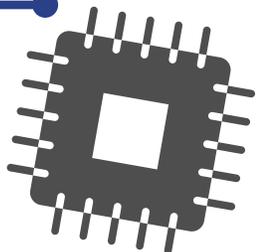
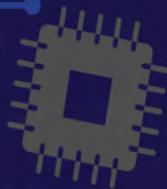


CULCYT



CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA • ISSN 2007-0411

CULCYT



CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA • ISSN 2007-0411



VOLUMEN 22 | NÚMERO 1

ENERO - ABRIL 2025

Dr. Daniel Constandse Cortez
 RECTOR

C. D. Salvador David Nava Martínez
 SECRETARIO GENERAL

Mtra. Guadalupe Gaytán Aguirre
 SECRETARIA ACADÉMICA

Dr. Edwin Adan Martínez Gómez
 DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Mtra. Mayola Renova
 COORDINADORA GENERAL EDITORIAL Y DE PUBLICACIONES

Dra. Nelly Gordillo Castillo
 JEFA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
 ELÉCTRICA Y COMPUTACIÓN DEL IIT

Comité Editorial

Dra. Nelly Gordillo Castillo
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
 Editora en Jefe

Mtro. Raúl Alfredo Meza González
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
 Coordinador Editorial

Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Dra. Klavdia Oleschko Lutkova
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Abdiel Ramírez Reyes
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dra. Santos Adriana Martel Estrada
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Cortés Sáenz
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Ortega Gaucin
 INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

CULCYT se fundó en diciembre de 2003 como parte del programa para la formación de investigadores del Instituto de Ingeniería y Tecnología. Lanzó su primer número en abril de 2004. Fundador: Dr. Victoriano Garza Almanza. A partir de 2019, ha fungido como Editora en Jefe la Dra. Nelly Gordillo Castillo.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
 DE CIUDAD JUÁREZ

CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Vol. 22, núm. 1, enero-abril 2025, es una publicación académica, editada de manera cuatrimestral por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología.

D.R. © UACJ, Avenida del Charro núm. 619 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Editora responsable: Dra. Nelly Gordillo Castillo.

Reserva de derechos al uso exclusivo núm. 04-2022-101711332100-102.

ISSN (electrónico): 2007-0411.

Sitio OJS: erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt. Correo electrónico: culcyt@uacj.mx. Teléfono +52 (656) 6884848.

DOI: [10.20983/culcyt.2025.1](https://doi.org/10.20983/culcyt.2025.1)

Modalidad de publicación continua. Tan pronto como un artículo ha sido preparado, se publica en línea.

Los trabajos a publicar en CULCYT deben ser originales e inéditos. En este momento, la revista no tiene costos de publicación para los autores.

El acceso a la revista es libre, sin requerimientos, bajo lo establecido en la normatividad mexicana de acceso abierto, y se da a través de su sitio

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt>

o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ

<http://ri.uacj.mx/vufind/>



Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite la fuente.

Información para autores:

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/autores>

Los contenidos e imágenes de la publicación están sujetos a una licencia CC 4.0 internacional BY NC.





ENFOQUE Y ALCANCE

La revista CULCYT Cultura Científica y Tecnológica es una publicación electrónica orientada a la discusión académica y científica, que busca fomentar la interacción entre los miembros de la comunidad mexicana e internacional, cuyas líneas de investigación están alineadas a la ingeniería y a la innovación tecnológica, así como a sus interrelaciones con otros campos de la ciencia y la dimensión deontológica que les es pertinente.

La revista CULCYT solo aceptará publicar aquellos trabajos cuyos resultados contribuyan al estado del

arte del campo de estudio. No deben arrojar conclusiones ya aceptadas por la comunidad científica, por lo que debe ser un trabajo de innovación, original y que aporte conocimientos nuevos a la comunidad científica internacional.

CULCYT acepta artículos de investigación, artículos de revisión, notas de información técnica y trabajos de excelencia que hayan sido galardonados con premios en congresos nacionales o internacionales.

EVALUACIÓN POR PARES

CULCYT es una revista con revisión por pares doble ciega, que es una política para asegurar la excelencia de las investigaciones publicadas y es considerada como uno de los elementos más importantes y críticos para la publicación científica.

Un artículo se envía a por lo menos tres revisores seleccionados de un padrón nacional e internacional, que son expertos en el campo de cada artículo.

Cada ronda de revisión de un artículo debe tardar hasta tres semanas, salvo que ocurran imponderables que alarguen este plazo. CULCYT envía una solicitud al revisor seleccionado y este debe responder si acepta, en un plazo no mayor a tres días naturales. Si la respuesta

es positiva, él descarga el manuscrito e inicia la evaluación y si es negativa, se invita a otro experto.

Al terminar, el evaluador llena un formulario de revisión en línea y/o carta el manuscrito del autor con comentarios en el sitio de la revista.

En caso de que haya controversia por las recomendaciones de los revisores, el/la editor/a en jefe será quien emita el veredicto para el artículo. Si lo considera necesario, puede solicitar la opinión de uno o más miembros del comité editorial de la revista para tomar la decisión. Al autor se le notificará la decisión editorial derivada de la controversia, junto con los argumentos que la respaldan.

POLÍTICA DE ACCESO ABIERTO

Esta revista proporciona un acceso abierto inmediato a su contenido, basado en el principio de que ofrecer al público un acceso libre a las investigaciones ayuda a un mayor intercambio global de conocimiento.

CULCYT no retribuye económicamente a los/las autores/as por sus escritos.

El acceso a la revista CULCYT Cultura Científica y Tecnológica es libre, sin requerimientos, bajo lo establecido en la normatividad mexicana de acceso abierto. El contenido de los artículos, así como las imágenes,

son responsabilidad exclusiva de los autores. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Actualmente, CULCYT no efectúa cargos por procesamiento de artículos (APC, por sus siglas en inglés) ni tampoco retribuye económicamente a los autores.

Se autoriza la reproducción parcial o total de cualquier artículo siempre y cuando se haga referencia bibliográfica a la revista CULCYT y se envíe una copia al correo electrónico culcyt@uacj.mx

Contenido
Contents

Artículos de investigación
Research articles

- Mechatronic Rehabilitation System for Upper Limbs** **5**
Sistema mecatrónico de rehabilitación para extremidades superiores
Andrés Blanco Ortega, Carlos Manuel Lara Barrios, Milton Uriel Vargas Ortiz, Andrea Magadán Salazar, Manuel de Jesús Palacios Gallegos, Jonathan Villanueva Tavira
- Diagrama de Ishikawa y las 3 Mu como herramientas para el diagnóstico de la productividad** **13**
Ishikawa diagram and the 3 Mu as tools for productivity
Liliana Reyes Juárez, Gibrán Rivera González, Luis Canek Ángeles Tovar, Lourdes Canós-Darós, Fernando Castelló-Sirvent
- Análisis logístico en última milla del comercio minorista en el centro histórico de Popayán, Colombia** **28**
Last-mile logistics analysis of retail trade in the historic center of Popayán, Colombia
Nelson Emilio Paz Ruiz, Juan Sebastian Garcia Pajoy, Anyi Daniela Hernández Ordoñez, Zuly Alexandra Gómez Camayo, Mario Chong Chong
- Optimización del proceso de distribución de negocios en el emporio comercial de Gamarra** **35**
Optimization of the distribution process of business in the Gamarra comercial emporium
Carlos Adrián Ubillús Lazóriga, Angie Shusey Pantigoso Nicho, Liz Stephanie Rodríguez Bojórquez, Aldino Ronaldo Santiago Maldonado, Samir William Mantari Salazar
- Aplicando KMoS-SSA como estrategia de gestión del conocimiento y enfoque sistémico para la conceptualización de soluciones** **45**
Applying KMoS-SSA as a knowledge management strategy and systemic approach for conceptualizing solutions
Lic. Omar Humberto Wong Nogueira, Ing. Edgar Montoya Vergara, Dra. Karla Miroslava Olmos Sánchez, Dr. Jorge Enrique Rodas Osollo, Mtro. David García Chaparro
- Diseño y estudio de un aerogenerador de 1 kW para uso doméstico** **61**
Engineering and analysis of a 1 kW domestic wind turbine
Diego Moisés Almazo Pérez, Néstor D. Galán H., Carlos Alberto Gómez Álvarez, Eber E. Orozco G.
- Identificadores algebraicos para un sistema de suspensión pasivo basado en inersor** **69**
Algebraic identifiers for an inerter-based passive suspension system
Edrei Yael Santos García, Eduardo Barredo Hernández, José Gabriel Mendoza Larios, Jesús Francisco Canseco Díaz
-

Mechatronic Rehabilitation System for Upper Limbs

Sistema mecatrónico de rehabilitación para extremidades superiores

Andrés Blanco Ortega^{1a}  , Carlos Manuel Lara Barrios^{1a} , Milton Uriel Vargas Ortiz^{1a}, Andrea Magadán Salazar^{1b} , Manuel de Jesús Palacios Gallegos² , Jonathan Villanueva Tavira² 

¹Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, ^{1a}Departamento de Ingeniería Mecánica, ^{1b}Departamento de Computación, Cuernavaca, Morelos, México

²Universidad Politécnica de Chiapas, Ingeniería en Energía y Maestría en Energías Renovables, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

ABSTRACT

Currently there is great interest in the development of machines that meet the demand to rehabilitate the upper and lower extremities, due to injuries caused by strokes, traumatic incidents or accidents, neuromuscular diseases, which are increasing day by day. The objective of this work is to present the kinematic analysis of an upper limb rehabilitation machine for patients who suffered a stroke. The rehabilitation machine has 3 degrees of freedom (DOF), uses a flexible cable, and can provide shoulder movements: flexion-extension, external rotation, abduction; and elbow flexion movements, among others. The kinematic analysis of some basic movements is presented by means of vector loop analysis. In addition, the simulation results in the MSC Adams environment show that the rehabilitation machine can provide smooth passive rehabilitation movements.

KEYWORDS: continuous passive motion; rehabilitation robot; rehabilitation robotics; upper limb rehabilitation machine.

RESUMEN

Actualmente existe un gran interés en el desarrollo de máquinas que atiendan la demanda para rehabilitar las extremidades superiores e inferiores, debido a lesiones provocadas por enfermedad vascular cerebral, accidentes traumáticos, enfermedades neuromusculares, que día a día van en aumento. El objetivo de este trabajo es presentar el análisis cinemático de una máquina de rehabilitación de miembros superiores para pacientes que han sufrido una enfermedad vascular cerebral. La máquina de rehabilitación es de tres grados de libertad (GDL), utiliza un cable flexible y puede proporcionar movimientos del hombro de: flexión-extensión, rotación externa y abducción; y movimiento de flexión del codo, entre otros. Se presenta el análisis cinemático de algunos movimientos básicos que puede proporcionar esta máquina mediante el análisis de un lazo vectorial. Además, los resultados de la simulación en el entorno de MSC Adams muestran que la máquina de rehabilitación puede proporcionar movimientos de rehabilitación pasivos suaves.

PALABRAS CLAVE: movimiento pasivo continuo; rehabilitador de extremidades superiores; robot rehabilitador; robótica de rehabilitación.

Corresponding author:

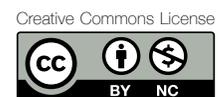
NAME: Andrés Blanco Ortega

INSTITUTION: Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)

ADDRESS: Interior Internado Palmira s/n, col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México

E-MAIL: andres.bo@cenidet.tecnm.mx

Received: 9 August 2024. Accepted: 13 January 2025. Published: 27 January 2025.



ISSN (electronic) 2007-0411

I. INTRODUCTION

A cerebrovascular accident (CVA) is typically caused by a hemorrhage or blockage in the blood vessels of the brain, which damages the brain cells, even causing death. The number of disabled people due to a stroke is increasing day by day, it is expected that it will continue to increase at an alarming rate in the United States and several countries around the world [1], [2]. A patient who suffered a stroke generally has loss of movement in the middle of the body, paralysis, or hemiplegia, requiring immediate rehabilitation to recover part of the mobility in the extremities. In addition, human beings are prone to traumatic incidents which cause injuries to the lower and upper extremities, which also require rehabilitation therapy during their recovery process.

Rehabilitation in patients in upper or lower extremities needs repetitive and progressive training exercises. To improve the effectiveness of rehabilitation, the use of robotic devices or machines is recommended. Since the early 1990s and up to the present, researchers and some companies have proposed and developed various assistance and rehabilitation devices to address this problem. Mechatronics in upper and lower extremities rehabilitation is a relatively new research field. Rehabilitation machines are tools for rehabilitation purposes that allow patients to perform basic and combined movements as part of their rehabilitation program.

The objective of rehabilitation is to recover the motion abilities, missed in a traumatic incident, through physical therapy as quick as possible. The constant increase in patients with injuries and the lack of physical therapists to provide proper care have led to the rise of robotic systems and rehabilitation machines. These mechanical devices do not replace the physical therapist but serve as support during the therapy process. In the last two decades, a large number of robots for upper extremity rehabilitation have been proposed. However, most of these robots are made up of rigid links and, mostly, of complex mechanisms such as those shown in [1]-[4].

On the other hand, rehabilitation machines using flexible cables have also been proposed [5]-[9]. The use of cable-actuated machines presents certain advantages such as: 1) it provides a greater number of movements, 2) it requires low power actuators in comparison with machines that use rigid links, 3) they are lighter, so they have low inertia and 4) they turn out to be cheaper machines.

Huang *et al.* [5] developed a gravity-compensated control strategy for an upper extremity cable-driven rehabilitation robot, which is capable of estimating gravity torque in real time with position feedback. They carried out tests with seven healthy subjects, assigning them movement tasks in four different directions (up, down, left, and right), in a 3D vector space, tracking human-machine interaction movements, see Figure 1. In [6] it was implemented a sliding mode control with a nonlinear disturbance observer, designed for the robot to solve the problem of unpredictable disturbances during robot-assisted training.

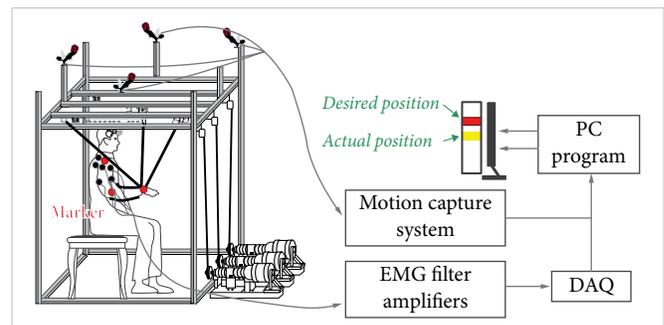


Figure 1. Upper extremity cable-driven rehabilitation robot [5].

Beer *et al.* [7] propose an arm rehabilitation machine with a multi-axis Cartesian system (MACARM), see Figure 2. This machine has a large workspace and was evaluated with a load of 4.5 kg, which represents the weight of the patient's arm. It has 6 DOF and has 8 engines.

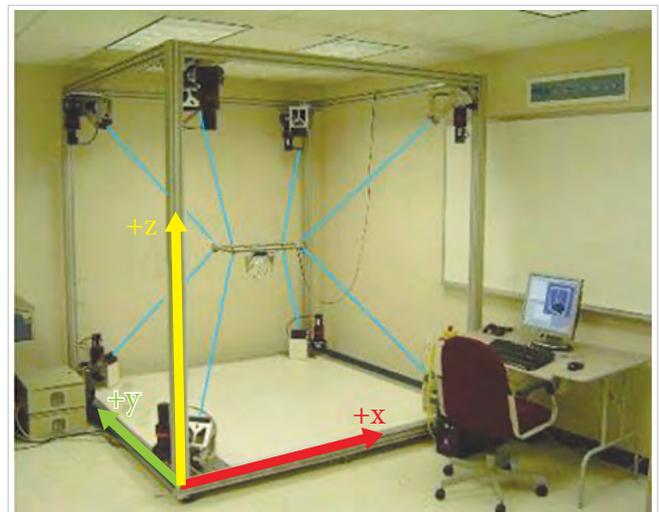


Figure 2. MACARM cable robot for upper limb neurorehabilitation [7].

VA 3-DOF cable-driven upper limb rehabilitation robot (CDULRR) is reported in [8]. The controller includes

three modes of operation: resistive, assistive, and restraint. The robot features a fuzzy logic tuner in assistive mode to adaptively and dynamically modify the level of robotic assistance; to avoid patient dependency on robotic support. Another parallel cable-driven upper limb rehabilitation robot (PCUR) was reported in [9]. The static stiffness of the PCUR is related to cable tension, cable arrangement, and cable stiffness. The PCUR consists of seven cable-driven units to move a movable platform to propel the affected limb to perform rehabilitation actions.

In [10] a portable 3 DOF cable-driven upper extremity rehabilitation robot based on a 3D printing framework is proposed. The robot provides an active/passive training model in certain shoulder movements, namely, abduction/adduction, and flexion/extension, see Figure 3. Another cable-actuated exoskeleton with variable stiffness for upper limb rehabilitation is presented in [11]. The adjustable stiffness of the cable-actuated exoskeleton is achieved by cable tension.

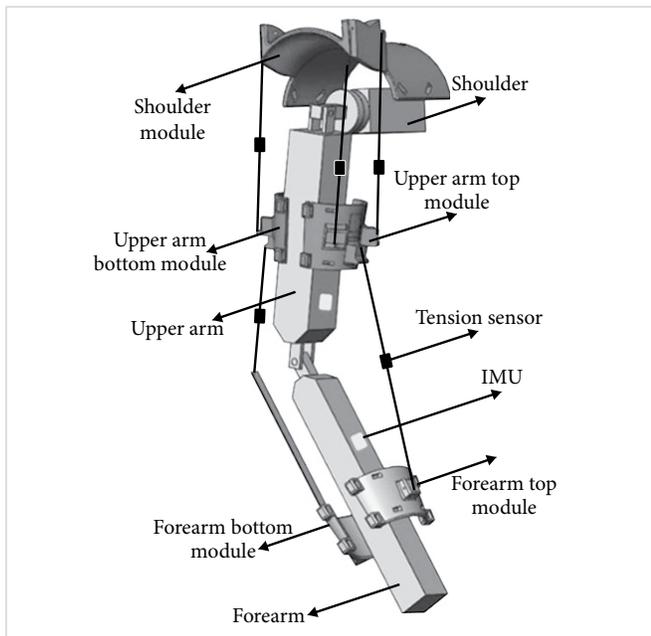


Figure 3. Portable 3-DOF cable-driven upper extremity rehabilitation robot [10].

In this paper, the design of a robot for the rehabilitation of upper limbs with a flexible cable of 3 DOF is presented. The machine provides the necessary movements to carry out the rehabilitation of an upper extremity. For the shoulder, these motions are: flexion, extension, abduction, adduction, internal rotation, external rotation and circumduction; for the elbow, the machine provides flexion. Table 1 shows the maximum values for

the movements of the shoulder [12] and elbow [13], as per Figures 4 and 5, respectively.

TABLE 1
MAXIMUM VALUES FOR SHOULDER AND ELBOW MOVEMENTS

MOVEMENT TYPE	MAXIMUM VALUE
Shoulder	
Flexion	180°
Extension	50°
Adduction	48°
Abduction	134°
Internal rotation	34°
External rotation	142°
Circumduction	360°
Elbow	
Flexion	140-150°
Extension	2-10°
Supination	90°
Pronation	80-85°

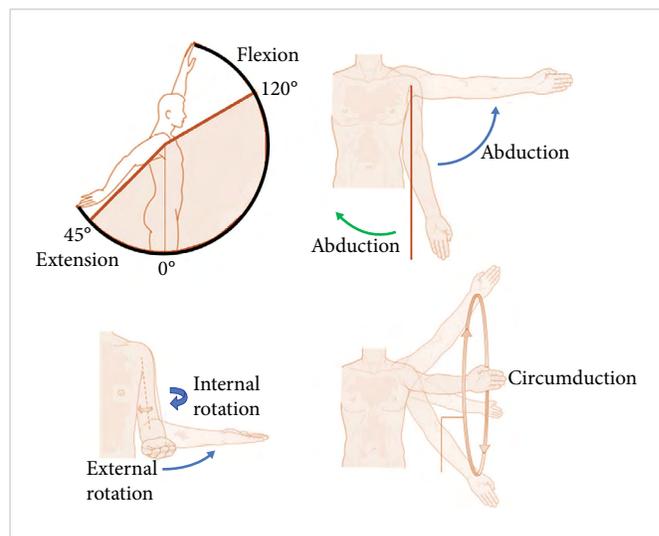


Figure 4. Basic shoulder movements.

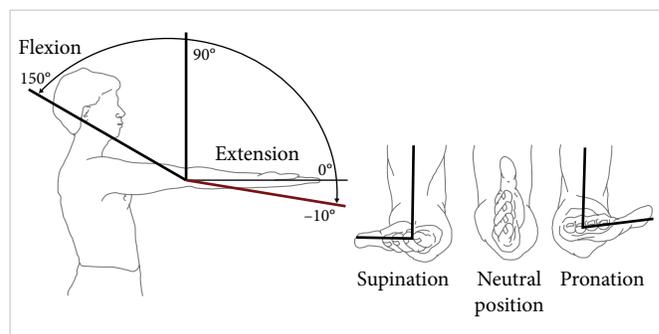


Figure 5. Basic elbow movements.

II. METHODOLOGY

A. DESCRIPTION SYSTEM

Figure 6 shows the proposed upper limb rehabilitation machine that uses linear systems and a cable-pulley system. The system has 3 DOF, with two linear guides for movements located in the X and Y axes. The movement in the Z axis is obtained through the cable-pulley system. This end-effector machine has the advantage of easy operation, wide range of motion, and can be used to rehabilitate both upper limbs, adjustable for different patients (adolescents and adults). For user safety, the physical prototype will have limit switches, as well as an automatic stop control that will be directly operated by the user.

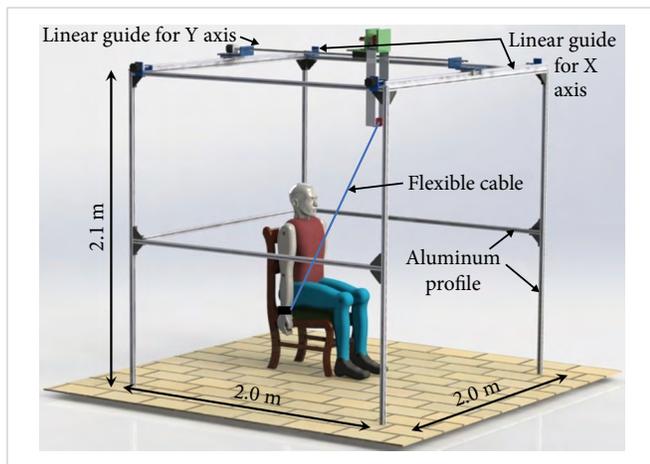


Figure 6. Upper limb rehabilitation machine.

B. ANALYSIS OF REHABILITATION MOVEMENTS

These movements are simple or basic, in other words, it is a pure movement of a joint. However, the rehabilitation system can provide combined movements. Next, the kinematic analysis is presented for some rehabilitation movements that can be performed on this machine. In all analyses, the vector R_1 represents the variable cable length that changes as the movement is performed, R_3 represents a constant vector, from a user's joint (e.g., elbow, wrist, or shoulder) to the fixed point of the machine's pulley, and R_2 represents the user's limb (forearm - 23 cm, or entire limb - 48 cm), see Figures 6 and 7.

Elbow flexion movement

Elbow flexion is considered a pure movement. For the loop closure equation, the vector loop shown in Figure 7 is considered.

DOI: 10.20983/culcyt.2025.1.2.1

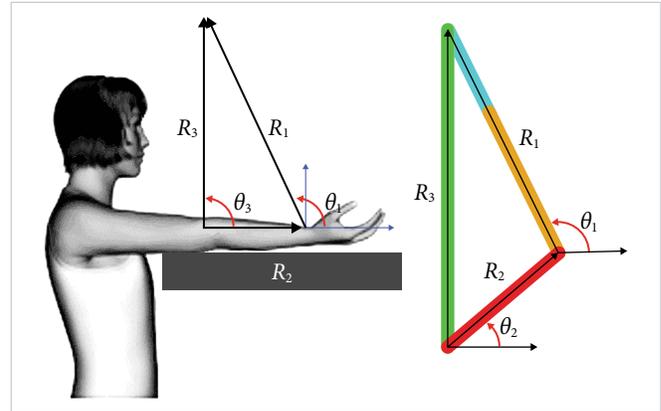


Figure 7. Loop closure equation for elbow flexion movement.

Considering Figure 7, the following vector loop equation of the three-bar mechanism is used, given by

$$R_1 + R_2 = R_3 \quad (1)$$

In complex form:

$$r_1 e^{i\theta_1} + r_2 e^{i\theta_2} = r_3 e^{i\theta_3} \quad (2)$$

From Figure 7, the known data are the magnitude of all the links: r_3 is the length from the elbow joint to the rehabilitator pulley, it will always remain constant, r_2 is the length of the forearm and r_1 is the known length of the cable where its magnitude varies depending on the position on the limb in the rehabilitation exercise. The angle $\theta_3 = 90^\circ$ (constant), leaving θ_1 and θ_2 , corresponding to the angles of the cable and the elbow, to be determined. Figure 8 shows elbow flexion angle φ , considering the reference shown in Figure 5.

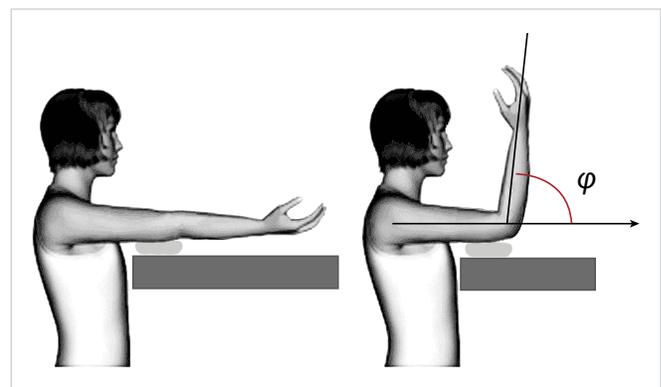


Figure 8. Arm position in elbow flexion movement.

Using Euler's formula, $re^{i\theta} = r\cos\theta + jr\sin\theta$, and considering the known data and after algebraic manipulation, we have to:

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(-\frac{r_2}{r_1}\cos\theta_2\right) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{r_3^2 + r_2^2 - r_1^2}{2r_2r_3}\right)$$

To obtain the velocities, we derive (2) and by changing the variables $\dot{\theta}_1 = \omega_1$ and $\dot{\theta}_2 = \omega_2$ we have:

$$r_1e^{j\theta_1}(j\omega_1) + \dot{r}_1e^{j\theta_1} + r_2e^{j\theta_2}(j\omega_2) = 0 \quad (4)$$

Using Euler's formula, considering the known data and after algebraic manipulation, we obtain:

$$\omega_1 = \frac{-\dot{r}_1\sin\theta_1 + r_2\omega_2\cos\theta_2}{r_1\cos\theta_1} \quad (5)$$

$$\omega_2 = \frac{-\dot{r}_1(\sin\theta_1\tan\theta_1 + \cos\theta_1)}{r_2(\cos\theta_2\tan\theta_1 - \sin\theta_2)}$$

Similarly, (4) is derived to obtain the acceleration analysis ($\dot{\gamma}_1 = \ddot{\theta}_1$ y $\dot{\gamma}_2 = \ddot{\theta}_2$). Therefore, we obtain:

$$\gamma_1 = \frac{-2\dot{r}_1\omega_1\cos\theta_1 + r_1\omega_1^2\sin\theta_1 + x_2 - x_1\cot\theta_2}{r_1(\cos\theta_1 - \sin\theta_1\cot\theta_2)} \quad (6)$$

$$\gamma_2 = \frac{-2\dot{r}_1\omega_1\sin\theta_1 - r_1\gamma_1\sin\theta_1 + x_3}{r_2\sin\theta_2}$$

where

$$x_1 = -2\dot{r}_1\omega_1\sin\theta_1 - r_1\omega_1^2\cos\theta_1 + \ddot{r}_1\cos\theta_1 - r_2\omega_2^2\cos\theta_2$$

$$x_2 = -\ddot{r}_1\sin\theta_1 + r_2\omega_2^2\sin\theta_2$$

$$x_3 = -r_1\omega_1^2\cos\theta_1 + \ddot{r}_1\cos\theta_1 - r_2\omega_2^2\cos\theta_2$$

Elbow external rotation movement

The elbow external rotation vector loop equation is obtained from Figure 9. Where R_2 is the vector that represents the forearm, R_3 is the reference vector and R_1 is the vector that represents the cable.

$$R_1 + R_2 = R_3 \quad (7)$$

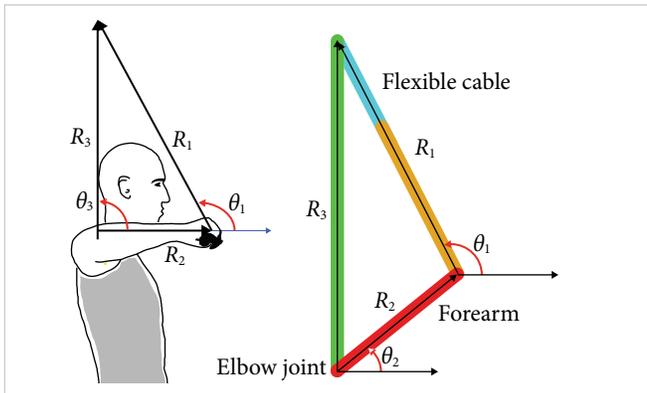


Figure 9. Loop closure equation for Elbow external rotation movement.

From Figure 9, the known data are the magnitude of all the links (r_1 is the known length of the cable where its magnitude varies depending on the position on the limb in the rehabilitation exercise) and θ_3 is constant, leaving θ_1 and θ_2 , corresponding to the angles of the cable and the elbow, to be determined. Therefore, the answer is the same as for the elbow flexion movement (3), (5) and (6).

Shoulder extension movement

The shoulder extension vector loop equation is obtained from Figure 10.

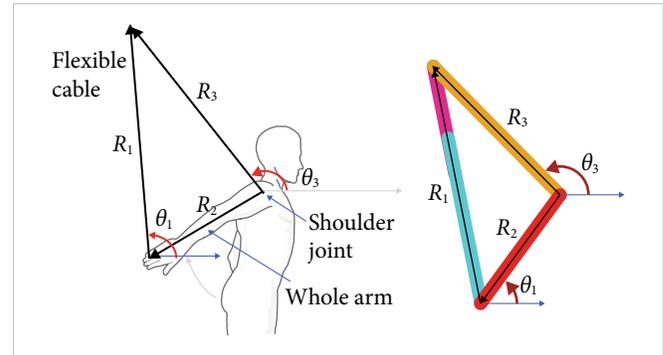


Figure 10. Loop closure equation for shoulder extension movement.

In a similar way, the relations of position, velocity and acceleration are obtained.

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{r_3\cos\theta_3 - r_1\cos\theta_1}{r_2}\right) \quad (8)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{r_2^2 - r_1^2 - r_3^2}{2r_1r_3}\right) + \theta_3$$

$$\omega_1 = \frac{-\dot{r}_1\sin\theta_1 + r_2\omega_2\cos\theta_2}{r_1\cos\theta_1} \quad (9)$$

$$\omega_2 = \frac{-\dot{r}_1(\cos\theta_1 + \sin\theta_1\tan\theta_1)}{r_2(\cos\theta_2\tan\theta_1 - \sin\theta_2)}$$

$$\gamma_1 = \frac{-2\dot{r}_1\omega_1\cos\theta_1 + r_1\omega_1^2\sin\theta_1 + x_5 - x_4\cot\theta_2}{r_1(\cos\theta_1 - \sin\theta_1\cot\theta_2)} \quad (10)$$

$$\gamma_2 = \frac{-2\dot{r}_1\omega_1\sin\theta_1 - r_1\gamma_1\sin\theta_1 + x_6}{r_2\sin\theta_2}$$

where

$$x_4 = -2\dot{r}_1\omega_1\sin\theta_1 - r_1\omega_1^2\cos\theta_1 + \ddot{r}_1\cos\theta_1 - r_2\omega_2^2\cos\theta_2$$

$$x_5 = -\ddot{r}_1\sin\theta_1 + r_2\omega_2^2\sin\theta_2$$

$$x_6 = -r_1\omega_1^2\cos\theta_1 + \ddot{r}_1\cos\theta_1 - r_2\omega_2^2\cos\theta_2$$

Shoulder abduction movement

Next, the equations of the kinematics of the vector loop for a shoulder abduction movement (see Figure 11) are presented.

