conservar de forma constante los valores de 30 °C y 65 %HR, parámetros establecidos por normativas internacionales como ICH Q1A y la FDA. El objetivo de esta investigación fue restaurar la funcionalidad de la cámara mediante el análisis técnico de sus componentes, la sustitución de elementos defectuosos, la incorporación de nuevos dispositivos de control y la implementación de un sistema automatizado con interfaz HMI-PLC. La metodología incluyó un levantamiento de información técnica, diseño del sistema de intervención, adquisición de materiales, ejecución de mejoras y monitoreo de resultados. Las pruebas realizadas durante 20 semanas evidenciaron una mejora sustancial en la precisión y estabilidad de las variables ambientales. Los resultados obtenidos confirman la viabilidad técnica y económica de la repotenciación, representando una alternativa eficaz frente a la adquisición de nuevos equipos. Esta experiencia puede servir como modelo para otras instituciones que requieran garantizar entornos de prueba controlados en industrias farmacéutica, alimentaria o cosmética.

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

**Palabras clave:** Cámara estabilizadora; temperatura; humedad relativa; repotenciación; control ambiental.

## ABSTRACT

This paper presents a technical proposal for the repowering of the BINDER KBF 240 stability chamber, widely used in pharmaceutical laboratories for stability testing. These chambers must maintain strictly controlled temperature and humidity levels to ensure the validity of tests. However, the equipment under study was unable to consistently maintain the standard values of 30 °C and 65 % relative humidity, as required by international regulations such as ICH Q1A and the FDA. The objective of this project was to restore the functionality of the chamber by analyzing its technical components, replacing faulty parts, incorporating new control devices, and implementing an automated HMI-PLC interface system. The methodology included technical diagnostics, system design, material procurement, technical improvements, and result monitoring. Tests conducted over 18 weeks showed significant improvement in the accuracy and stability of environmental variables. The results confirm the technical and economic viability of repowering, representing an effective alternative to the acquisition of new equipment. This experience may serve as a model for other institutions needing to ensure controlled testing environments in pharmaceutical, food, or cosmetic industries.

**Index terms:** Stability chamber; temperature; relative humidity; repowering; environmental control.

## 1. INTRODUCCIÓN.

En la industria farmacéutica, las pruebas de estabilidad son procedimientos críticos que determinan la vida útil y calidad de los medicamentos mediante la exposición de estos a condiciones ambientales específicas y controladas durante períodos prolongados (International Council for Harmonisation [ICH], 2003). Estas pruebas permiten identificar posibles fallas en la composición química de los productos, garantizando así su seguridad y eficacia a lo largo del tiempo. Para realizar dichas pruebas se requieren equipos especializados como las cámaras estabilizadoras, que deben mantener parámetros ambientales precisos con mínimas variaciones.

Las cámaras de estabilidad son sistemas autónomos y complejos diseñados específicamente para replicar y mantener condiciones ambientales controladas durante períodos extendidos, que pueden abarcar desde días hasta meses (Thermo Fisher Scientific, 2019). Estos equipos permiten simular diversos ambientes sin la necesidad de trasladar los productos a diferentes ubicaciones geográficas, lo que representa una ventaja significativa en términos de costo y control experimental (Wexler, 1965). La precisión y estabilidad de estos equipos son factores determinantes para la validez de los estudios realizados.

En este contexto, la cámara estabilizadora Binder KBF 240, utilizada en un laboratorio farmacéutico en Quito, Ecuador, presentaba limitaciones operativas que impedían mantener los parámetros ambientales requeridos para las pruebas de estabilidad específicas que necesitaba

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

realizar la empresa. Aunque este modelo está diseñado para operar en rangos de temperatura entre 10°C y 70°C, y humedad relativa entre 10% y 80% (Binder GmbH, 2019), el equipo no lograba estabilizar las condiciones específicas de 30°C y 65% de humedad relativa necesarias para los procesos de estabilidad farmacéutica requeridos por el laboratorio.

La normativa ICH Q1A establece condiciones precisas para estudios de estabilidad de medicamentos, y la incapacidad del equipo para mantener estos parámetros comprometía la validez de los ensayos realizados (ICH, 2003). El equipo presentaba variaciones de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  en temperatura y  $\pm 15\%$  en humedad relativa, muy por encima de las tolerancias máximas aceptables de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  y  $\pm 3\%$  respectivamente, establecidas por las Buenas Prácticas de Laboratorio (GLP) y las Buenas Prácticas de Manufactura (GMP) según las directrices de la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos [FDA], 2003).

Varios estudios han demostrado que las fluctuaciones en las condiciones ambientales durante las pruebas de estabilidad pueden afectar significativamente los resultados, conduciendo a conclusiones erróneas sobre la vida útil y seguridad de los productos farmacéuticos (Çengel, 2019). Por lo tanto, la precisión en el control de temperatura y humedad no solo es un requisito normativo, sino una necesidad científica para garantizar la validez de las pruebas realizadas.

La repotenciación de equipos existentes, frente a la adquisición de nuevos sistemas, representa una alternativa económica y ambientalmente sostenible que ha ganado relevancia en el contexto industrial actual. Extender la vida útil de equipos especializados mediante intervenciones técnicas focalizadas permite optimizar recursos mientras se mantienen o mejoran las capacidades operativas (Binder GmbH, s.f.).

El presente estudio tiene como objetivo principal implementar las mejoras necesarias en la cámara estabilizadora Binder KBF 240 para mantener condiciones específicas de temperatura a 30°C ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) y humedad relativa de 65% ( $\pm 3\%$ ), garantizando así la calidad de los productos farmacéuticos sometidos a pruebas de estabilidad (Arteaga, 2019). Esta investigación busca no solo resolver un problema técnico específico, sino también generar conocimiento aplicable a situaciones similares en la industria farmacéutica y otros sectores que requieran control ambiental preciso.

La relevancia de este estudio radica en su contribución a la mejora de procesos críticos en la industria farmacéutica, permitiendo el cumplimiento de estándares regulatorios estrictos y asegurando la calidad de los medicamentos. Adicionalmente, la metodología desarrollada podría aplicarse a equipos de similares funciones en diferentes contextos industriales, proporcionando una alternativa viable a la sustitución de equipos costosos cuando estos presentan deficiencias operativas específicas.

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS / DESARROLLO

### 2.1 Diseño del estudio

Se realizó un estudio de tipo experimental aplicado, enfocado en la identificación de deficiencias técnicas y la implementación de soluciones específicas para la repotenciación de la cámara estabilizadora Binder KBF 240. El proceso se dividió en cuatro fases principales: diagnóstico inicial, diseño de mejoras, implementación técnica y validación de resultados. Este enfoque metodológico permitió abordar sistemáticamente las limitaciones del equipo y proponer soluciones basadas en evidencia técnica.

### 2.2 Equipamiento analizado

El objeto de estudio fue una cámara estabilizadora modelo Binder KBF 240, diseñada para pruebas de estabilidad farmacéutica con las siguientes especificaciones técnicas originales:

- Volumen interno: 240 litros
- Rango de temperatura operacional: 10°C a 70°C
- Rango de humedad relativa operacional: 10% a 80%
- Sistema de control: Digital con panel de control HMI (Human-Machine Interface)
- Fabricante: Binder GmbH (Alemania)

### 2.3 Instrumentos y técnicas de diagnóstico

Para la evaluación inicial del equipo se emplearon las siguientes herramientas y técnicas:

**Verificación de parámetros ambientales:** Se utilizaron termómetros calibrados (precisión  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ) e higrómetros (precisión  $\pm 1\%$ ) como instrumentos de medición externa para contrastar con las lecturas del sistema integrado.

**Análisis de componentes eléctricos:** Mediante multímetros digitales y analizadores de circuitos para identificar fallas en el sistema de control y alimentación.

**Evaluación de sistemas mecánicos:** A través de inspección visual y pruebas de funcionamiento de válvulas, compresores y mecanismos de generación de vapor.

**Levantamiento de información documental:** Se consultó el manual de usuario del fabricante (Binder GmbH, 2019) y especificaciones técnicas de los componentes para identificar las características de diseño original.

## 2.4 Procedimiento de diagnóstico

Se realizó un levantamiento exhaustivo del estado inicial del equipo mediante listas de verificación (check lists) para cada subsistema, categorizando los componentes según su estado: operativo, averiado o inexistente. Este procedimiento permitió identificar los siguientes sistemas críticos que requerían intervención:

**Sistema de refrigeración:** Se evaluó el estado del compresor, gas refrigerante, válvulas solenoides, tubos capilares, termostato, condensador, evaporador, filtro secador y aislamiento térmico.

**Sistema de generación de vapor:** Se analizó el funcionamiento de la caldera, termostato, sensor de nivel, red de distribución, resistencia de calentamiento, válvulas de seguridad, paso y purga, tanque de recolección y aislante térmico.

**Sistema de control y automatización:** Se examinó el estado del relé de estado sólido, PLC, pantalla HMI, software y parámetros, transformador, borneras, sensores de humedad y temperatura, líneas de conexión y bobinas de válvulas solenoides.

## 2.5 Materiales utilizados para la intervención

Basado en el diagnóstico, se seleccionaron los siguientes materiales para la repotenciación:

### Para el sistema de humedad relativa:

- Válvula de control proporcional (3/8")
- Válvula solenoide (3/8")
- Válvula esférica (3/8")
- Manómetro (4 bares, 1/4")
- Desincrustante químico (1 lb)
- Filtro de alta temperatura (3/8")
- Fibra mineral como aislante térmico (1 m<sup>2</sup>)

### Para el sistema de refrigeración:

- Gas refrigerante R134-A
- Bobinas para válvulas solenoides (220V)
- Aislante rubatex (10 m)

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

**Para el sistema de control:**

- Cable N18 (5 m) para circuitos de control
- Cable N16 (5 m) para circuitos de potencia
- Transformador 110V-220V
- Carril DIN (1 m)

**2.6 Metodología de implementación**

La implementación de mejoras técnicas se realizó siguiendo un enfoque sistemático por subsistemas:

**Intervención en el sistema de control (HMI-PLC)**

Se realizó la calibración y parametrización del sistema de control para ajustar los valores de referencia (set point) a 30°C y 65% de humedad relativa. Se verificaron las conexiones entre sensores y controlador, así como los algoritmos de control programados en el PLC.