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{r_3 \cos \theta_3 + r_2 \cos \theta_2}{r_1}\right) \quad (11)$$

$$\theta_2 = \theta_3 + \cos^{-1}\left(\frac{r_2^2 + r_3^2 - r_1^2}{2r_2 r_3}\right)$$

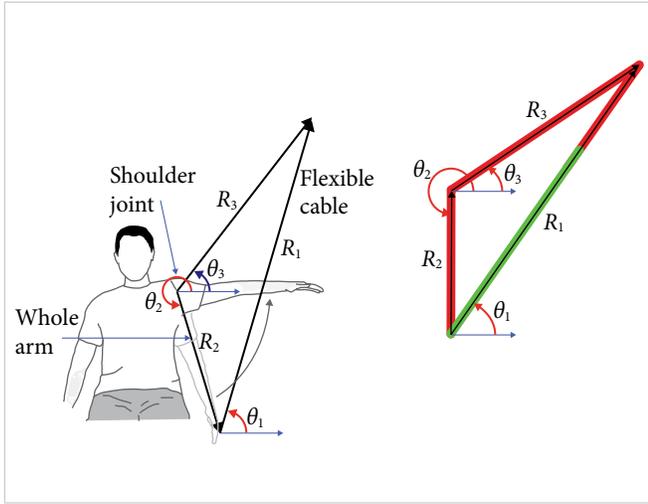


Figure 11. Loop closure equation for Elbow external rotation movement.

$$\omega_1 = \frac{-\dot{r}_1(\cos \theta_1 + \sin \theta_1 \tan \theta_2)}{r_2(\cos \theta_1 \tan \theta_2 - \sin \theta_1)} \quad (12)$$

$$\omega_2 = \frac{-(\dot{r}_1 \sin \theta_1 + r_1 \omega_1 \cos \theta_1)}{r_2 \cos \theta_2}$$

$$\gamma_1 = \frac{-2\dot{r}_1 \omega_1 \sin \theta_1 + r_1 \omega_1^2 \cos \theta_1 + x_7 + x_8 \tan \theta_2}{r_1(\cos \theta_1 \tan \theta_2 - \sin \theta_1)} \quad (13)$$

$$\gamma_2 = \frac{-2\dot{r}_1 \omega_1 \cos \theta_1 - r_1 \gamma_1 \cos \theta_1 + x_9}{r_2 \cos \theta_2}$$

where

$$x_7 = -\dot{r}_1 \cos \theta_1 + r_2 \omega_2^2 \cos \theta_2$$

$$x_8 = -2\omega_1 \dot{r}_1 \cos \theta_1 + r_2 \omega_1^2 \sin \theta_1 - \dot{r}_1 \sin \theta_1 + r_2 \omega_2^2 \sin \theta_2$$

$$x_9 = r_1 \omega_1^2 \sin \theta_1 - \dot{r}_1 \sin \theta_1 + r_2 \omega_2^2 \sin \theta_2$$

III. RESULTS AND DISCUSSION

Some simulations were performed in MSC ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) software to verify the kinematics equations. In these simulations, Figure 12 to Figure 14, the rigid links, including the cable, were considered so that, in future work, they could be compared with the tests on

the physical prototype and determine the error in the movement trajectories due to the use of the flexible cable.

For the elbow flexion movement, see Figure 12, a function was used to move the cable, defined by (14), and for the shoulder extension movement, the function (15).

$$u_1(t) = 27 \sin\left(\frac{t}{5}\right) \text{ [cm]} \quad (14)$$

$$u_2(t) = 24 \sin\left(\frac{57t}{200}\right) \text{ [cm]} \quad (15)$$

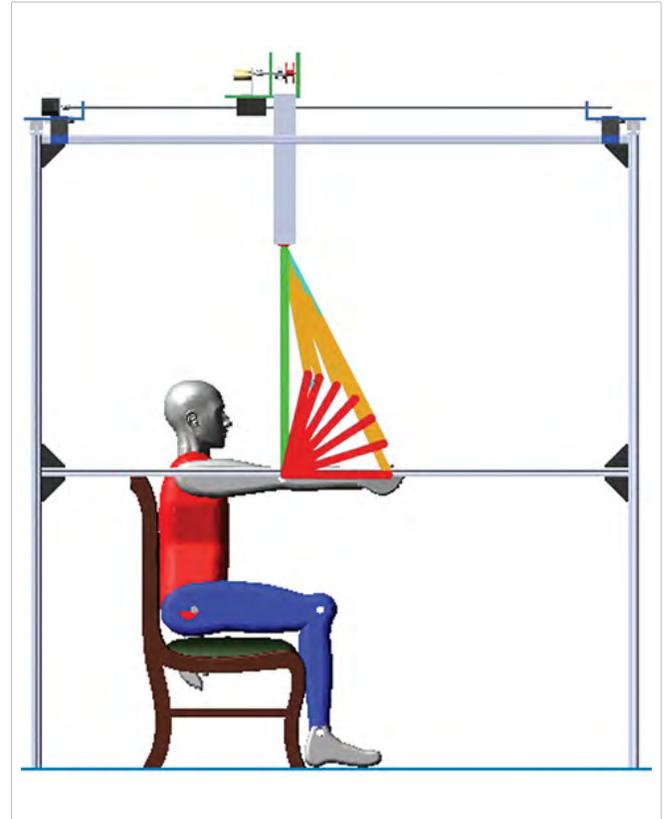


Figure 12. Elbow flexion simulation response in MSC Adams.

Figure 13 shows the response for the elbow flexion movement (θ_2). It starts at the angular position of 0° and goes to a value of 80° , in a time of 7.8 s. The responses of displacement, velocity and angular acceleration are smooth trajectories, without abrupt changes.'

Similarly, for the shoulder extension movement, Figure 14, it starts at an angle of 270° and goes to a value of 230° , in a time of approximately 5.2 s. The displacement, velocity and angular acceleration curves also present smooth behavior.

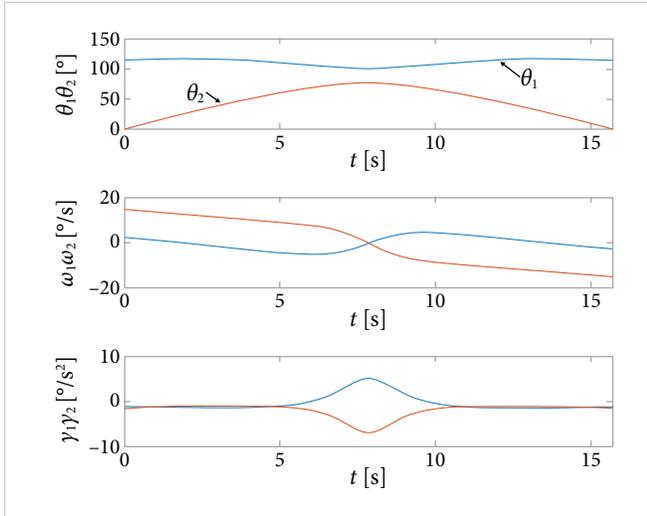


Figure 13. Elbow flexion movement response.

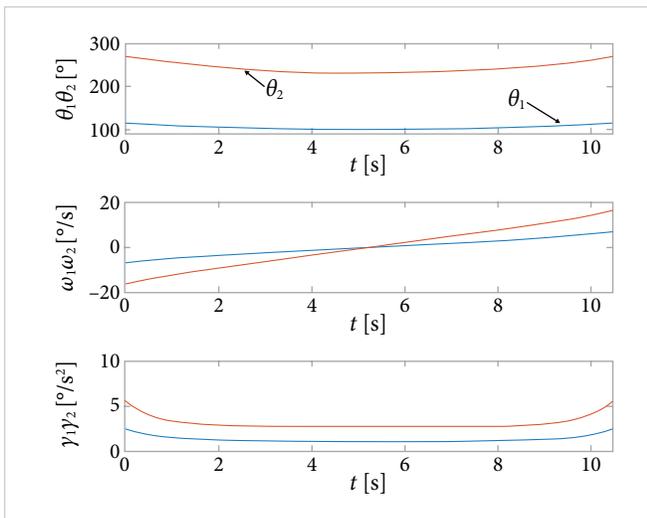


Figure 14. Shoulder extension movement response.

This machine is designed to provide rehabilitation to patients who have suffered a stroke in its early stages, when they have lost mobility in an upper limb but do not have much stiffness in the joints.

The difference between this machine and those reported in the literature is that it contains only 3 actuators, when the others contain more than 7 actuators [7], [9]. This is also reflected in the fact that the kinematic analysis is less complex, since other machines when they use more than 3 cables [5]-[9] become a parallel system, which increases the complexity of the kinematic analysis. Also, another advantage is that being a crane-type system, a greater range of movement is achieved, allowing users with different limb lengths to perform rehabilitation exercises.

IV. CONCLUSIONS

This article proposes a 3 DOF upper extremity rehabilitation machine using a flexible cable. The machine configuration allows providing basic and combined movements, such as shoulder movements of flexion-extension, abduction-adduction, and internal-external rotation, as well as elbow flexion movements.

This article reports the kinematics for some movements and some simulation results for elbow flexion and shoulder extension movements. The results show that with this machine various rehabilitation exercises for upper extremities can be provided with smooth movements.

REFERENCES

- [1] N. Rehmat, J. Zuo, W. Meng, Q. Liu, S. Q. Xie and H. Liang, "Upper limb rehabilitation using robotic exoskeleton systems: a systematic review," *Int J Intell Robot Appl*, vol. 2, pp. 283–295. 2018, doi: [10.1007/s41315-018-0064-8](https://doi.org/10.1007/s41315-018-0064-8).
- [2] H. Shing Lo and S. Quan Xie, "Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects," *Med. Eng. Phys.*, vol. 34, no. 3, pp. 261–268, 2012, doi: [10.1016/j.medengphy.2011.10.004](https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2011.10.004).
- [3] A. S. Niyetkaliyev, S. Hussain, M. H. Ghayesh and G. Alici, "Review on Design and Control Aspects of Robotic Shoulder Rehabilitation Orthoses," in *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 47, no. 6, pp. 1134–1145, Dec. 2017, doi: [10.1109/THMS.2017.2700634](https://doi.org/10.1109/THMS.2017.2700634).
- [4] R. A. R. C. Gopura, K. Kiguchi and D. S. V. Bandara, "A brief review on upper extremity robotic exoskeleton systems," *2011 6th International Conference on Industrial and Information Systems*, Kandy, Sri Lanka, pp. 346–351, 2011, doi: [10.1109/ICIINFS.2011.6038092](https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2011.6038092).
- [5] Y. Huang, Q. Yang, Y. Chen and R. Song, "Assessment of Motor Control during Three-Dimensional Movements Tracking with Position-Varying Gravity Compensation," *Front. Neurosci.*, vol. 11, 2017, doi: [10.3389/fnins.2017.00253](https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00253).
- [6] J. Niu, Q. Yang, X. Wang and R. Song, "Sliding Mode Tracking Control of a Wire-Driven Upper-Limb Rehabilitation Robot with Nonlinear Disturbance

- Observer,” *Front Neurol.*, vol. 8, 2017, doi: [10.3389/fneur.2017.00646](https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00646).
- [7] R. Beer, D. Mayhew, C. Bredfeldt and B. Bachrach, “Technical evaluation of the MACARM: A cable robot for upper limb neurorehabilitation,” *2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, Scottsdale, AZ, USA, pp. 942–947, 2008, doi: [10.1109/BIOROB.2008.4762880](https://doi.org/10.1109/BIOROB.2008.4762880).
- [8] X. Li, Q. Yang and R. Song, “Performance-Based Hybrid Control of a Cable-Driven Upper-Limb Rehabilitation Robot,” in *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 68, no. 4, pp. 1351–1359, April 2021, doi: [10.1109/TBME.2020.3027823](https://doi.org/10.1109/TBME.2020.3027823).
- [9] Y. Zou, X. Wu, B. Zhang, Q. Zhang, A. Zhang and T. Qin. “Stiffness Analysis of Parallel Cable-Driven Upper Limb Rehabilitation Robot,” *Micromachines*, vol. 13, no. 2, 2022, doi: [10.3390/mi13020253](https://doi.org/10.3390/mi13020253).
- [10] K. Shi, A. Song, Y. Li and C. Wu, “Cable-driven Wearable Upper Limb Rehabilitation Robot,” *2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 2434–2438, 2018, doi: [10.1109/ROBIO.2018.8665179](https://doi.org/10.1109/ROBIO.2018.8665179).
- [11] Z. Li et al., “Mechatronics design and testing of a cable-driven upper limb rehabilitation exoskeleton with variable stiffness,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 92, no. 2, 024101, February 2021, doi: [10.1063/5.0037317](https://doi.org/10.1063/5.0037317).
- [12] A. Magadán, A. Blanco, José A. Santana, F. A. Gómez and E. Antúnez, “Diseño y control de un rehabilitador de hombro,” *Pistas Educativas*, no. 130, pp. 1764–1778, November 2018.
- [13] M. T. Angulo, A. Álvarez and Y. Fuentes, “Biomecánica Clínica. Biomecánica de la Extremidad Superior. Exploración del Codo,” *REDUCA*, vol. 3, no. 4, pp. 82–103, 2011.

Diagrama de Ishikawa y las 3 Mu como herramientas para el diagnóstico de la productividad

Ishikawa diagram and the 3 Mu as tools for productivity

Liliana Reyes Juárez¹ , Gibrán Rivera González¹ , Luis Canek Ángeles Tovar¹  ✉ , Lourdes Canós-Darós² ,
Fernando Castelló-Sirvent² 

¹Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

²Departamento de Organización de Empresas, Universitat Politècnica de València, Valencia, España

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo identificar los factores que afectan la productividad de una empresa de plásticos en México, respondiendo a la pregunta: ¿cuáles son los factores que disminuyen la productividad del área de revisión y ajuste en una empresa de plásticos? Para lograrlo, se utilizó una metodología de estudio de casos, apoyado en la recolección de datos cuantitativos y cualitativos con base en entrevistas, observaciones, revisión de documentos y estadísticas de la compañía. Se encontró que los problemas causantes de la baja productividad en la empresa se encuentran dentro de seis factores: material, mano de obra, método, medio ambiente, medición, maquinaria y equipo. La principal limitante reside en ser una investigación enfocada en una sola empresa, pero al mismo tiempo esto otorga un mayor valor a la indagación al contribuir con conocimientos respecto a la utilidad que ofrece la combinación de las herramientas de las 3 Mu y el diagrama de Ishikawa, empleados para hacer un diagnóstico de la productividad. Se concluye que la investigación representa una contribución importante sobre el uso de herramientas de la ingeniería industrial para estudiar la productividad, gracias a su enfoque sistemático, análisis riguroso y diagnóstico detallado.

PALABRAS CLAVE: diagrama de Ishikawa; las 3 Mu; empresas de plásticos; administración industrial; productividad.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to identify the factors that affect the productivity of a plastics company in Mexico, answering the question: What are the factors that decrease the productivity of the review and adjustment area in a plastics company? To achieve this, a case study methodology was used, supported by the collection of quantitative and qualitative data based on interviews, observations, document review and company statistics. It was found that the problems causing low productivity in the company are found within six factors: material, labor, method, environment, measurement, machinery, and equipment. The main limitation is that it is research focused on a single company, but at the same time this gives greater value to the investigation by contributing knowledge regarding the usefulness offered by the combination of the 3 Mu tools and the Ishikawa diagram, used to make a productivity diagnosis. It is concluded that the research represents an important contribution on the use of industrial engineering tools to study productivity, thanks to its systematic approach, rigorous analysis, and detailed diagnosis.

KEYWORDS: Ishikawa diagram; the 3 Mu; plastic companies; industrial management; productivity.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Luis Canek Ángeles Tovar

INSTITUCIÓN: Instituto Politécnico Nacional / Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas

DIRECCIÓN: Av. Té 950, Granjas México, Iztacalco, C. P. 08400, Ciudad de México, México

CORREO ELECTRÓNICO: canekangeles@gmail.com

Fecha de recepción: 1 de agosto de 2024. **Fecha de aceptación:** 24 de febrero de 2025. **Fecha de publicación:** 4 de marzo de 2025.



I. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas, las empresas dedicadas a la transformación de plásticos desempeñan un rol muy importante tanto a nivel nacional como internacional, por el amplio uso de este material en industrias como la automotriz, electrónica o de empaques, por mencionar algunas. Además, el mercado de los plásticos ofrece grandes ventajas como un bajo costo, durabilidad, resistencia a la corrosión y la capacidad de moldeo [1].

En el caso de México, la industria del plástico ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos 20 años, tanto que el país se ha posicionado como uno de los principales productores y exportadores de esos productos a escala mundial, lo que ha permitido mantener un ritmo de crecimiento. Tan solo en 2012, las exportaciones de plásticos en México alcanzaron los 7 521 millones de dólares estadounidenses, mientras que para 2022 prácticamente se duplicaron al llegar a los 13 146 millones de dólares [2]. Esto deja en claro el gran peso económico que el sector tiene para el país, lo que justifica que todo lo relacionado con su funcionamiento o el de sus empresas sea relevante.

Un crecimiento como este evidentemente conlleva a que las empresas de plásticos mantengan un adecuado nivel de productividad para cumplir con la demanda que el mercado exige. Sin embargo, en ocasiones, su funcionamiento se ve afectado por diferentes factores, teniendo como resultado menor producción y sobrecostos, lo que a su vez perjudica la rentabilidad de la organización y, en última instancia, incluso amenaza su supervivencia en el mediano plazo. Por lo anterior resulta relevante adentrarse en el estudio de las causas que afectan negativamente la productividad de las empresas de plástico en México. Hacerlo, ofrece la oportunidad, por un lado, de obtener información que contribuya a un mayor entendimiento del funcionamiento de ese tipo de entidades económicas y, por el otro, permite incrementar el conocimiento en lo referente a los problemas de productividad que se enfrentan en empresas del sector.

Por eso, este artículo pretende acercarse a los problemas de productividad del sector, mediante el estudio de una empresa de producción de termoformado de plástico para componentes eléctricos. Esto tiene por objetivo identificar los factores o elementos que provocan una baja productividad para, posteriormente, buscar accio-

nes enfocadas en mejorarla para beneficio de la empresa y un mejor desempeño comercial en su área. Por ello, se adoptaron dos herramientas de la ingeniería industrial útiles para el diagnóstico de la productividad: el diagrama de Ishikawa y la metodología de las 3 Mu.

La elección de dichas herramientas se debe a que gracias a varios estudios recientes se ha comprobado que las 3 Mu (Muri, Muda y Mura), pueden auxiliar en diversas industrias a minimizar los desperdicios en las organizaciones, lo que les beneficia operativamente [3], [4], [5], [6], [7]. Además, el diagrama de Ishikawa ha demostrado su utilidad para identificar adecuadamente y de manera pronta las causas raíz de diferentes problemas [8], [9], [10]. Ambos instrumentos se han implementado apoyándose en una metodología cuantitativa o cualitativa, lo que ha contribuido a detectar elementos que generan problemas en las empresas, por lo que ambas han sido idóneas para generar un adecuado diagnóstico de la organización objeto de estudio con el fin de tener certeza de los factores que afectaban su productividad.

Con base en lo anterior, el presente documento se estructura de la siguiente manera: primero se expone la metodología usada, así como los elementos teóricos relevantes sobre la productividad, para después ofrecer el contexto actual de la empresa objeto de estudio, con la intención de que el lector tenga claridad en cuanto a las características principales de la organización y su situación actual; a continuación se presentan los resultados de la investigación, así como la discusión sobre los aportes de las herramientas de diagrama de Ishikawa y las 3 Mu, como apoyo en la posible resolución de los problemas de productividad y, finalmente, se ofrecen las conclusiones correspondientes.

II. METODOLOGÍA

Este artículo de investigación tiene por objetivo identificar los factores que afectan la productividad de una empresa de plásticos en México y, para lograrlo, se buscó responder a la pregunta: ¿cuáles son los factores que disminuyen la productividad del área de revisión y ajuste en una empresa de plásticos? Bajo esta consideración, este trabajo se basó en un enfoque cualitativo-cuantitativo, siguiendo una metodología mixta [11].

Lo anterior se refuerza con la profundidad y la contextualización proporcionadas por la metodología de estudio de casos, donde hay cabida para la estructuración

e integración de datos cuantitativos y cualitativos. La elección del estudio de casos se debe a que ofrece un acercamiento detallado al objeto de estudio al tomar en cuenta su contexto específico. Aunado a esto, la metodología permite triangular información gracias a herramientas diversas de recolección que generan un análisis estructurado del fenómeno [12].

La organización en donde se llevó a cabo el estudio es una empresa de plásticos ubicada en la Ciudad de México, con más de 10 años en la industria y alrededor de 400 empleados. Fue seleccionada debido a su diversidad de procesos, la presencia de tres turnos y en particular la existencia de personal con limitaciones físicas. Esto último es peculiar porque en el área de revisión y ajuste laboran personas que tienen algún problema físico, derivado de su desempeño dentro de la empresa (como lastimarse una extremidad o tener lesiones por movimientos repetitivos), pero esos traumatismos al no ser de gravedad, es decir, que no requieren una incapacidad al menos inicialmente, permiten que los empleados puedan desempeñar labores en la mencionada área, como una medida de la empresa para no perder personal ante la alta demanda que tienen. Pero una vez que se recuperan físicamente, ellos regresan a sus puestos habituales, por lo que en el área de revisión y ajuste no hay estabilidad en la cantidad de personas ni el tiempo en el que laboran ahí, lo que de inicio parece ser el factor principal que impacta negativamente la productividad.

En específico, una dinámica como la mencionada es lo que ofrece un contexto rico y complejo para el estudio de la productividad operativa, un tema muy relevante hoy en día para la continuidad de cualquier empresa. Cabe mencionar que toda la información de compañía se obtuvo durante los 6 meses de trabajo *in situ* con sus directivos y empleados.

En cuanto a la recopilación de datos, se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas, con un enfoque que consiste en escuchar todo lo que puedan compartir actores clave [13], en este caso supervisores, operadores de maquinaria y personal de mesas de trabajo. Estas permitieron obtener perspectivas y experiencias relacionadas con la productividad, las cuales se complementaron con observaciones directas para documentar el ambiente laboral, los flujos de trabajo y las interacciones entre el personal y el entorno en el área de revisión y ajuste. En complemento, se realizó un análisis de documentos que incluyó formatos de producción, hojas de instrucción,

reportes de inventarios y diagnósticos clínicos. Este proporcionó una visión histórica y contextual de la empresa, facilitando la comprensión de las prácticas y procesos relacionados con la mejora de la productividad.

Respecto al análisis de los datos cualitativos obtenidos de las entrevistas y observaciones, este se realizó temáticamente, identificando patrones recurrentes, temas clave y subtemas relacionados con la productividad. El enfoque de análisis temático sigue recomendaciones que permiten una comprensión detallada y estructurada de los datos recopilados [14]. Con ello, la información recabada permitió generar un diagnóstico donde se identificaron necesidades reales y se establecieron las bases para realizar afirmaciones sobre el funcionamiento de la organización. Este se realizó de manera objetiva, considerando los diferentes factores identificados durante la investigación y la observación no participante [15], que indican que un determinado observador debe explicar las experiencias que tiene de una organización y de su operar en un esquema de distinción.

Es necesario agregar que para otorgar una estructura adecuada al diagnóstico realizado, se consideró pertinente complementarlo con elementos de mejora continua, concretamente con las dimensiones de Lean Manufacturing conocidas como las tres principales formas de desperdicio, las 3 Mu, que hacen referencia a Muri (sobrecarga), Mura (variabilidad) y Muda (desperdicio), y adoptarlas permitió detectar los tipos de desperdicios existentes y así determinar cuáles son los principales problemas que afectan la productividad.

Finalmente, se aplicó una triangulación de datos para robustecer y corroborar la información recabada [16], fortaleciendo así la validez y fiabilidad de la información que primeramente se obtuvo. Esta metodología mixta y el enfoque de triangulación contribuyeron a mejorar la validez y confiabilidad de los resultados del estudio, contrastando y comparando la información obtenida de diferentes fuentes.

Así, la metodología adoptada en esta investigación ofreció una aproximación completa y rigurosa para abordar la complejidad de la productividad operativa en el área de revisión y ajuste de la empresa estudiada, proporcionando un marco sólido para el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos. Una vez presentados los elementos metodológicos, a continuación se exponen aspectos teóricos relevantes para la investigación.

2.1. SUSTENTO TEÓRICO

En cuanto a los elementos teóricos que apoyan la investigación, hay que mencionar la productividad por la importancia que tiene para las sociedades, pues los cambios en ella pueden influir en las condiciones de vida [17]. Es necesario aclarar que en la literatura se identifican varios tipos de productividad, pero la que se retoma aquí es la operativa. Esta se entiende como la relación entre la producción obtenida por un sistema de producción o servicios y los recursos utilizados para conseguirla, es decir, el uso eficiente de recursos [18]. Otra perspectiva la concibe como la manera en que se usan los factores de producción en la generación de bienes y servicios para la sociedad [19] y también se define como una medida de la eficiencia y la eficacia en la utilización de recursos para producir bienes o servicios [20], lo que también puede entenderse como la relación entre insumos y los resultados dentro de un periodo específico. También se le puede considerar como la relación entre la producción obtenida y los recursos utilizados para lograrla [21].

En [22] se ve la productividad operativa como toda relación entre las salidas y los insumos, por lo que para aumentar la productividad se requiere obtener mejores resultados en los procesos, en otras palabras, hacer más con menos. También menciona que las empresas poseen una serie de insumos concentrados en cinco grandes rubros: materiales, máquinas, mano de obra, métodos y medio ambiente, mejor conocidos como las 5 M, que en algunos casos pueden ser 6 al considerarse la medición. De hecho, la propuesta se encuentra abierta a reconocer más factores que puedan influir en la situación empresarial, ya que esos insumos permiten generar los productos terminados.

Una vez que hay claridad en cuanto a la productividad operativa y su relevancia, enseguida es necesario saber cuáles son los factores que influyen en ella. En ese sentido, se han logrado identificar varios trabajos que, aunque abordan aspectos muy diferentes, han sido de utilidad para evitar los bajos índices productivos [23], [24], [25], [26], [27]. En resumen, los factores que afectan la productividad en cualquier empresa son: 1) mano de obra, 2) materiales, 3) tecnología e innovación, 4) habilidades y capacitación de la fuerza laboral y 5) ambiente y organización laboral [28].

Estos factores son enunciativos más no limitativos, pues los factores dentro de las organizaciones se proveen a las

personas de manera grupal o individual [29], lo cual funge como la razón de ser de la organización, su estructura, el conjunto de los símbolos, así como su visión. Estos factores mantienen una interacción entre la organización y el ser humano que labora, buscando que se logre una efectividad organizativa y, por otra parte, marcan la vida laboral y profesional del personal.

Los anteriores elementos, junto con el diagrama Ishikawa, permiten identificar lo que afecta la productividad, siendo el primer paso para lograr soluciones. En síntesis, este diagrama posibilita conocer todas las posibles causas de un problema para ser analizado, las cuales se colocan en una espina de pescado, donde los factores más relevantes se representan con espinas y las subcausas en espinas menores [30]. Cabe mencionar que un aspecto fundamental para realizar un adecuado diagrama de Ishikawa es categorizar los hallazgos con base en las 6 M: mano de obra, maquinaria, materiales, método, medición y medio ambiente; así, se obtiene mayor claridad al analizar los problemas previo a proponer soluciones.

Para complementar lo expuesto, el acercamiento a herramientas de Lean Manufacturing para abordar el tema de la productividad, se debe a que, pese al transcurso del tiempo, se ha comprobado que estas continúan aportando ampliamente a estudiar y resolver problemas productivos en los diversos tipos de empresas y giros que estas manejan. Investigaciones en años recientes comprueban lo anterior al indagar respecto a las formas en que las herramientas de Lean Manufacturing han beneficiado a empresas en lo productivo, independientemente del método o perspectiva usada [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46].

Con relación a lo anterior y antes de terminar este apartado, es pertinente abundar en la herramienta de Lean Manufacturing conocida como las 3 Mu, ya que permite clasificar los problemas que afectan la productividad en los grupos Muda, Muri y Mura, los cuales se enfocan en el desperdicio, la sobrecarga y la variabilidad respectivamente, todos ellos elementos que son limitantes de la productividad [21]. Esto, en combinación con las 6 M, permite que la mayoría de los factores involucrados en la baja productividad presenten modificaciones, pues los procesos suelen tener variabilidad; desperdicio, ya sea en tiempos o productos; y sobrecarga en la capacidad de producción, del personal o tiempos de fabricación.

De forma sintética, las 3 Mu conllevan lo siguiente: la Muri se enfoca en la sobrecarga en las diferentes áreas o procesos, por lo que generalmente se relaciona con la mano de obra, la maquinaria, la medición y el método, aunque no se limita a estos elementos; la Mura se centra en la variabilidad, es decir, en obtener productos no homogéneos que pueden causar problemas con los clientes en específico en cuanto a la calidad, por ello, normalmente se relaciona con las materias primas, el personal, los materiales, las especificaciones, los procesos y las maquinarias y, por último, la Muda tiene como elemento clave el desperdicio o excesos, los cuales no ofrecen valor a la empresa ni resultados positivos para los consumidores y, por ende, se disminuye la productividad. Los desperdicios pueden presentarse en cualquier rubro de la empresa, por lo que esta Mu se puede considerar como la más amplia en ese sentido.

Así, las 3 Mu, junto con las 5 M [21], o mejor dicho, 6 M (considerando la medición) para la presente investigación, son herramientas que apoyan ampliamente para identificar los problemas que afectan la productividad de una empresa y de ahí la pertinencia de retomar ambas junto con las aportaciones del diagrama de Ishikawa. Debido a ello, la principal contribución del trabajo es exponer la realización de un diagnóstico donde se identificaron los factores que afectan la productividad de un área determinada, pero tomando en cuenta las características particulares presentes en la empresa objeto de estudio. Esto es relevante, ya que permite que el diagnóstico sea específico y, por lo tanto, completamente coherente con la realidad en el momento de la investigación. Gracias a ello, se abona a una mejor toma de decisiones dentro de la organización, al tener claridad respecto a

factores negativos que afectan la productividad y así generar acciones encaminadas a mejorarla.

Una vez expuestos los elementos teóricos que apoyan la presente investigación, enseguida se presenta el contexto de la organización objeto de estudio.

2.2. CONTEXTO DE LA ORGANIZACIÓN

La empresa elegida para el estudio tiene más de una década de experiencia en la Ciudad de México, dedicándose al termoformado de plástico y se ha establecido como un actor clave en la industria de transformación de dicho material. Con una fuerza laboral de alrededor de 400 personas, la compañía se destaca por su compromiso con la calidad y la innovación, por medio de sus procesos principales de inyección, compresión y acondicionamiento, cruciales para la producción de componentes eléctricos, dirigidos especialmente a dispositivos electrónicos de consumo.

En ese sentido, a continuación, se muestra la interacción de los procesos existentes en la organización, divididos en estratégicos, centrales y de apoyo. En dicha interacción se encuentra el área de revisión y ajuste (integrada en su momento por 35 profesionales dedicados a garantizar la calidad de los productos finales), que es el objeto de estudio. La Figura 1 presenta los procesos de la empresa, donde destacan los centrales por su peso para lograr la producción, al ser aquellos que transforman las materias primas para obtener los bienes a comercializar. El área de revisión y ajuste participa para asegurar que se llegue bien al empaque y distribución del producto final.

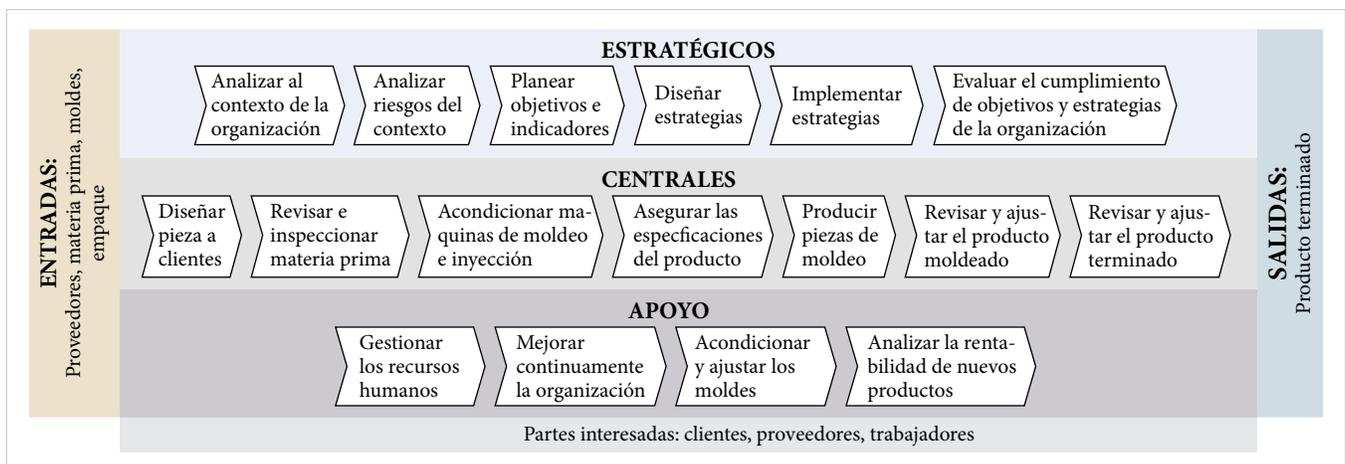


Figura 1. Interacción general de procesos. Fuente: elaboración propia. Los proveedores se consideran como entrada, ya que son los que suministran los moldes y realizan los ajustes correspondientes en la etapa de acondicionar máquinas de moldeo e inyección.

Así, el área de revisión y ajuste es fundamental en la producción porque garantiza la calidad y la eficiencia operativa de la empresa, pese a enfrentar desafíos significativos, incluida la gestión de personal con limitaciones físicas por lesiones o enfermedades. El impacto directo que tiene el desempeño del área para la productividad de la empresa es lo que genera el interés por analizar su caso.

En síntesis, la empresa opera bajo un sistema de procesos interconectados que van desde la planificación estratégica hasta la producción operativa. El área de revisión y ajuste se sitúa en el núcleo de estos procesos, actuando como un puente esencial entre la producción y la entrega final al cliente.

En específico, dentro del área de revisión y ajuste se llevan a cabo cuatro procesos clave: tómbola, sandblasteado, broquelado y acondicionamiento en mesas de trabajo (Figura 2). Ahí se encargan de la eliminación de rebabas, la inspección de calidad y el acabado final de los productos, asegurando que cumplan con las especificaciones requeridas.

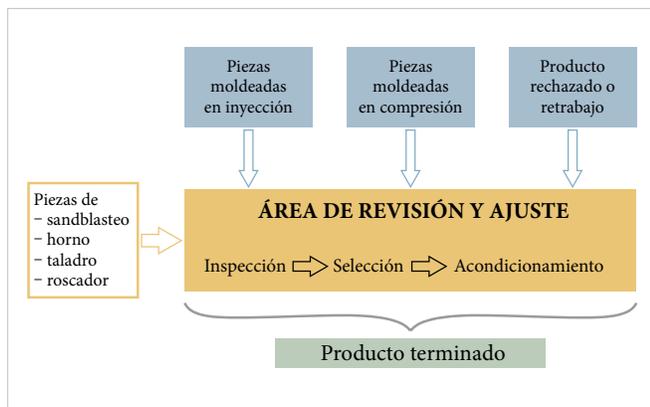


Figura 2. Proceso de revisión y ajuste específico. Fuente: elaboración propia.

Además, el área actúa como un punto de conexión entre los procesos de moldeo por inyección y compresión y los clientes, ya que maneja las piezas terminadas, los rechazos de los compradores y los retrabajos. Aproximadamente, el 80 % de las piezas procesadas pasan por este departamento, lo que refuerza su importancia en la cadena de producción.

Sin embargo, el área de revisión y ajuste enfrenta desafíos en términos de productividad y calidad, con un nivel significativo de *scrap* (74 %, con base en el diag-

nóstico realizado) y bajos niveles de productividad (el promedio para los tres turnos del área era de menos del 50 % de productividad). Estos inconvenientes pueden estar relacionados con los procesos de inyección y compresión, lo que subraya la necesidad de un enfoque integrado para abordar estos problemas. A partir de este contexto se deriva el interés por identificar los problemas que causan la baja productividad.

Expuestos los aspectos teóricos relevantes y el contexto de la organización investigada, en la siguiente sección se abordan los resultados y la discusión de los hallazgos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. DIAGNÓSTICO DEL ÁREA DE REVISIÓN Y AJUSTE

Previo a exponer los aspectos más relevantes del diagnóstico realizado, es necesario mencionar que en este apartado no se presentan datos cuantitativos obtenidos, debido a que se firmó un acuerdo de confidencialidad de la información con la empresa objeto de estudio, en el cual, a petición de esta, se estableció que no se diera a conocer públicamente información cuantitativa de su situación.

Aclarado lo anterior, el diagnóstico de esta investigación aborda la problemática de baja productividad en el área de revisión y ajuste, y se apoya en el diagrama de Ishikawa o la espina de pescado para identificar todas las causas posibles reconocidas durante la observación en el área, que representan la causa raíz de la baja productividad (Figura 3).

Es pertinente aclarar que una causa raíz o causa origen es aquella que si es eliminada se podría prevenir o disminuir la probabilidad de recurrencia [22]. Por lo anterior, realizar un análisis para identificarla es un proceso delicado donde cometer algún error puede derivar en una mala interpretación y a su vez provocar que el diagnóstico carezca de validez.

En las jornadas *in situ* se presenciaron eventualidades que contribuyeron a fortalecer el diagnóstico para que los factores no se restringieran a analizar una parte del área. Gracias a esto, el diagnóstico pudo ampliarse sin limitaciones a seis factores que, con ayuda del diagrama de pescado, se categorizaron como se muestra en la Figura 3.

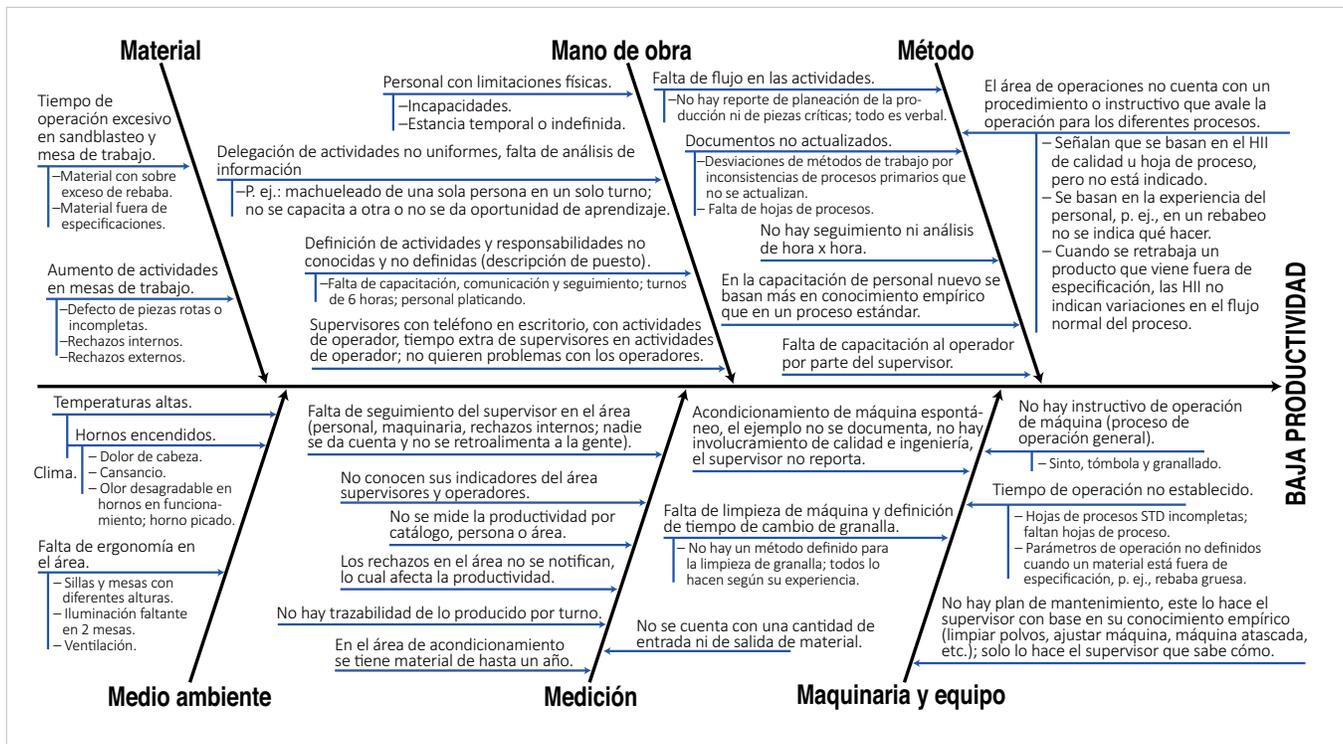


Figura 3. Diagrama Ishikawa de causa raíz del área de revisión y ajuste. Fuente: elaboración propia.

Para generar el diagrama de causa raíz de la Figura 3, es pertinente mencionar que se siguió una metodología en donde se realizaron los siguientes pasos: 1) conformación del equipo de trabajo, integrado por personas de diversas áreas y con conocimientos sobre el problema identificado; 2) recopilación y tratamiento de los datos, donde se obtiene información de diversos medios como los diagramas de flujo, manuales, planes y estadísticas de producción; 3) jerarquización de problemas, que implica determinar cuáles son los elementos que parecen afectar más en el problema planteado; 4) definición del problema, con los elementos anteriores identificados se realizan una serie de preguntas tendientes a tener mayores detalles sobre el problema indagado; 5) análisis causa-efecto, en donde se analiza cada elemento encontrado para determinar las causas y efectos de cada uno, y 6) definición de causa raíz, momento en el cual, gracias a los pasos anteriores, es posible determinar en conjunto qué genera el problema planteado [47].

Las segmentaciones de los factores se determinaron según los problemas presentados en más de tres ocasiones por semana, que se confirmaban con las entrevistas al personal y se reflejaba en los números de la productividad diaria, semanal y mensual. El diagrama de Ishikawa fue un punto de partida idóneo para determinar los problemas de productividad del área de

revisión y ajuste. Para apoyar la determinación de las causas raíz, se recurrió a la herramienta de calidad de los 5 porqués para establecer las subcausas. El análisis se realizó con colaboración del jefe de mejora continua, el gerente de producción, los jefes de turno, los supervisores y los operadores involucrados. Como resultado del análisis de causa raíz, a continuación se resume cada factor identificado y se establecen las principales problemáticas.

3.1.1. Factor material

Durante la observación en el área de revisión y ajuste, se detectó que la productividad de ciertas piezas estaba por debajo del 70 %, lo que sugirió la existencia de un problema generalizado con el material. Al analizar la causa de los defectos encontrados, se identificó que una parte significativa se asociaba con las especificaciones del material, lo que indicaba que ese aspecto era un factor clave a abordar.

En resumen, las principales problemáticas identificadas en relación con los materiales incluyen material fuera de especificación, tiempos no establecidos para la revisión de materiales, roles y actividades no definidos, falta de comunicación y registro de rechazos, ausencia de un flujo de actividades claro en el área de revisión

y ajuste, criterios de calidad mal definidos y liberación inadecuada de material proveniente de otras áreas.

3.1.2. Factor mano de obra

En el área de revisión y ajuste, al menos la mitad del personal trabaja con limitaciones físicas, lo que afecta directamente a la productividad por las incapacidades recurrentes solicitadas y la incertidumbre de no tener certeza de cuánto tiempo trabajaría en esa área. Además, cuando un trabajador se lesiona, es asignado temporalmente al área de revisión y ajuste por el bajo ritmo de trabajo. Se comprobó que las operadoras trabajaban el mismo catálogo durante periodos prolongados y que los supervisores no realizan la capacitación del personal con base en sus perfiles de puesto y responsabilidades.

Así, los problemas identificados en relación con la mano de obra son personal con limitaciones físicas, rotación corta de trabajadores de otras áreas, falta de capacitación y conocimiento empírico, falta de descripción de puestos y actividades, lo que resulta en trabajo no uniforme y repetitivo.

3.1.3. Factor maquinaria

Aquí se encontró que las cinco máquinas existentes tienen una función diferente entre ellas: perforar, desbastar, limpiar y rebajar la mayor cantidad de rebaba posible, pero en estas no existe un estándar para la operación, lo que causa errores, tiempos muertos y potencial daño a las piezas, provocando un retrabajo en exceso dentro del área. Además, se operan y se les da mantenimiento con base solo en conocimientos empíricos, sin revisar manualmente, lo que suele producirse en periodos muy prolongados para reparar las maquinarias.

Operar las máquinas es un reto complejo para los nuevos colaboradores, ya que no existen instructivos de operación ni relación entre los materiales y la maquinaria existente en el área. Además, la operación es espontánea conforme se trabaja con el material, provocando una gran urgencia en cada uno.

Así, es posible establecer los siguientes inconvenientes: trabajo estándar no definido, falta de procedimientos e instructivos, falta de mantenimiento preventivo y correctivo en las maquinarias y, nuevamente, la operación empírica.

3.1.4. Factor medición

En la empresa no se cuenta con mediciones de sus variadas actividades, lo que lleva a la inexistencia de metas medibles que permitan conocer el estado de las acciones y, por ende, no hay control en los procesos productivos. Por otra parte, hay poca retroalimentación en los tres turnos respecto a los defectos de los materiales, lo que resulta en números de producción bajos y que el indicador de productividad no aumente. Esto lleva a generar retrasos también en la trazabilidad del material, a lo que se agrega la falta de un historial de catálogos producidos que evita tener un control de los pedidos de los clientes.

Resulta evidente que la medición es importante, ya que coadyuva a que existan registros de productividad y desempeño, así como instructivos que documenten la resolución de problemas a los que se enfrenta el personal durante los procesos productivos, lo cual, a su vez, permite tener más elementos para tomar decisiones precisas. Por ello, hay problemas para no tener un objetivo medible, trabajar con medición empírica y no registrar rechazos y seguimiento en la producción.

3.1.5. Factor método

Con relación al método, se usan hojas de instrucción que detallan de forma simplificada el proceso de inspección. No obstante, se ha detectado que no están actualizadas y cuando se hacen cambios en el catálogo no se modifican adecuadamente, además, no se especifican los pasos operativos porque se carece de una cultura centrada en la correcta documentación. Por otra parte, se detectó la falta de capacitación al personal, ya que, en el caso de nuevos ingresos, estos eran entrenados por el mismo personal operativo, ya que el supervisor no contaba con tiempo suficiente.

Así, las problemáticas para este factor se concretan en la falta de flujo de actividades, documentación, cultura de llenado de documentos y planeación en la producción, además de que el método de operación existente es empírico.

3.1.6. Factor medio ambiente

Al interior de las instalaciones del área existen hornos que se utilizan para el acabado de algunos materiales, razón por la que están encendidos todos los días, aunque no se usen, afectando al personal con síntomas como

dolor de cabeza, cansancio y un olor desagradable en el lugar de trabajo. Además, las sillas y mesas de trabajo eran incómodas para las operadoras, lo que provocaba que presentaran diferentes movimientos durante la jornada laboral, en algunas ocasiones se ponían de pie, en otras se sentaban y en algunas más solo recargaban un pie. Todo ello afectaba la productividad de las personas, al interrumpir su ciclo natural de trabajo en más de una ocasión durante su turno.

Estas observaciones en el área de revisión y ajuste permitieron ver que el medio ambiente no era el idóneo porque presentaba variables que de algún modo afectan a la salud de las operadoras. De esa manera, los inconvenientes en este factor se resumen en condiciones ambientales desfavorables inadecuada ventilación y problemas ergonómicos.

3.2. EL APORTE DE LAS 3 MU COMO EL PRIMER PASO PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE PRODUCTIVIDAD

Como se mencionó antes, la identificación de problemas es crucial para mejorar la productividad en cualquier proceso, ya que implica la interacción de materiales, personas, maquinaria y espacio para generar un pro-

ducto o servicio. El diagnóstico contribuye a encontrar esos inconvenientes y en el caso de la empresa en estudio, se han detectado problemas integrados en los seis factores ya expuestos. Detenerse en ese punto permite lograr el objetivo propuesto por la investigación, sin embargo, como se mencionó al inicio del documento, resulta enriquecedor incluir los tres elementos conocidos como las 3 Mu: Muri, Mura y Muda, debido a los aportes que ofrecen.

Realizar un cruce entre los elementos presentes en cada factor y las 3 Mu permite agruparlos por Muri, Mura y Muda, proporcionando así una mayor comprensión de los aspectos encontrados. Esto es algo que más allá de complementar el diagnóstico, permite obtener mayores elementos de análisis que coadyuven a generar en el futuro próximo las soluciones adecuadas para resolver la problemática de la productividad en el área de revisión y ajuste, y por ende también de la empresa objeto de estudio.

Aclarado lo anterior, es pertinente presentar un análisis de los 29 elementos presentes en los seis factores (Figura 4), para posteriormente desglosarlos en relación con las Mu.

Material	Mano de obra	Maquinaria y equipo	Medición	Método	Medio ambiente
1. Material fuera de especificación.	1. Personal con limitaciones físicas.	1. Trabajo estándar no definido en los catálogos.	1. No cuenta con objetivos medibles en producción por catálogo.	1. Falta de flujo de actividades.	1. Condiciones ambientales desfavorables.
2. Tiempos no establecidos para la revisión de materiales.	2. Estancias cortas por parte de otros trabajadores de otras áreas.	2. Instructivos de operación no existentes.	2. Medición empírica, pretensión de recordar todo a detalle.	2. Falta de documentación actualizada.	2. Falta de ventilación adecuada.
3. Actividades o roles no especificados.	3. Falta de capacitación.	3. Falta de mantenimiento preventivo y correctivo por el área correspondiente.	3. Falta de procedimiento para medir rechazos.	3. Conocimiento empírico.	3. Problemas ergonómicos.
4. Falta de comunicación y de registros de rechazos.	4. Conocimiento empírico.	4. Procesos de acabados no definidos ni documentados.	4. Falta de seguimiento al material que entra y que se trabaja en el área.	4. Falta de cultura de llenado de documentos.	4. Problemas de iluminación.
5. Sin flujo de actividades en el área, criterios de calidad no definidos, mala liberación de materiales provenientes de otras áreas.	5. Falta de descripción de puestos y actividades y/o roles no especificados, lo que ocasiona trabajo no uniforme y repetitivo.	5. Operación empírica de las máquinas.	5. No existe una producción estándar.	5. Falta de planeación de la producción.	

Figura 4. Hallazgos identificados en el diagnóstico. Fuente: elaboración propia.

Cabe recordar que cada Mu hace referencia a un elemento en específico que afecta el funcionamiento de la

organización y sus actividades, lo que se aborda a continuación.

3.2.1. Muri

Aquí la sobrecarga es lo más relevante, la cual se encontró de inicio en los operarios debido a la falta de especificación en las hojas de instrucción y la necesidad de realizar ajustes basados en el conocimiento tácito. También existe sobrecarga en material, actividades o errores, lo que contribuye a visualizar que esta es una causa raíz general y permite clasificar todas las causas particulares ya mencionadas. El impacto de la sobrecarga es un notorio incremento en errores y disminución de la eficiencia operativa que conduce a una baja productividad en el área, lo que permite validar las causas de esta Mu.

3.2.2. Mura

En este caso, la variabilidad es clave y se identificó en las limitantes físicas del personal del área de revisión y ajuste, ya que, debido a ellas, la manera de desempeñar sus funciones es diferente para cada persona, resultando en variaciones en los procesos. Aunque la variabilidad es muy notoria en el plano operativo, el detalle donde está concentrada ayuda a determinar los factores a atender para darle solución. Una excesiva variabilidad afecta negativamente al derivar en una desigualdad en la calidad del producto y tiempos de producción irregulares. Con este impacto en la productividad es indudable que es una causa raíz del problema.

3.2.3. Muda

Este elemento enfatiza en el desperdicio. En el caso del área de revisión y ajuste, lo que se encontró inicialmente fue la falta de una cultura de documentación adecuada y una deficiente planificación de producción, resultando en material no registrado y almacenado por largos periodos. Lo anterior resulta en el aumento de desperdicios y pérdida de recursos en los diversos procesos existentes, lo que se identificó es un aspecto recurrente en muchas actividades realizadas.

El objetivo de analizar con las 3 Mu es destacar la importancia de abordar los factores identificados bajo la herramienta y obtener más información que permita resolver en el futuro los problemas para mejorar la productividad del área de revisión y ajuste. La Figura 5 proporciona un resumen de los hallazgos y su relación con las Mu, facilitando la identificación de áreas críticas que requieren intervención. Como se observa, los factores de material, método y medio ambiente inicialmente

pueden relacionarse con el desperdicio, mientras que medición y maquinaria con desperdicio y sobrecarga, por su parte la mano de obra tiene correspondencia con las tres, el desperdicio, sobrecarga y variabilidad.

Gracias al uso de las Mu se identificó que en la práctica existen tres causas raíz de la baja productividad: la variación, el desperdicio y la sobrecarga, en cada una de las cuales es posible integrar como subcausas los diferentes elementos que hay en los seis factores obtenidos en el diagnóstico, esto con la intención de clarificar hacia dónde deben dirigirse las posibles propuestas de mejora.

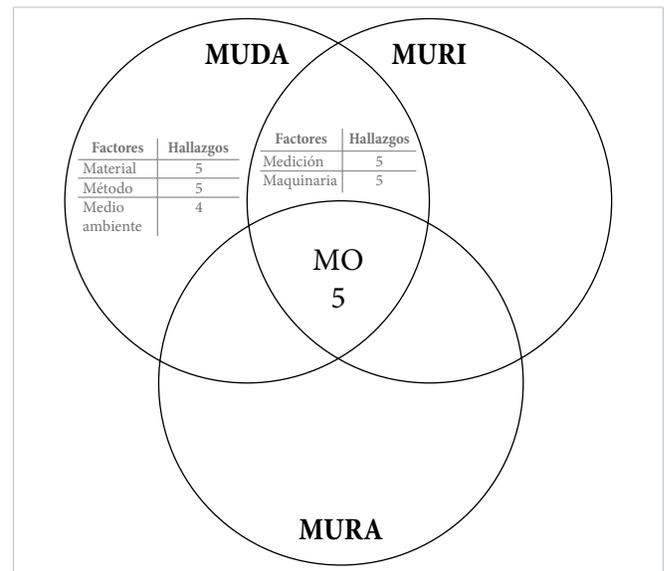


Figura 5. Relación de factores con las Mu. Fuente: elaboración propia.

En ese sentido, como se aprecia en la Figura 6, resulta evidente una mayor carga en Muda, lo que alude al desperdicio como el aspecto de mayor peso. Con base en ello, fue posible determinar que la problemática reside principalmente en los desperdicios de material, maquinaria, medición, método, medio ambiente y tiempos.

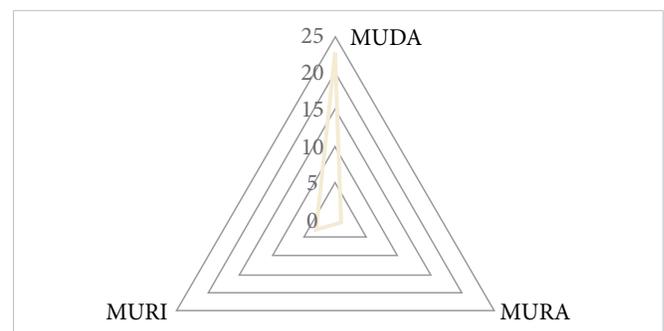


Figura 6. Análisis de hallazgos por cada Mu. Fuente: elaboración propia.

Así, se procedió a agrupar cada hallazgo identificado en los seis factores directamente con las 3 Mu. De esta forma se amplió el diagnóstico inicial permitiendo que para cada elemento fuera evidente la causa que lo pro-

voca, lo que ofrece información necesaria para diseñar estrategias específicas por hallazgo que puedan implementarse en el corto o mediano plazo para mejorar la productividad.

1. Mura (desperdicio)		Mura (variabilidad)	Muri (sobrecarga)
1. Material fuera de especificación.	13. Medición empírica; pretenden recordar todo a detalle.	25. Personal con limitaciones físicas.	26. Estancias cortas en el área. 27. Conocimiento empírico. 28. Operación empírica. 29. Falta de seguimiento a material que entra y que se trabaja.
2. Tiempos no establecidos para la revisión de materiales.	14. Falta de procedimiento para medir rechazos.		
3. Actividades o roles no especificados.	15. No existe una producción estándar.		
4. Falta de comunicación y de registros de rechazos.	16. Falta de flujo de actividades.		
5. Sin flujo de actividades en el área, criterios de calidad no definidos, mala liberación de materiales provenientes de otras áreas.	17. Falta de documentación actualizada.		
6. Falta de capacitación.	18. Conocimiento empírico.		
7. Falta de descripción de puestos y actividades y/o roles no especificados, lo que ocasiona trabajo no uniforme y repetitivo.	19. Falta de cultura de llenado de documentación.		
8. Trabajo estándar no definido en los catálogos.	20. Falta de planificación de la producción.		
9. Instructivos de operación no existentes.	21. Condiciones ambientales desfavorables.		
10. Falta de mantenimiento preventivo y correctivo por el área correspondiente.	22. Falta de ventilación adecuada.		
11. Procesos de acabados no definidos ni documentados.	23. Problemas ergonómicos.		
12. Sin objetivo medible en producción por catálogo.	24. Problemas de iluminación.		

Figura 7. Clasificación de hallazgos en cada Mu. Fuente: elaboración propia.

Como muestra la Figura 7, muchos de los problemas se relacionan directamente con el desperdicio de recursos, lo que permite comprender mejor la situación del área de revisión y ajuste. Lo anterior implica que los hallazgos dentro de la Muda pueden atenderse por medio de estrategias similares para combatir los desperdicios, mientras que aquellos en las otras Mu podrían solucionarse con tácticas distintas.

La ventaja de agrupar los problemas por Mu reside en que es posible atenderlos de manera general inicialmente con la intención de que las estrategias sean reproducibles en otras áreas o factores posteriormente.

Un enfoque más amplio como este coadyuva a una implementación eficaz de acciones y una mejora sustancial en el área de revisión y ajuste. La mayoría de los problemas se relacionan con la Muda, las estrategias iniciales para mejorar la productividad deben enfocarse en disminuir el desperdicio de diversas maneras, y hacerlo puede contribuir a que otros elementos necesarios mejoren sustancialmente.

Una vez agrupadas las principales causas considerando los hallazgos, las causas raíz y la observación, el objetivo es que a partir de toda la evidencia generada se cuente con un diagnóstico más completo. Esto implica

una comprensión detallada del contexto existente en el área de revisión y ajuste, permitiendo conocer mejor cada uno de sus componentes, interacciones, fortalezas y debilidades, y considerando múltiples aspectos y dimensiones. Precisamente la incorporación de las Mu al diagnóstico permite lograrlo.

De esta manera, se obtiene un diagnóstico mejorado de la situación actual del área de revisión y ajuste, el cual permite identificar distintos tipos de desperdicios, ineficiencias y excesos que deben atenderse de forma prioritaria para mejorar la productividad. En ese sentido, gracias al diagnóstico hecho, se tuvo la certeza de que el objetivo inicial del área de revisión y ajuste debería ser lograr al menos un 70 % de productividad para cualquier pieza fabricada. Lo anterior posibilita lograr una clara identificación y atención de los problemas en dicha área mediante soluciones acordes a las circunstancias actuales derivadas de las 3 Mu, las cuales al menos inicialmente deben enfocarse en lo siguiente:

- Para Muda: implementación de programas de mantenimiento preventivo, optimización de métodos de trabajo y adopción de prácticas sostenibles.
- Para Muri: redistribución de tareas para equilibrar la carga de trabajo y mejora en la capacitación y uso de herramientas.
- Para Mura: estandarización de procesos y establecimiento de protocolos claros, junto con sistemas de gestión de calidad.

Así, este enfoque amplio no solo contribuye a una implementación más eficaz, sino también a lograr en el corto o mediano plazo una mejora integral en el área de revisión y ajuste.

Para cerrar esta sección vale la pena responder algunas interrogantes. Primero, ¿cuáles son las aportaciones de una metodología como la usada? El retomar la metodología de estudio de caso, apoyada en el uso de herramientas de Lean Manufacturing, permite considerar las características específicas de la organización en cuestión, es decir, ofrece la oportunidad de lograr un diagnóstico hecho a la medida que refleja la realidad que se vive en un momento dado. Lo anterior hace posible la búsqueda de soluciones al problema o problemas detectados, completamente enfocadas en lo que la empresa requiere y en los recursos con los que cuenta.

Derivado de lo anterior, ¿qué tan eficientes pueden ser las soluciones creadas para resolver el problema o problemas? Debido a la consideración amplia del contexto y características de la organización estudiada, se incrementan las probabilidades de que las acciones tomadas sean exitosas, esencialmente porque se cuenta con bastante información específica de cada factor que afecta la productividad y, por ende, es posible focalizarse en elementos que abonen a obtener mejoras.

Respecto a las ventajas y desventajas de este estudio con relación a otros similares, la ventaja más evidente es que el diagnóstico obtenido refleja la situación real de la empresa, por lo que las acciones de mejora y solución son completamente coherentes con la realidad vivida en la organización. Y sobre las desventajas, la principal se resume en que si bien los resultados ofrecidos pueden fungir como una guía para proceder en situaciones similares (baja productividad), no son generalizables debido al contexto y a las características específicas existentes.

Por último, una investigación como esta, ¿en qué otras áreas de la ingeniería industrial, ya sea en el país o fuera de él puede ser de utilidad? Aunque se ha comprobado ampliamente que las herramientas de Lean Manufacturing son idóneas para abordar los problemas de productividad en las empresas, con base en los resultados de la investigación es posible considerar que usar el estudio de caso, en combinación con ese tipo de herramientas, puede dar muy buenos resultados en otras áreas o departamentos que no sean aquellos enfocados en la producción. Esto se debe, en esencia, a que la metodología de estudio de caso fue creada justamente para particularizar las investigaciones y que estas sean de alguna manera únicas, es decir, no importa si hay problemas en el departamento de ventas, de personal, de mercadotecnia o de finanzas, por mencionar algunos. Gracias al estudio de caso siempre se puede conocer de forma amplia el contexto, lo que contribuye a obtener un diagnóstico más focalizado y, por ende, a generar soluciones coherentes con la situación actual, independientemente si se está en México, China, Canadá, Francia, etc.

IV. CONCLUSIONES

La investigación llevada a cabo en el área de revisión y ajuste representa un estudio exhaustivo y sistemático que aborda de manera integral los desafíos de baja pro-

ductividad utilizando un enfoque fundamentado en las metodologías de Lean Manufacturing. La aplicación de herramientas como el diagrama de Ishikawa y el análisis de las 3 Mu ha permitido identificar de manera precisa los factores clave que influyen en la productividad.

La meticulosa clasificación de los problemas encontrados en cada factor bajo las 3 Mu ha proporcionado una estructura coherente y comprensible para el análisis y una posterior propuesta de soluciones. Esta clasificación no solo resalta la complejidad de los desafíos enfrentados, sino que también establece una base sólida para el diseño de estrategias de mejora específicas y orientadas a resultados.

Una propuesta de soluciones futura debe incluir acciones concretas como la implementación de programas de mantenimiento preventivo y la estandarización de procesos, lo que requiere un enfoque pragmático y orientado a la acción. Estas estrategias deben respaldarse por el análisis riguroso hecho y la comprensión profunda de las causas subyacentes de la baja productividad en el área de estudio, lo que funge como el primer acercamiento para solucionar esta problemática.

Además, la identificación de áreas de investigación futura, como la optimización de protocolos de operación y la evaluación del impacto de las intervenciones propuestas en la productividad a largo plazo, sugiere un compromiso constante con la mejora continua y la excelencia operativa. Este enfoque proactivo hacia la investigación y el desarrollo demuestra un compromiso con la innovación y el avance en el campo de la gestión de la productividad.

En conjunto, el presente estudio representa una contribución significativa al cuerpo de conocimientos en Lean Manufacturing y la gestión de la productividad. Su enfoque sistemático, análisis riguroso y diagnóstico detallado no solo proporcionan una comprensión profunda de los desafíos actuales en el área de revisión y ajuste, sino que también sientan las bases para investigaciones futuras y mejoras continuas en la eficiencia operativa.

REFERENCIAS

[1] J. Pérez, “La industria del plástico en México y el mundo”, *Comercio Exterior*, vol. 64, n.º 5, pp. 6-9, 2014.

- [2] Secretaría de Economía. “Plásticos y sus Manufacturas”. Data México. Accedido: abr. 15, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/plastics-and-articles-the-reof?sourceTradeBalance=inegiOption&timeNetTradeSelector=Year>
- [3] K. Srinivasan, P. Sarulkar y V. K. Yadav, “Operational excellence of the steel industry using the Lean Six Sigma approach: a case study”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 41, n.º 3, pp. 826-849, 2024, doi: [10.1108/IJQRM-08-2022-0250](https://doi.org/10.1108/IJQRM-08-2022-0250).
- [4] W. A. Rasanjali, A. P. K. D. Mendis, B. A. K. S. Perera y V. Disaratna, “Implementing enterprise resource planning for lean waste minimisation: challenges and proposed strategies”, *Smart Sustain. Built Environ.*, vol. 13 n.º 2, pp. 330-353, 2024, doi: [10.1108/SASBE-04-2022-0068](https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2022-0068).
- [5] Š. Markulik, M. Šolc y M. Filo, “Implementation of Quality Tools in Mechanical Engineering Piece Production”, *Appl. Sci.*, vol. 14, n.º 2, pp. 944, 2024. doi: [10.3390/app14020944](https://doi.org/10.3390/app14020944).
- [6] R. Z Radin, J. Y. Tiong, N. Ahmad, y J. Dahala, “Development of framework integrating ergonomics in Lean’s Muda, Muri, and Mura concepts”, *Prod. Plan. Control*, vol. 35, n.º 12, pp. 1466-1474, 2023, doi: [10.1080/09537287.2023.2189640](https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2189640).
- [7] S. Baysan, O. Kabadurmus, E. Cevikcan, S. I. Satoglu y M. B. Durmusoglu, “A simulation-based methodology for the analysis of the effect of lean tools on energy efficiency: An application in power distribution industry”, *J. Clean. Prod.*, vol. 211, pp. 985-908, 2019, doi: [10.1016/j.jclepro.2018.11.217](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.217).
- [8] R. Carvalho et al., “Analysis of root causes of problems affecting the quality of hospital administrative data: A systematic review and Ishikawa diagram”, *Informatics*, vol. 156, n.º 104584, 2021, doi: [10.1016/j.ijmedinf.2021.104584](https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2021.104584).
- [9] K. Adib, M. Mazouzi y S. Elyoussoufi, “Investigation of annual trucks fatal accidents in El Hajeb province of Morocco using TRIZ-Ishikawa diagram”, *Heliyon*, vol. 10, n.º 4, e26295, 2024, doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e26295](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26295).