**Intervención en el sistema de generación de vapor**

- Mantenimiento de la caldera: Desarme, limpieza y desincrustación de sólidos mediante arrastre mecánico.
- Reparación de soldaduras externas y reajuste de componentes roscables.
- Instalación de soporte tipo trípode para separar la caldera de la superficie.
- Mantenimiento y calibración de la válvula de seguridad (1.8 Bar).
- Limpieza del tanque de almacenamiento y reposicionamiento del sensor de nivel.
- Reemplazo de cableado existente por cable AWG No. 16.
- Calibración del sensor de humedad mediante ajuste manual de potenciómetros.

**Implementación de red de distribución de vapor**

Se diseñó e implementó un nuevo sistema de distribución de vapor que incluyó:

- Filtro de vapor para eliminar contaminantes
- Válvula esférica para control manual
- Manómetro para monitoreo de presión
- Válvula solenoide controlada por el PLC
- Válvula de control proporcional para regular el flujo de vapor

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

### **Intervención en el sistema de refrigeración**

- Instalación de aislante térmico tipo rubatex en las líneas de distribución.
- Carga de gas refrigerante R134-A.
- Instalación de transformador 110V a 220V para las válvulas solenoides.
- Reemplazo de bobina 220V en la válvula principal del sistema.

### **2.7 Protocolo de validación**

Para validar las mejoras implementadas, se estableció un protocolo de seguimiento durante 20 semanas, con mediciones semanales de temperatura y humedad relativa. Los datos se recolectaron cada lunes, registrando los valores en tablas de control para análisis posterior. Se consideraron satisfactorios los resultados que presentaran estabilidad en:

- Temperatura:  $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- Humedad relativa:  $65\% \pm 3\%$

### **2.8 Análisis de datos**

Los datos recolectados durante el período de validación fueron analizados utilizando herramientas estadísticas descriptivas para evaluar la estabilidad y consistencia de los parámetros ambientales. Se generaron gráficos de tendencia para visualizar el comportamiento de temperatura y humedad relativa a lo largo del período de estudio, con particular énfasis en comparar el desempeño previo y posterior a la semana 8, cuando se completó la implementación de las mejoras principales.

## **3. RESULTADOS**

Los resultados fueron contundentes: a partir de la semana 10 luego de hacer calibraciones y la intervención en los subsistemas se estabilizaron los valores requeridos, con fluctuaciones mínimas. La temperatura promedio registrada fue de  $30.2^{\circ}\text{C}$  con una desviación estándar de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . La humedad relativa se mantuvo dentro del  $65\% \pm 2.5\%$ .

### **3.1 Diagnóstico inicial del equipo**

El diagnóstico inicial reveló deficiencias significativas en los tres sistemas principales de la cámara estabilizadora. Las tablas 1, 2 y 3 presentan el estado de los componentes antes de la intervención.

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

**Tabla 1.**

*Estado inicial del sistema de refrigeración*

Componente	Estado	Observación
Compresor	Averiado	Requería limpieza
Gas refrigerante	Inexistente	Necesitaba recarga
Válvula solenoide	Averiado	Requería reemplazo
Tubo capilar	Operativo	-
Termostato	Operativo	-
Condensador	Operativo	-
Evaporador	Operativo	-
Filtro secador	Operativo	-
Aislamiento térmico	Inexistente	Requería instalación

**Tabla 2.**

*Estado inicial del sistema de generación de vapor*

Componente	Estado	Observación
Caldera	Averiado	Requería limpieza y calibración
Termostato	Operativo	-
Sensor de nivel	Operativo	-
Red de distribución	Inexistente	Requería instalación
Resistencia de calentamiento	Operativo	-
Ingreso de agua	Averiado	Requería reemplazo
Válvula de seguridad	Averiado	Requería limpieza y calibración
Válvula de paso	Averiado	Requería limpieza y calibración
Válvula de purga	Inexistente	Requería instalación
Tanque de recolección	Averiado	Requería limpieza
Aislante térmico	Inexistente	Requería instalación

**Tabla 3**

*Estado inicial del sistema de control y automatización*

Componente	Estado	Observación
Relé de estado sólido	Operativo	-
PLC	Operativo	-
Pantalla HMI	Operativo	-
Software y parámetros	Averiado	Requería calibración

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

Componente	Estado	Observación
Transformador 110V a 220V	Inexistente	Requería instalación
Borneras	Averiado	Requería reajuste
Sensor de humedad	Averiado	Requería limpieza
Sensor de temperatura	Averiado	Requería limpieza
Líneas de conexión	Averiado	Requería reemplazo
Bobinas de válvulas solenoides	Averiado	Requería reemplazo

Estos hallazgos iniciales permitieron identificar que el equipo presentaba deficiencias en aproximadamente 60% de sus componentes críticos, con un 25% de ellos totalmente inexistentes o no funcionales, lo que explicaba su incapacidad para mantener las condiciones ambientales requeridas.

### 3.2 Resultados de las intervenciones técnicas

#### Sistema de control

La calibración del sistema de control permitió configurar correctamente los parámetros de funcionamiento a 30°C y 65% de humedad relativa. El ajuste manual de los potenciómetros de la tarjeta de control de humedad relativa mejoró la precisión de las lecturas del sensor, permitiendo un control más exacto por parte del PLC.

#### Sistema de generación de vapor

La limpieza y recalibración de la caldera resolvieron problemas de incrustaciones que afectaban su rendimiento. La implementación de mejoras como aislamiento térmico de fibra mineral y la instalación de una válvula solenoide para el control automático del agua optimizaron su funcionamiento. La calibración de la válvula de seguridad a 1.8 Bar garantizó la operación segura del sistema.

#### Red de distribución de vapor

La implementación de un nuevo sistema de distribución de vapor, que incluyó filtro, manómetro, válvula solenoide y válvula de control proporcional, permitió una dosificación precisa de humedad en la cámara, eliminando las fluctuaciones excesivas presentes anteriormente.

#### Sistema de refrigeración

La recarga de gas refrigerante R134-A, junto con la instalación de aislamiento térmico en las líneas de distribución, mejoró significativamente la eficiencia del sistema de refrigeración. La instalación del transformador 110V a 220V y el reemplazo de bobinas en las válvulas solenoides resolvieron los problemas de control en el sistema.

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

### 3.3 Evaluación de parámetros post-intervención

La Tabla 4 presenta los datos recolectados semanalmente durante las 20 semanas de seguimiento, mostrando la evolución de los parámetros de temperatura y humedad relativa.

**Tabla 4.**  
*Datos recolectados semanalmente*

SEMANA	DÍA	TEMPERATURA °C	HUMEDAD RELATIVA
1	Lunes 14 Oct	28,5	60%
2	Lunes 21 Oct	28,5	59%
3	Lunes 28 Oct	28,0	61%
4	Lunes 04 Nov	28,2	70%
5	Lunes 11 Nov	22,0	50%
6	Lunes 18 Nov	29,1	61%
7	Lunes 25 Nov	27,5	57%
8	Lunes 02 Dic	30,0	61%
9	Lunes 09 Dic	30,5	60%
10	Lunes 16 Dic	30,2	68%
11	Lunes 23 Dic	30,6	63%
12	Lunes 30 Dic	30,1	65%
13	Lunes 6 Ene	30,5	66%
14	Lunes 13 Ene	30,3	67%
15	Lunes 20 Ene	30,6	64%
16	Lunes 27 Ene	30,0	66%
17	Lunes 03 Feb	30,5	65%
18	Lunes 10 Feb	30,1	64%
19	Lunes 17 Feb	30,4	65%
20	Lunes 24 Feb	30,5	65%

Los datos muestran una clara mejora en la estabilidad de los parámetros a partir de la semana 10, cuando se completó la implementación de las principales mejoras técnicas. Durante las primeras siete semanas, se observan fluctuaciones significativas tanto en temperatura (entre 22.0°C y 29.1°C) como en humedad relativa (entre 50% y 70%).

A partir de la semana 10, la temperatura se estabiliza en un rango de 30.0°C a 30.6°C, lo que representa una variación máxima de  $\pm 0.6^\circ\text{C}$  respecto al valor objetivo de 30°C, dentro del límite aceptable de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . De manera similar, la humedad relativa se mantiene entre 60% y 68% a partir de la semana 9, con una estabilización más precisa entre 63% y 67% desde la semana 11, lo que representa una variación máxima de  $\pm 3\%$  respecto al valor objetivo de 65%, cumpliendo con el requisito establecido.

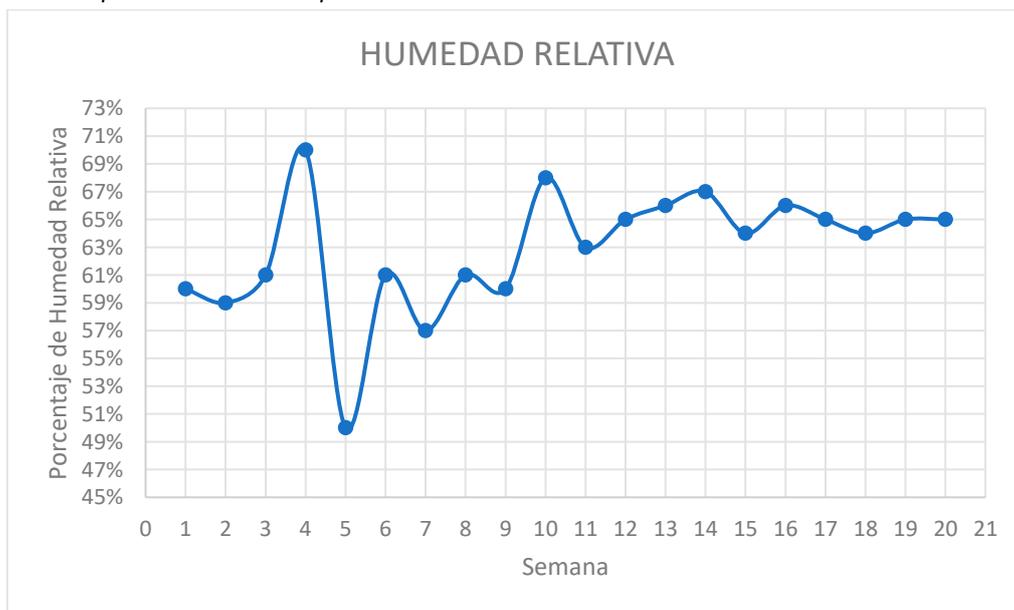
Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

### 3.4 Análisis gráfico de resultados

El análisis gráfico de los datos permite visualizar claramente la mejora en la estabilidad de ambos parámetros. La Figura 1 muestra la evolución de la temperatura a lo largo de las 20 semanas, evidenciando la estabilización a partir de la semana 10. De manera similar, la Figura 2 presenta el comportamiento de la humedad relativa, que también muestra una clara estabilización después de la semana 10.