- [10] M. Agrawal, "Impact of Ishikawa on the analysis of data in mechanical industries", *Mater. Today Proc.*, vol. 81, parte 2, pp. 1040-1045, 2023, doi: [10.1016/j.matpr.2021.04.376](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.376).
- [11] R. Hernández-Sampieri, *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de México, México: Mc Graw Hill Educación, 2018.
- [12] R. E. Stake, *The Art of Case Study Research*. Londres: SAGE, 1999.
- [13] V. Braun y V. Clarke, "Using thematic analysis in psychology", *Qual. Res. Psychol.*, vol. 3, n.º 2, pp. 77-101, 2006.
- [14] D. Rodríguez, *Diagnóstico organizacional*, 8.ª ed. Chile: Alphaomega, 2016.
- [15] S. Aguilar y J. Barroso, "La triangulación de datos como estrategia en investigación educativa", *Pixel-bit*, n.º 47, pp. 73-88, 2015.
- [16] O. H. Pedraza, "Un enfoque sistémico sobre los factores determinantes de la productividad", *Economía y Sociedad*, año IV, n.º 5, pp. 151-175, 1999.
- [17] J. Prokopenko, *Productivity management. A practical Handbook*. Ginebra: International Labour Organisation, 1987.
- [18] J. Medina, "Modelo integral de productividad, aspectos importantes para su implementación", *Revista EAN*, vol. 69, pp. 110 -119, 2010.
- [19] N. G. Mankiw, *Principios de Economía*. México: Cengage Learning, 2021.
- [20] E. Brynjolfsson y A. McAfee, *La segunda era de las máquinas: trabajo, progreso y prosperidad en una época de tecnologías brillantes*. Nueva York: WW Norton & Company, 2014.
- [21] L. Socconini, *Lean Manufacturing. Paso a Paso*. Valencia: Marge books, 2019.
- [22] A. Everett, *Productividad y Calidad*. México: Trillas, 1994.
- [23] P. Mali, *Improving total productivity, MBO strategies for business government, and not-for-profit organizations*. Nueva York: Wiley, 1978.
- [24] E. Mercado, E. A. Díaz y M. D. Flores, *Productividad: Base de la Competitividad*. México: Limusa, 1997.
- [25] F. W. Taylor, *Management Científico*. Barcelona: Editorial Orbis, 1986.
- [26] Z. Torres, "La productividad en las industrias micros y pequeñas de dulces y chocolates, ubicadas en el D.F. y parte metropolitana", tesis doctoral, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 1997.
- [27] R. Sutermeister, *People and Productivity*. Nueva York: McGraw-Hill, 1976.
- [28] M. M. Cequea, C. Rodríguez y M. A. Núñez, "The productivity from a human perspective: Dimensions and factors", *Intangible capital*, vol. 7, n.º 2, pp. 549-584, 2011, doi: [10.3926/ic.194](https://doi.org/10.3926/ic.194).
- [29] A. Nagi, y S. Altarazi, "Integration of value stream map and strategic layout planning into DMAIC approach to improve carpeting process" *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 10, n.º 1, pp. 74-97, 2017, doi: [10.3926/jiem.2040](https://doi.org/10.3926/jiem.2040).
- [30] P. Ruiz-López, C. Rodríguez-Salinas y J. Alcalde-Escribano, "Análisis de causas raíz. Una herramienta útil para la prevención de errores", *Revista de Calidad Asistencial*, vol. 20, n.º 2, pp. 71-79, 2005.
- [31] A. Palange y P. Dhattrak, "Lean Manufacturing a vital tool to enhance productivity in manufacturing", *Mater. Today Proc.*, vol. 46, n.º 1, pp. 729-736, 2021, doi: [10.1016/j.matpr.2020.12.193](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.193).
- [32] R. E. Joseph, N. Kanya, K. Bhaskar, J. F. Xavier, S. Sendilvelan, M. Prabhakar, N. Kanimozhi y S. Geetha, "Analysis on productivity improvement, using Lean Manufacturing concept", *Mater. Today Proc.*, vol. 45, parte 7, pp. 7176-7182, 2021, doi: [10.1016/j.matpr.2021.02.412](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.412).
- [33] L. Mulugeta, "Productivity improvement through Lean Manufacturing tools in Ethiopian garment manufacturing company", *Mater. Today Proc.*, vol. 37, parte 2, pp. 1432-1436, 2021, doi: [10.1016/j.matpr.2020.06.599](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.599).

- [34] G. Jimenez et al., "Improvement of Productivity and Quality in the Value Chain through Lean Manufacturing – a case study", *Procedia Manuf.*, vol. 41, pp. 882-889, 2019, doi: [10.1016/j.promfg.2019.10.011](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.011).
- [35] O. Voronova, "Improvement of warehouse logistics based on the introduction of Lean Manufacturing principles", *Transp. Res. Proc.*, vol. 63, pp. 919-928, 2022, doi: [10.1016/j.trpro.2022.06.090](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.090).
- [36] A. Mofolasayoa, S. Younga, P. Martineza y R. Ahmada, "How to adapt lean practices in SMEs to support Industry 4.0 in manufacturing", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 200, pp. 934-943, 2022, doi: [10.1016/j.procs.2022.01.291](https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.291).
- [37] M. A. Habib, R. Rizvan y S. Ahmed, "Implementing Lean Manufacturing for improvement of operational performance in a labeling and packaging plant: A case study in Bangladesh", *Results Eng.*, vol. 17, pp. 2590-1230, 2023, doi: [10.1016/j.rineng.2022.100818](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100818).
- [38] N. Kumar, S. S. Hasan, K. Srivastava, R. Akhtar, R. K. Yadav y V. K. Choubey, "Lean Manufacturing techniques and its implementation: A review", *Mater. Today Proc.*, vol. 64, parte 3, pp. 1188-1192, 2022, doi: [10.1016/j.matpr.2022.03.481](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.481).
- [39] M. Deshmukh, A. Gangele, D.K. Gope y S. Dewangan, "Study and implementation of Lean Manufacturing strategies: A literature review", *Mater. Today Proc.*, vol. 62, parte 3, pp. 1489-1495, 2022, doi: [10.1016/j.matpr.2022.02.155](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.155).
- [40] M. T. Hossen, M. Rafiquzzaman y Y. Arafat, "Productivity improvement through lean tools in cement industry – A case study", *Heliyon*, vol. 11, n.º 3, e42057, 2025, doi: [10.1016/j.heliyon.2025.e42057](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42057).
- [41] E. L. Vargas y J. W. Camero, "Aplicación del Lean Manufacturing (5s y Kaizen) para el incremento de la productividad en el área de producción de adhesivos acuosos de una empresa manufacturera", *Ind. Data*, vol. 24, n.º 2, pp. 249-271, 2021, doi: [10.15381/idata.v24i2.19485](https://doi.org/10.15381/idata.v24i2.19485).
- [42] J. Ortiz, J. Salas, L. Huayanay, R. Manrique y E. Sobrado, "Modelo de gestión para la aplicación de herramientas Lean Manufacturing para la mejora de la productividad en una empresa de confección de ropa antífama de Lima – Perú", *Ind. Data*, vol. 25, n.º 1, pp. 103-135, 2022, doi: [10.15381/idata.v25i1.21501](https://doi.org/10.15381/idata.v25i1.21501).
- [43] L. M. Perugachi, "Implementación de Lean Manufacturing en la mediana empresa textil de Antonio Ante: estrategias, desafíos y beneficios", *Vitalia*, vol. 5, n.º 2, pp. 331-359, 2024, doi: [10.61368/r.s.d.h.v5i2.190](https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v5i2.190).
- [44] J. R. Gómez, A. Mares y J. D. Rocha, "Aplicación de técnicas Lean Manufacturing para la reducción de desperdicios en un centro de acopio de leche", *Pistas Educativas*, vol. 46, n.º 148, pp. 400-418, 2024.
- [45] C. Campos, J. M. Palomino y G. A. Montoya, "Metodología 5S para incrementar de la productividad en el almacén de una empresa ferretera en Lima", *Llamkasun*, vol. 5, n.º 1, pp. 16-19, 2024, doi: [10.47797/llamkasun.v5i1.127](https://doi.org/10.47797/llamkasun.v5i1.127).
- [46] I. L. Hernández, Z. Castillo, A. Zapata y C. A. Alcalá, "Identificación y Reducción de Tiempos Muertos como Estrategia de Productividad en la Industria Metal-Mecánica", *Ciencia Latina*, vol. 8, n.º 5, pp. 12742-12753, 2024, doi: [10.37811/cl_rcm.v8i5.14726](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14726).
- [47] J. Poveda y M. Guardiola, "Análisis de causa raíz. Técnicas y relación con los sistemas de gestión y las no conformidades", *3C Tecnología*, vol. 8, n.º 2, pp. 84-97, 2019, doi: [10.17993/3ctecno/2019.v8n2e30.84-97](https://doi.org/10.17993/3ctecno/2019.v8n2e30.84-97).

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) de México, así como a la Universitat Politècnica de València (UPV) en España, por el apoyo para concluir adecuadamente la investigación expuesta en el presente artículo.

Análisis logístico en última milla del comercio minorista en el centro histórico de Popayán, Colombia

Last-mile logistics analysis of retail trade in the historic center of Popayán, Colombia

Nelson Emilio Paz Ruiz¹ , Juan Sebastian Garcia Pajoy¹ , Anyi Daniela Hernández Ordoñez¹ ,
Zuly Alexandra Gómez Camayo¹ , Mario Chong Chong² 

¹Unicomfauca, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Industrial, Popayán, Cauca-Colombia

²Universidad del Pacífico

RESUMEN

La distribución de mercancías en ciudades intermedias de Latinoamérica se ha convertido en un desafío logístico que involucra diferentes factores: intereses de las partes interesadas, infraestructura disponible, cambios en las cadenas de suministro, tendencias en tecnología y demanda de productos por parte de los consumidores. Dada a la falta de integración entre el sector privado y público, los tomadores de decisiones optan por medidas poco eficientes para la regulación de la distribución de mercancías de comercios minoristas. Considerando que el comercio minorista es de gran importancia económica en mercados emergentes como el Latinoamericano, esta investigación analizó las operaciones de distribución en última milla del comercio minorista en el centro histórico de Popayán, Colombia. La metodología fue de tres fases: identificar, evaluar y comprender la logística de los establecimientos comerciales en el área de estudio. Como resultado relevante, se encontraron diferencias significativas entre las subzonas, con una distribución que depende del tipo de producto. Por tanto, este estudio puede servir de base en la formulación de políticas públicas para esta ciudad, con base en métodos de otros estudios realizados en ciudades latinoamericanas. La línea de investigación tiene un amplio campo por recorrer en el estudio de las entregas de última milla y logística urbana.

PALABRAS CLAVE: comercio minorista; distribución en última milla; ciudad intermedia; ciudad intermedia latinoamericana.

ABSTRACT

The distribution of goods in intermediate cities in Latin America has become a logistical challenge that involves different factors: stakeholder interests, available infrastructure, changes in supply chains, technological trends and consumer demand for products. Given the lack of integration between the private and public sectors, decision makers opt for inefficient measures to regulate the distribution of goods from retail stores. Considering that retail trade is of great economic importance in emerging markets such as Latin America, this research analyzed the last-mile distribution operations of retail trade in the historic center of Popayán, Colombia. The methodology was three-phased: identify, evaluate and understand the logistics of commercial establishments in the study area. As a relevant result, significant differences were found between the sub-zones, with a distribution that depends on the type of product. Therefore, this study can serve as a basis for the formulation of public policies for this city, based on methods from other studies carried out in Latin American cities. The line of research has a wide field to cover in the study of last mile deliveries and urban logistics.

KEYWORDS: retail; last-mile deliveries; mid-city; Latin American middle city.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Nelson Emilio Paz Ruiz

INSTITUCIÓN: Unicomfauca / Facultad de Ingeniería

DIRECCIÓN: Calle 4 #8-30, C. P. 190001, Popayán, Cauca, Colombia

CORREO ELECTRÓNICO: npaz@unicomfauca.edu.co

Fecha de recepción: 28 de septiembre de 2024. **Fecha de aceptación:** 5 de marzo de 2025. **Fecha de publicación:** 10 de marzo de 2025.



I. INTRODUCCIÓN

El intercambio de bienes y servicios ha evolucionado de manera significativa en los últimos 20 años. La única manera que un consumidor podría comprar un producto era cuando se acercaba a un minorista. En otras palabras, el cliente tenía que ir al punto de venta para adquirir el bien [1].

La región de América Latina está emergiendo como un atractivo mercado de comercio electrónico. La pandemia fue un catalizador para el crecimiento del sector del comercio electrónico. Los estudios muestran que casi 13 millones de personas en América Latina realizaron una transacción minorista en línea por primera vez en 2020, con un crecimiento significativo en Argentina (79 %), Brasil (35 %) y México (27 %) [2]. Esto proliferó el crecimiento del sector minorista.

De igual forma, debido a cambios en los hábitos de compra y consumo, el espacio físico que ocupan los comercios se ha puesto en discusión. En la Figura 1 se muestra que el espacio destinado al comercio minorista por persona difiere considerablemente. “Si comparamos el espacio de México (10 pies por habitante) y otros países latinos que se observan son Colombia y Chile con 6.0 y 5.4 pies respectivamente; mientras que Argentina y Perú solo registran una cifra de 1.1 y 0.8. pies” [3], se puede afirmar que el espacio por establecimiento es relativo a su evolución en estos mercados.

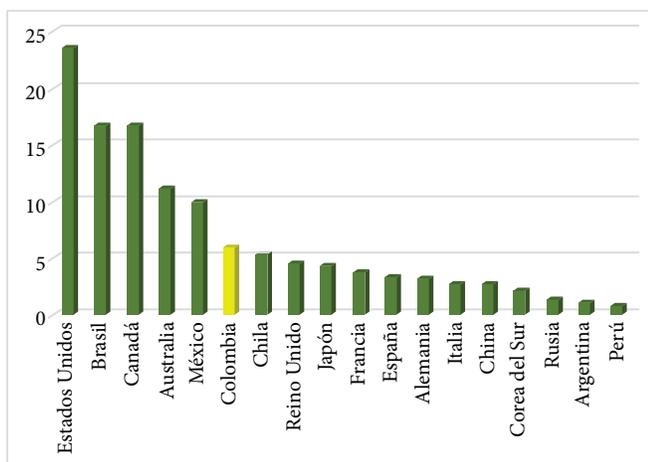


Figura 1. Espacio destinado al comercio minorista por persona (pies) (2020) Fuente: elaboración propia a partir de León et al. [3].

En la economía latinoamericana, la participación de mercado del canal tradicional es alta dentro del sector minorista y ventas al detalle de productos. En conjunto,

las nano-tiendas, pequeños comercios que suplen necesidades diarias del consumidor, y el canal minorista forman el nicho de mercado más grande del mundo, con 50 millones de puntos de venta operando en América Latina, Asia y África [4] (Figura 1). Los establecimientos comerciales multiservicios, kioscos y ventas de enseres desarrollan actividades económicas importantes dentro de las zonas urbanas y son un medio de relacionamiento para las empresas con los consumidores. Esta misma naturaleza del canal tradicional requiere que las compañías supervisen de cerca la operación de distribución en la última milla, etapa en la cual el producto se transporta desde un centro de distribución al consumidor o destino final [5].

América Latina es una de las regiones con mayor índice de urbanización; según datos de Naciones Unidas el 81 % de la población del continente reside en áreas urbanas [6]. El crecimiento demográfico de estas zonas se traduce en una mayor demanda por bienes y servicios. Y al mismo tiempo se genera la necesidad por desarrollar estrategias logísticas que satisfagan el nivel de consumo de las personas, en cuanto a disponibilidad, calidad y precios.

Actualmente, la distribución de mercancías se enfrenta a infraestructuras congestionadas y, en muchos casos, precarias, particularmente en calles y zonas de estacionamiento, añadiendo complejidad a las actividades de distribución de mercancías e incrementando las externalidades negativas en las ciudades, como la congestión, contaminación, emisión de gases de efecto invernadero y el ruido [7].

En Colombia, cerca del 74 % de sus habitantes que viven con ingresos menores a USD 370 mensuales realizan sus compras exclusivamente en tiendas minoristas [8]. Este panorama es más frecuente en ciudades intermedias como Popayán, que alberga a más del 85 % de su población en su zona urbana, lo que ha implicado un aumento en las operaciones logísticas en la zona central de la ciudad [9]. La zona central de la ciudad se caracteriza por su infraestructura colonial, la presencia de edificios gubernamentales, instituciones de educación superior y una gran cantidad de establecimientos comerciales, tanto formales como informales; en consecuencia, este sector se ha convertido en una zona de difícil acceso y de alta congestión para la movilidad de vehículos motorizados y principalmente para aquellos que transportan carga.

Con base en lo antes señalado, puede indicarse que el presente estudio tuvo como objetivo principal analizar las prácticas logísticas en la distribución de última milla del comercio minorista del centro de la ciudad de Popayán. A partir de una revisión de literatura, como los estudios de Winkelbach [6], García [5] y Paz [9], se procedió a conocer las percepciones de las partes interesadas (comerciantes y transportistas) con el fin de sentar bases para posibles estrategias de carga urbana y mejorar la distribución de mercancías en este importante sector de la ciudad.

Finalmente, considerando que la mayoría de las investigaciones en última milla y logística urbana se centran en grandes ciudades, el valor agregado del presente artículo radica en aportar a la literatura en logística urbana, con énfasis en el comercio minorista en una ciudad intermedia Latinoamericana.

II. METODOLOGÍA

La distribución en última milla de mercancías es uno de los principales retos que afrontan las empresas y comerciantes. Diferentes estudios [7], [10] estiman que entre el 28 % y el 75 % de los costos totales de la cadena de suministro ocurren en la carga y entrega de mercancía. Por ende, el diseño metodológico se enfoca en tres fases: 1) contextualización del sector, donde se identifican los tipos de comercios; 2) evaluación de la distribución de mercancías, se reconocen las prácticas logísticas de los establecimientos comerciales y sus interacciones a partir de encuestas y 3) análisis de datos, con el fin de poder identificar las brechas existentes en la distribución y posibles mejoras acordes a las percepciones de las partes interesadas.

A continuación, la [Figura 2](#) describe la metodología planteada en el estudio.

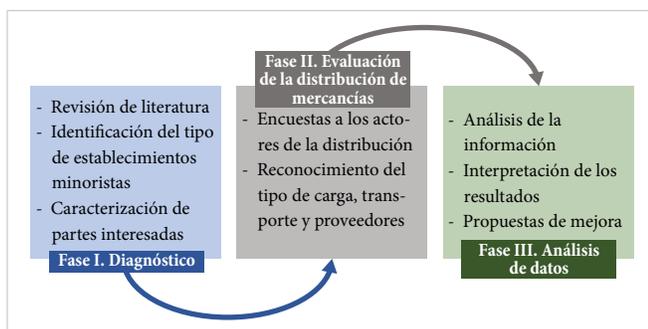


Figura 2. Metodología de la investigación. Fuente: elaboración propia.

A. DIAGNÓSTICO

Se inició con una revisión de literatura, con la cual se obtuvo una base para la investigación, en la cual se encontró una tendencia en publicaciones relacionadas con la distribución de última milla y estrategias orientadas a la sostenibilidad de las actividades de entrega de mercancías [3]-[5]. A partir de un trabajo de campo, se logró la identificación de la actividad comercial y de servicios en el centro histórico de la ciudad, lo cual permitió una zonificación del área de estudio. De igual forma, se caracterizó a las partes interesadas en la distribución de mercancías que intervienen directa o indirectamente en esta actividad.

B. EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS

En la segunda fase de la investigación se evaluó la distribución de mercancías mediante el uso de encuestas [11] a las partes interesadas del transporte de carga urbano. En este caso se optó por los comerciantes y transportadores, se procuró identificar el tiempo y frecuencia de entrega de mercancías, la principal causa de generación de externalidad negativa en la operación y el tipo de vehículo, entre otros indicadores. Con ello se obtuvo un panorama de la distribución actual en última milla en el centro histórico de Popayán.

C. ANÁLISIS DE DATOS

Finalmente, en la tercera fase se requirió entender y comprender la información recolectada en las fases previas, con el fin de interpretar los resultados de forma adecuada, que condujeran a la generación de propuestas de mejora en la distribución de última milla en el centro de la ciudad y que ayudara en la formulación de políticas públicas coherentes con las características y percepciones de los establecimientos comerciales y las partes interesadas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las operaciones de distribución y entrega en el centro de la ciudad son afectadas por factores que inciden en el tiempo que toma completar el proceso: el alto tráfico de vehículos, la saturación en la ocupación de las áreas de estacionamiento permitidas y la infraestructura vial de las calles que limitan el tránsito de vehículos de carga y camiones. Por esta razón, la investigación se

orientó a las operaciones de logística urbana, enfocada en la distribución de productos manufacturados que se comercializan en las tiendas minoristas ubicadas en el casco histórico de la ciudad de Popayán. Esta área constituye un sector de alta densidad de establecimientos comerciales en sus diferentes formatos (establecimientos multiservicios, tiendas de ropa, entre otros) y una alta congestión vehicular. La zona del área de estudio, que se visualiza en la **Figura 3**, tiene una extensión de 1.03 km².



Figura 3. Delimitación del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

A. DIAGNÓSTICO

El centro histórico de la ciudad de Popayán se caracteriza por un importante desarrollo del turismo mezclado con el uso del suelo comercial y residencial, donde la economía radica en el sector comercio (53.3 %), servicios (18.4 %), restaurantes y hoteles (11 %), educación (7.4 %), manufactura (6.5 %) y otros (3 %). Sin embargo, la infraestructura designada para uso vehicular se limita a carreteras estrechas, la mayoría con solo un carril por dirección, o calles de un solo sentido.

En 2019 se registraron 27 988 unidades productivas en el centro histórico, un incremento del 2.7 % respecto a las 27 257 unidades identificadas el año anterior [12]. Esto supera el total nacional en 0.6 puntos porcentuales, lo que demuestra que la distribución comercial del área está generando nuevos mercados (**Figura 4**).

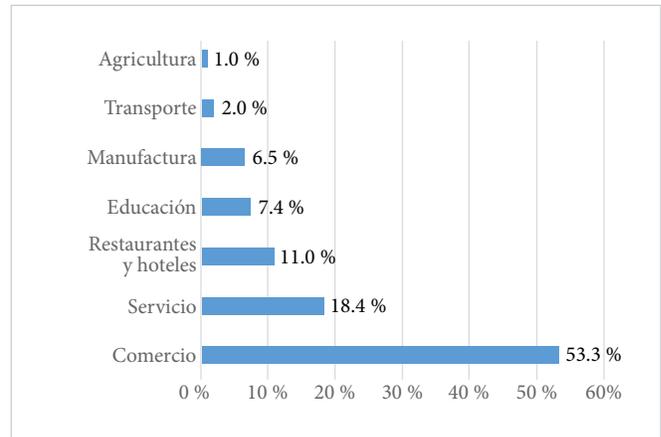


Figura 4. Actividad económica en la zona centro de Popayán. Fuente: elaboración propia a partir de [12].

B. EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS

Como estrategia para facilitar la recolección de información en las encuestas a las nano-tiendas, se dividió el área de estudio en cinco subzonas, delimitando la correspondiente al centro histórico con base a características visibles de cada una de ellas. Es así como las subzonas se definieron en los sectores de Plaza Principal (P), Zona Universitaria (U), Zona Residencial (R), Zona comercial sector histórico (H) y Zona comercial barrio Valencia (V). Esta división en el mapa se muestra en la **Figura 5**.



Figura 5. División de subzonas de estudio. Fuente: elaboración propia.

Un factor importante que caracteriza cada subzona es el tipo de comercio y carga que se encuentra en cada área. La **Tabla 1** muestra las particularidades de cada sector estudiado.

TABLA 1
DESCRIPCIÓN DE SUBZONAS

SUBZONA	CARACTERÍSTICAS	TIPO DE COMERCIO
Plaza Principal (P)	En esta área se localizan la mayoría de los edificios gubernamentales de la ciudad, su infraestructura es colonial y se encuentra la plaza principal, parque Caldas, es el punto de encuentro todos sus habitantes y visitantes.	Su dinámica comercial radica en bancos, cafeterías y establecimientos multiservicios.
Zona Universitaria (U)	Se encuentran la mayoría de las instalaciones de instituciones de educación superior (universidad del Cauca, universidad autónoma y el SENA).	Cafeterías, restaurantes, papelerías, ventas informales (vendedores ambulantes).
Zona Residencial (R)	En esta área converge la zona residencial del centro histórico de la ciudad, se caracteriza por tener casas familiares, escuelas y tiendas <i>nano-stores</i> (tiendas de barrio).	Tiendas de barrio, supermercados, farmacias, restaurantes.
Zona comercial sector histórico (H)	Es la zona de mayor extensión, se caracteriza por tener un comercio minorista del tipo de establecimientos multiservicio, tiendas de ropa y calzado, farmacias, supermercados, cafeterías y restaurantes, sus calles en su mayoría son de un solo carril, esto dificulta la movilidad en este sector y el incremento de externalidades negativas producidas por operaciones de carga.	Se encuentran la mayoría de los negocios minoristas de la zona de estudio, el tamaño de carga que se maneja difiere por el tipo de establecimiento y la temporada de ventas.
Zona comercial barrio Valencia (V)	En este sector se encuentran los establecimientos de venta de productos para la decoración del hogar, mueblerías, ferreterías, talleres de repuestos para automóviles y entidades de salud.	En esta zona se tienen la mayoría de las externalidades negativas producidas por el transporte de carga urbano en la zona, dada la limitada infraestructura y el tamaño de carga (ejemplo, ferreterías y elementos para la construcción, incrementan significativamente las disrupciones en la distribución de última milla.

Seguido a la zonificación por sectores, se aplicó una encuesta a 51 comercios minoristas del sector, mediante un análisis de conglomerados se podrá llevar a una conclusión importante en la zona de estudio.

C. ANÁLISIS DE DATOS

Los datos fueron recolectados a través de encuestas en el centro histórico de Popayán, mediante un trabajo de campo durante una semana, en el mes de septiembre de 2023, con individuos seleccionados aleatoriamente. En total se aplicaron 51 cuestionarios. La [Figura 6](#) muestra que el 45 % de los comercios minoristas son establecimientos multiservicios, 22 % tiendas de barrio, 14 % tiendas de ropa, 12 % ferreterías y 8 % farmacias.

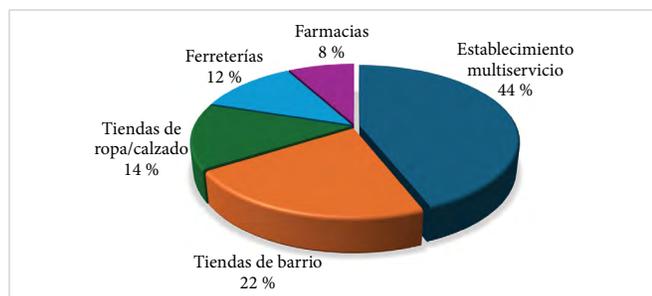


Figura 6. Tipos de establecimientos comerciales. Fuente: elaboración propia.

De igual forma, la información de la [Figura 6](#) se asemeja a las especificaciones de la [Tabla 1](#), donde en la zona R se encuentran la mayoría de las tiendas de barrio y en V ferreteras, sin embargo, los establecimientos multiservicio están en todas las subzonas. Asimismo, el trabajo de campo indica que la mayoría de los establecimientos encuestados son creados por emprendimiento o negocios familiares. Se observan diferencias en la hora de apertura de los comercios: en V abren a las 8:00 a. m., en comparación con H, con apertura a las 9:00 a. m. En cuanto a la cantidad de personas que entregan mercancías, el 61 % se realiza con 2 personas, 24 % 1 persona, 12 % 3 personas, y solo el 4 % utilizan más de 3. Lo anterior varía respecto al tipo de comercio y carga, dado a que difiere V de U, H de R y V de H.

Respecto al transporte de distribución de mercancías, en la [Figura 7](#) se muestra que el más utilizado es el camión de carga liviana (Piaggio), seguido del de carga pesada, lo cual se evidencia en H, V y parte de R, en comparación con U y P que usan moto-camión y camioneta tipo van para esta actividad.

Finalmente, en la [Figura 8](#) se evidencia que el 55 % se demora menos de 30 min en comparación con el 4 % que se tarda más de 1 hora en realizar la operación.

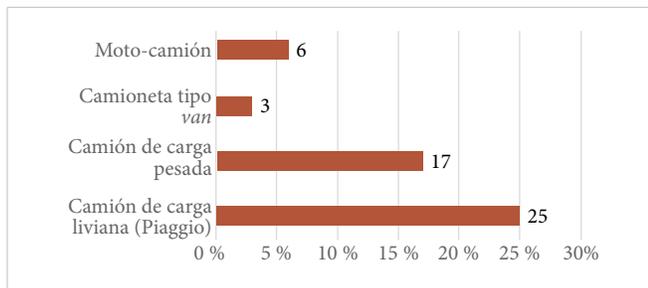


Figura 7. Tipo de transporte utilizado en distribución de mercancías. Fuente: elaboración propia.

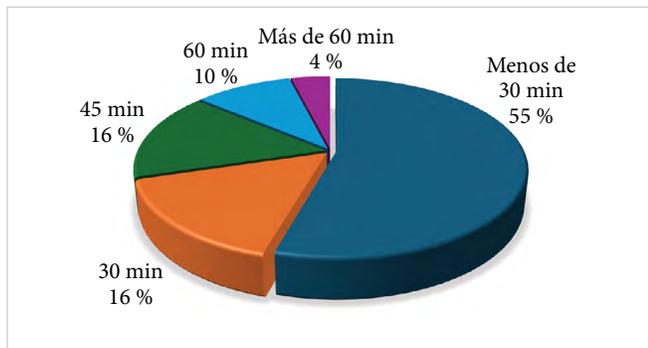


Figura 8. Tiempo de entrega de mercancías. Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que el 75 % de los encuestados están de acuerdo en la ausencia de zonas para descarga de mercancías, debido a que el 99 % realiza sus operaciones en la vía pública, lo que usualmente ocasiona la mayoría de las externalidades negativas en el centro histórico de Popayán.

Esta investigación buscó aportar a la relación de las políticas públicas que aborden aspectos como la infraestructura vial y la regulación de horarios, considerando las características de las actividades de distribución de mercancías en última milla, complementando a García [6] y Paz [9] en cuanto a sentar bases para políticas públicas para la distribución de mercancías del comercio minorista en el centro de la ciudad de Popayán.

IV. CONCLUSIONES

Se cumple con el objetivo de la investigación al analizar la distribución de última milla en el centro de la ciudad de Popayán. Mediante la división por subzonas se podrá llevar a cabo un análisis detallado del comercio minorista y la distribución de mercancías por parte de los proveedores, donde el 45 % de los comercios son establecimientos multiservicio, de los cuales el 49 % utiliza camiones tipo Piaggio para la distribución de mercan-

cías. Asimismo, se pone de manifiesto las diferencias entre las zonas, donde H y V cuentan con la mayoría de los comercios minoristas del centro histórico.

Establecer estrategias de distribución integrales a los objetivos de las partes interesadas al proceso de entrega de mercancías en esta zona de la ciudad, que es de alta actividad comercial y congestión vehicular, podría permitir el inicio de una gestión logística que involucre a los principales actores participantes y mejore el proceso en beneficio de la ciudadanía. Una de las estrategias capaz de dar funcionalidad a la carga y descarga adecuada es la optimización de rutas, mediante un sistema de ruteo indicando a los distribuidores los trayectos adecuados para su reparto, ayudando a minimizar los costos.

Cabe mencionar que este estudio seguirá efectuándose hasta alcanzar 800 comercios minoristas ubicados en la ciudad de Popayán. Con ello se podrá proponer políticas públicas que mejoren la logística urbana en el centro histórico de la ciudad.

REFERENCIAS

- [1] C. E. Lizarzaburu, “Evolución y perspectivas del *e-commerce* para el comercio minorista en el Perú (2022)”, [Repositorio Institucional ULima], accedido: sept. 2023. Disponible en: https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/17905/EcommercePeru_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [2] “Mercado Latinoamericano de Minorista”. *informesdeexpertos.com*. [En línea]. Accedido: sept. 21, 2023. Disponible en: <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-minorista-de-america-latina>
- [3] D. León, “Retail en Latinoamérica y tendencias del sector”. Newmark. [En línea]. Accedido: sept. 21, 2023. Disponible en: <https://nmrk.lat/retail-y-tendencias-en-america-latina/>
- [4] D. Merchán y E. E. Blanco, “The Near Future of Megacity Logistics. Overview of Best-Practices, Innovative Strategies and Technology Trends for Last-Mile Delivery”, MIT Center for Transportation & Logistics, reporte técnico, sept. 2015. Accedido: sept. 21, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28441.42083>

- [5] M. Winkenbach et al., “City Logistics Policy Toolkit: A Study of Three Latin American Cities”, MIT, Cambridge, MA, Report to the World Bank, 2018. Accedido: sept. 21, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/pt/413421568727734853/pdf/City-Logistics-Policy-Toolkit-A-Study-of-Three-Latin-American-Cities.pdf>
- [6] J. Garcia-Pajoy, N. Paz Ruiz, M. Chong y A. Luna, “Utilising PLS-SEM and Km² Methodology in Urban Logistics Analysis: A Case Study on Popayán, Colombia”, *Sustainability*, vol. 15, n.º 17, en. 2023, doi: [10.3390/su151712976](https://doi.org/10.3390/su151712976).
- [7] N. Arvidsson y A. Pazirandeh, “An ex ante evaluation of mobile depots in cities: A sustainability perspective”, *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 11, n.º 8, pp. 623-632, 2017, doi: [10.1080/15568318.2017.1294717](https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1294717).
- [8] “Características de los canales de comercio minorista en Colombia”. Sintec Consulting. Accedido: sept. 21, 2023. [En línea]. Disponible en: https://sintec.com/p_innovador/comercio-minorista-en-colombia/
- [9] H. P. Orozco, J. A. Segura, N. Paz, Y. Anaconda, J. S. García, y M. Chong, “Urban Logistic Analysis in the Commercial Area and Proposal of a Policy for Loading and Unloading of Goods in Popayán City”, en *Supply Chain Management Strategies and Methodologies: Experiences from Latin America*, J. L. García, D. F. Manotas, R. G. González-Ramírez, M. G. Chong e I. de Brito, eds. Springer, 2023, pp. 381-403.
- [10] S. Lauenstein y C. Schank, “Design of a Sustainable Last Mile in Urban Logistics—A Systematic Literature Review”, *Sustainability*, vol. 14, n.º 9, 2022, doi: [10.3390/su14095501](https://doi.org/10.3390/su14095501).
- [11] J. Amaya, J. Arellana y M. Delgado-Lindeman, “Stakeholders perceptions to sustainable urban freight policies in emerging markets”, *Transp. Res. Part Policy Pract.*, vol. 132, pp. 329-348, 2020, doi: [10.1016/j.tra.2019.11.017](https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.11.017).
- [12] “Plan de Ordenamiento Territorial Popayán”. Alcaldía de Popayán. Accedido: may. 5, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://pot-popayan-alcaldiapopayan.hub.arcgis.com/datasets/2bb20d4301a349a3a5ab2aaf4937dfc1>

Optimización del proceso de distribución de negocios en el emporio comercial de Gamarra

Optimization of the distribution process of business in the Gamarra comercial emporium

Carlos Adrián Ubillús Lazóriga¹ ✉ , Angie Shusey Pantigoso Nicho¹ , Liz Stephanie Rodríguez Bojórquez¹ ,
Aldino Ronaldo Santiago Maldonado¹ , Samir William Mantari Salazar¹ 

¹Universidad del Pacífico, Facultad de Ingeniería, Lima, Perú

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es optimizar el proceso de distribución en los negocios de una galería del emporio comercial de Gamarra, en Perú, mediante el análisis de su situación actual. Para ello, se utilizó una metodología que incluyó una entrevista semiestructurada con la propietaria de una de las tiendas, así como el desarrollo de un modelo matemático que permita evaluar los costos actuales y, con ello, proyectar los beneficios de implementar un software de gestión logística con tecnología telemática. Como resultado, se obtuvo que la implementación del software, junto con la tercerización del proceso de distribución, podría reducir los costos en un 30 % en comparación con la situación actual, lo que implicaría una mejora sustancial en la situación AS IS de muchos de estos negocios. Sin embargo, se identificaron limitaciones, tales como la reticencia de las tiendas a proporcionar datos, así como la necesidad de un plan complementario para garantizar que los resultados estimados sean alcanzables. Este plan incluye estrategias de capacitación en el uso del software, el monitoreo continuo de su impacto y la adaptación de los procesos según las necesidades específicas de cada tienda.

PALABRAS CLAVE: Gamarra; distribución; software; reestructuración; optimización.

ABSTRACT

The objective of this research is to optimize the distribution process in the businesses of a gallery in the Gamarra commercial emporium, Peru, by analyzing its current situation. To do so, a methodology was used that included a semi-structured interview with the owner of one of the stores, as well as the development of a mathematical model that allows the evaluation of current costs and, with it, project the benefits of implementing logistics management software with telematics technology. As a result, it was found that the implementation of the software, together with the outsourcing of the distribution process, could reduce costs by 30% compared to the current situation, which would imply a substantial improvement in the AS IS situation of many of these businesses. However, limitations were identified, such as the reluctance of stores to provide data, as well as the need for a complementary plan to ensure that the estimated results are achievable. This plan includes training strategies in the use of the software, continuous monitoring of its impact and adaptation of the processes according to the specific needs of each store.

KEYWORDS: Gamarra; distribution; software; restructuring; optimization.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Carlos Adrián Ubillús Lazóriga
INSTITUCIÓN: Universidad del Pacífico / Facultad de Ingeniería
DIRECCIÓN: Jr. Gral. Jirón Luis Sánchez Cerro 2141, Lima - Perú
CORREO ELECTRÓNICO: ca.ubillusl@alum.up.edu.pe

Fecha de recepción: 21 de agosto de 2024. **Fecha de aceptación:** 13 de febrero de 2025. **Fecha de publicación:** 21 de marzo de 2025.



I. INTRODUCCIÓN

La competitividad del mercado está en crecimiento, por lo que es necesario que una empresa implemente estrategias que ayuden a contrarrestar este efecto y proporcionen alternativas para aumentar la productividad. Una de estas opciones es mencionada por Benites *et al.* [1], quienes precisan que un clúster es un conjunto de empresas agrupadas geográficamente y pertenecientes a sectores afines que cooperan y compiten a la vez. Con ello, los autores sostienen que la formación de clústeres está arraigada a un aumento de la productividad tanto conjunta como individual.

En un sentido más dinámico, Ketels [2] habla de esta agrupación y lo relaciona con el acceso a nuevas ideas y menores costos asociados, lo que también conduce a un aumento de la productividad. En este sentido, ambas investigaciones aportan a la idea de que la formación de un clúster sirve como herramienta para aumentar la competitividad de las empresas. Este concepto se relaciona directamente con las tiendas de la galería Markata, las cuales pueden funcionar como un clúster y perseguir un objetivo en común, como la reducción de costos, dado que pertenecen al mismo rubro y tienen un funcionamiento similar.

Por otro lado, la literatura existente resalta la importancia de la logística en micro y pequeñas empresas (MYPES) como una herramienta estratégica para aumentar su competitividad, especialmente cuando se incorporan tecnologías innovadoras, como un software de gestión logística. El estudio de Vélez [3], por ejemplo, abarca el diseño de una mejora para este modelo en MYPES dedicadas al consumo masivo en la ciudad de Guayaquil. Esta investigación se basa en que las empresas no consideran su logística de distribución como una herramienta de crecimiento empresarial, por lo que ignoran una parte importante de su cadena de suministro. El autor enfatiza que los propietarios o administradores de las PYMES se muestran reacios o asustados a los nuevos conocimientos e innovaciones, por lo que prefieren continuar con su modelo existente, obviando la aplicación de tecnologías. Al finalizar su análisis, identificó una gran brecha entre el modelo existente con respecto al modelo mejorado de la logística de distribución, por lo que concluye que es una alternativa útil. En este sentido, la mejora en esta parte de la cadena de suministros incrementa los beneficios y la competitividad de las empresas, cuyo enfoque es el que se dio a esta investigación.

La mejora del modelo logístico antes mencionado puede concretarse desde varias perspectivas. Una de ellas, y que fue adoptada en esta investigación, es la implementación de un software que sirva para reducir costos y mejore las rutas de distribución. Respecto a este punto, existe un estudio previo referente a la empresa Semacaf Máquinas de Café, S. L., donde se emplearon dos herramientas de obtención de trayectos óptimos: *grafos* y *rutas*. La primera logró mejorar la ruta inicial de distribución mediante la aplicación de algoritmos enfocados en tres factores (kilómetros, tiempo y costo). La segunda permitió capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar visualmente en un mapa la información geográficamente introducida. El objetivo de esta aplicación fue el cálculo de rutas y su gestión [4].

En otro artículo se empleó el software SIMPLIROUTE en la empresa Pet's Place. En esta se evidenció que el uso de herramientas tecnológicas y de un software de planificación y programación de rutas simplifica la toma de decisiones, aumenta la confianza al controlar los envíos de productos y servicios y mejora los indicadores logísticos de la empresa [5].

A su vez, Laureano [6] propone para la empresa Anygas S.A.C la realización de un sistema de gestión que sea capaz de monitorear y proveer caminos más cortos utilizando el GPS y el servicio de Google plataforma. Aparte de ello, el sistema contará con módulos de gestión de *stock*, gestión de programaciones, entre otros.

El conjunto de estas investigaciones sirve para ejemplificar la mejora de un sistema logístico de distribución de la mano de la tecnología.

Esta revisión de literatura previa trabaja sobre tres puntos clave: la formación de un clúster o grupo, la logística de distribución y el desarrollo de un software. El presente trabajo comprende estos conceptos, teniendo como objetivo principal optimizar el sistema de distribución de la galería Markata (Lima) mediante la implementación de un software de seguimiento y planificación de rutas.

En este contexto, se realizó el análisis inicial que evidenció varios problemas críticos en el sistema logístico actual. Por ejemplo, el costo asociado a las ventas representa el 95 % del total de ingresos obtenidos, lo que deja márgenes de utilidad neta muy bajos (3.9 %). Además, el proceso de distribución carece de control, y presenta altos costos de envío (20 % del total solicitado), mien-

tras que el 5 % de las entregas llegan con defectos, y casi un tercio de los pedidos se entrega fuera del tiempo estimado. Estos indicadores reflejan las principales limitaciones del sistema logístico actual y permiten identificar puntos críticos de mejora relacionados con la eficacia y los costos del proceso de distribución.

En este sentido, se seleccionaron indicadores clave para evaluar el impacto de las mejoras propuestas, como la eficacia de las entregas, el porcentaje de ventas generadas por distribución y el costo de envío, entre otros. Aunque la disponibilidad de datos limitó el alcance del análisis, los indicadores seleccionados son representativos de la magnitud del problema y justifican la necesidad de un modelo optimizado. Con ello, se busca no solo incrementar la seguridad en los envíos y reducir sus costos, sino también mejorar la competitividad del sistema logístico de estas tiendas.

En línea con este enfoque, el presente estudio se analizó cómo la implementación de herramientas tecnológicas, específicamente un software logístico, puede mejorar la competitividad de las MYPES del emporio comercial de Gamarra. Al abordar problemas clave, como altos costos de distribución, entregas defectuosas y falta de control logístico, se buscó demostrar cómo la innovación tecnológica puede optimizar procesos operativos en pequeños negocios y fomentar su integración en clústeres más eficientes.

II. METODOLOGÍA

El diseño metodológico adoptado en esta investigación es de tipo exploratorio-descriptivo, enfocándose en el análisis de un modelo logístico existente (AS IS) y la proyección de un modelo optimizado (TO BE) basado en la implementación de un software.

Es así como la presente investigación adoptó como punto de partida la búsqueda de contacto con algún dueño de una tienda en Gamarra. Después de encontrar un negocio mayorista ubicado en la galería Markata, dentro de Gamarra, se procedió a organizar una entrevista semiestructurada con la dueña. El resultado de la entrevista fue la recolección de datos cuantitativos útiles para calcular ratios de costos, utilidades, rotación de inventarios y ventas de su sistema actual de distribución, además de los costos asociados. De igual manera, se recopiló información cualitativa que favoreció la elaboración del modelo esperado, el cual incluye la

mejora estimada. Por ese motivo, se eligió un software con tecnología de seguimiento satelital y análisis de datos. Las funciones que proporciona esta herramienta pueden ayudar a la empresa a mantener un sistema de distribución efectivo.

Para el análisis del modelo AS IS y TO BE se tomó en cuenta una serie de ratios que permiten cuantificar partes del proceso distributivo. En este trabajo, todo es medido en nuevos soles por mes, a menos que se indique lo contrario. Estas ratios fueron comprendidos de la siguiente manera:

1. Ratio costo de ventas. Esta ratio es útil para evaluar la eficiencia de la empresa, dado que estima la cantidad gastada por cada nuevo sol obtenido de las ventas. En este caso, consideraremos que el costo de ventas es explicado por el costo del local, el volumen de mercadería vendida y el costo de distribución.

$$\text{costo de ventas} = \frac{\text{costo del local} + \text{volumen mercadería} + \text{sueldo trabajadores} + \text{costo distribución}}{\text{ventas netas}} \quad (1)$$

2. Porcentaje de utilidad neta. Este indicador mide el desempeño de forma simplificada. En este caso se mostrará la utilidad neta como el resultado de la sustracción entre el total de ventas realizadas y su costo de ventas.

$$\text{porcentaje de utilidad neta} = \frac{\text{utilidad neta}}{\text{ventas netas}} * 100 \quad (2)$$

3. Rotación de inventario. Esta ratio sirve para determinar el número de días que le tomaría a la empresa vender todo el inventario que posee en almacén. Para este caso, se consideró que el promedio de inventario (mercadería) incluye el promedio del volumen actual y del mes anterior, mientras que el costo de ventas está explicado por el costo del alquiler del local, el costo de la mercadería vendida mensual y el sueldo de los trabajadores.

$$\text{rotación de inventario} = 30 * \frac{\text{promedio de inventarios}}{\text{costo de las ventas}} \quad (3)$$

Medir esta ratio es importante porque a mayor número de días, mayor costo de almacenaje e inflexibilidad para satisfacer cambios en la demanda.

- Porcentaje de las ventas por distribución. Este indicador mide la relevancia de las ventas por distribución para la generación de ingresos en la tienda.

$$\text{porcentaje de ventas por distribución} = \frac{\text{ventas por distribución}}{\text{ventas totales}} * 100 \quad (4)$$

- Porcentaje de entregas defectuosas. Este indicador permite evaluar el desempeño de la empresa al distribuir sus productos. En la mercadería errónea se ha considerado a aquella que llega en mal estado o con características diferentes a lo solicitado, frente al total de mercadería distribuida por la empresa.

$$\text{porcentaje de entregas defectuosas} = \frac{\text{volumen de mercancía distribuida con errores}}{\text{volumen de ventas por distribución mensual}} * 100 \quad (5)$$

- Eficacia de las entregas. Esta ratio mide la eficacia de la tienda respecto a las entregas que realiza. En este caso, ambas variables serán medidas por cantidades.

$$\text{eficacia de las entregas} = \frac{\text{número de entregas a tiempo mensual}}{\text{número de entregas mensual}} \quad (6)$$

- Ratio de costo de envío. Esta ratio servirá para verificar si existe un cambio en el costo de distribución entre el modelo actual y el modelo sugerido y, asimismo, con el fin de evaluar si este es un factor relevante para optimizar el proceso distributivo.

$$\text{costo de envío} = \frac{\text{costo de distribución mensual} + \text{costo personal}}{\text{total de ventas por distribución}} \quad (7)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado de este trabajo se expone en tres fases. La primera incluye información sobre la recolección de datos tanto de su forma como de contenido. En la segunda fase se muestra de forma gráfica y conceptual cómo se está llevando a cabo el modelo actual acompañado de las ratios y operaciones correspondientes. Luego se presenta el modelo TO BE, que abarca el funcionamiento del software y los resultados trabajados, como ratios y costos.

RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de datos se hizo a través de una entrevista primaria semiestructurada. La mayoría de las preguntas fueron previamente definidas para conocer el funcionamiento de la cadena de suministro de la tienda, sus números y problemas existentes, mientras que otras interrogantes surgieron durante la entrevista para corroborar la información.

Durante la conversación, la propietaria de la tienda Audacia, ubicada dentro de la galería Markata, precisó que tiene un sistema logístico simple de distribución que involucra altos costos y reducido alcance. Algunas veces contrata a una persona de confianza para realizar la entrega, mientras que en otras ella misma tiene que cerrar su negocio e ir a realizarla. Es importante resaltar que las demás tiendas se encuentran en una situación similar. Por lo tanto, el modelo TO BE será una generalización para las 50 tiendas de la galería, teniendo en cuenta que el costo de la implementación del software será dividido entre el conjunto de estas.

MODELO AS IS (MODELO ACTUAL):

En gráfico del modelo actual de la empresa se muestra en la [Figura 1](#).

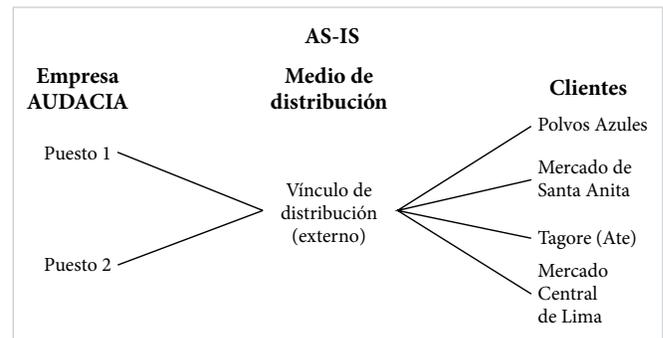


Figura 1. Modelo AS IS. Fuente: elaboración propia.

En la [Figura 1](#) se observa que el negocio cuenta con un medio de distribución externo a la empresa, el cual consiste en una persona de confianza para el dueño, quien a veces es el encargado de realizar las entregas, mientras que en otras ocasiones son los mismos trabajadores quienes tienen que distribuir su mercadería. Los principales mayoristas, con los cuales se completa el modelo AS IS, están ubicados en Polvos Azules, Mercado de Santa Anita, Tagore y Mercado Central de Lima.

Cabe resaltar que esta forma de distribuir sus productos no le permite a la empresa tener un control real del proceso, por lo que se presentan demoras e insatisfacción del cliente continuamente.

RATIOS

Este apartado se presenta el cálculo de los indicadores explicados en la metodología (Tabla 1), basado en el modelo actual de la tienda. Cabe mencionar que los datos numéricos son aproximaciones mencionadas durante la entrevista, pero suficientes para mostrar un vistazo de la situación presente.

TABLA 1
CÁLCULO DE RATIOS AS IS

RATIO	CÁLCULO	RESULTADO
Ratio costo de ventas	$\frac{13000 + 1050 + 1000 * 5}{20000}$	0.9525
Utilidad neta (%)	$\frac{1640}{20000} * 100$	3.895 %
Rotación de inventario	$30 + \frac{(8000 + 7000)}{17000}$	13.235
Ventas por distribución (%)	$\frac{10000}{20000} * 100$	50 %
Entregas defectuosas (%)	$\frac{500}{10000} * 100$	5 %
Eficacia de las entregas (%)	$\frac{65}{100} * 100$	65 %
Costo de envío (%)	$\frac{2000}{10000} * 100$	20 %

Los resultados obtenidos evidencian que el modelo actual presenta importantes limitaciones. El costo de ventas es muy elevado, lo que deriva en márgenes de utilidad reducidos. Aunque la rotación de inventario es eficiente, los altos costos asociados a la distribución, el porcentaje de entregas defectuosas y la falta de control en el proceso afectan directamente la competitividad de la empresa. Estos factores refuerzan la necesidad de implementar un modelo optimizado, como el propuesto en esta investigación, para corregir las deficiencias actuales y mejorar la eficiencia del sistema logístico.

COSTOS DEL MODELO AS IS

En esta parte se desarrolló un modelo para estimar el costo de distribución considerando los siguientes parámetros:

CE: costo de envío
X: cantidad de unidades pedidas
CP: costo del personal
CT: costo transporte

El modelo matemático es el siguiente:

$$\text{costo de envío} = \sum_{i=1}^n (CP_i + CT_i) \quad (8)$$

$$\text{costo de distribución} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (CE_{ij} + X_{ij}) \quad (9)$$

con la restricción:

$$\forall CE_{ij} \geq 0 \text{ para } n \text{ y } j = 1, 2, \dots, 12 \quad (10)$$

siendo m el número de meses y n el número de unidades vendidas.

El modelo matemático incluye el costo de envío compuesto por el costo del personal y de transporte, ambos en función de las unidades vendidas.

Aunque es cierto que estos elementos son representativos del sistema logístico actual, se reconoce que existen otros costos asociados a la distribución que no han sido considerados en el modelo. Entre ellos destacan posibles gastos en el mantenimiento de vehículos, imprevistos relacionados con devoluciones, así como otros costos indirectos. Estos factores podrían influir en los resultados, pero no se incluyeron debido a las limitaciones en la recopilación de datos y el alcance del estudio.

Sin embargo, es importante destacar que la formulación de modelos matemáticos depende de las variables que cada tienda considera relevantes. Por lo tanto, los parámetros utilizados pueden variar en otras investigaciones, adaptándose a las necesidades y prioridades específicas de cada caso.

En la Tabla 2 no se considera la variable X de cantidad de unidades vendidas, dado que en la encuesta no se logró recabar información sobre esta, pero sí sobre el costo de envío total por mes. Esta es una manera más simplificada de calcular el costo de distribución. Sin embargo, si se desea tener una estimación más precisa es recomendable utilizar el modelo matemático planteado en las Ecuaciones (8) y (9).

TABLA 2
CÁLCULO DE RATIOS AS IS

COSTO DE ENVÍO	MES DE PEDIDO	COSTO DEL PERSONAL	COSTO DE TRANSPORTE	COSTO DE DISTRIBUCIÓN
2000	1	700	1000	1700
2100	2	700	1100	1800
2200	3	700	1200	1900
2300	4	700	1300	2000
1800	5	700	800	1500
1900	6	700	900	1600
2200	7	700	1200	1900
2100	8	700	1100	1800
1900	9	700	900	1600
1900	10	700	900	1600
2300	11	700	1300	2000
2500	12	700	1500	2200
Promedio				1800

Ahora, analizando los resultados de la tabla se obtiene que el costo de distribución promedio es de 1800 soles mensuales. Contextualmente, este costo se genera dado que la tienda realiza entregas de forma tercerizada o directa. En ambas se considera el servicio de transporte y el gasto aproximado en sueldo del personal que acompaña al transportista para realizar la entrega. De forma cualitativa también se debe considerar el tiempo que se deja de atender la tienda para ir a entregar un pedido.

MODELO TO BE (MODELO FINAL)

Funcionalidad del software (interacción con el usuario)

Durante la investigación se consideró la implementación de un software para la mejora de la distribución de productos. En este caso, se utilizó un software con tecnología telemática. En [7] se señala que la telemática es como la estandarización y mejora de infraestructura y redes de la telecomunicación, que posibilitan la integración de texto, voz e imagen. Asimismo, en [8] se define esta tecnología como el producto del desarrollo logrado entre telecomunicaciones e informática. Para este informe, se escogió el proveedor de software y hardware de Geotab, que es una empresa que ofrece herramientas capaces de conectar vehículos de compañías con dicha tecnología. La plataforma de Geotab permite que pequeñas, medianas y grandes empresas automaticen y digitalicen sus procesos mediante la integración de los datos de sus vehículos [9].

La aplicación está diseñada para ser lo más flexible a las necesidades del usuario. El menú “preferencias” incluye opciones para configurar el idioma, formato de fecha y hora, zona horaria local y moneda. A su vez, la aplicación también permite al usuario seleccionar qué proveedor de mapas usar. Entre estos están Google Maps, Mapbox y HERE Maps, siendo el primero seleccionado por defecto. Este sistema permite establecer la configuración para las horas de servicio (HOS) de su flota. Esta selección determina las reglas a aplicar a los vehículos de la empresa, como el terminal de inicio, dirección de terminal y asignaciones para sus conductores. También existe una pestaña de comunicación de sistemas que es donde se configura las preferencias para recibir reportes. Estas pueden ser por correo, notificaciones de noticias o de servicio. El software en su mapa ofrece un filtro para visualizar determinados vehículos a la vez.

El menú “favoritos” muestra cuatro funcionalidades, que comienzan con el mapa, el historial de viajes, los activos y el panel de gráfico, pero se pueden personalizar mediante el uso de marcadores en otras páginas. En este panel es posible destacar los eventos y comportamientos críticos de toda la flota de una sola vez, mediante el uso de inteligencia artificial. Con ello también se puede recibir recomendaciones para optimizar la flota.

Específicamente, en la “vista del mapa” se puede visualizar las rutas y crear nuevas seleccionando zonas en su mapa o añadiendo puntos intermedios en las ubicaciones deseadas.

Los vehículos son los que usan el “dispositivo telemático”, cuya información sobre sus viajes son registradas en el software.

Si la aplicación presenta problemas se puede utilizar “Community”. Este apartado permite al usuario conectarse con otros miembros de la comunidad, distribuidores, socios, desarrolladores y expertos internos. También se cuenta con un blog por si los usuarios desean conocer más sobre esa tecnología y sus actualizaciones.

Tipos de seguimiento

Geotab ofrece dos alternativas de seguimiento, sin incluir el que ofrece en su plan Plus. Estos seguimientos son los siguientes:

a) Seguimiento estándar

Las ubicaciones de los activos en el mapa se actualizan cada 15 segundos, según la última posición conocida del dispositivo telemático. Para visualizar el estado, el nombre y la dirección del vehículo solo hace falta colocar el cursor sobre este en el software.

b) Sin seguimiento (modo personal)

El “Modo personal” permite que los conductores y los administradores de la flota oculten temporalmente el seguimiento de activos en la aplicación de gestión de flotas, específicamente aquellos que utilizan GPS. Este modo solo debe usarse cuando el vehículo realiza alguna actividad no relacionada con el proceso distributivo.

Con ayuda del mapa el usuario puede explorar qué actividad ocurrió en un área seleccionada durante un periodo específico. Esta opción permite al cliente poder verificar que su servicio de transporte está cumpliendo con su horario de trabajo y realizando las entregas encargadas. Para este caso, es muy importante, ya que los dueños de las tiendas necesitan tener la seguridad de que sus productos lleguen en el momento y al cliente adecuado. Si el usuario desea acortar las rutas de distribución para minimizar costos, puede hacer un seguimiento de los viajes durante el día y ver cómo estos llevaron a cabo la distribución [10].

En la Figura 2 se observa la propuesta de mejora implementada. Es necesario comprender que este modelo no está siendo aplicado a una única tienda como el modelo AS IS, sino que trabaja sobre el conjunto de tiendas de la galería Markata y el grupo de tiendas mayoristas con las cuales estas interactúan. En este diagrama se puede observar la aparición de un proceso previo al envío del producto. Ahora bien, dicho proceso es el planeamiento de los pedidos a enviar a los distintos clientes con ayuda del software de categoría Software as a Service (SaaS), que se define como, “un modelo de distribución del software que proporciona a los clientes el acceso a aplicaciones a través de Internet. El software se suministra como un servicio, de manera que el usuario no tiene que preocuparse del mantenimiento de dichas aplicaciones” [11]. Tal y como se mencionó, este brinda rutas más eficientes para llevar a cabo una distribución adecuada, lo cual permite reducir demoras, además de poder realizar un seguimiento a tiempo real del vehículo.

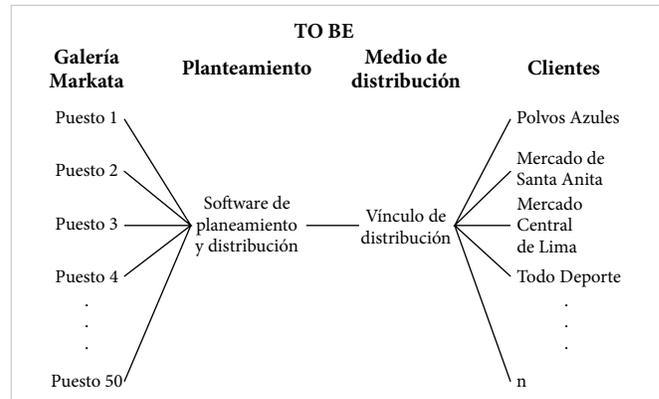


Figura 2. Modelo TO BE. Fuente: elaboración propia.

Infraestructura Tecnológica

En la Figura 3 se puede visualizar la infraestructura tecnológica de un software de seguimiento satelital. En primer lugar, está Geotab, el cual es el proveedor del software. Como este ofrece un servicio en la nube, debe contar con servidores con alta capacidad y disco de almacenamiento para la información de los usuarios. En segundo lugar, se instaló el dispositivo de rastreo Geotab GO9 en los camiones, de tal manera que se pueda visualizar en tiempo real la ubicación y otras funcionalidades mencionadas anteriormente. Por último, se tiene la infraestructura básica que tendrá una tienda para poder hacer uso del servicio, como Geotab maneja un modelo SaaS. De esta manera el usuario solo necesitará de una laptop con acceso a internet y pagar la suscripción mensual de USD 872 para poder entrar al software en la nube. El servicio SaaS permite una implementación rápida, flexible, escalable y segura.

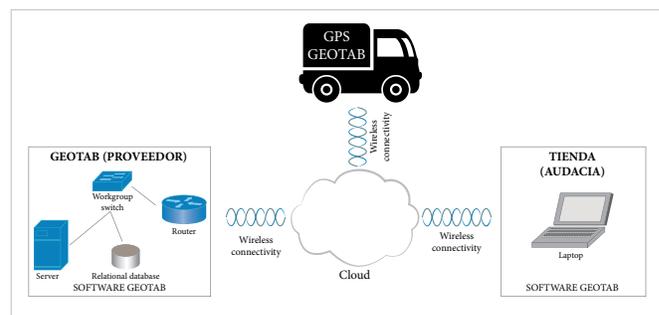


Figura 3. Infraestructura tecnológica. Fuente: elaboración propia.

RATIOS DEL MODELO TO BE

Una vez implementada la solución, se espera principalmente que la situación de este negocio mejore y que esta sea tangible en números, como se visualizará en las ratios planteadas.

En tal sentido, se hizo una proyección de lo que serán las ratios una vez la solución ya esté puesta en marcha (Tabla 3).

TABLA 3
PROYECCIÓN DE LAS RATIOS ANALIZADAS EN EL MODELO TO BE

RATIO	VALOR AS IS	VALOR TO BE
Ratio costo de ventas	0.95	0.9
Utilidad neta (%)	3.895 %	8.2 %
Rotación de inventario	13.235	13
Ventas por distribución (%)	50 %	60 %
Entregas defectuosas (%)	5 %	4 %
Eficacia de las entregas (%)	65 %	85 %
Costo de envío (%)	20 %	10 %

Como se puede apreciar, el primer impacto de esta solución es la reducción de costos de distribución (y con ello el aumento de la utilidad). Se pretende que la ratio de costo de ventas disminuya 5 unidades porcentuales, que la utilidad aumente en 3.5 % y que el costo de envío pase de 20 % a un 10 % (la mitad de lo que es ahora).

También se espera que la rotación de inventario mejore, puesto que todo el proceso de distribución sería más ágil y controlado. Se estima un cambio significativo en la eficacia de las entregas. Con el control sobre los pedidos, se espera que estos sean entregados a tiempo y sin demoras, pasando de un 65 % como lo es ahora, a un 85 %.

COSTOS DEL MODELO TO BE

Los parámetros incluidos en este modelo son los siguientes:

- CMS: Costo Mensual del Software
- CGL: Costo de Gestión Logística
- CE: Costo de Envío
- X: cantidad de unidades pedidas
- CP: Costo del Personal
- CT: Costo del Transporte

El modelo matemático generado para evaluar los costos de distribución de una tienda individual es el siguiente:

$$\text{costo mensual del software} = \frac{\text{costo anual del software}}{12 * \text{cantidad de tiendas}} \quad (11)$$

$$\text{costo de gestión de logística} = CT * 0.2 \quad (12)$$

$$\text{costo de envío} = \sum_{i=1}^n (CGL + CT)_i \quad (13)$$

$$\text{costo de distribución} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (CE_{ij} * X_{ij}) + \sum_{j=1}^{12} CMS_{jk} \quad (14)$$

Cabe resaltar que el cálculo del costo mensual del software se está dividiendo entre el número de tiendas, esto se debe a que se piensa agrupar a las 50 tiendas de la galería como un clúster y entre todas ellas se dividirá el costo del software.

El modelo matemático, considerando los costos asociados para todas las tiendas luego de contratar el software, es el siguiente.