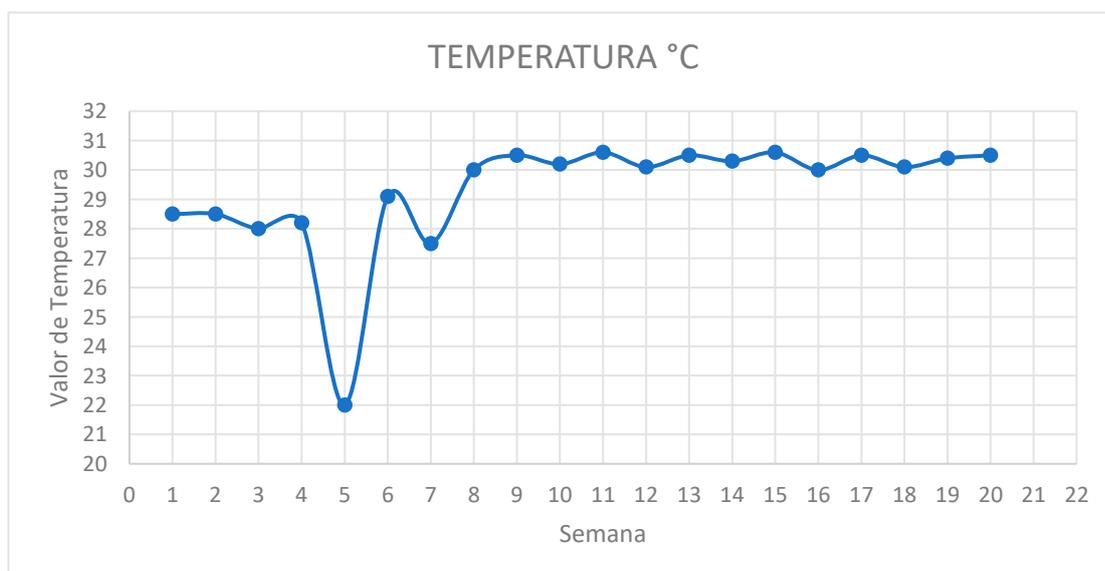
**Figura 1**

*Evolución de la temperatura durante el período de estudio*



**Figura 2**

*Evolución de la humedad relativa durante el período de estudio*



Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

El análisis estadístico de los datos post-intervención (semanas 10-20) confirma la efectividad de las mejoras:

**Temperatura:**

- Media: 30.32°C
- Desviación estándar: 0.24°C
- Coeficiente de variación: 0.79%

**Humedad relativa:**

- Media: 65.33%
- Desviación estándar: 1.41%
- Coeficiente de variación: 2.16%

Estos valores están dentro de los límites establecidos de  $\pm 1^\circ\text{C}$  para temperatura y  $\pm 3\%$  para humedad relativa, demostrando que la repotenciación logró el objetivo de estabilizar las condiciones ambientales dentro de los rangos requeridos para las pruebas de estabilidad farmacéutica.

## 4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la repotenciación de equipos especializados como la cámara estabilizadora Binder KBF 240 representa una alternativa viable frente a la adquisición de nuevos sistemas cuando se presentan problemas específicos de funcionamiento. El enfoque sistemático aplicado permitió identificar con precisión los componentes críticos que requerían intervención y diseñar soluciones específicas para cada subsistema, logrando mejorar significativamente el desempeño del equipo.

### 4.1 Impacto de las mejoras en el sistema de generación de vapor

La intervención en el sistema de generación de vapor resultó ser uno de los aspectos más críticos para la estabilización de la humedad relativa. La limpieza y calibración de la caldera, junto con la implementación de una red de distribución adecuada, permitieron controlar con mayor precisión la inyección de vapor en la cámara. Estos hallazgos concuerdan con Wexler (1965), quien destaca la importancia de los sistemas de humidificación en el control preciso de la humedad relativa en ambientes controlados.

El diseño e implementación de la nueva red de distribución de vapor, que incluyó componentes como filtro, manómetro, válvula solenoide y válvula de control proporcional, permitió una dosificación más precisa y controlada. Este enfoque es consistente con las recomendaciones de Thermo Fisher Scientific (2019), que enfatiza la necesidad de sistemas de distribución eficientes para garantizar la homogeneidad de las condiciones ambientales en cámaras de estabilidad.

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

La instalación de aislamiento térmico en la caldera también contribuyó significativamente a mantener la eficiencia energética del sistema, reduciendo las pérdidas de calor y permitiendo un funcionamiento más estable. Esta mejora se alinea con los principios termodinámicos discutidos por Çengel (2019), quien señala la importancia del aislamiento térmico en la eficiencia de los sistemas de transferencia de calor.

#### **4.2 Efectividad de las intervenciones en el sistema de refrigeración**

El sistema de refrigeración presentaba deficiencias significativas, principalmente relacionadas con la falta de gas refrigerante y problemas en las válvulas solenoides. La recarga de gas refrigerante R134-A, ambientalmente más seguro que alternativas anteriores, permitió restablecer el funcionamiento adecuado del sistema de enfriamiento. Esta elección se alinea con las tendencias actuales en refrigeración industrial, que buscan reducir el impacto ambiental mediante el uso de refrigerantes con menor potencial de agotamiento de la capa de ozono (CV, 2015).

La instalación de aislamiento térmico en las líneas de refrigeración demostró ser una intervención costo-efectiva para mejorar la eficiencia del sistema, reduciendo la frecuencia de activación del compresor y, por ende, el consumo energético. Este resultado confirma lo señalado por CV (2015) sobre la importancia del aislamiento adecuado en sistemas de refrigeración para optimizar su rendimiento.

La implementación del transformador 110V a 220V para las válvulas solenoides resolvió problemas de control que afectaban el funcionamiento intermitente del sistema de refrigeración, asegurando una operación más precisa y confiable. Esta mejora destaca la importancia de considerar aspectos eléctricos en la repotenciación de equipos, aspecto que a menudo recibe menos atención que los componentes mecánicos pero que resulta igualmente crítico para el funcionamiento adecuado.

#### **4.3 Interrelación entre sistemas de control de temperatura y humedad**

Los resultados confirman la estrecha relación entre el control de temperatura y humedad relativa descrita por Çengel (2019). Las intervenciones realizadas en ambos sistemas permitieron lograr un equilibrio adecuado, evitando las interferencias mutuas que anteriormente provocaban inestabilidad. La calibración precisa del sensor de humedad mediante el ajuste de potenciómetros resultó fundamental para mejorar la precisión de las lecturas y, por ende, la eficacia del control automatizado.

Esta interdependencia de variables subraya la necesidad de un enfoque holístico en la repotenciación de cámaras estabilizadoras, considerando cómo las modificaciones en un subsistema pueden afectar el desempeño de otros. El análisis gráfico de los datos muestra claramente cómo la estabilización de la temperatura precedió a la estabilización de la humedad relativa, confirmando la relación causal entre ambos parámetros.

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

#### 4.4 Cumplimiento de estándares normativos

Las mejoras implementadas permitieron que la cámara estabilizadora cumpla con los requisitos establecidos por la normativa ICH Q1A para estudios de estabilidad farmacéutica (ICH, 2003) y las directrices de la FDA para BPL/BPM (FDA, 2003). Este aspecto es particularmente relevante en el contexto farmacéutico, donde el incumplimiento de estos estándares puede comprometer la validez de los estudios realizados y, potencialmente, la seguridad de los medicamentos evaluados.

El logro de variaciones máximas de  $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$  en temperatura y  $\pm 3\%$  en humedad relativa supera incluso las expectativas iniciales del proyecto, que establecían límites de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  y  $\pm 3\%$  respectivamente. Esta precisión mejorada representa una ventaja adicional para la realización de pruebas de estabilidad más rigurosas y confiables.

#### 4.5 Sostenibilidad y costo-efectividad del enfoque

La repotenciación de equipos existentes, frente a su reemplazo, representa una alternativa más sostenible desde perspectivas económicas y ambientales. Aunque no se realizó un análisis económico detallado en este estudio, la intervención focalizada en componentes específicos sin duda representó una inversión significativamente menor que la adquisición de un equipo nuevo de características similares.

Este enfoque de repotenciación es particularmente relevante en países en desarrollo y empresas de tamaño medio, donde la adquisición de equipos especializados de alta gama puede representar una barrera financiera significativa. La metodología desarrollada en este estudio podría aplicarse a situaciones similares en diferentes contextos, proporcionando una alternativa viable que extiende la vida útil de los equipos existentes.

#### 4.6 Limitaciones y consideraciones futuras

A pesar de los resultados positivos, este estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse. En primer lugar, el período de seguimiento de 18 semanas, aunque suficiente para validar la estabilidad inicial, no permite evaluar el comportamiento a largo plazo del equipo repotenciado. Sería recomendable realizar un seguimiento extendido para confirmar la durabilidad de las mejoras implementadas.

El estudio también se limitó a condiciones específicas de temperatura ( $30^{\circ}\text{C}$ ) y humedad relativa (65%), sin evaluar el desempeño del equipo en otros puntos de su rango operativo. Investigaciones futuras podrían explorar la capacidad del equipo repotenciado para mantener diferentes combinaciones de parámetros dentro de su rango de diseño.

Finalmente, cabe considerar la posibilidad de integrar tecnologías más

## 5. CONCLUSIONES

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

La repotenciación de la cámara estabilizadora Binder KBF 240 logró restablecer y mejorar su capacidad para mantener condiciones ambientales estables de 30°C y 65% de humedad relativa, con variaciones máximas de  $\pm 1^\circ\text{C}$  y  $\pm 3\%$  respectivamente. Este resultado satisface plenamente los objetivos establecidos y confirma la viabilidad técnica de la solución implementada.

Las intervenciones realizadas en los sistemas de generación de vapor, refrigeración, y control y automatización demostraron ser efectivas para resolver los problemas identificados en el diagnóstico inicial. La instalación de componentes modernos compatibles con el sistema existente permitió optimizar el rendimiento del equipo sin necesidad de modificaciones estructurales significativas.