Costo por la cantidad de tiendas de la galería:

$$\text{costo de distribución} = \sum_{k=1}^{50} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (CE_{ijk} * X_{ijk}) \quad (15)$$

siendo m el número de meses, n el número de unidades vendidas y k la cantidad de tiendas.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO TO BE

El modelo del costo de distribución considera las implementaciones que se están realizando para poder mejorar este proceso y hacerlo más eficiente. Es decir, el costo incluye lo siguiente: el nuevo costo de envío, que incluye el costo de transporte y el costo de gestión logística, que es el 20 % del costo de transporte y se encarga de gestionar las rutas de los envíos y cuáles están en la misma dirección o tienen el mismo punto de llegada (esto se da con el objetivo de reducir los costos por la cantidad de pedidos que lleva la movilidad y de esta manera aprovechar adecuadamente su capacidad potencial), y se suma el costo del software que permitirá hacer realidad todo el proceso.

En síntesis, la implementación del software y de la gestión logística permitirá quitar el costo del personal que se encargaba de llevar y hacer la entrega de los pedidos de la tienda, permitiendo que se redujeran considerablemente los costos de distribución.

La Tabla 4 muestra los valores aproximados de los costos que enfrentará cada tienda luego de implementado el modelo.

TABLA 4
MODELO TO BE

COSTO DE ENVÍO	MES DE PEDIDO	COSTO DEL SOFTWARE	COSTO DE TRANSPORTE	COSTO DE GESTIÓN DE LOGÍSTICA	COSTO DE DISTRIBUCIÓN
1080	1	64.75	900	180	1145
1188	2	64.75	990	198	1253
1296	3	64.75	1080	216	1361
1404	4	64.75	1170	234	1469
864	5	64.75	720	144	929
972	6	64.75	810	162	1037
1296	7	64.75	1080	216	1361
1188	8	64.75	990	198	1253
972	9	64.75	810	162	1037
972	10	64.75	810	162	1037
1404	11	64.75	1170	234	1469
1620	12	64.75	1350	270	1685
Promedio					1253

En la **Tabla 4**, los costos de distribución se están planteando con una proyección de un año; se estimó la cantidad de tiendas que hay en una galería de Gamarra, que es 50, lo cual se utilizó para calcular el costo del software por mes por cada tienda. Además, se determinó que el costo de gestión de logística será un 20 % del costo de transporte. Esta parte del costo de distribución se encargará de que todos los envíos que van hacia un mismo lugar o ruta vayan en un solo vehículo para reducir los costos de envío lo más que se pueda por volumen. Por esta misma razón, los costos de transporte se reducirían en 10 %.

La **Tabla 5** contiene una comparación entre el modelo AS IS y el TO BE.

TABLA 5
COMPARACIÓN DEL MODELO AS IS Y TO BE

AS IS	TO BE	DIFERENCIA		
		MENSUAL	ANUAL	PORCENTUAL
90000	62637.6	27362.4	328348.8	30 %

Comparando los costos de distribución estimados en base a 50 tiendas de la galería, se tiene que el modelo TO BE es 30 % más barato que en el modelo AS IS. Esto se debe a que se eliminaría completamente los costos que pagaba la tienda individualmente por el personal que se encargaba de realizar las entregas a los clientes.

Entonces se considera viable la implementación de este sistema para poder optimizar el proceso de distribución de las tiendas mayoristas de Gamarra.

Ahora bien, como el software es SaaS, solo se pagaría por un servicio de software en la nube, es decir, no sería necesario adquirir una infraestructura tecnológica costosa, pues esto lo tiene el proveedor del servicio.

IV. CONCLUSIONES

En general, este estudio permite observar que la aplicación de un software de seguimiento de rutas puede optimizar el proceso de distribución de las 50 tiendas de la galería Markata. Asimismo, gracias a que Geotab es un Software as a Service, la empresa únicamente deberá tener una computadora *laptop* con conexión a internet para poder usar esta herramienta.

Ahora bien, entre las funciones más destacadas de la implementación del software Geotab están la visualización y creación de rutas y la exploración de qué actividad ocurrió en un área seleccionada en el mapa, de forma tal que se logra tener la seguridad de que los productos lleguen en el momento y al cliente adecuado.

Parte del impacto de la implementación de este software se vería materializado, principalmente, en tres de las ratios analizadas. Por una parte, se evidencia un posible aumento del porcentaje de ventas por distribución (10 %), lo que permitiría un mayor rango de acción de las empresas, una disminución de 10 % en los costos de envío y un aumento de 20 % en la eficacia de las entregas, lo que daría los primeros atisbos de mejoras en el proceso productivo analizado.

Por último, el modelo matemático de los costos de distribución permitió estimar los costos en el modelo AS IS y el TO BE, donde se determinó el costo que se reduce en un 30 %, poniendo en evidencia los beneficios que traería reestructurar el proceso de distribución.

REFERENCIAS

- [1] L. Gutierrez et al., “Los clústeres como alternativa estratégica para la competitividad de las pymes: caso industria cuero y calzado en Perú,” *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 35, pp. 136-156, jun. 2023, doi: [10.46661/revmetodoscuanteconempresa.5304](https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.5304).

- [2] C. Ketels, “Michael Porter’s Competitiveness Framework—Recent Learnings and New Research Priorities”, *JICT*, vol. 6, n.º 2, pp. 115-136, jun. 2006, doi: [10.1007/s10842-006-9474-7](https://doi.org/10.1007/s10842-006-9474-7).
- [3] E. Vélez, “Diseño de un modelo logístico de distribución para pymes dedicadas a la entrega de productos de consumo masivo en el centro de la ciudad de Guayaquil”, proyecto de grado, Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, Guayaquil, 2018.
- [4] V. Puchades, J. Mula y A. Rodríguez, “Aplicación de la Teoría de Grafos para mejorar la planificación de rutas de trabajo de una empresa del sector de la distribución automática”, *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 6, n.º 6, pp. 7–22, 2008, doi: [10.46661/revmetodoscuanteconempresa.2112](https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.2112).
- [5] C. M. Roldan, “Optimización de la Distribución de Rutas para la Mejora de los Indicadores Logísticos en la Empresa Pets Places”, tesis de grado, Universidad Privada del Norte, 2020.
- [6] J. C. Laureano, “Implementación de un sistema informático basado en geolocalización para el proceso de distribución de gas en la Empresa Anygas S.A.C – 2022”, tesis de grado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú, 2022.
- [7] J. Peiro, F. Prieto y A. Zornoza, “Nuevas Tecnologías Telemáticas y Trabajo Grupal. Una Perspectiva Psicosocial”, *Psicothema*, vol. 5, n.º sup., pp. 287-305, 1993.
- [8] M. E. Fejes, A. M. P. dos Santos, M. R. Calil, F. Franzolin, E. M. Morita y L. C. B. de Tolentino, “Implementación de Proyectos de Ciencias vía Telemática”, *Revista Novedades Educativas*, vol. 163, pp. 4-9, 2004.
- [9] Geotab. “Acerca de Geotab”. GEOTAB.com. [En línea]. Accedido: sept. 21, 2023. Disponible en: <https://www.geotab.com/es-latam/acerca/>
- [10] Geotab. “GeotabProductGuide”. GEOTRAB.com. [En línea]. Accedido: sept. 21, 2023. Disponible en: <https://docs.google.com/document/d/1wFU4aWqaynb0ykLT8AoHNixWPQ-NLvSyIghvCjEZE58/edit#heading=h.gjdxs%0A>
- [11] Á. Hernández, “El SaaS y el Cloud-Computing: una opción innovadora para tiempos de crisis”, *REICIS*, vol. 5, n.º 1, pp. 38-41, 2009.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se logró concretar gracias a la ayuda brindada por Stefani Yessenia Arias Ramírez, quien proporcionó toda la información para realizar las estimaciones correspondientes. Asimismo, agradecemos la asesoría del profesor Mario Chong durante el desarrollo del estudio.

Aplicando KMoS-SSA como estrategia de gestión del conocimiento y enfoque sistémico para la conceptualización de soluciones

Applying KMoS-SSA as a knowledge management strategy and systemic approach for conceptualizing solutions

Lic. Omar Humberto Wong Nogueira¹, Ing. Edgar Montoya Vergara¹, Dra. Karla Miroslava Olmos Sánchez¹ ,
Dr. Jorge Enrique Rodas Osollo¹ , Mtro. David García Chaparro¹

¹Maestría en Cómputo Aplicado, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

La era cognitiva representa una transformación en la que el conocimiento y la inteligencia, tanto humana como artificial, impulsan los procesos de innovación y desarrollo. En este contexto, algunas organizaciones pueden considerarse como ecosistemas cognitivos, ya que permiten la integración de datos, tecnologías avanzadas y habilidades humanas para la toma de decisiones inteligentes. Estos ecosistemas definen los ámbitos en los que se toman decisiones y se conceptualizan soluciones para hacer frente a las situaciones problemáticas. Sin embargo, conceptualizar y diseñar soluciones factibles y deseables para estos dominios complejos representan un reto debido a la multiplicidad de factores, a la ambigüedad, al dinamismo del entorno y a la naturaleza mayormente tácita del conocimiento de los especialistas. Este artículo describe la aplicación del marco metodológico KMoS-SSA a dos casos reales con características de dominios complejos de estructura informal, el cual está diseñado para guiar la conceptualización y especificación de soluciones deseable y factibles utilizando la gestión del conocimiento y el pensamiento sistémico. El presente artículo tiene como objetivo evidenciar cómo la aplicación del marco metodológico KMoS-SSA facilitó la conceptualización de soluciones factibles y deseables en dos contextos significativamente diferentes, respondiendo de manera estructurada a las necesidades específicas de cada dominio.

PALABRAS CLAVE: marco metodológico KMoS-SSA; gestión del conocimiento; dominios complejos de estructura informal.

ABSTRACT

The cognitive era represents a transformation in which knowledge and intelligence, both human and artificial, drive innovation and development processes. In this context, cognitive ecosystems enable the integration of data, advanced technologies, and human skills for intelligent decision-making. These ecosystems define the domains in which decisions are made, and actions are taken to address problematic situations. However, conceptualizing and designing solutions for these complex ecosystems is challenging due to the multiplicity of factors, ambiguity, dynamism of the environment, and the vastly quantity of tacit knowledge. This article describes the application of the KMoS-SSA methodological framework to two real cases with characteristics of informally structured complex domains. The strategy is designed to guide the conceptualization and specification of solutions using knowledge management and systemic thinking. The objective of the article is to show how, through the KMoS-SSA methodological strategic framework, two significantly different challenging situations were able to develop desirable, viable, and effective solution proposals that addressed the needs of both domains.

KEYWORDS: KMoS-SSA methodological framework; knowledge management; complex domains with informal structure.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Dra. Karla Miroslava Olmos Sánchez
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: kolmos@uacj.mx

Fecha de recepción: 21 de noviembre de 2024. **Fecha de aceptación:** 11 de marzo de 2025. **Fecha de publicación:** 21 de marzo de 2025.



I. INTRODUCCIÓN

Los Dominios Complejos de Estructura Informal (DCEI) se refieren a sistemas o entornos en los que las relaciones y las interacciones de sus elementos no siguen una jerarquía o estructura formal claramente definida, lo que provoca grandes cantidades de incertidumbre y ambigüedad. En estos dominios, el conocimiento de las personas involucradas evoluciona rápidamente, lo que da lugar a concepciones del mundo diferentes y a veces contradictorias. Por tal motivo, la definición de conceptos y sus conexiones asociadas, así como las influencias entre ellos, pueden ser dinámicas y cambiantes, lo que hace que se generen propiedades emergentes y que el conocimiento de los involucrados sea mayormente tácito [1]. Estos dominios son comunes en organizaciones modernas, donde las estructuras jerárquicas tradicionales están siendo remplazadas por redes más flexibles y adaptativas que pueden responder mejor a los cambios rápidos y a la incertidumbre del entorno empresarial.

De acuerdo con Nonaka y Takeuchi [2], el conocimiento tácito es difícil de codificar, expresar o comunicar de manera formal, pues se basa en la experiencia personal, habilidades, intuiciones y la perspectiva única de un individuo, y es altamente subjetivo y contextual, ya que se desarrolla a través de la interacción y la práctica. Estos autores proponen el modelo SECI (Socialization, Externalization, Combination and Internalization) basado en la teoría de creación del conocimiento, el cual sigue siendo relevante en la actualidad para la gestión y mejora del conocimiento en entornos organizacionales complejos [3].

La *conceptualización de soluciones* es el proceso de explicitar, definir, estructurar y modelar una idea para abordar un problema, considerando las diferentes expectativas y prioridades de los involucrados en un dominio de aplicación —contexto específico en el que un software opera y resuelve problemas—. Por otro lado, la *especificación de una solución* es el proceso en el que se definen sus requisitos y restricciones que garanticen que sea apropiada al dominio de aplicación.

Conceptualizar y especificar soluciones en DCEI es una experiencia desafiante que no puede abordarse con enfoques tradicionales que utilicen estructuras rígidas y procesos lineales. Se requiere de un marco metodológico que permita a los *proveedores de soluciones* —entidades o personas que diseñan, desarrollan e implementan so-

luciones tecnológicas para resolver necesidades específicas dentro de un dominio de aplicación— comprender, modelar y gestionar la incertidumbre, la ambigüedad, la evolución del conocimiento y las diversas perspectivas de todos los involucrados en el proyecto. Cabe resaltar que generalmente estos proveedores de soluciones son ajenos a los dominios u organizaciones, por lo que deben apropiarse del conocimiento de los especialistas en un tiempo relativamente corto para transformarlo en soluciones deseables y factibles.

El marco metodológico KMoS-SSA (Knowledge Management of Strategic options through Soft Systemic Analysis) está diseñado para guiar la conceptualización y especificación de soluciones en dominios complejos de estructura informal, ya que incorpora de forma armónica la *teoría de creación del conocimiento* de Nonaka y Takeuchi [2] y la *perspectiva de sistemas suaves* de Checkland [4], el cual proporciona, las técnicas y herramientas para una perspectiva holística en la que se consideren de manera efectiva las diversas visiones de los actores en la búsqueda de posibles soluciones. Por otro lado, KMoS-SSA tiene como núcleo el modelo SECI para gestionar de forma efectiva el conocimiento tanto explícito como tácito de todos los involucrados en el proyecto.

Este artículo describe la aplicación del marco metodológico KMoS-SSA a dos casos reales que cumplen con las características de DCEI. El primero es la generación de estrategias para abordar el proceso de acreditación del programa de Ingeniería en Sistemas Computacionales de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ). El segundo es la conceptualización y especificación de requisitos de un sistema de software para el análisis de datos de la gestión de ergonomía en las organizaciones. La justificación del porqué ambos casos se consideran como DCEI se explicará en los siguientes párrafos.

Actualmente, las Instituciones de Educación Superior (IES) de las universidades públicas en México están obligadas a someter sus programas académicos a procesos de acreditación para asegurar los resultados de aprendizaje de los estudiantes y la reputación de la institución. En [5] se define este proceso como complejo debido a la variedad de actores involucrados y por las diferentes dimensiones de calidad. En particular, en este artículo se considera que los procesos de acreditación en las IES se pueden considerar como DCEI. Aunque en estas instituciones existen actores con jerarquías y puestos bien

delimitados, en el proceso de acreditación se involucran múltiples actores como autoridades, docentes, alumnos y evaluadores con diferentes niveles de influencia e interacción, cuyo conocimiento depende de su rol en el dominio, lo que crea redes flexibles para la toma de decisiones. Por otro lado, los criterios de acreditación pueden cambiar con el tiempo y adaptarse a nuevas normativas y cada actor puede interpretarlos de forma diferente, lo que genera múltiples enfoques en cuanto a su cumplimiento. Por lo tanto, el conocimiento de los procesos de acreditación es dinámico, lo que obliga a las instituciones a mejorar sus estrategias para alcanzar y demostrar la calidad educativa. Aunado a esto, las decisiones del proceso son subjetivas y dependen de la experiencia y juicio de los evaluadores. Además, se presentan propiedades emergentes que surgen del proceso de acreditación, como la innovación educativa y la reestructuración de programas académicos.

De manera general, el proceso de especificación de requisitos de un sistema de software es una actividad compleja debido a que se tienen que gestionar las intrincadas interacciones de los sistemas, tratar con incertidumbre y ambigüedad en la elicitación de requisitos, atender los requisitos en evolución y garantizar el consenso entre los actores involucrados [6]. Aunado a esto, cuando el dominio de aplicación es la gestión de la ergonomía en las cadenas de suministro se puede considerar un DCEI, en el que se involucran diversos actores como proveedores, fabricantes, transportistas, distribuidores y clientes con diferentes niveles de influencia, ya que la ergonomía debe gestionarse de manera transversal. Además, existe alta incertidumbre y ambigüedad, debido a que los factores ergonómicos dependen de varios aspectos, como las condiciones de trabajo, las regulaciones laborales y la evolución tecnológica. Por otro lado, existen grandes cantidades de conocimiento tácito, ya que muchas decisiones dependen de la percepción y la experiencia en el campo.

Dada esta complejidad, existe una expectativa significativa de proveer soluciones innovadoras. Sin embargo, es crucial hacer frente a estos desafíos considerando las características únicas de los dominios complejos. Esto implica el desarrollo de alternativas que tengan en cuenta el conocimiento, tanto tácito como explícito, de los involucrados en el dominio y el uso del enfoque sistémico flexible que permita abordar la complejidad a partir de estas dos estrategias: conceptualizar y especificar soluciones deseables y factibles.

El resto del presente documento está organizado de la siguiente manera: en lo que resta de la sección se presentan los fundamentos teóricos, como son la gestión de conocimiento, el enfoque de sistemas flexibles y la fusión de ambos. En la sección II se presenta el marco metodológico KMoS-SSA, que consiste en el ciclo de creación de conocimiento y el modelo de proceso. Además, se explican los dos casos de aplicación. En la sección III se describen los resultados y discusiones. Por último, en la IV se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

1.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1.1. Gestión de Conocimiento

Unos de los ejes fundamentales del marco metodológico KMoS-SSA es la *gestión de conocimiento*, enfoque sistemático utilizado en las organizaciones y orientado a la elicitación, externalización, organización y distribución del conocimiento, con el propósito de optimizar su utilización en los procesos de innovación y de automatización de procesos, con el fin de fortalecer su competitividad [7]. La gestión del conocimiento no se limita al conocimiento explícito almacenado en documentos, bases de datos o manuales, sino que incluye y le da más importancia a la gestión de conocimiento tácito, arraigado en experiencias, habilidades y percepciones individuales.

Una de las contribuciones teóricas más importantes es la teoría de creación de conocimiento propuesta en [2] y conocida como el modelo SECI. Este marco conceptual describe cómo el conocimiento explícito y el tácito interactúan y se transforman en un ciclo perpetuo en el que el conocimiento de las personas involucradas evoluciona constantemente. La *socialización* facilita la transferencia de conocimiento tácito a través de la interacción directa y la experiencia compartida; la *externalización* permite la conversión de conocimiento tácito en explícito mediante su articulación en documentos, modelos o teorías; la *combinación* integra y sintetiza conocimiento explícito proveniente de diversas fuentes y la *internalización* asimila el conocimiento explícito en tácito a través de la práctica y la aplicación.

Aplicar sistemáticamente la gestión de conocimiento en la conceptualización y especificación de soluciones en DCEI es esencial para capturar el conocimiento mayormente tácito de los especialistas e incorporarlo en las soluciones. Como se mencionó anteriormente, de

forma general las soluciones para estos dominios se conceptualizan y desarrollan por un grupo de proveedores de soluciones ajenos al dominio u organizaciones, quienes tienen que entender en un tiempo relativamente corto las necesidades de los especialistas y transformarlas en una propuesta de solución. En [8] se destaca la importancia de la elicitación del conocimiento tácito en organizaciones, especialmente para que los novatos puedan aprovechar el conocimiento de los expertos. Un desafío común es la falta de consenso entre expertos al extraer dicho conocimiento, debido a las diferencias en la interpretación de actividades complejas.

1.1.2. Enfoque de Sistemas Flexibles

La Metodología de Sistemas Blandos (Soft System Methodology, SSM) forma parte de las propuestas del enfoque de sistemas flexibles [4] y busca abordar problemas complejos, donde los aspectos humanos, sociales y organizacionales juegan un papel central. A diferencia de los enfoques de sistemas duros, que se centran en problemas bien definidos y cuantificables, la SSM reconoce que en muchos contextos los problemas son difusos, subjetivos y están influenciados por múltiples perspectivas y valores. Este enfoque proporciona un marco estructurado pero flexible para facilitar la conceptualización y especificación de soluciones en entornos donde el conocimiento tácito, las relaciones, los procesos y las interpretaciones son tan importantes como los datos técnicos.

El proceso de la SSM comienza con la exploración del problema en su contexto real, identificando a los actores involucrados y sus perspectivas. A través de herramientas, como los modelos conceptuales, se representan los elementos clave y las interrelaciones dentro del sistema, lo que permite visualizar cómo podrían mejorarse las situaciones problemáticas. Estos modelos no pretenden ser una descripción exacta de la realidad, sino una herramienta para facilitar el diálogo y la reflexión entre los participantes. La metodología enfatiza la importancia del aprendizaje organizacional y la construcción de consensos, ya que las soluciones emergen de la negociación y el entendimiento mutuo entre las partes interesadas.

La importancia de la SSM radica en su capacidad para manejar la complejidad y la ambigüedad inherentes a los dominios de estructura informal. Al centrarse en las percepciones y los valores de los actores, este enfoque permite diseñar soluciones que no solo son técnica-

mente viables, sino también deseables y apropiadas al dominio de aplicación.

A pesar de que fue creado hace décadas, la SSM se sigue utilizando con éxito en la actualidad, como se describe en los siguientes trabajos. En [9], los autores tienen como objetivo determinar las características necesarias para un Sistema Basado en Conocimiento para los problemas de desechos médicos peligrosos, que ayudó a las partes interesadas (gobierno, terceros, hospitales, atención primaria de la salud, las autoridades locales y las sociedades) a reducir los impactos entre las prácticas actuales y los protocolos de salud. Este estudio utilizó la SSM y los enfoques de regulación para descubrir las lagunas en la coordinación y gestión de la HMW en Indonesia.

Por otro lado, en [10] se abordan los desafíos que enfrentan los proyectos de construcción, que se están volviendo cada vez más competitivos y complejos, lo que dificulta su gestión mediante enfoques tradicionales. El estudio examina los beneficios de aplicar SSM en el desarrollo de sistemas de gestión del conocimiento dentro de proyectos de construcción, especialmente en situaciones desafiantes que son difíciles de comprender y actuar. En ambos casos, la SSM se propone como una solución eficaz para el análisis y resolución de problemas en este tipo de situaciones complejas. A través de un enfoque de pensamiento sistémico que involucra un ciclo de investigación-acción, SSM facilita la comprensión de las diversas perspectivas de las partes implicadas.

1.1.3. Fusionando Gestión de Conocimiento y Pensamiento Sistémico

En entornos complejos y dinámicos, las organizaciones enfrentan desafíos que requieren una comprensión integral del problema y un manejo eficiente del conocimiento, donde la fusión de la Gestión del Conocimiento y Pensamiento Sistémico permite abordar estos desafíos de manera estructurada y adaptativa. Nakamori [11] propone un marco conceptual conocido como Sistema de Innovación del Conocimiento (Knowledge Innovation System), que busca facilitar la innovación y la resolución de problemas en entornos donde la incertidumbre y la complejidad son predominantes.

El núcleo de la teoría de Nakamori se estructura en torno a tres dimensiones principales: conocimiento tácito, conocimiento explícito y conocimiento sistémico. Estas dimensiones interactúan a través de procesos de sociali-

zación, externalización, combinación e internalización, conceptos que amplían y complementan el modelo SECI de Nonaka y Takeuchi. Sin embargo, Nakamori introduce una perspectiva más amplia al incorporar la dimensión sistémica, que considera el contexto global en el que se genera y aplica el conocimiento.

Una aplicación práctica de la fusión de gestión de conocimiento y enfoque de sistemas flexibles se da en [12], donde los autores mencionan que es importante la elicitación del conocimiento tácito en las organizaciones, especialmente para que los novatos puedan acceder al saber de los expertos. Para resolver este problema, se propone un enfoque de pensamiento suave que busca establecer un acuerdo entre los expertos. En este estudio, se utiliza una combinación de técnicas como el mapa conceptual, la creación de escenarios, la clasificación de cartas dentro del marco de la metodología de sistemas suaves. Esto da lugar a una nueva metodología para la elicitación del conocimiento tácito. Se destaca que el conocimiento tácito es fundamental para el conocimiento organizacional y constituye un recurso estratégico y una ventaja competitiva. La elicitación de este tipo de conocimiento es un aspecto crítico en la gestión del conocimiento, siendo un paso previo necesario para su utilización efectiva.

II. METODOLOGÍA

2.1. MARCO METODOLÓGICO KMoS-SSA

El marco metodológico KMoS-SSA se compone del Ciclo de Enriquecimiento del Conocimiento (CEC) y de un Modelo de Procesos [1]. KMoS-SSA tiene sus orígenes en KMoS-RE (Knowledge Management on a Strategy for Requirements Engineering) [13], estrategia metodológica e iterativa basada en la gestión de conocimiento que adapta el modelo SECI al proceso de elicitación de requisitos.

La idea fundamental de la estrategia KMoS-RE es que cierra la asimetría de la ignorancia entre los especialistas del dominio de aplicación —generalmente conocidos como clientes y usuarios—, y los proveedores de soluciones —desarrolladores, en el caso particular de soluciones de software—. Este hecho facilita la transferencia y transformación del conocimiento y mejora los procesos de comunicación y negociación entre los especialistas del dominio y los proveedores de las soluciones. KMoS-RE se compone de tres fases: el modelado

del dominio, el modelado de los procesos y la especificación de la solución. KMoS-RE ha sido utilizada en diversos proyectos con resultados satisfactorios [14]. De manera adicional, en [15] se presenta un estudio de caso en el que se da evidencia de que KMoS-RE genera requisitos funcionales más adecuados a las necesidades de los especialistas del dominio.

2.1.1. Ciclo de Enriquecimiento del Conocimiento

El núcleo de KMoS-RE es el modelo SECI de Nakamori. A través de la socialización, los desarrolladores en el proyecto elicitán el conocimiento de los clientes y usuarios. Este conocimiento se externaliza a través de los diversos modelos y artefactos desarrollados durante el proceso. La combinación se genera cuando los modelos son integrados para generar nuevos modelos o artefactos. Por último, la internalización se pone de manifiesto cuando los especialistas del dominio validan los modelos y/o cuando los proveedores de la solución generan los modelos; en ambos casos, el conocimiento tanto del dominio de aplicación como de la solución evolucionan para la conceptualización de la solución. KMoS-SSA integra adicionalmente los conceptos del enfoque de sistemas suaves mediante el CEC (Figura 1).

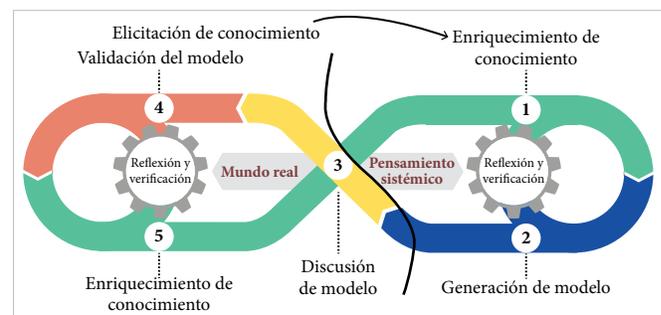


Figura 1. Ciclo Continuo de enriquecimiento del conocimiento Fuente: [1].

El ciclo divide a los involucrados del proceso en especialistas del dominio de aplicación (lado izquierdo de la figura) y los proveedores de la solución, aquellos con conocimientos técnicos especializados en soluciones complejas (lado derecho de la figura). El ciclo inicia con la elicitación de conocimiento de los proveedores de soluciones a los especialistas del dominio. Esta fase puede ser realizada por medio de entrevistas o grupos focales, además de considerar fuentes de conocimiento explícita, como procesos, reglamentos, etc. La información recabada es reflexionada y verificada por los proveedores de la solución, lo que genera un enriquecimiento del co-

nocimiento. Este proceso de reflexión y verificación genera diversos modelos que representan múltiples vistas del dominio de aplicación. Los modelos se presentan y explican a los especialistas del dominio, quienes validan los modelos mediante un proceso también de reflexión y verificación, lo que provoca que el conocimiento sea enriquecido. Tomando como base la SSM, la generación de modelos es parte del pensamiento sistémico y la validación de estos se realiza considerando el mundo real, como se muestra en la [Figura 1](#).

Al representar el dominio complejo a través de modelos que incorporan diversas perspectivas, KMoS-SSA apoya la reflexión continua de todos los actores involucrados. El objetivo del CEC es obtener, validar, discutir y compartir conocimientos entre los especialistas del dominio y los proveedores de soluciones tecnológicas para lograr soluciones no solo eficientes, sino también deseables y satisfactorias.

2.1.2. Modelo de Procesos

Un modelo de procesos es una representación estructurada de las actividades, tareas y flujos de trabajo que conforman una metodología, con el objetivo de organizar, gestionar y optimizar la ejecución de un conjunto de acciones para alcanzar un resultado específico. La [Figura 2](#) representa el modelo de procesos del marco metodológico KMoS-SSA, cuyo núcleo es el CEC.

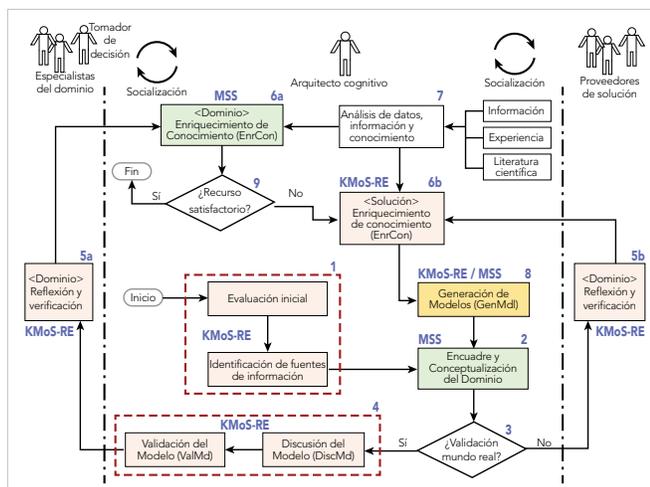


Figura 2. Representa el marco KMoS-SSA, ilustrando las etapas y tareas esenciales para lograr la gestión de los conocimientos. Las cajas rectangulares simbolizan las etapas y sus tareas asociadas, mientras que los diamantes representan decisiones. Los puntos "Inicio" y "Fin" se designan con elipses. En la parte superior, las figuras humanas simbolizan los actores principales dentro de una CISD y sus interrelaciones. Fuente: [1].

Se propone la figura del *arquitecto cognitivo*, quien liderará el proyecto y decidirá los modelos que deben realizarse de acuerdo con las características del dominio de aplicación. Al igual que en el CEC, los especialistas del dominio llevan a cabo las actividades del lado izquierdo, los proveedores de la solución las del derecho y las de socialización se hacen en conjunto. A continuación, se explican las etapas del modelo de procesos. Los números solo ayudan a identificar las etapas y explicarlas a continuación. Cabe mencionar que es un proceso iterativo en el que los modelos se desarrollan y actualizan gradualmente.

1. El proceso arranca con una evaluación inicial en la que se realiza una definición del dominio de aplicación y su alcance. Se establecen los límites y el contexto del sistema, considerando las interconexiones y relaciones de los componentes del dominio. Esta actividad se lleva a cabo mediante entrevistas y grupos de enfoque. Asimismo, se identifican las fuentes de información, como reglamentos, procesos o cualquier tipo de documento.
2. En el encuadre y conceptualización del dominio se identifica y categoriza a los actores clave involucrados en el proyecto, considerando sus perspectivas y roles dentro del sistema.
3. Se realiza una evaluación entre los proveedores de solución para considerar si se tiene el avance suficiente para llevar los modelos a validar por parte de los especialistas del dominio o se continúa verificando y/o generando nuevos modelos.
4. En el caso de que los proveedores de la solución consideren que se tiene el avance suficiente para validar los modelos con los especialistas del dominio, los modelos se describen y explican para que los especialistas puedan realizar el proceso de validación, es decir, indicar si los modelos representan de forma adecuada la realidad del dominio de aplicación. Esto se hace mediante la socialización. Si se decide que se cuenta con el avance suficiente en los modelos para ser validados, se realizan las etapas 5a y 6a, en caso contrario, las 5b y 6b.
- 5a. Los especialistas del dominio reflexionan y verifican los modelos.
- 6a. El proceso de validación, reflexión y verificación del modelo provoca que más conocimiento sea enrique-

cido, el cual será tomado en cuenta para actualizar los modelos generados y/o realizar nuevos modelos.

- 5b. En el caso de que los proveedores de la solución no consideren que tienen el avance suficiente para realizar el proceso de validación con los especialistas del dominio se realiza un proceso de reflexión y verificación por parte de los proveedores de la solución.
- 6b. El proceso de reflexión y verificación de los modelos provoca que más conocimiento sea enriquecido, el cual será tomado en cuenta para actualizar los modelos generados y/o realizar nuevos modelos.
7. En todo el proceso de pueden agregar datos, información y conocimiento científico, este último a través de un análisis de literatura científica.
8. En la etapa de generación de modelos se desarrollan todos los modelos que representan diferentes aspectos del dominio de aplicación. Estos son una fuente de inspiración para generar un diálogo cognitivo en el que se establezcan las diversas posturas y enfoques de los involucrados en el proyecto.

Los modelos que KMoS-SSA propone es el modelo sistémico, la figura enriquecida, el CATWOE, el enfoque PQR, el modelo de metas estratégicas, el Léxico Extendido del Lenguaje (LEL) y el modelo conceptual, mismos que se explicarán en los casos de aplicación. El arquitecto cognitivo decidirá, junto con los proveedores de la solución, el orden y la relevancia de utilizar cada uno de estos modelos.

2.2. CASOS DE APLICACIÓN

A continuación, se presentan dos casos reales de aplicación de la utilización del marco metodológico KMoS-SSA en DCEI. Los proveedores de las soluciones de los casos de aplicación han seguido las actividades del modelo de proceso para atender las situaciones problemáticas que existen dentro de los DCEI, elicitando conocimiento entre los expertos, delimitando los dominios y buscando las mejores alternativas de solución.

2.2.1. Caso de Aplicación: Estrategias de Analítica de Datos para Apoyar la Acreditación de Programas Educativos

El objetivo del siguiente caso de aplicación es buscar soluciones estratégicas para apoyar el proceso de

acreditación del Programa de Ingeniería en Sistemas Computacionales (ISC) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), mediante la instrumentación de acciones remediales en la deserción de los estudiantes.

Descripción del caso

Durante los últimos años, en la UACJ se ha trabajado intensamente para mejorar de manera integral la calidad de la institución, particularmente en fortalecer su capacidad y competitividad académica y orientándose a la consolidación de la calidad de los programas educativos mediante la acreditación de estos.

Actualmente la UACJ oferta 86 programas académicos de pregrado, entre los cuales se encuentra la Ingeniería en Sistemas Computacionales (ISC). Como organización acreditadora de programas académicos de nivel licenciatura en la modalidad de ingeniería, el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería, A. C. (CACEI) es una asociación civil sin fines de lucro que mantiene el reconocimiento vigente otorgado por el Consejo para la Acreditación de la Educación Superior, A. C. (COPAES). Su objetivo primordial es, mediante la acreditación de los programas educativos en el área de las ingenierías, promover que las Instituciones de Educación Superior (IES) ofrezcan educación de calidad a los estudiantes inscritos en programas de ingeniería.

Dentro de los criterios establecidos por el COPAES se establece que se valora si se cuenta con un sistema de información de la trayectoria escolar de los estudiantes y si se realizan investigaciones educativas con estos datos, a fin de instrumentar acciones remediales para disminuir los índices de reprobación y deserción.

Planteamiento del problema

La reprobación y la deserción escolar es un problema real dentro de los Programas Académicos (PA). Cubrir este último criterio establecido por CACEI frente a una acreditación académica no es tarea fácil. En la UACJ, la coordinación de los PA es responsable de completar las acreditaciones. Pero los actores involucrados en dichos procesos son muchos, con distintas visiones del mundo que aportan diferentes entradas y salidas de información buscando obtener los resultados esperados.

Con el objetivo de organizar este DCEI e instrumentar acciones remediales para disminuir los índices de re-

probación y deserción de la ISC en la UACJ, como parte de los criterios establecidos por CACEI por atender dentro de los procesos de acreditación académica, la aplicación de la metodología KMoS-SSA busca facilitar una comprensión integral del problema, permitiendo abordar los desafíos establecidos de manera estructural y adaptativa.

El dominio de aplicación de la metodología para este caso es amplio, desde identificar qué actores están involucrados y cuál es su papel específico para ser capaces de modelar el sistema, identificar cuál es el marco normativo que lo rige, encontrar las necesidades específicas de los tomadores de decisiones y, una vez atendido todo esto, identificar las mejores herramientas que ayuden a atender la problemática.

Con el marco metodológico KMoS-SSA y buscando definir el dominio de aplicación, desde el inicio de las actividades de la investigación de este proyecto se realizaron entrevistas con los actores del dominio y con los tomadores de decisiones para definir el contexto del sistema bajo el cual ocurren los procesos de certificación académica en la coordinación de la ISC en la UACJ.

La Figura 3 muestra el modelo sistémico trabajado a partir de la elicitación de conocimiento de la investigación, que define cuáles son los límites de actividad de los subsistemas que coexisten dentro de todo el sistema de acreditaciones académicas en la UACJ. También se definió cuál es el marco normativo que rige cada uno de los subsistemas.

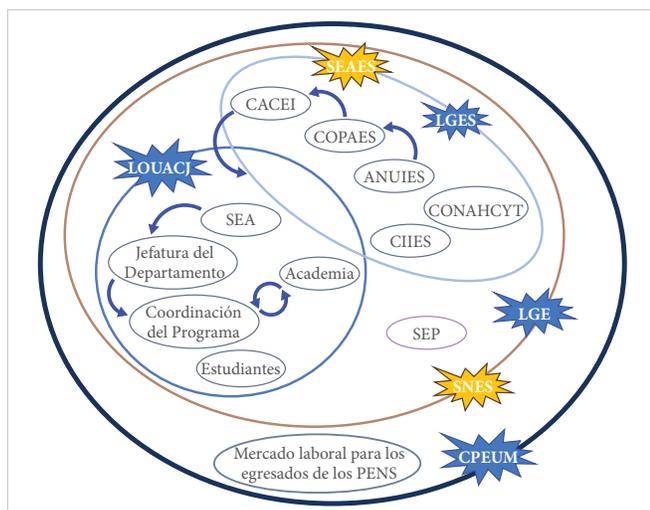


Figura 3. Modelo sistémico de los procesos de acreditación académica en la UACJ realizado a partir del análisis sistémico. Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se trabajó una visión enriquecida de los procesos de acreditación dentro de la UACJ (la Figura 4 muestra su representación gráfica). Este modelo permitió identificar quiénes son los principales actores en el dominio, cuál es su rol en el sistema y la interacción entre ellos.

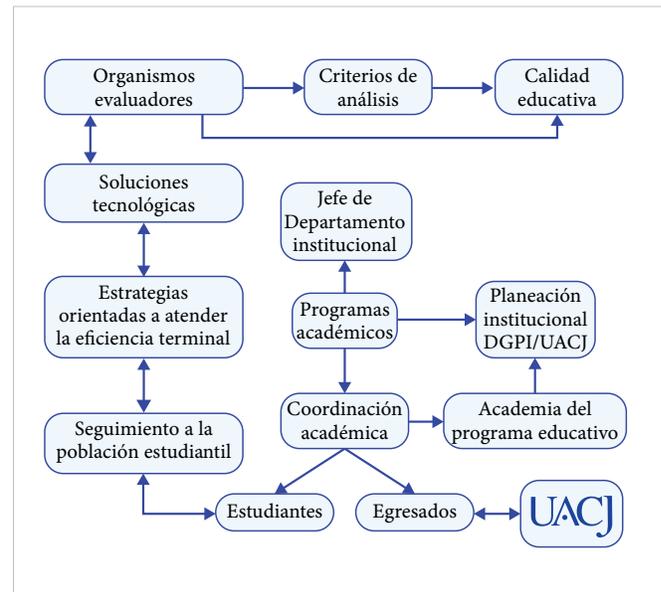


Figura 4. Visión enriquecida de los procesos de acreditación académica en la UACJ. Se muestran las interacciones directas que tienen algunos de los actores principales y los objetivos de estas. Fuente: elaboración propia.

Para sostener el ciclo continuo de enriquecimiento del conocimiento, se mantuvieron las reuniones con los especialistas del dominio y también con algunos de los actores involucrados. Esto, y la continua revisión del estado del arte, permitió delimitar el CATWOE del sistema (detallado en la Tabla 1).

Después de un extensivo proceso de gestión del conocimiento a través de la elicitación con los especialistas del dominio, del modelado del sistema y del desarrollo de herramientas como el CATWOE, existía todavía la ambigüedad de definir cuál era la necesidad específica que se iba a atender, debido a que el dominio de aplicación para una solución tecnológica es extenso y puede ramificarse en muchos subsistemas. Es por eso que se empleó la herramienta de definición de metas estratégicas (Figura 5) con los tomadores de decisiones para identificar en que parte de las interacciones que suceden entre los actores en el proceso de acreditación académica existe la posibilidad de implementar una solución tecnológica.

TABLA 1
CATWOE DEL SISTEMA

N.º	CATWOE	DESCRIPCIÓN
1	Cliente	Alumnos del Programa de la Ingeniería en Sistemas Computacionales de la UACJ
2	Actores	Academia, Alumnos, Dirección de Planeación y Desarrollo, Egresados, Jefatura de Departamento, CACEI, COPAES, ANUIES, Personal Administrativo, Programas Académicos
3	Proceso de transformación	En análisis de datos de las trayectorias educativas para instrumentar acciones remediales para disminuir los índices de reprobación y deserción
4	Visión del mundo	La acreditación es el resultado de un proceso de evaluación y seguimiento sistemático y voluntario del cumplimiento de las funciones universitarias de una Institución de Educación Superior (IES). En la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) se ha trabajado intensamente para mejorar de manera integral la calidad de la institución
5	Dueños	Coordinación del Programa de la Ingeniería en Sistemas Computacionales de la UACJ
6	Ambiente	Educación de Nivel Superior y su Evaluación, Voluntad Política, Organismos Públicos, Docencia, Jerarquía Organizacional

Después de un extensivo proceso de gestión del conocimiento a través de la elicitación con los especialistas del dominio, del modelado del sistema y del desarrollo de herramientas como el CATWOE, existía todavía la ambigüedad de definir cuál era la necesidad específica que se iba a atender, debido a que el dominio de aplicación para una solución tecnológica es extenso y puede ramificarse en muchos subsistemas. Es por eso que se empleó la herramienta de definición de metas estratégicas (Figura 5) con los tomadores de decisiones para identificar en qué parte de las interacciones que suceden entre los actores en el proceso de acreditación académica existe la posibilidad de implementar una solución tecnológica.

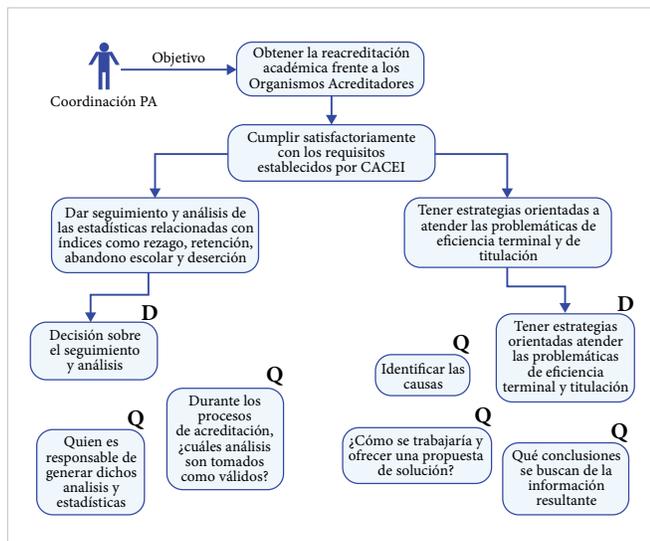


Figura 5. Modelo de Metas Estratégicas validado con los tomadores de decisiones del sistema. Las letras D indican decisiones que deben tomarse y las Q las preguntas que deben responderse para tomar la toma de decisión. Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Caso de Aplicación: Desarrollo de Sistema de Software para la Gestión de la Ergonomía

La gestión de la ergonomía en las cadenas de suministro de la industria es un aspecto crítico que a menudo recibe insuficiente atención. La falta de prácticas ergonómicas eficaces puede dar lugar a una serie de problemas que afectan tanto a los empleados como a las empresas. Los trabajadores en estas cadenas de suministro están expuestos a riesgos ergonómicos significativos, como la manipulación de cargas pesadas y la realización de tareas repetitivas, lo que puede llevar a lesiones y trastornos musculoesqueléticos. Estos problemas no solo disminuyen la calidad de vida de los trabajadores, sino que también afectan la competitividad empresarial [16].

La necesidad de implementar un sistema de software para el Índice de Gestión de la Ergonomía (IGE) surge a partir del desafío de representar adecuadamente los datos asociados a esta disciplina. Los especialistas del dominio requieren herramientas que les permitan estructurar, analizar y visualizar la información de manera más eficiente, facilitando así la toma de decisiones estratégicas. Para abordar esta problemática, se adoptó la metodología KMoS-SSA, la cual permite la elicitación del conocimiento a partir de la experiencia de los expertos en ergonomía, asegurando que la información relevante sea capturada, comprendida y organizada de manera efectiva.

La aplicación de sistemas blandos resulta clave en este proceso, ya que ofrecen un enfoque estructurado para la recopilación y modelado del conocimiento. Para ello, se emplean diversas técnicas metodológicas, como el

modelo PQR (Problema, Causa, Remedio), que permite identificar y solucionar problemáticas en la gestión de la ergonomía. Además, se utiliza CATWOE, una técnica que ayuda a definir los actores, procesos y objetivos dentro del sistema. También se incorpora el Modelo de Metas Estratégicas, el cual alinea los objetivos de la gestión ergonómica con las necesidades organizacionales, y el Léxico Extendido del Lenguaje, que permite una mejor estructuración terminológica del dominio.

Como parte fundamental de este enfoque, se emplea el Modelo Conceptual (MC) para organizar y representar la información de manera estructurada. Finalmente, toda esta información se modela y visualiza en un grafo de conocimiento, una representación flexible y relacional que permite conectar datos de manera intuitiva. Gracias a esta metodología, se logra una gestión más efectiva del conocimiento ergonómico, proporcionando a los especialistas herramientas avanzadas para enriquecer la toma de decisiones y la implementación de mejores prácticas dentro de la organización.

Descripción del caso

La falta de prácticas ergonómicas adecuadas en las cadenas de suministro de la industria representa un desafío significativo, ya que puede generar riesgos laborales que afectan la salud y el bienestar de los trabajadores. Factores como la manipulación de cargas pesadas, la realización de tareas repetitivas y la falta de adecuaciones ergonómicas incrementan la probabilidad de lesiones y trastornos musculoesqueléticos.

Además del impacto en los empleados, estas deficiencias pueden afectar la eficiencia operativa y la competitividad de las empresas, generando costos adicionales por ausentismo, rotación de personal y menor productividad. Ante esta problemática, surge la necesidad de comprender a profundidad las condiciones ergonómicas dentro de la cadena de suministro y de identificar estrategias que permitan mitigar estos riesgos de manera efectiva.

En [16] se recopilaron datos a través de un cuestionario aplicado a distintos niveles de la organización, incluyendo empleados operativos, expertos en ergonomía, mandos medios y directivos. El instrumento utilizado en este estudio (cuestionario) está basado en la Norma 035 [17] y fue diseñado para recopilar datos detallados sobre las prácticas ergonómicas, de las cuales se evalúan

las condiciones de trabajo y los factores ergonómicos de los trabajadores.

Algunos de los perfiles encuestados son los siguientes:

Expertos: profesionales con amplio conocimiento en ergonomía y experiencia en la implementación y evaluación de prácticas ergonómicas, el cual se encuentra dividido por empleados, académicos, logística, consultores, ergónomos y gestión de calidad.

Mandos medios: profesionales con alto conocimiento de la empresa, como gerentes o director de la compañía, que tienen una visión directa de las operaciones diarias y pueden proporcionar información sobre la implementación de políticas ergonómicas y su efectividad en el lugar de trabajo.

Superiores: son los ejecutivos responsables de la toma de decisiones estratégicas y la asignación de recursos.

La información obtenida refleja percepciones, condiciones de trabajo y cumplimiento de estándares ergonómicos dentro de la cadena de suministro. Dado que estos datos pueden ser complejos y con múltiples interconexiones, se requiere un enfoque que facilite su análisis y permita identificar patrones clave para la toma de decisiones. Los especialistas del dominio requieren de un sistema de software que les facilite la gestión de la ergonomía basada en este estudio.

Desarrollo

Debido a la complejidad del dominio, se utilizó el marco metodológico KMoS-SSA, desarrollándose de forma iterativa los siguientes modelos y artefactos: Léxico Extendido del Lenguaje, Visión Enriquecida, enfoque PQR, CATWOE, Modelo Conceptual y Modelo de Metas Estratégicas. El desarrollo de estos artefactos y modelos permitieron tener un mejor entendimiento del dominio y analizar elementos clave en la ergonomía para facilitar la propuesta de la solución.

LEL (Léxico Extendido de Lenguaje)

De acuerdo con [8], el Léxico Extendido del Lenguaje (LEL) es un modelo creado para facilitar la comprensión y representación del lenguaje utilizado en diferentes dominios. Al aplicarlo en el dominio del IGE en las cadenas de suministro, se busca mejorar la comprensión

del dominio de aplicación. Este modelo se centra en la idea de que una descripción detallada de los términos del lenguaje contribuye significativamente a una mejor comprensión del dominio de aplicación. Para construir el LEL, se identifica y registran los términos relevantes del dominio, asignándoles nombres y descripciones que incluyen tanto su denotación (noción) como su connotación (impacto). Se clasifican las entradas del léxico en cuatro tipos principales según su función en el dominio de aplicación: sujeto, objeto, verbo y estado. Este enfoque permite organizar y categorizar eficazmente el lenguaje utilizado en el dominio del IGE en las CS, lo que facilita su comprensión y aplicación en el contexto de nuestro estudio.

Modelo Conceptual

Como se menciona en [10], durante la fase de entendimiento de la situación, se desarrolla un elemento fundamental específico para entender el dominio de aplicación: el Modelo Conceptual (MC). Este es una representación visual que encapsula las actividades críticas necesarias para llevar a cabo el cálculo del índice de gestión de la ergonomía en las Cadenas de Suministro (CS) de la industria minera y de sal. El MC actúa como un mapa detallado que ilustra cómo se relacionan entre sí las diversas actividades, como la evaluación del instrumento para el IGE.

Al contar con una estructura clara y organizada, el MC permite una comprensión más profunda de cómo se evalúa el índice de gestión de la ergonomía en las CS. Además de su función como herramienta de visualización, el MC también cumple un papel importante en la comunicación y la planificación estratégica del proyecto. También, facilita la discusión y la alineación entre los diferentes miembros del equipo, incluidos los expertos del dominio.

Modelo Metas Estratégicas

Se aplicó el modelo de metas estratégicas con el objetivo de entender mejor la situación que se está enfrentando, donde las partes interesadas hacen énfasis en que ellos desean la mejora del índice de gestión de la ergonomía mediante la evaluación de la gestión ergonómica en las cadenas de suministro. Para realizar este modelo (Figura 6), se identificó que existen varios actores donde ven viable esa evaluación, algunos de los cuales son los líderes de la cadena (departamento de seguridad),

donde ellos desean reducir la prima de riesgo; sindicato, que desea mejorar la calidad de vida de los trabajadores mediante la evaluación de la cadena de suministro con el IGE y, por otra parte, recursos humanos, que desea la reducción de accidentes y enfermedades de trabajo con la evaluación del IGE.

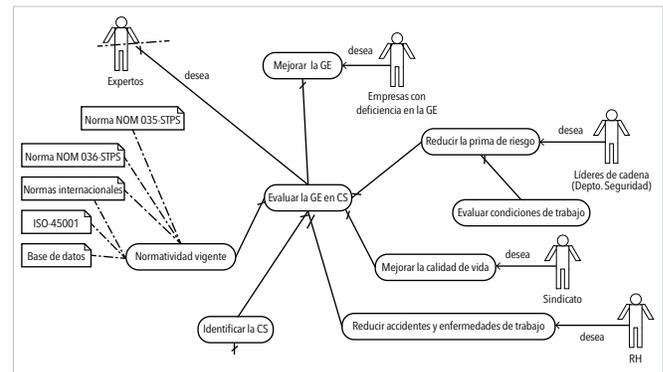


Figura 6. Factores identificados que inciden en la eficiencia terminal en las IES. Fuente: elaboración propia.

Para la evaluación de la gestión de la ergonomía se debe enfocarse en unas normativas vigentes, como la norma NOM 035-STPS, que corresponde al estudio de los factores de riesgos psicosociales que ocurren en el trabajo para el análisis, identificación y prevención de los trabajadores, y también en la norma NOM 036-STPS, que es el estudio de los factores y riesgos ergonómicos en el trabajo, con la identificación, prevención, control y análisis para el manejo manual de cargas [17].

Además, se identificó que el instrumento se encuentra diseñado también con base en ISO45001, el cual, según [18], se basa en la gestión de la seguridad y salud en el trabajo y es fundamental para las empresas, con un enfoque más crítico en aquellas que operan en entornos donde la salud y la seguridad ocupacional son de suma importancia.

PQR (Problema, Causas, Remedio)

Como se menciona en [19], el enfoque PQR (Problema, Causas, Remedio) es una metodología utilizada para identificar y abordar problemas complejos mediante la comprensión de algún dominio en su totalidad, la identificación de las causas subyacentes y la proposición de soluciones. Este enfoque se centra en responder a tres preguntas fundamentales: ¿cuál es el problema? (P), ¿por qué ocurre? (Q) y ¿cómo podemos resolverlo? (R). Al aplicar el enfoque PQR, se busca una comprensión

más detallada de los desafíos específicos y se facilita el desarrollo de estrategias prácticas para resolverlo.

TABLA 2
PQR

PQR	
Realiza P	Evaluación del IGE en las CS de la industria minera superficial mexicana
Por medio de Q	Ayudar con recomendaciones para la gestión de la ergonomía en las cadenas de suministro
Para alcanzar R	Mejorar la gestión de la ergonomía en la cadena de suministro para las empresas

En la evaluación del índice de la gestión de la ergonomía (IGE) en las cadenas de suministro (CS) de la industria minera superficial mexicana, el enfoque PQR se implementa para estructurar el análisis de manera clara y efectiva. Utilizando el PQR, se define el problema (P) como la evaluación del IGE en las CS de la industria minera superficial mexicana. A través del cuestionamiento (Q), se busca ayudar con recomendaciones prácticas y específicas para la gestión de la ergonomía en las cadenas de suministro. El objetivo final (R) es mejorar la gestión de la ergonomía en la cadena de suministro para las empresas, lo que resultará en una mejora en la calidad de vida de los trabajadores y un aumento en la eficiencia operativa de las empresas. Este enfoque proporciona un análisis exhaustivo de los datos que beneficia directamente a los trabajadores y a las empresas para un análisis más profundo de los datos y la toma de decisiones informada.

CATWOE

El análisis CATWOE (del inglés Customers, Actors, Transformation, Worldview, Owner, and Environment) de este estudio se desglosa de la siguiente manera: los clientes son las empresas que deciden evaluar el índice de gestión de la ergonomía en la cadena de suministro. Los actores incluyen a expertos, así como a mandos medios y superiores, como directores de compañía, gerentes y supervisores. La transformación buscada es lograr una gestión ergonómica que mejore la salud laboral y la eficiencia operativa en la empresa minera y de sal. La visión del mundo sostiene que la implementación efectiva de prácticas ergonómicas en la cadena de suministro de la industria minera superficial mexicana mejorará la salud y seguridad de los trabajadores e incrementará la productividad. Los propietarios de esta iniciativa sí se

encuentran identificados. Las restricciones incluyen la participación de un mínimo de dos personas por eslabón de la cadena de suministro.

TABLA 3
CATWOE DEL SISTEMA

N.º	CATWOE	DESCRIPCIÓN
1	Clientes	Empresas que decidan evaluar el índice de gestión de la cadena de suministro
2	Actores	Expertos: Empleados, académicos, logística, consultores, ergonomistas, gestión de calidad y seguridad. Mandos medios y superiores: director compañía, gerentes, supervisores
3	Proceso de transformación	Gestión de la ergonomía en la cadena de suministro
4	Visión del mundo	Implementar una solución de software para el análisis del instrumento contestado por los expertos y altos mandos de las empresas
5	Dueños	Mtro. Iván Francisco Rodríguez, Dra. Aidé Maldonado
6	Ambiente	Disponibilidad y Calidad de los Datos Externos, Normas 035 y 036

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CASO DE APLICACIÓN: ESTRATEGIAS DE ANALÍTICA DE DATOS PARA APOYAR LA ACREDITACIÓN DE PROGRAMAS EDUCATIVOS

Los resultados del proceso de investigación a través de la metodología identificaron que dentro de la categoría de “estudiantes” en los criterios de análisis que CACEI revisa en los procesos de acreditación académica, existe la necesidad de presentar evidencia documentada de estrategias orientadas a atender la problemática relacionada a la eficiencia terminal. Con esto en mente, con la colaboración de los especialistas del dominio, se ubicó la necesidad específica de dar seguimiento a la trayectoria estudiantil, ofreciendo estrategias de contención frente la deserción escolar de un PA. Considerando que es posible tener acceso a los datos reales del desempeño de los estudiantes a través de los servicios de apoyo institucional de la UACJ, una herramienta de analítica de datos puede hacer uso de ellos para identificar las causas y definir estrategias.

El rezago, la reprobación y la deserción escolar afectan la eficiencia terminal por la diversidad de factores que interactúan y dificultan su solución y complejizan esta

problemática. Para poder idear estrategias que busquen rezagar el impacto de estas variables en el índice de eficiencia terminal en un PA, primero hay que identificar cuáles son los principales factores que los provocan. Para eso, se mantuvieron sesiones semanales durante dos meses con un especialista de acreditación de CACEI que ayudó a identificar, a través de una revisión de la literatura y su propia experiencia, qué factores relacionados a las variables de rezago, reprobación y deserción escolar inciden en la de eficiencia terminal de un PA de nivel superior (Figura 7).

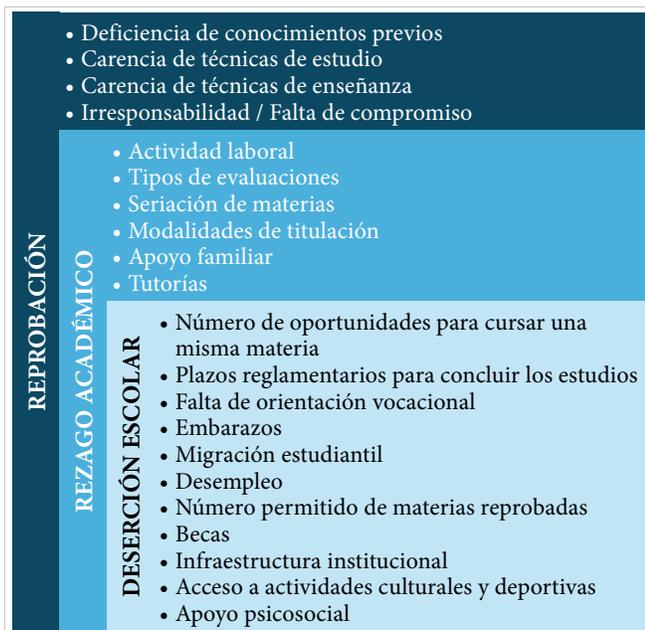


Figura 7. Factores relacionados a las variables de rezago, reprobación y deserción escolar que inciden en la deserción escolar revisado por los especialistas del dominio. Fuente: elaboración propia.

Por último, se hizo una revisión de trabajos previos donde utiliza analítica de datos mediante técnicas de Inteligencia Artificial para identificar qué factores inciden en la deserción escolar y cuáles son las características que pueden predecir si un estudiante de una IES termina desertando de un PA. Esto con la intención de identificar qué tipo de características se deben considerar para formar un conjunto de datos de trabajo.

Los artículos revisados arrojaron las observaciones expuestas en la [Tabla 4](#).

3.1.1. Resultados: Conceptualización de la Solución

Después de haber completado la revisión de la literatura y tomando en consideración las conclusiones de

los proyectos relacionados, se trabajó en conjunto con el responsable de la coordinación de ISC para definir una posible solución a la situación problemática. Se concuerda realizar un modelo de aprendizaje automático basado en algoritmos de Inteligencia Artificial que identifique el perfil de los estudiantes desertores y que una vez que sea validado por los expertos del dominio, sea capaz de predecir a partir de nueva información si un estudiante tiene altas posibilidades de desertar del programa. Los datos para este análisis serían las trayectorias académicas y los datos de asistencia académica con los que cuenta la Coordinación de Orientación y Bienestar Estudiantil (COBE) de la UACJ, la cual es una entidad dedicada a apoyar el desarrollo integral de los estudiantes.

La herramienta se alimentará de los datos históricos relacionados con el desempeño académico de los estudiantes, delimitados dentro de las generaciones de ingreso entre los años 2017 y 2018, que suman alrededor de 7000 estudiantes, y también de datos de asistencia para apoyo académico a COBE.

La delimitación generacional de los estudiantes se debe a las siguientes consideraciones:

- Se trata de las primeras generaciones que comparten el plan de estudios más actualizado del programa (45200-17).
- Muchos de esos estudiantes ya han cumplido con el plazo estándar establecido de 9 semestres para completar sus asignaturas, permitiendo obtener muestras de estudiantes con el estatus de titulados y bajas, de tal forma que permita a la herramienta cognitiva segmentar de forma precisa el perfil de los estudiantes.
- Las características generales de los estudiantes considerados en esta delimitación generacional están más relacionadas a las de los estudiantes de nuevo ingreso y por ingresar que a las características de cortes generacionales de años previos.

Los datos por analizar serán anonimizados o agregados, lo que significa que no se podrá identificar a los estudiantes de manera individual. Esta práctica garantiza la protección de la privacidad de los sujetos, ya que la información personal no será vinculada directamente a los datos de investigación.

TABLA 4
RESUMEN DE LA REVISIÓN DE LITERATURA SELECCIONADA PARA DEFINIR CUÁL HERRAMIENTA COGNITIVA ES LA MÁS CONVENIENTE PARA ATENDER LA DESERCIÓN ESCOLAR EN LOS PA NIVEL SUPERIOR

REFERENCIAS	HERRAMIENTAS COGNITIVAS UTILIZADAS	VARIABLES EXPLICATIVAS DE LA VARIABLE OBJETIVO	TAMAÑO DE LA MUESTRA UTILIZADA	COMENTARIOS
[16]	DT ID3, DT J48, Naive Bayes Tree, Naive-Bayes, Bayes Net	Las calificaciones obtenidas por los estudiantes en el primer año de sus estudios	193 registros de estudiantes	Los mejores algoritmos para la predicción de la deserción escolar son el Naive Bayes Tree y el DT J48.
[17]	DT C4.5	27 atributos relacionados a factores académicos, económicos, familiares, sociales, creencias, distancias y transporte, seguridad, entre otros	500 registros de estudiantes	Las cinco principales causas de la deserción escolar universitaria se deben a la falta de asesorías, a un inadecuado ambiente estudiantil, a la falta de seguimiento académico, a la deficiente calidad educativa y al servicio en general
[18]	Decision tree, Naive bayes, Random Forest Classifier, SVM y KNN.	28 atributos como estado civil, Ingreso bruto de los padres y su escolaridad, préstamos bancarios, promedio general, entre otros	3562 registros de estudiantes	Se descubrió que el clasificador Random Forest es muy prometedor para predecir las tasas de abandono, con una precisión de entrenamiento del 94% y una precisión de prueba del 86%

Una vez desarrollada la herramienta tecnológica, será capaz de identificar a aquellos estudiantes que comparten un perfil relacionado a aquellos que decidieron darse de baja o fueron dados de baja en periodos anteriores, y esto permitirá a la coordinación del programa brindarles la atención necesaria para buscar continúen su trayectoria académica.

3.1.2. Discusión

El sostenido ciclo continuo de enriquecimiento a través de la elicitación de conocimiento frente a los expertos del dominio a partir de entrevistas y desarrollo de modelos, como lo marca KMoS-SSA, fue el mejor vehículo de comunicación en la búsqueda de un medio para estructurar la situación problemática y ayudar a los proveedores de una posible solución a encontrar cuál pudiera ser la herramienta más adecuada para atender el caso. La herramienta cognitiva sigue en desarrollo, pero los resultados de los prototipos realizados al momento ofrecen resultados que invitan a continuar el trabajo realizado.

3.2. CASO DE APLICACIÓN DESARROLLO DE SISTEMA DE SOFTWARE PARA LA GESTIÓN DE LA ERGONOMÍA

3.2.1. Resultados: Solución Propuesta

Una vez finalizado el análisis, se decidió realizar una solución de software que utilice grafos de conocimiento que se alimente de los resultados de las encuestas y que facilite el análisis de los datos mediante la visualización

del conocimiento. Los grafos de conocimiento utilizan un modelo de datos basado en grafos para manejar y organizar información en diferentes dominios que requieren integración, gestión y extracción de valor de diferentes fuentes de datos [20]. Esta metodología ofrece ventajas en comparación con los modelos relacionales tradicionales. Los grafos de conocimiento brindan una representación clara y sencilla de entender para una amplia gama de dominios.