El análisis estadístico de los datos recopilados durante 18 semanas confirma una mejora sustancial en la estabilidad de los parámetros ambientales, con una reducción significativa en la variabilidad tanto de temperatura ( $DE=0,24^\circ\text{C}$ ) como de humedad relativa ( $DE=1,66\%$ ). Estos valores están dentro de los márgenes establecidos por las normativas internacionales para pruebas de estabilidad farmacéutica.

La metodología desarrollada en este estudio puede aplicarse a equipos similares con problemas de control ambiental, ofreciendo una alternativa sostenible y económicamente viable frente a la sustitución completa de los equipos. Esto es particularmente relevante en contextos donde los recursos son limitados o donde se busca extender la vida útil de la infraestructura existente.

Para garantizar el mantenimiento de los resultados a largo plazo, se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo trimestral que incluya inspecciones regulares de los sensores y el sistema de control, así como la documentación detallada de todas las intervenciones realizadas.

## 6. REFERENCIAS

Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU. (2003). *Guidance for industry: 11A (R2) Stability Testing of New Drugs Substances and Products*. U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/media/71707/download>

Çengel, Y. A. (2019). *Termodinámica: Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill.

CV, T. S. (2015). *Sistemas de Refrigeración*. (D. G. Zusammenarbeit, Ed.). México D.F: GIZ.

Electric, S. (2024). *Catálogo general 2024*. <https://flipbook.se.com/es/es/ESMKT01250G23/2024/#page/448>

Genebre. (2017). *Catálogo industrial 2017*. [https://www.genebre.es/media/contents/catalogo/genebre\\_catalogo\\_industrial\\_2017.pdf](https://www.genebre.es/media/contents/catalogo/genebre_catalogo_industrial_2017.pdf)

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

- GmbH, B. (2019). *Manual de usuario: Cámara climática KBF 240*. Tuttlingen, Alemania.
- GmbH, B. (s.f.). *Cámaras climáticas y sus aplicaciones: Guía técnica*. <https://www.binder-world.com>
- Guemisa. (s.f.). *Tutorial humedad*. <https://guemisa.com/articulos/tutorial-humedad.pdf>
- Heikki Laurila, Beamex. (17 de abril de 2018). *Sensor de temperatura pt100: lo que hay que saber*. <https://blog.beamex.com/es/sensor-de-temperatura-pt100-lo-que-hay-que-saber>
- International Council for Harmonisation. (2003). *Q1A Stability testing of new drug substances and products*. <https://www.ich.org/page/quality-guidelines>
- Thermo Fisher Scientific. (13 de agosto de 2019). *Cámaras ambientales y sus aplicaciones*. [https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LPD/brochures/BR-TSENVCHAMBERS-E%20081319\\_ES\\_LR-0620.pdf](https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LPD/brochures/BR-TSENVCHAMBERS-E%20081319_ES_LR-0620.pdf)
- Vycindustrial. (s.f.). *Catálogo calderas eléctricas a vapor*. <https://vycindustrial.com/vycweb/calderas/catalogos/caldera.elv.pdf>
- Wexler, A. (1965). *Relative humidity and its measurement*. U.S. Department of Commerce.
- Argueta Escobar, L. A. (2019). *Calificación de la cámara de estabilidad PREMLAB CC13WSRA del laboratorio de investigación de productos naturales – LIPRONAT – según la guía de validación de la Organización Mundial de la Salud – OMS* (Tesis de licenciatura en Química Farmacéutica). Universidad de San Carlos de Guatemala. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06\\_4462.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_4462.pdf)

Mayusa, J., Almeida, G. & Alomoto, E. (2025). Soluciones Técnicas para la Repotenciación de la Cámara Binder KBF 240.

## Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolquí.

### Análisis de viabilidad técnica para la implementación de túneles solares: caso supermercado Santa María en Sangolquí.

Nayeli Cristina Cajilema Chanchicocha <sup>1</sup>, Dayana Alexandra Tasiguano Imba <sup>2</sup>, Omar Fernando  
Sánchez Olmedo <sup>3</sup>[0000-0001-5280-4412]

<sup>1</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [nccalijelamachanchicocha@istct.edu.ec](mailto:nccalijelamachanchicocha@istct.edu.ec)

<sup>2</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [datasiguanoimba@istct.edu.ec](mailto:datasiguanoimba@istct.edu.ec)

<sup>3</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [osanchez@istct.edu.ec](mailto:osanchez@istct.edu.ec)

Recibido: 05/04/2025

Aceptado: 05/06/2025

Publicado: 30/06/2025

#### RESUMEN

Este trabajo analizó la factibilidad técnica de instalar túneles solares en el Centro Comercial Santa María, ubicado en Sangolquí. El objetivo principal fue estudiar el impacto ambiental de esta tecnología, enfocándose en su capacidad para reducir tanto el consumo de energía eléctrica como las emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello, se adoptó un enfoque cuantitativo, realizando mediciones de iluminación en 20 puntos clave, los cuales se clasificaron en diferentes categorías para calcular promedios de los niveles de luz en distintos momentos del día. Los hallazgos mostraron que la utilización de túneles solares podría disminuir significativamente el uso de energía artificial y las emisiones contaminantes. Esta tecnología se presenta como una alternativa eficiente para optimizar el consumo energético y contribuir al cuidado del medio ambiente al reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables. Sin embargo, a pesar de los beneficios en términos de ahorro energético, se determinó que el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial es demasiado prolongado, lo que hace que el proyecto no sea viable en las condiciones actuales. También se analizaron los beneficios ambientales de esta solución, considerando los costos iniciales y los ahorros a largo plazo.

**Palabras clave:** Túneles solares, impacto ambiental, consumo de energía, eficiencia energética, viabilidad técnica.

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolquí.

## ABSTRACT

This study analyzed the technical feasibility of installing solar tunnels at the Santa María Shopping Center, located in Sangolquí. The main objective was to study the environmental impact of this technology, focusing on its ability to reduce both electricity consumption and greenhouse gas emissions. To achieve this, a quantitative approach was adopted, conducting lighting measurements at 20 key points, which were classified into different categories to calculate average light levels at various times of the day. The findings showed that the use of solar tunnels could significantly reduce artificial energy consumption and pollutant emissions. This technology is presented as an efficient alternative to optimize energy consumption and contribute to environmental care by reducing dependence on non-renewable energy sources. However, despite the benefits in terms of energy savings, it was determined that the time required to recover the initial investment is too long, making the project unfeasible under current conditions. The environmental benefits of this solution were also analyzed, considering the initial costs and long-term savings.

**Index terms:** Solar tunnels, environmental impact, energy consumption, energy efficiency, technical feasibility.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Este estudio tiene como objetivo principal analizar la factibilidad técnica de instalar túneles solares en el Centro Comercial Santa María, ubicado en Sangolquí. Debido al elevado flujo de personas que recibe este centro comercial, se considera una oportunidad ideal para implementar estrategias innovadoras que mejoren tanto la eficiencia energética como el confort de los visitantes.

El uso de túneles solares permite reducir el consumo de energía eléctrica al disminuir el uso de sistemas de iluminación artificial. Además, al apagar las luces eléctricas, se genera menos calor en el interior de los edificios, lo que reduce la necesidad de utilizar sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, optimizando así el gasto energético (Solatube, 2024).

Un túnel solar es un dispositivo diseñado para captar la luz natural del sol y llevarla a espacios interiores, proporcionando iluminación sin necesidad de electricidad. Este sistema está compuesto por un captador que recoge la luz solar, un tubo reflectante que la conduce y un difusor que la distribuye de manera uniforme en el interior, lo que lo convierte en una solución sostenible y eficiente para iluminar áreas oscuras o de difícil acceso para la luz natural (Doinglight, 2024).

Para cumplir con este propósito, se llevará a cabo un análisis detallado de las características técnicas de los túneles solares, su funcionamiento, los requisitos de instalación y los posibles beneficios para el centro comercial. Asimismo, se considerarán factores como el contexto local, las condiciones climáticas y la normativa vigente para evaluar la viabilidad de su implementación.

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

En el ámbito de la agricultura vertical, los túneles solares desempeñan un papel crucial al reducir la dependencia de la iluminación artificial y aumentar la eficiencia en la producción de alimentos. Por ejemplo, empresas como Plantagon en Suecia han liderado iniciativas sostenibles que maximizan el rendimiento agrícola utilizando luz natural, promoviendo un enfoque más respetuoso con el medio ambiente. Además, la luz natural es fundamental para los ciclos reproductivos y el bienestar general de los animales (Doinglight, 2024).

La energía solar, como fuente renovable y limpia, se mide en términos de radiación solar directa, expresada en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Este indicador determina la cantidad de electricidad que puede generarse mediante un sistema fotovoltaico: cuanto mayor sea la radiación solar directa, mayor será la producción de energía eléctrica (Factorenergía, 2023).

El diseño y desarrollo sostenible ha motivado a arquitectos, diseñadores y constructores a crear espacios de alto rendimiento que minimicen el impacto ambiental y mejoren la calidad de vida de las personas. Los sistemas de iluminación natural tubular, como Solatube, son una alternativa rentable, eficiente y ecológica para iluminar espacios interiores sin consumo de energía y con un mantenimiento mínimo. Además, gracias a su excelente eficiencia térmica, las pérdidas de calor durante el invierno son mínimas, lo que ayuda a mantener temperaturas interiores agradables y reduce la necesidad de calefacción (Solatube, 2024).

La implementación de túneles solares no solo mejora la eficiencia energética, sino que también contribuye a reducir las emisiones de carbono asociadas al uso de energía eléctrica generada por combustibles fósiles. Según estudios recientes, los sistemas de iluminación natural pueden disminuir hasta un 30% el consumo eléctrico en edificios comerciales al aprovechar al máximo la luz solar disponible durante el día. Esto no solo representa un ahorro económico significativo, sino que también promueve prácticas más sostenibles en el sector de la construcción y el diseño de interiores (EnergySage, 2023).

Además, los túneles solares tienen un impacto positivo en la salud y el bienestar de las personas. La exposición a la luz natural está vinculada con una mayor productividad, mejor estado de ánimo y una regulación más eficiente del ciclo circadiano. En espacios comerciales, esto se traduce en una experiencia más agradable para los visitantes y un ambiente laboral más saludable para los empleados. Estudios han demostrado que las áreas iluminadas con luz natural generan un entorno más acogedor y atractivo, lo que puede influir en el comportamiento de los consumidores y en el tiempo que permanecen en el lugar (GreenBuildingAdvisor, 2022).

Los resultados de esta investigación proporcionarán una base sólida para desarrollar una propuesta técnica bien fundamentada para la instalación de túneles solares en el Centro Comercial Santa María. De esta manera, se busca impulsar soluciones sostenibles en el sector comercial, promoviendo un uso más eficiente de los recursos energéticos y mejorando la experiencia de los usuarios.

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS / DESARROLLO

### 2.1. Materiales

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron los materiales especificados en la Tabla 1, los cuales fueron fundamentales tanto para el diseño de los planos de distribución de los túneles solares como para la interpretación y análisis de los datos obtenidos.

**Tabla 1**

*Equipos y materiales empleados en el trabajo investigativo.*

Ítems	Descripción	Especificaciones
1	Luxómetro	Rango de medición: 0-200,000 lux; precisión $\pm 5\%$ .
2	Software CAD	Funciones de dibujo 2D/3D.
4	Atlas Solar	Datos de irradiación para el año 2024.
5	Planos de arquitectónicos	Planos en formato PDF, escala 1:100.
6	Características túnel solar	330 DC -OS
7	Software de diseño de iluminación	Diseño iluminación

Es importante destacar que la tabla presenta una descripción detallada de los materiales y herramientas necesarios para llevar a cabo el análisis técnico. En ella se incluyen equipos de medición, software especializado para diseño y simulación, así como documentación relevante. Cada uno de estos elementos desempeña un papel esencial para asegurar una evaluación precisa y efectiva, respaldando tanto el desarrollo como la implementación adecuada de las soluciones planteadas.

### 2.2. MÉTODOS

La investigación se desarrolló siguiendo un enfoque metodológico estructurado en varias fases, diseñado para asegurar un análisis integral y detallado de la viabilidad de los túneles solares.

#### Datos iniciales

#### Datos generales de Sangolquí.

En la tabla 2 se resumen las características generales del cantón Rumiñahui-Sangolquí.

**Tabla 2**

*Datos generales de Sangolquí.*

Aspecto	Detalle
Ubicación	Provincia de Pichincha, sureste de Quito, Ecuador
Ciudad principal	San Juan Bautista de Sangolquí
Extensión	137.2 km <sup>2</sup>
Clima	Cálido y templado
Temperatura promedio anual	15 °C
Temperatura máxima en días soleados	23 °C

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolquí.

Estaciones	Verano (junio a septiembre), Invierno (octubre a mayo)
Población total (2022)	102,863 habitantes
Población urbana	96,647 habitantes
Población rural	6,216 habitantes

**Nota.** Los datos fueron obtenidos del Cantón Rumiñahui (2021) y del censo poblacional del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2022).

### Datos climáticos de Sangolquí.

La recopilación de datos desempeñará un papel fundamental en la evaluación de la disponibilidad y el aprovechamiento del potencial de los recursos renovables en los sistemas de energía solar, con un enfoque particular en la radiación solar. Cabe destacar que la información utilizada proviene de dos fuentes meteorológicas diferentes: el Atlas Solar y MeteoBlue.

**Figura 1**

*Mapa Radiación solar en Sangolquí.*



**Nota:** El mapa muestra la distribución de la radiación solar en la región de Sangolquí. La información sobre la irradiancia ha sido obtenida del Atlas Solar Mundial de 2024. Las áreas sombreadas representan diferentes niveles de radiación solar, lo cual es clave para analizar la factibilidad de implementar túneles solares en esta localidad.

En la tabla 3 se presentan los datos recopilados sobre la radiación solar, según el Atlas Solar Mundial. Este atlas ha sido elaborado por Solargis bajo un contrato con el Banco Mundial, utilizando una base de datos de recursos solares de su propiedad (Atlas Solar Global, 2024).

**Tabla 3**

*Irradiancia solar anual 2024 en Sangolquí*

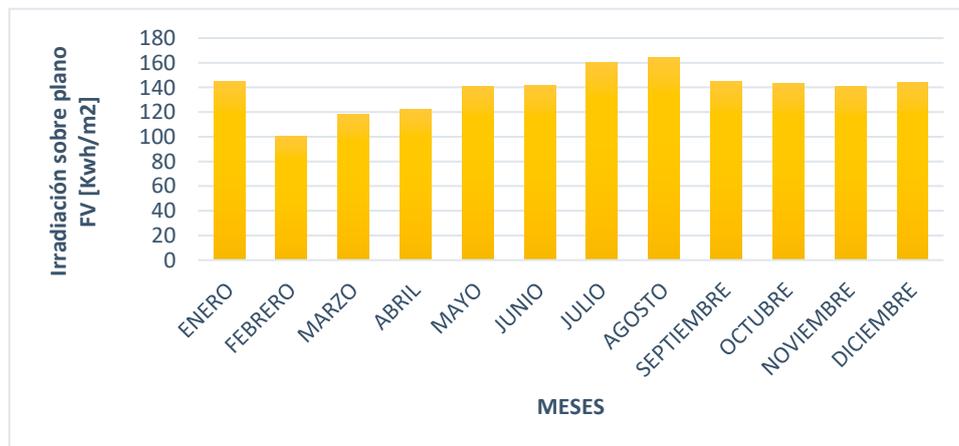
Tipos	Promedios Irradiación solar [kWh/m <sup>2</sup> ]
Irradiación normal directa	1709.5
Irradiación horizontal global	2012.1
Irradiación horizontal difusa	825.0
Irradiación global inclinada en un ángulo óptimo	2015.0

**Nota:** Los datos relacionados con la cantidad de luz solar anual en Sangolquí, provienen del Atlas Solar Mundial de 2024.

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolquí.

**Figura 2**

Estimación de radiación en el 2024



*Nota:* Esta figura representa la exposición directa al sol en el Centro Comercial Santa María, ubicado en Sangolquí, a lo largo del año 2024. Los datos reflejan la cantidad de radiación solar que impacta de manera directa en superficies verticales en esta área específica. Fuente: Atlas Solar Mundial, 2024.

### Intensidad lumínica en el Supermercado Santa María

Se llevaron a cabo tres mediciones de la iluminación artificial y natural en 20 puntos estratégicos del supermercado Santa María utilizando un luxómetro a lo largo del área disponible (2.774,12 m<sup>2</sup>). Estas ubicaciones se clasificaron por categorías. Las mediciones se realizaron en diferentes momentos del día: mañana, mediodía y noche. Los datos recopilados se utilizaron para presentar los resultados que se muestran a continuación.

**Tabla 4.**

*Niveles de iluminación artificial y natural promedio en diferentes áreas del centro comercial.*

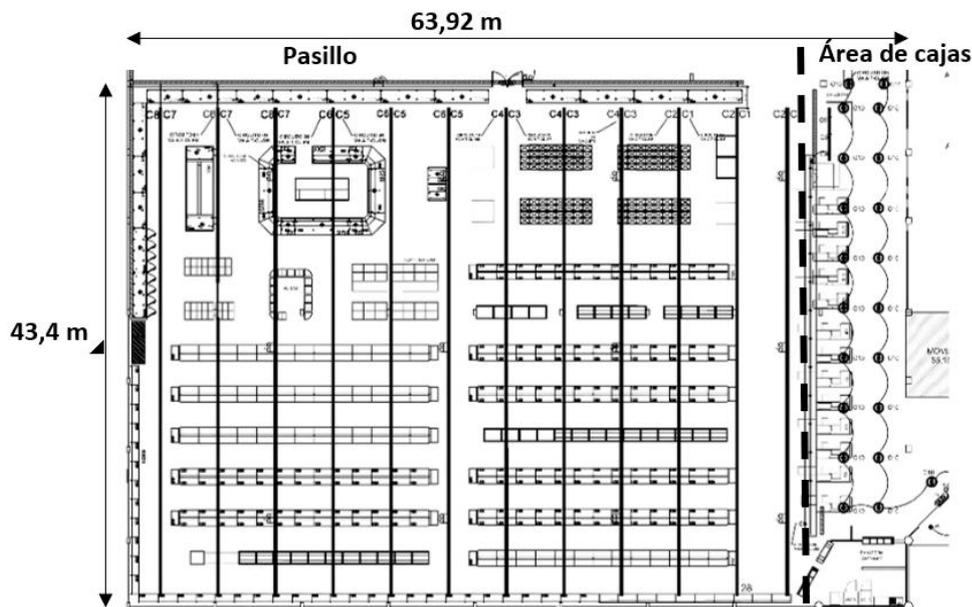
Zona	Mañana (lx)	Mediodía (lx)	Noche (lx)
Zonas de Acceso y Tránsito	616	694	417
Zonas de Atención al Cliente	578	439	393
zonas de Alimentos y Bebidas	578	403	397
Zonas de Productos de Uso Diario	500	410	381

### Consumo de energía

El supermercado dispone de luminarias led instaladas en la siguiente distribución:

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

**Figura 3.**  
*Plano de Iluminación actual*



*Nota:* Las luminarias tipo tira LED (C1 al C8) se han colocado en áreas como pasillos y zonas de tránsito. Las luminarias tipo campana están ubicadas en las áreas de cajas, donde se necesita una iluminación focalizada y eficiente para asegurar una visibilidad óptima y comodidad tanto para los clientes como para el personal. Todos estos datos se obtuvieron de los planos eléctricos y arquitectónicos disponibles.

**Tabla 5**

*Especificaciones de luminarias existentes.*

Tipo de luminaria	Luminaria sobrepuesta abierta 120cm con tubo led	Luminaria tipo campana acrílica
Cantidad de luminarias	336	21
Potencia	50 w	100w
Horas al día / mensual	12 horas/30días	12 horas/30días

*Nota:* La tabla presenta las especificaciones de las luminarias actualmente en uso en el centro comercial, incluyendo el tipo de luminaria, la cantidad instalada, su potencia en vatios, y el tiempo de funcionamiento diario y mensual.

El costo del mantenimiento trimestral de las 357 luminarias instaladas asciende a \$111,25, considerando un costo de \$1,25 por lámpara y que cada trimestre se realiza el mantenimiento del 25% del total. En este sentido, el costo anual de mantenimiento de las luminarias actuales es de \$445, según los datos proporcionados en el plan financiero de mantenimiento de la empresa.

### **Energía de consumo del sistema de iluminación actual y costo**

Se realizó el cálculo de kilovatios-hora (kWh) y del valor de la factura eléctrica para analizar el costo asociado al consumo de energía destinado a la iluminación. Este análisis es esencial para obtener una estimación precisa del gasto, ya que permitió identificar la proporción de este

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

consumo en el total de la factura eléctrica mensual y anual.

$$\text{Consumo kwh} = \frac{P \times NL \times T}{1000} \quad (1)$$

**Donde:**

**P:** Potencia activa en w.

**NL:** número de luminaria.

**T:** Tiempo en horas.

**1000:** Factor de conversión para convertir de vatios-hora (Wh) a kilovatios-hora (kWh).

$$\text{Calculo 1} = \frac{(100w * 21) * 12h * 30d}{1000} = 756kwh$$

$$\text{Calculo 2} = \frac{(50w * 336) * 12h * 30d}{1000} = 6048kwh$$

$$\text{Consumo mensual total (CM)} = 756 \text{ Kwh} + 6048\text{Kwh} = 6804\text{kwh}$$

$$CM = CT (kWh) * \text{Costo por kWh} \quad (2)$$

$$CM = 6804 \text{ Kwh} * 0,10 \frac{USD}{kwh} = 680,40 \text{ USD}$$

$$\text{Consumo anual} = 6.804\text{kwh} * 12 = 81.648 \text{ kwh}$$

$$\text{Costal anual} = 81.648\text{kwh} * 0,10 = 8.164,80 \text{ USD}$$

### Características de los túneles solares disponibles en Ecuador

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del túnel solar, incluyendo su capacidad de captación, dimensiones, eficiencia lumínica y materiales, con el objetivo de evaluar su rendimiento y su contribución al ahorro energético.

**Tabla 2**

*Especificaciones técnicas del túnel solar*

<b>Modelo</b>	330 DC OS
<b>Diámetro</b>	21" (53cms)
<b>Intensidad lumínica</b>	De 13,900 a 20,800lm
<b>Área recomendada</b>	+/-50m <sup>2</sup>
<b>Recorrido máximo recomendado</b>	15m

Además, es importante resaltar el diseño estructural de los túneles solares, presentados en la figura 4. Este sistema utiliza una combinación de domos, tubos reflectantes y difusores para capturar la luz solar desde el exterior y llevarla al interior del edificio (Solatube,2024).

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

**Figura 4**

*Túnel solar 330 DC OS*



### 2.2.1. Marco regulatorio

En Ecuador, la iluminación de los supermercados debe ajustarse a los estándares establecidos por normativas técnicas, como la NTE INEN 1 154, que regula los requerimientos de iluminación para distintos tipos de espacios. En este contexto, los niveles recomendados de iluminación pueden variar dependiendo de la zona y la actividad realizada en cada área.

A continuación, se especifican los niveles de iluminación sugeridos para diversas áreas en un entorno comercial:

- Iluminación general: entre 300 y 600 lux.
- Escaparates exteriores: de 1000 a 3000 lux.
- Escaparates interiores: aproximadamente 1000 lux.
- Estanterías de productos: entre 200 y 400 lux.
- Vitrinas: de 1000 a 3000 lux.
- Mostradores y zonas de caja: entre 500 y 900 lux (según la NTE INEN 1 154).

### 2.2.2. Diseño de iluminación por el método lúmenes

#### Parámetros de diseño de la iluminación

**Tabla 7**

*Parámetros de diseño de la iluminación*

Aspecto	Especificación
Dimensiones de la sala	43,4 x 63,92 x 8 metros (ancho x profundidad x alto)
Nivel de iluminancia media	400 luxes según las normas técnicas NTE INEN 1 154
Tipo de luminaria	Túnel solar 330 DC -OS (Flujo $\phi$ : 17.350 lm, se calculó un promedio entre los rangos de luminosidad para obtener una estimación equilibrada del desempeño del sistema en casos desfavorables y favorables)
Altura recomendada del plano de trabajo	Entre 0,90 y 1,20 m (según la Guía Técnica de Iluminación Eficiente para el Sector Retail de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética). Se estableció un promedio de 1,20 m considerando las estanterías de 2,40 m.
Factor de mantenimiento	0,7 (aplicado por acumulación de suciedad y factores ambientales)

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

---

	sobre el domo del túnel solar)
Coeficientes de reflexión	Pared blanca: 0,80; Techo gris claro: 0,60; Suelo blanco: 0,70

---

### Cálculo del número de luminarias

Para el cálculo del número de luminarias hay que considerar los siguientes aspectos:

- **Cálculo del índice del local**

El índice del local se calcula en función de las dimensiones físicas del espacio. Para ello, se emplea la fórmula que se aplica a esquemas de iluminación directa, semidirecta, directa-indirecta y difusa general:

$$k = \frac{a \cdot b}{(H-h) \cdot (a+b)} \quad (3)$$

Donde:

- k: Índice del local.
- a: Ancho del área en metros (m).
- b: Largo del área en metros (m).
- H: Altura total del espacio.
- h: Altura del plano o superficie de trabajo.

$$k = \frac{43,4 \cdot 63,92}{(8 - 1,20) \cdot (43,4 + 63,92)} = 3,8$$

Con el índice aproximado del local definido (k=4), se consulta la tabla de correcciones de la Norma UNE 12464-1, junto con los coeficientes de reflexión de las superficies del espacio. A partir de esto, se determina el coeficiente de utilización mediante interpolación, obteniendo un valor de Cu=1,19.

- **Cálculo del flujo luminoso total necesario**

El flujo luminoso total requerido en el espacio se calcula con la siguiente fórmula:

$$\Phi T = \frac{E \cdot S}{Cu \cdot Fm} \quad (4)$$

Donde:

- $\Phi T$ : Flujo luminoso total necesario (en lúmenes).
- E: Nivel de iluminancia requerido sobre el plano de trabajo (en lux).
- S: Área total (en metros cuadrados, m<sup>2</sup>).
- Cu: Coeficiente de utilización del sistema de iluminación.
- Fm: Factor de mantenimiento o depreciación del sistema.

Sustituyendo los valores:

$$\Phi T = \frac{400 \cdot 2774,12}{1,19 \cdot 0,7} = 1\,332.110,44 \text{ lm}$$

Por lo tanto, el flujo luminoso total necesario para iluminar el centro comercial es de **1.332.110,44 lúmenes**.

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

- **Cálculo del número de luminarias necesarias**

El número de luminarias requeridas se calcula con la siguiente fórmula:

$$NL = \frac{\Phi_T}{\Phi_L} \quad (5)$$

Donde:

- NL: Número de luminarias necesarias.
- $\Phi_T$ : Flujo luminoso total del espacio.
- $\Phi_L$ : Flujo luminoso de cada luminaria.

Sustituyendo los valores:

$$NL = \frac{1332.110,44 \text{ lm}}{17.350 \text{ lm}} = 76 \text{ luminarias}$$

Por lo tanto, se requieren **76 luminarias** para iluminar el espacio.

- **Altura de las luminarias**

Para determinar la altura desde el plano de trabajo hasta las luminarias, se ajusta la altura total considerando las características del entorno. La fórmula empleada es:

$$h = \frac{4}{5} * (h - 0,85) \quad (6)$$

Sustituyendo los valores:

$$h = \frac{4}{5} * (8m - 0,85) = 5,72m$$

La altura desde el piso hasta las luminarias se calcula sumando la altura del plano de trabajo:

$$h = 5,72m + 1,20m = 6,92$$

Finalmente, la distancia entre el techo y el difusor de las luminarias se obtiene restando:

$$h = 8m - 6,92m = 1,08 m$$

Por lo tanto, las luminarias deben instalarse a **1,08 metros** del techo.

### Diseño y simulación en Software

Para la simulación se considera luminarias con características similares a los túneles solares modelo 330 DS OC. Las especificaciones consideradas se detallan en la tabla 8:

**Tabla 8**

*Tabla comparativa luminaria Molto Luce y Túnel Solar*

Parámetro	Luminaria	Túnel Solar
Tipo de lámpara	LED	Natural
Flujo luminoso	3100lm	De 13,900 a 20,800 lm
Tipo de montaje	Pendular	Inclinado
Diámetro	550mm	21" (53 cm)

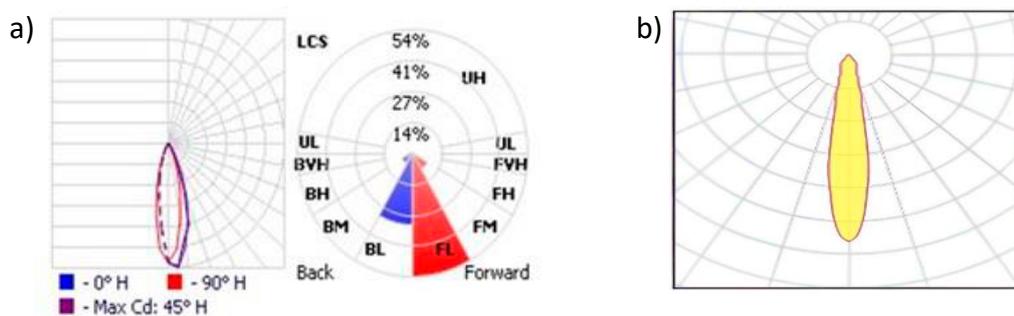
Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

<b>Dimensiones</b>	Longitud: 550 mm	Recorrido Max: 15 m
	Anchura: 550 mm	Área: +/-50m <sup>2</sup>
	Altura ajustable:	
	288 mm	

Se realizó un análisis de las curvas fotométricas de ambos dispositivos, comparando las correspondientes a la lámpara y al túnel solar. Este procedimiento permitió comprender con mayor detalle cómo se distribuye la luz en el área de instalación. A continuación, se incluyen los diagramas que ilustran dichas curvas fotométricas.

**Figura 5**

*Curva fotométrica Túnel solar 330 DC OS vs luminaria Molto Luce - MOVA M BASIC LOFT PD SUSPENSION*



*Nota:* La figura 5 a) representa la curva fotométrica del túnel solar modelo 330 DS OC, ilustrando cómo se distribuye la luz en el área de instalación. La figura 5 b) muestra la curva fotométrica de la luminaria Molto Luce - MOVA M BASIC LOFT PD SUSPENSION, destacando su rendimiento lumínico y su contribución a la iluminación del espacio.

En resumen, los datos ingresados en el software se muestran en la tabla 9:

**Tabla 9**

*Datos ingresados al software*

Variable	Valor calculado	Unidad
Luminancia	17.350	lm
Potencia	0	w
Número de lámparas	76	lámparas
Tipo de luminaria	Molto Luce - MOVA M BASIC LOFT PD SUSPENSION	-
Altura desde el plano de trabajo hasta las luminarias	5,72	m

*Nota:* Los datos anteriores fueron calculados previamente para evaluar la viabilidad de la instalación de túneles solares en el centro comercial Santa María. Estos valores se ingresaron al software para generar la simulación correspondiente.

## DISTRIBUCIÓN DE LOS TÚNELES

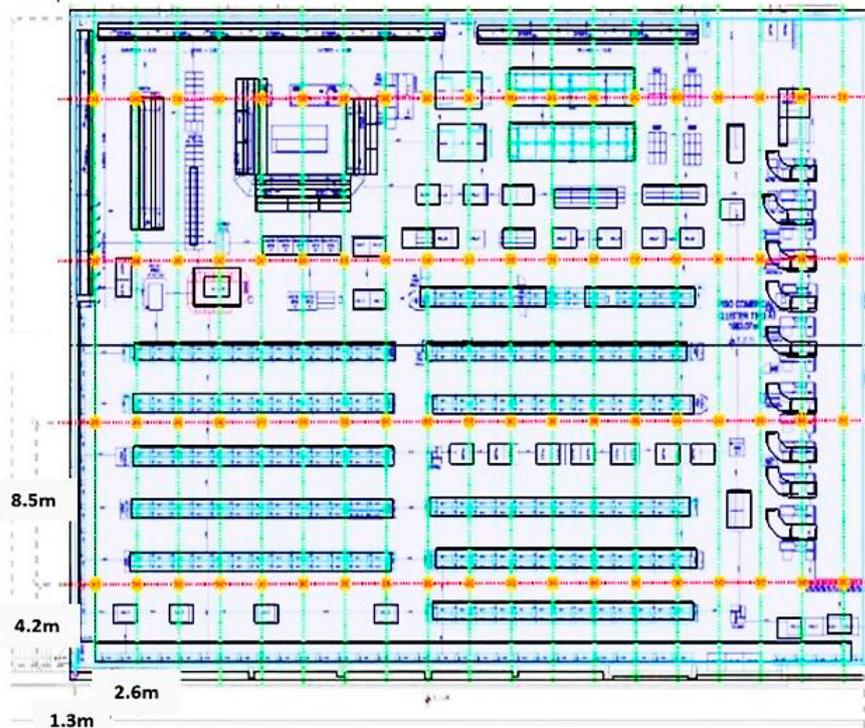
Para la simulación y diseño se realizó la siguiente distribución de las luminarias según los datos

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

mencionados en la tabla 9.

**Figura 6.**

*Plano de la distribución de túneles solares*



*Nota:* Este plano muestra la distribución propuesta para los túneles solares en el centro comercial. Su ubicación estratégica optimiza la captación de luz natural en el espacio. En total fueron colocadas 76 túneles solares en el simulador.

### 3. RESULTADOS

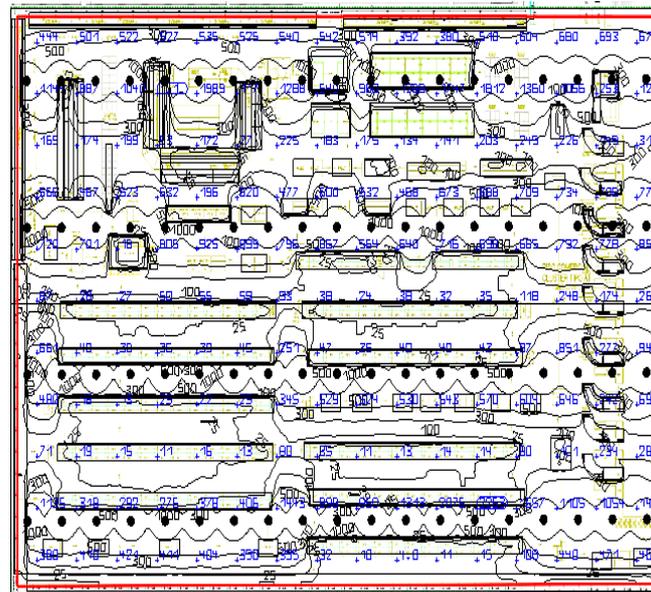
Los resultados generados por la simulación del software, a partir de los datos previamente introducidos, se emplearon para analizar la eficiencia y el rendimiento de la instalación de los túneles solares.

La simulación arroja un promedio de 611 luxes en el área del supermercado descrita, con un consumo de energía eléctrica de 0 Wh.

En el plano de la figura 7, de isóneas de distribución de luz, se puede observar la distribución de la intensidad lumínica.

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

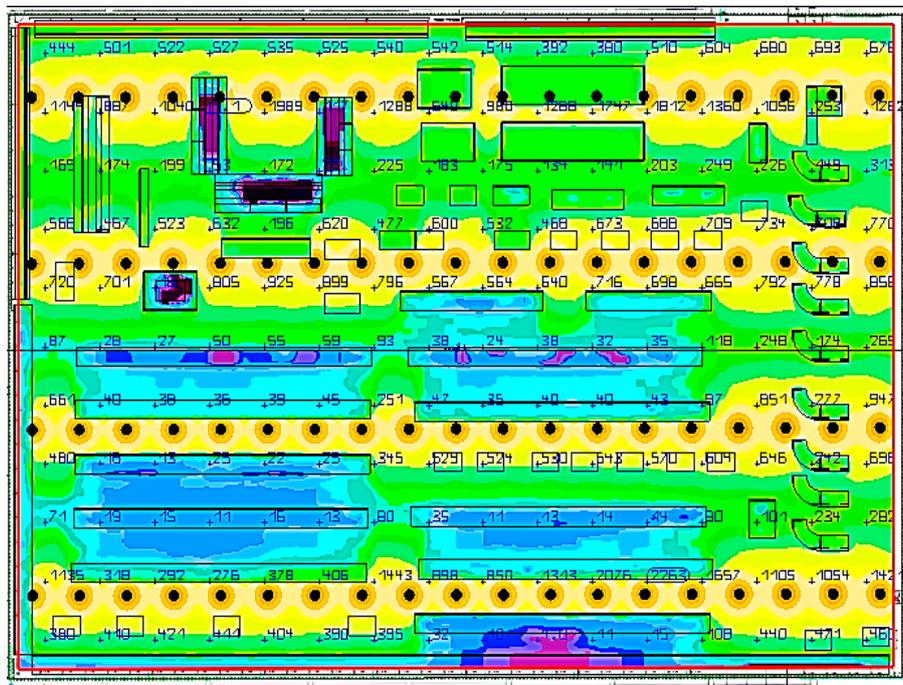
**Figura 7.**  
*Islóneas de distribución de la luz en el plano*



*Nota:* Valores numéricos en Luxes

De igual forma se puede observar con detalle de colores en la figura 8, el plano de distribución de niveles de iluminación. Los colores permiten identificar zonas óptimas de iluminación.

**Figura 8.**  
*Distribución de niveles de iluminación*



Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

### 3.1. Análisis financiero

Es importante tener en cuenta que el mantenimiento de los túneles solares se realiza cada seis meses e incluye principalmente la limpieza del domo exterior y del difusor, ya que son las partes más propensas a acumular suciedad.

En este sentido, el ahorro anual (AA) contempla tanto la reducción directa en el consumo de energía como la eliminación de los costos asociados al mantenimiento.

$$AA = 8164,80 \text{ USD} + 445 \text{ USD} = 8609,80 \text{ USD}$$

En la tabla 10 se presenta el desglose del costo total de la inversión para la compra e instalación de los túneles solares. En ella se detallan los precios unitarios, las cantidades y el cálculo del monto total, incluyendo los impuestos correspondientes.

**Tabla 3**

*Costo Total de la Inversión al año 2024*

Ítem	Precio Unitario (USD)	Cantidad	Costo total (USD)
Túnel solar suministro domo tubular 330 DC OS	\$1.206,00	76	\$91.656,00
Instalación de túneles solares SOLATUBE	\$ 340,00	76	\$25.840,00
<b>Subtotal</b>	-	-	\$117.496,00
<b>Descuento 15% Solatube</b>			\$13.748,40
<b>Subtotal</b>			\$103.747,60
<b>IVA 15%</b>	-	-	\$15.562,14
<b>Total</b>	-	-	\$119.309,74

*Nota:* Esta tabla detalla el costo total de la inversión para la adquisición de los túneles solares. Cabe destacar que el descuento del 15% se aplica únicamente al suministro de los túneles solares, específicamente al ítem "Túnel solar suministro domo tubular 330 DC OS". Estos precios son referenciales al año 2024 del proveedor en Ecuador.

#### 3.1.1. Tiempo de retorno de la inversión

$$PRI = \frac{I_0}{FCA} \tag{7}$$

**Donde:**

**PRI:** Período de retorno de inversión

**I<sub>0</sub>:** Inversión inicial

**FC:** Flujo Caja Anual

El Período de Recuperación es una estimación que indica la cantidad de años necesarios para recuperar la inversión inicial de \$119.309,74. El valor de \$8609,80 corresponde al flujo de caja anual (FCA), que representa el ingreso neto esperado cada año. Este monto se utiliza en el cálculo porque, al multiplicarlo por los años de recuperación, el resultado se aproxima al total de la inversión inicial, verificando que el flujo de caja proyectado es adecuado para recuperar la inversión dentro del plazo previsto. Por lo mencionado el PRI resulta 13 años.

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

Según la norma NIIF, un proyecto se considera viable cuando su Período de Recuperación de la Inversión (PRI) es menor a 5 años, lo que lo hace atractivo. En contraste, un PRI superior a 10 años podría reflejar un nivel de riesgo más elevado.

#### 4. DISCUSIÓN

La instalación de 76 túneles solares en el Centro Comercial Santa María ha demostrado ser una solución eficiente, alcanzando un nivel de iluminación de 611 luxes y generando un ahorro anual de \$8609,80 en las facturas de electricidad, con un período de recuperación estimado en 13 años, periodo de recuperación elevado y de alto riesgo. Un caso similar es el de la Saudi Industrial Projects Company (SIPCO), donde la instalación de 185 túneles solares modelo M74 DS permitió alcanzar niveles de iluminación de 200 luxes, un ahorro anual de 648,240 kWh y una reducción de SAR 17,011 (aproximadamente \$4,530 USD) en su factura eléctrica. Este ejemplo refuerza la efectividad de los túneles solares en la optimización del consumo energético en instalaciones de gran escala.

La incorporación de túneles solares modelo 330 DC OS demuestra ser una estrategia sostenible, comparable con la implementación realizada en Byerly's, una reconocida cadena de supermercados de lujo en Twin Cities. En este caso, la instalación de 37 túneles solares Serie M74 DS, combinados con iluminación LED, permitió optimizar el consumo energético tanto en horas diurnas como nocturnas. Esto resultó en una reducción significativa de costos a largo plazo, al tiempo que mejoró la experiencia de los clientes mediante la creación de un ambiente más atractivo y funcional. Este enfoque híbrido, que combina luz natural y artificial, resalta la importancia de integrar tecnologías complementarias para maximizar los beneficios.

En el análisis, la instalación de 76 túneles solares en un centro comercial con una superficie de 2,774.12 m<sup>2</sup> presenta resultados comparables al proyecto de Stater Bros. en Chino Hills, California. En este último, la instalación de 164 túneles solares iluminó una superficie de 43,235 pies cuadrados (aproximadamente 4,016 m<sup>2</sup>), reduciendo casi por completo la dependencia de la iluminación artificial durante las horas de luz natural. Este caso demuestra cómo los túneles solares pueden contribuir significativamente a la eficiencia energética en instalaciones comerciales de mayor escala.

Un resultado particularmente relevante es la reducción del 100% del consumo energético relacionado con la iluminación, logrado mediante la instalación de 76 túneles solares modelo 330 DC OS a una altura de 8 metros. Este hallazgo supera los resultados obtenidos en otros proyectos, como el caso de Aqua Lung, donde la instalación de 194 túneles solares modelo 330 DS-0 en un área de 60,000 pies cuadrados permitió una reducción del 33% en el consumo eléctrico. Aunque esta reducción es significativa, la experiencia analizada demuestra que, bajo condiciones óptimas, es posible eliminar por completo los costos de iluminación artificial, lo que subraya el potencial de los túneles solares como una solución energética sostenible.

En el ámbito comercial, se logró un ahorro mensual de \$680.40 mediante el uso exclusivo de túneles solares, eliminando la necesidad de iluminación artificial y optimizando el consumo energético. Estos resultados pueden compararse con el proyecto "De algas a omega" en

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

agricultura interior, donde se instalaron 8 túneles solares modelo 750 DS-O para maximizar la luz natural en tanques de 3,000 galones de profundidad. En dicho proyecto, la integración de iluminación LED específica para el crecimiento de algas permitió una operación modular, escalable, eficiente y de bajo costo. Este caso destaca cómo la combinación de tecnologías puede adaptarse a diferentes sectores, optimizando tanto la producción como el consumo energético.

## 5. CONCLUSIONES

Las mediciones realizadas en el Centro Comercial Santa María evidenciaron diferencias significativas en la calidad de la iluminación en distintas áreas del establecimiento, lo que refleja una alta dependencia de la luz artificial. Esta situación incrementa tanto el consumo energético como el impacto ambiental asociado al funcionamiento del centro comercial.

El análisis técnico sobre la viabilidad de instalar túneles solares en el recinto demostró una mejora considerable en la eficiencia energética. La incorporación de estos sistemas permite un aprovechamiento óptimo de la luz natural, reduciendo significativamente la necesidad de iluminación artificial y los costos asociados a su mantenimiento, estimados en 8609,80 USD anuales. Esto se traduce en una disminución sustancial de las facturas de electricidad, fortaleciendo la sostenibilidad económica del establecimiento.

La adopción de túneles solares representa un avance importante hacia la integración de energías renovables en entornos comerciales. Este sistema no solo optimiza el uso de la energía solar, sino que también contribuye a la reducción de la huella de carbono del centro comercial, en línea con las tendencias globales de sostenibilidad. Además, la implementación de tecnologías basadas en energías renovables mejora la imagen corporativa del establecimiento, reforzando su compromiso con un futuro más sostenible.

La luz natural, además de ser eficiente, desempeña un papel clave en la creación de ambientes comerciales más atractivos y funcionales. Los túneles solares no solo proporcionan iluminación de alta calidad, sino que también mejoran la percepción del espacio por parte de los clientes, generando una experiencia de compra más agradable. Este efecto positivo puede traducirse en un incremento en la afluencia y permanencia de los consumidores, lo que potencialmente favorece el aumento de las ventas y la rentabilidad del centro comercial.

Los túneles solares son una tecnología innovadora que utiliza la luz natural para iluminar espacios interiores, reduciendo el consumo eléctrico y promoviendo la sostenibilidad. No obstante, su implementación implica una inversión inicial considerable, lo que puede limitar su adopción en determinados proyectos. Por esta razón, resulta fundamental llevar a cabo un análisis de costo-beneficio que evalúe si los ahorros energéticos a largo plazo compensan el gasto inicial. En caso de que no sea viable, sería prudente considerar otras alternativas más adecuadas para las necesidades específicas del proyecto.

---

## REFERENCIAS

Alemán, E. I. M. (s. f.). *Cálculo del número de luminarias para un espacio arquitectónico por el*

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolqui.

- método de lúmenes*. Unidades de Apoyo para el Aprendizaje - CUAIEED - UNAM. Recuperado de <https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/099ccabb-1893-46cc-a291-897d9bc59078/contenido/index.html#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20de%20l%C3%BAmenes%20determina,proyecto%20de%20la%20instalaci%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica>
- Cantón Rumiñahui. (s. f.). *Provincia de Pichincha*. Recuperado de <https://pichinchaesturismo.com/es-ec/pichincha/ruminahui/ciudades/canton-ruminahui-agm1uegqq>
- Deloitte. (2019). *Normas Internacionales de Información Financiera - NIIF 2019: Completas*. Recuperado de <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cr/Documents/audit/documentos/niif-2019/NIIF-2019-Completas.pdf>
- Doinglight. (2024, 27 agosto). *El tubo solar de luz natural | Guía práctica de uso y beneficios*. Doinglight España. Recuperado de <https://www.doinglight.es/tubo-solar/>
- Factorenergia, E. T. E. (2023, 18 mayo). *¿Qué es la radiación solar directa e indirecta? Y su importancia en la fotovoltaica*. Recuperado de <https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo-electrico/que-es-la-radiacion-solar-directa-e-indirecta-y-su-importancia-en-la-fotovoltaica/>
- González, J. (2023). *Método del Lumen* [Artículo]. ResearchGate. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/371986125\\_Metodo\\_del\\_Lumen](https://www.researchgate.net/publication/371986125_Metodo_del_Lumen)
- Guerrero, J. (2018). *Estudio de viabilidad de un sistema de energía solar fotovoltaica en el campus de la Universidad Politécnica Salesiana* (Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana). DSpace. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10253/1/UPS-GT001344.pdf>
- Guía Técnica de Iluminación Eficiente para el Sector Retail. (2016, febrero 16). *Issuu*. Recuperado de [https://issuu.com/guias-agencia-ee/docs/guia\\_tecnica\\_de\\_iluminacion\\_e](https://issuu.com/guias-agencia-ee/docs/guia_tecnica_de_iluminacion_e)
- J, H. (2019). *Diez innovaciones de aparcamiento sostenible para un entorno más sostenible*. Intertraffic. Recuperado de <https://www.intertraffic.com/news/parking/ten-sustainable-parking-innovations-for-a-more-sustainable-environment>
- McCasland, M., Stater Bros. Markets, Inc., & Solatube International, Inc. (2007). *Case Study. In Stater Bros*. Recuperado de <https://solatube.com/wp-content/uploads/2019/03/case-study-retail-stater-bros.pdf>
- Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolquí.

- Solargis. (s. f.). *Global Solar Atlas*. The World Bank Group. Recuperado de <https://globalsolaratlas.info/map?s=-0.311736,-78.460922&m=site&c=-0.32929,-78.451338,11>
- Solatube. (2024, 29 marzo). *Sustainability - Solatube*. Recuperado de <https://solatube.com/commercial/sustainability/>
- Solatube International, Inc. (2015). *Byerly's Supermarket Case Study*. Recuperado de <https://solatube.com/wp-content/uploads/2019/03/retail-byerlys-case-study.pdf>
- Solatube International, Inc. (2018). *SIPCO- Jeddah Distribution Center*. In *Solatube M74*. Recuperado de <https://solatube.com/wp-content/uploads/2019/03/Sipco Pepsico Warehouse Jeddah Saudi Arabia1.pdf>
- Solatube International, Inc. (2019). *Aqua Lung Warehouse Case Study*. Recuperado de <https://solatube.com/wp-content/uploads/2019/03/Aqua-Lung-Warehouse-Case-Study.pdf>
- Solatube International, Inc. (2019). *Industrial Case Study: Algae to Omega*. Recuperado de [https://solatube.com/wp-content/uploads/2019/03/case-study-industrial-algae-to-omega\\_1.pdf](https://solatube.com/wp-content/uploads/2019/03/case-study-industrial-algae-to-omega_1.pdf)
- Solatube International, Inc. (2020). *Solatube 330DS: Ficha técnica*. Recuperado de <https://www.solatube.com/330ds-tech-sheet.pdf>
- Túnel-Solar. (s. f.). Recuperado de <https://www.velux.lat/productos/tunel-solar>
- Universidad Técnica del Norte. (s. f.). *UNE 12464: Norma de iluminación en entornos de trabajo*. Recuperado de <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-tecnica-del-norte/seguridad-industrial/03-une-12464-norma/43060881>

Cajilema, M., Tasiguano, D., & Sánchez, O. (2025). Technical feasibility analysis for the implementation of solar tunnels: case of Santa María supermarket in Sangolquí.

# INVESTIGACIÓN

TECNOLÓGICA IST CENTRAL TÉCNICO

**Dirección:**

ISTCT, Av. Isaac Albéniz E4-15 y El Morlán, Sector el Inca  
Quito - Ecuador • Telf.: (593) 2403096  
[www.istct.edu.ec](http://www.istct.edu.ec) • [www.investigacionistct.ec](http://www.investigacionistct.ec) • [investigacion@istct.edu.ec](mailto:investigacion@istct.edu.ec)