Como se hace mención en [21], una de las ventajas más importante de los grafos de conocimiento es su flexibilidad para posponer la definición de un esquema, lo que posibilita que los datos se adapten y evolucionen de manera más dinámica. Los lenguajes de consulta de grafos no solo admiten operaciones relacionales estándar, como uniones, sino que también permiten buscar entidades conectadas a través de caminos de longitud variable. También, se pueden utilizar ontologías y reglas para definir y comprender la semántica de los términos utilizados en el grafo de conocimiento. Los marcos escalables para el análisis de grafos proporcionan herramientas para calcular medidas como el agrupamiento, lo cual implica evaluar qué tan conectados están los nodos dentro de una misma comunidad. Una métrica común para esto es el coeficiente de agrupamiento (*clustering coefficient*), que mide la probabilidad de que los vecinos de un nodo estén también conectados entre sí.

Este tipo de análisis es útil para identificar estructuras locales dentro del grafo, como subgrupos bien defini-

dos, relaciones estrechas entre conceptos o incluso detectar anomalías en la organización del conocimiento representado.

En la actualidad, se han presentado técnicas prometedoras que aplican el aprendizaje automático y Soft-Computing a los grafos, lo que abre nuevas brechas para explorar y aprovechar los grafos de conocimiento en una variedad de dominios para su análisis.

3.2.2. Discusión

La gestión ergonómica en las cadenas de suministro presenta un desafío importante que afecta tanto la salud de los trabajadores como la competitividad de las empresas resultando en un impacto negativo tanto para los empleados como para la organización. El resultado de KMoS-SSA fue la propuesta del uso de técnicas avanzadas como el análisis de grafos de conocimiento para analizar la información obtenida de cuestionarios aplicados a empleados, expertos y mandos medios y superiores. Mediante el uso de metodologías como PQR y CATWOE, se busca identificar patrones y conceptos clave en el ámbito de la ergonomía laboral. Sin embargo, un desafío identificado es que al ser una percepción de los trabajadores (cuestionario), en lugar de datos objetivos, como mediciones con sensores, limita el avance hacia un entorno de Industria 5.0. Esto sugiere la necesidad de integrar datos más precisos y objetivos en el análisis para implementar mejoras efectivas en la gestión ergonómica de las cadenas de suministro.

IV. CONCLUSIONES

Atender situaciones problemáticas dentro de los DCEI a través del uso de la metodología KMOS-SSA, permite caminar de manera completa los espacios dentro de los procesos, interacciones y toma de decisiones de los actores involucrados, para identificar las mejores alternativas de solución.

La utilización del marco metodológico en los casos aplicación concluyeron con propuestas de solución deseables, ya que fueron validadas y aceptadas por los especialistas del dominio, quienes no son especialistas en propuestas de tecnologías de información. Sin embargo, el marco metodológico KMoS-SSA les permitió identificar los ángulos en donde las alternativas de solución pueden desarrollarse. Una vez identificado el PQR y el CATWOE, se pudo realizar una búsqueda más eficiente

de trabajos similares, lo que permitió llegar a un consenso de la solución propuesta. Estos trabajos similares dan evidencia de la factibilidad de la propuesta solución.

Sobre estos mismos casos de aplicación, existen muchas líneas de investigación que podría continuar a partir del trabajo realizado. Los actores de ambos dominios y los procesos involucrados son terreno fértil para el desarrollo de diferentes herramientas relacionadas con el cómputo en la nube o la continuación en el desarrollo de herramientas de cómputo cognitivo que atiendan las necesidades dinámicas a las que se enfrentan en su cotidianidad.

Como trabajos futuros, se está avanzando en la implementación de las soluciones con herramientas tecnológicas. Estos desarrollos permitirán validar la efectividad del enfoque en entornos reales, optimizando la adopción de las soluciones y su impacto en la práctica. Además, se explorarán mejoras cambios al marco metodológico para mejorar la toma de decisión de los proveedores de solución acerca de la relevancia de los modelos utilizados, así como la mejora de estos para asegurar la escalabilidad y adaptabilidad de KMoS-SSA a diferentes necesidades.

REFERENCIAS

- [1] K. Olmos-Sánchez, J. Rodas-Osollo, A. A. Maldonado-Macías y A. Jiménez-Galina, "Harmonization of knowledge representation: Integrating systems thinking ideas with appropriate domain representation strategies", *Computación y Sistemas*, vol. 28, n.º 3, 2024.
- [2] I. Nonaka y H. Takeuchi, *The Knowledge-Creating Company*. Nueva York: Oxford University Press, 1995.
- [3] A. R. Zamin, N. Yazdani y K. Hameed, "Development Of Nonaka's Thought: A Critical Review", *Pak. J. Humanit. Soc. Sci.*, vol. 12, n.º 2, pp. 951-958, 2024.
- [4] P. Checkland, *Systems Thinking, Systems Practice*. Wiley, 1999.
- [5] M. Kayyali, "An overview of quality assurance in higher education: Concepts and frameworks", *IJMSIT*, vol. 4, n.º 2, pp. 1-4, 2023.
- [6] I. Siddique, "Systems Engineering in Complex Systems: Challenges and Strategies for Success", *EJAET*, vol. 9, n.º 9, pp. 61-66, 2022, doi: [10.2139/ssrn.4885918](https://doi.org/10.2139/ssrn.4885918).

- [7] S. Cabrilo, S. Dahms y F.-S. Tsai, "Synergy between multidimensional intellectual capital and digital knowledge management: Uncovering innovation performance complexities", *J. Innov. Knowl.*, vol. 9, n.º 4, pp. 1-16, 2024, doi: [10.1016/j.jik.2024.100568](https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100568).
- [8] G. Hadad, J. Doorn y G. Kaplan. (2009). Explicitar Requisitos del Software usando Escenarios. Presentado en Workshop em Engenharia de Requisitos. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Explicitar-Requisitos-del-Software-usando-Hadad-Doorn/e3078bf5fcb6abd6a34f26e0f5780cb99d983c06>
- [9] S. Rohajawati, S. Fairus, H. Saragih, H. Akbar y P. Rahayu, "A Combining Method for Systems Requirement of Knowledge - Based Medical Hazardous Waste", *TEM Journal*, vol. 10, n.º 4, pp. 1761-1768, 2021, doi: [10.18421/TEM104-37](https://doi.org/10.18421/TEM104-37).
- [10] B. Wilson, *Soft Systems Methodology: Conceptual Model Building and its Contribution*. Wiley, 2001.
- [11] Y. Nakamori, A. Wierzbicki y Z. Zhu, "A Theory of Knowledge Construction Systems", *Syst. Res.*, vol. 28, pp. 15-39, 2010, doi: [10.1002/sres.1046](https://doi.org/10.1002/sres.1046).
- [12] P. Hanafizadeh y F. Ghamkhari, "Elicitation of Tacit Knowledge Using Soft System Methodology", *Syst. Pract. Action Res.*, vol. 32, n.º 5, pp. 521-555, 2019, doi: [10.1007/s11213-018-9472-9](https://doi.org/10.1007/s11213-018-9472-9).
- [13] K. Olmos y J. Rodas, "KMoS-RE: knowledge management on a strategy to requirements engineering", *Requirements Eng*, vol. 19, pp. 421-440, 2014, doi: [10.1007/s00766-013-0178-3](https://doi.org/10.1007/s00766-013-0178-3).
- [14] J. Rodas-Osollo y K. Olmos-Sánchez, "Marco metodológico para la gestión sistémica del conocimiento", *Novarua*, vol. 16, n.º 29, pp. 48-71, 2024, doi: [10.20983/novarua.2024.29.3](https://doi.org/10.20983/novarua.2024.29.3).
- [15] K. Olmos-Sánchez, J. Rodas, L. Fernández y V. Morales, "Requirements engineering based on knowledge: a comparative case study of the KMoS-RE strategy and the DMS process", *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, n.º 77, pp. 88-94, 2015.
- [16] I. F. Rodríguez-Gámez, A. A. Maldonado-Macías, E. A. Lagarda-Leyva, J. L. Hernández-Arellano y Y. Rodríguez, "A Continuous Improvement Instrument for the evaluation of the ergonomics management system in the supply chain", *Heliyon*, vol. 10, n.º 24, pp. 1-19, 2024, doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e40956](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40956).
- [17] *Factores de riesgo psicosocial en el trabajo- Identificación, análisis y prevención*, Norma Oficial Mexicana NOM-035-STPS-2018, Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541828&fecha=23/10/2018#gsc.tab=0
- [18] *Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo*, ISO 45001:2018(es), Organización Internacional de Normalización, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:es>
- [19] S. Salavati y A. Mirijamdotter, "Soft Systems Methodology and Cognitive Mapping: A Linkage between the Initial Phases of SSM", en *Vienna 2017 International Society for System Sciences, The 61st ISSS World Conference*, Vienna, 2017.
- [20] T. Al-Moslmi, M. Gallofré, A. L. Opdahl y C. Veres, "'Named Entity Extraction for Knowledge Graphs: A Literature Overview", en *IEEE Access*, vol. 8, pp. 32862-32881, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.2973928](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973928).
- [21] C. Lu, P. Laublet y M. Stankovic, "Travel Attractions Recommendation with Knowledge Graphs", en *European Knowledge Acquisition Workshop (EKAW)*, 2016, doi: [10.1007/978-3-319-49004-5_27](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49004-5_27).

Diseño y estudio de un aerogenerador de 1 kW para uso doméstico

Engineering and analysis of a 1 kW domestic wind turbine

Diego Moisés Almazo Pérez¹ ✉ , Néstor D. Galán H.² , Carlos Alberto Gómez Álvarez¹, Eber E. Orozco G.² 

¹Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

²Profesor de tiempo completo, Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México

RESUMEN

Los aerogeneradores de eje horizontal de potencia de 1 kW, ofrecen una alternativa viable para la generación de energía limpia en hogares. Mediante la aplicación de los modelos teóricos de Rankine-Froude y Elemento de Pala, este trabajo presenta un diseño detallado que contribuye a la reducción de la dependencia de fuentes de energía fósiles y promueve la sostenibilidad energética. En el presente trabajo, se muestra detalladamente el proceso de diseño de un aerogenerador de eje horizontal con una potencia de 1 kW empleando el modelo teórico de Rankine-Froude y modelo del Elemento de Pala, para las cuales se trabajó con perfiles NACA de cuatro dígitos con una ordenada de 0.4 al 40 % de la cuerda, con diferentes espesores con MATLAB® se ha calculado el perfil alar para posteriormente construir el aerogenerador. El análisis estadístico del recurso eólico (10 m de altura) para la ciudad de Saltillo, Coahuila, México, donde se han realizado las pruebas de funcionamiento muestra que con una velocidad mínima de 6 m/s se puede generar energía eléctrica.

PALABRAS CLAVE: aerogenerador; energía eólica; perfil aerodinámico; sostenibilidad energética; viento.

ABSTRACT

Low-power (1 kW) horizontal axis wind turbines offer a viable alternative for clean energy generation in homes. By applying the theoretical models of Rankine-Froude and Blade Element, this work presents a detailed design that contributes to reducing the dependence on fossil fuels and promotes energy sustainability. This paper presents a detailed design process of a 1 kW horizontal axis wind turbine using the Rankine-Froude and Blade Element theoretical models, for which NACA 44xx series airfoils have been used, and MATLAB® has been used to calculate the airfoil profile to subsequently build the wind turbine. The statistical analysis of the wind resource (10 m height) for the city of Saltillo, Coahuila, Mexico, where the operational tests have been carried out, shows that with a minimum wind speed of 6 m/s, electrical energy can be generated.

KEYWORDS: wind turbine; wind energy; aerodynamic profile; energy sustainability; wind.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Diego Moisés Almazo Pérez

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología

DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

CORREO ELECTRÓNICO: diego.almazo@uacj.mx

Fecha de recepción: 5 de noviembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 20 de marzo de 2025. **Fecha de publicación:** 25 de marzo de 2025.



I. INTRODUCCIÓN

El viento es una fuente de energía libre, limpia e inagotable. Durante décadas ha sido utilizada en el transporte, la industria y la agricultura. Con la aparición de los aerogeneradores se ha aprovechado esta energía para generar energía eléctrica. En el año 2023 en México, el 5 % de la generación eléctrica fue proveniente de la energía eólica, mientras que más del 70 % por energía fósil, siendo esta el mayor contaminante por las emisiones de CO₂. Es importante mencionar que solo nueve estados son productores de esta energía limpia y que el 98.7 % de la población tiene acceso al servicio de energía eléctrica en México [1].

El presente trabajo, pretende motivar a personas interesadas en la generación de energía a través de aerogeneradores de bajo costo, contribuyendo a la reducción de la problemática ambiental, así como a la disminución de gastos por consumo de energía eléctrica al poder ser utilizados en ciudades o lugares donde no se tiene acceso a este servicio.

El Laboratorio Nacional de Energía Renovable [2] ha señalado que los sistemas eólicos de pequeña escala son capaces de aportar una contribución sustancial al suministro eléctrico de los hogares. Aunque su tamaño sea reducido en comparación con las grandes turbinas industriales, estas unidades pueden generar suficiente energía para cubrir una porción significativa del consumo doméstico.

La falta de acceso a electricidad para muchos hogares en México podría reducirse mediante la instalación de aerogeneradores caseros capaces de producir hasta 1 kW de potencia para uso doméstico, como encender focos, prender una estufa o licuadora, calentar el agua, etc.

Los aerogeneradores son máquinas que capturan la energía cinética del viento y, a través de un proceso de conversión, la transforman en energía eléctrica utilizable. Esta transformación consiste en tres procesos cuyo fin es mover un generador eléctrico, los cuales son [3] los siguientes:

- Aerodinámica. Obtención de la mayor cantidad de energía por perfiles aerodinámicos.
- Mecánica. Conversión de energía cinética a energía mecánica por medio del rotor.

- Eléctrica. Conversión de energía mecánica a energía eléctrica por medio del generador.

II. METODOLOGÍA

A. MODELO COMBINADO

El comportamiento de una hélice puede ser modelado a través de dos teorías principales: Rankine-Froude y el modelo del Elemento de Pala, las cuales permiten establecer un conjunto de ecuaciones no lineales que relacionan el ángulo ε de las palas y las velocidades inducidas a y b en el plano del disco de la hélice, donde C_L es el coeficiente de levantamiento y C_D es el coeficiente de arrastre:

$$f(\varepsilon) = \tan(\varepsilon) \frac{Jb + \pi x a}{J(J + a) + \pi x(\pi x - b)} \quad (1)$$

$$a = \frac{\frac{8x}{\sigma} \sin(\theta + \varepsilon)(C_L \pi x - C_D) - (C_L^2 + C_D^2) J}{\left[\frac{8x}{\sigma} \sin(\theta + \varepsilon) + C_D\right]^2 + C_L^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{\frac{8x}{\sigma} \sin(\theta + \varepsilon)(C_L J + C_D \pi x) + (C_L^2 + C_D^2) \pi x}{\left[\frac{8x}{\sigma} \sin(\theta + \varepsilon) + C_D\right]^2 + C_L^2} \quad (3)$$

Las unidades de velocidad son nD y la velocidad de avance de la hélice, donde n es número de revoluciones y D es el diámetro de la hélice y queda representada mediante el llamado coeficiente de funcionamiento (o factor de avance J), como se establece en la ecuación (4):

$$J = \frac{V}{nD} \quad (4)$$

Del mismo modo, las velocidades inducidas quedarán representadas por los números:

$$a = \frac{a'}{nD} \quad (5)$$

y

$$b = \frac{b'}{nD} \quad (6)$$

Finalmente, se introduce un número adimensional para representar la “densidad” de las palas con respecto al disco de la hélice:

$$\sigma = \frac{Nc}{nD} \quad (7)$$

A este número se conoce con el nombre de solidez σ [4].

B. SELECCIÓN DEL PERFIL AERODINÁMICO

La optimización del rendimiento de una hélice de aerogenerador pasa por la elección de un perfil aerodinámico con un alto coeficiente de sustentación y un bajo coeficiente de resistencia, lo que se traduce en una elevada relación sustentación/resistencia. Esto normalmente se obtiene tomando aquellos perfiles que poseen altos valores de la relación sustentación sobre resistencia, C_L/C_D y luego, se debe considerar otras propiedades relacionadas con la forma en que C_L y C_D varían con el ángulo de ataque. Para las turbinas eólicas se sugieren aquellos perfiles en los cuales el coeficiente C_L alcanza su valor máximo en forma suave, evitando los que tienen picos agudos de C_L en función de α , en los cuales la abrupta caída de la sustentación puede producir fuertes vibraciones [5]. En base a la literatura de Manwell [6] y Abbott [7], los tipos de perfiles de la serie NACA 44xx y NACA 230xx cumplen con lo antes mencionado y son considerados los óptimos para aerogeneradores de baja potencia.

Los perfiles NACA son una familia de perfiles aerodinámicos normalizados, cuyo diseño geométrico está definido por un código numérico, el cual sirve como entrada para ecuaciones matemáticas que permiten generar la geometría exacta del perfil y calcular sus propiedades aerodinámicas.

La descripción de cada dígito de los perfiles de cuatro dígitos es la siguiente:

- El primer dígito determina la curvatura del perfil, especificando la máxima distancia que la línea media se desvía de una línea recta que une los extremos del perfil, como un porcentaje de la longitud total de la cuerda (% C).
- El segundo dígito del código NACA determina la posición a lo largo de la cuerda donde se encuentra la mayor curvatura del perfil. Esta posición se expresa como una fracción del 1 % de la longitud total de la cuerda, medida desde el borde de ataque.
- Los dos últimos dígitos del código NACA definen la ordenada máxima de la línea de espesor del per-

fil, expresada como un porcentaje de la longitud de la cuerda. Esta ordenada máxima indica el espesor máximo del perfil.

Para este proyecto se utiliza el perfil NACA 4412, siendo su descripción la siguiente:

- Flecha máxima del perfil 4 %.
- La abscisa de la ordenada máxima de la línea media del perfil corresponde al 40 % de la longitud de la cuerda.
- La ordenada máxima de la línea de espesor es del 12 % de la cuerda.

En la [Tabla 1](#) se muestran los datos de los valores de C_L y C_D del perfil NACA 4412, de acuerdo con el ángulo de ataque α .

TABLA 1
POLARES DEL PERFIL NACA 4412 [8]

α	C_L	C_D
-7.0	-0.314	0.0118
-4.0	-0.008	0.0102
-2.4	0.140	0.0097
-1.0	0.300	0.0094
0.6	0.453	0.0097
2.1	0.604	0.0100
5.2	0.896	0.0122
8.2	1.185	0.0162
11.4	1.444	0.0243
14.9	1.604	0.0539
16.9	1.595	0.1077
19.2	1.520	0.1922
26.3	1.167	0.4166

Los esfuerzos a los que se someterá el álabe se muestran en la [Figura 1](#) y serán los siguientes:

- Esfuerzo de flexión: los álabes tienden a flectarse debido a las fuerzas de empuje (1).
- Esfuerzos de tracción: los álabes sufren un empuje en la zona del buje debido a las fuerzas centrífugas (2).
- Esfuerzos de torsión: los álabes tienden a retorcerse hacia un ángulo de álabe menor debido a las fuerzas (3).

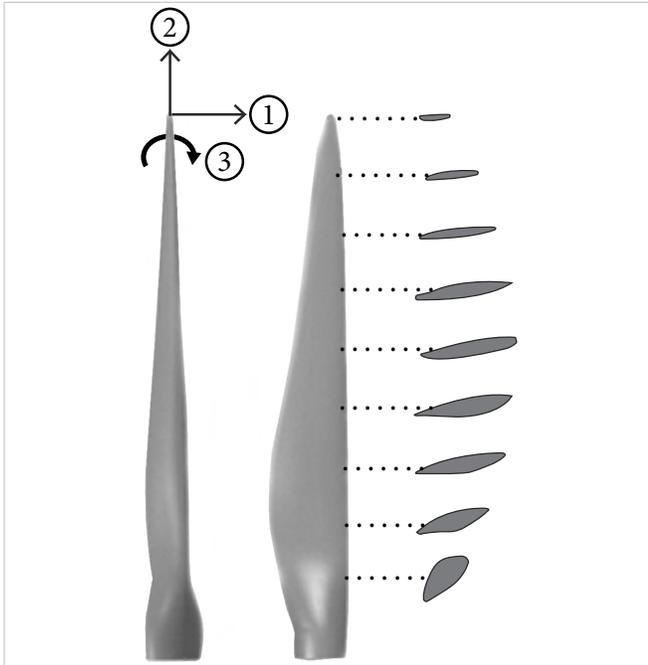


Figura 1. 1) Esfuerzo de flexión. 2) Esfuerzo de tracción. 3) Esfuerzo de torsión.

C. DISEÑO DE PALA Y COMPONENTES DEL AEROGENERADOR

El rotor consta de álabes, buje y cono:

- Álabes: material fibra de vidrio.
- Buje: lámina galvanizada con diámetro de 20 cm.
- Cono: impresión 3D, material PLA, diámetro: 20 cm.

Para determinar el tamaño de la hélice, se desarrolló la metodología descrita en Manwell [6] y Bleier [9], siendo necesario conocer la potencia máxima deseada del rotor, donde el espesor máximo y la envergadura de la pala son funciones principales del rendimiento aerodinámico deseado. En este proyecto, al ser la potencia requerida de 1 kW, las dimensiones recomendadas según la literatura son; una envergadura de 1.47 m, ideal para satisfacer lo requerido. En la [Tabla 2](#) se muestran los datos de la matriz de rotor.

TABLA 2
MATRIZ DE ROTOR

Perfil alar	NACA 4412
Diámetro de rotor	3 m
Envergadura	1.47 m
Espesor máximo	15.50 cm
Cuerda	2.50 cm

Otros componentes del aerogenerador son los siguientes:

- Eje de baja velocidad: tubo galvanizado 2.5 cm longitud de 16 cm.
- Multiplicador: tren de engranajes con estrellas de bicicleta de 45, 14, 40 y 10 dientes.
- Eje de alta velocidad: tubo galvanizado 2.5 cm longitud de 11 cm.
- Torre: tubo galvanizado 2.55 m de longitud.
- Sistema de orientación: lámina galvanizada 34 × 27.5 cm.

D. DISEÑO DE COMPONENTES EN CAD

La [Figura 2](#) ofrece una vista general de un generador eólico de eje horizontal. Este aerogenerador cuenta con un rotor de tres palas y tiene unas dimensiones totales de 3 metros de diámetro de rotor y 4.02 metros de altura.

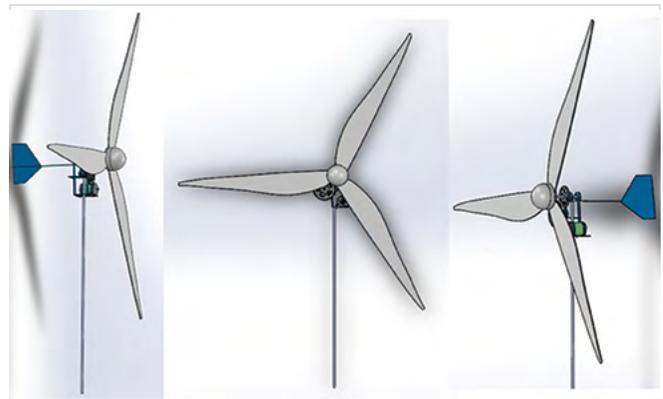


Figura 2. Ensamble del aerogenerador en CAD.

Álabe

Es la parte más importante del aerogenerador y la que más requiere de talento e ingeniería. Existen diversas formas para diseñar la pala o álabe. La sección transversal se diseñó a partir de la ecuación de perfil alar de 4 cifras NACA 4412 (ecuación (8)) para obtener la sección transversal del álabe ([Figura 3](#)). A partir de esta sección transversal se genera el alabe completo mostrado en la [Figura 4](#), donde y es la línea de curva, c es la cuerda, x es la distancia desde la punta y t es el espesor.

$$y_t = \frac{t}{0.2} c \left[0.2969x \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.1260 \left(\frac{x}{c}\right) - 0.3516 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right] \quad (8)$$

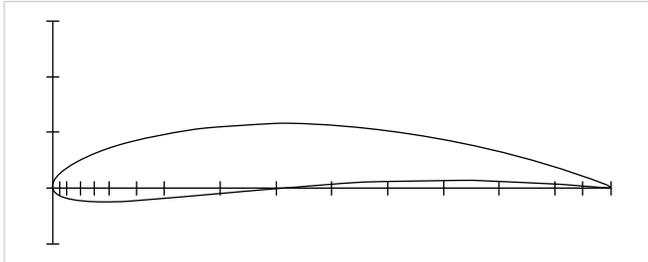


Figura 3. Perfil alar para el alabe del aerogenerador generado en Matlab.

La cuerda, el ángulo de ataque, el espesor y otros parámetros del álabe, se van variando en la programación en base a las velocidades de viento promedio de diseño.

Finalmente, después de modelar en Matlab (Figura 4), se obtuvo el álabe (Figura 5), con las características y formas deseadas, el cual se diseñó con el software SolidWorks.

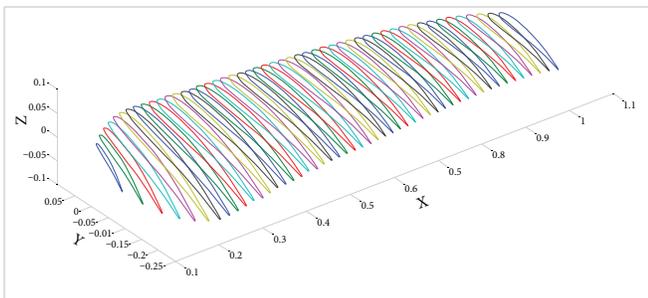


Figura 4. Álabe generado en Matlab a partir de 50 perfiles alares NACA 4412 con variación de cuerda, torcimiento y espesor del álabe.

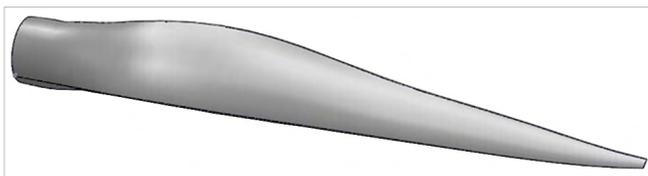


Figura 5. Álabe del aerogenerador en SolidWorks.

La manufactura de los alabes, puede ser realizada en un centro de maquinado CNC o en impresión 3D.

Una vez obtenidos los álaves del aerogenerador, se procedió a fabricarlos y a ensamblar el aerogenerador para realizar las pruebas (Figura 6).

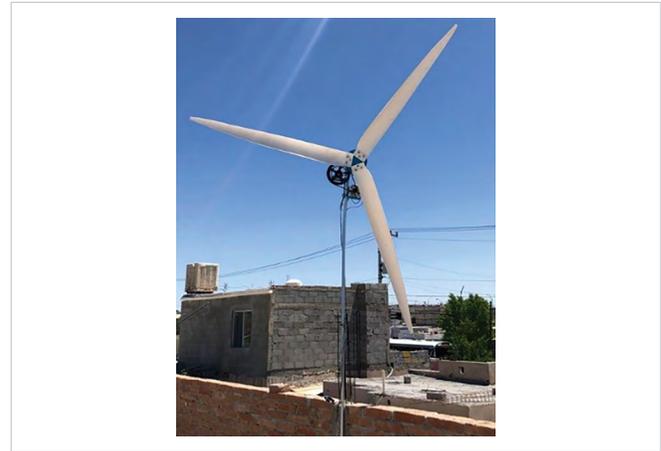


Figura 6. Aerogenerador instalado y funcionando.

E. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL VIENTO

Se realizó un estudio de potencial eólico en la ciudad de Saltillo, Coahuila, a 10 m de altura, para determinar las condiciones de operación del aerogenerador en generación distribuida. Además de los parámetros estadísticos tradicionales, como la velocidad media y la desviación estándar, se incluyeron indicadores energéticos, como la densidad de potencia y la potencia eólica disponible para una evaluación más exhaustiva del recurso eólico.

Estos resultados de velocidad media y desviación estándar permitirán estimar el factor de forma k ,

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (9)$$

y el factor de escala c en (m/s) es,

$$c = \bar{v} \left(0.568 + \frac{0.433}{k}\right)^{-1/4} \quad (10)$$

de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP) de Weibull, que, a partir de la distribución de velocidades del viento, permite estimar tanto el potencial energético del sitio como la energía eléctrica que puede producir un aerogenerador en un año [10]. La FDP es expresada como sigue:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (11)$$

Debido a que las estaciones meteorológicas suelen medir la velocidad del viento a 10 metros sobre el suelo, es necesario aplicar la ley de Hellman para estimar la velo-

cidad del viento a la altura de rotor del aerogenerador, que en este caso es de 20 metros:

$$\frac{v'_w}{v_w} = \left(\frac{h'}{h}\right)^\alpha \quad (12)$$

donde v_w es la velocidad de viento medida a la altura h , v'_w es la velocidad del viento a la altura h' del buje, el factor α depende del tipo de rugosidad de la superficie y de la estabilidad atmosférica [11]. Numéricamente, α se encuentra en el rango de 0.1-0.3, adoptando para terrenos de asentamiento eólico el valor de 1/7.

F. CURVA DE POTENCIA

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que muestra la relación entre la velocidad del viento y la potencia eléctrica que puede generar el aerogenerador [12]. La curva de potencia depende de varios factores, como el diseño de las palas, el tamaño del rotor, la densidad del aire y el rendimiento del generador [13]. Para obtener la curva de potencia de un aerogenerador de 3 metros de diámetro a diferentes velocidades del viento desde 1 m/s a 10 m/s, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p \eta_G \quad (13)$$

donde P es la potencia eléctrica en Watts (W), ρ es la densidad del aire en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3), A es el área barrida por el rotor en metros cuadrados (m^2), C_p es el coeficiente de potencia, que depende de la velocidad específica y el ángulo de paso, v_w es la velocidad del viento en metros por segundo (m/s) y η_G es la eficiencia del generador.

Con esta expresión, se puede calcular la potencia eléctrica para cada velocidad del viento desde 1 m/s a 16 m/s y graficar las curvas de potencia resultante.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. RECURSO EÓLICO

Del análisis estadístico de la velocidad de viento promedio horario anual se obtuvo el comportamiento de la velocidad del viento a la altura de medición (10 m) y su extrapolación a 20 m de altura (Figura 7), observando una velocidad media anual de 3.1 m/s a los 10 m de

altura y de 3.8 m/s a los 20 m de altura, con una desviación estándar de 1.4 m/s y 1.6 m/s respectivamente, con una intensidad de turbulencia de 0.47.

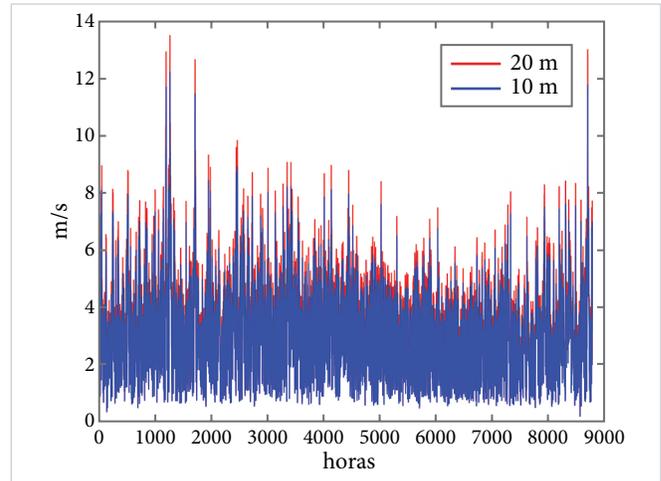


Figura 7. Velocidad de viento medio horario en Saltillo, Coahuila.

En la FDP de Weibull (Figura 8), el factor de forma para zonas propicias de asentamientos eólicos es de 2 a 2.5, donde existen vientos no turbulentos e intensos y el factor de escala debe ser muy cercano a la velocidad media anual, en este estudio se obtienen valores de $k_{10} = 2.22$ y $k_{20} = 2.47$ con factores de escala $c_{10} = 3.4$ m/s y $c_{20} = 3.8$ m/s, que indican que el lugar propuesto es apto para la microgeneración eólica.

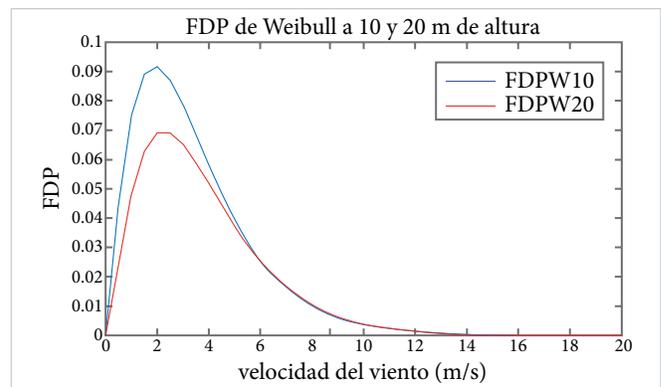


Figura 8. Distribución de Weibull para velocidades de viento a 10 y 20 m de altura.

Las curvas de potencia mostradas en la Figura 9 se estimaron para el área de barrido de la turbina del aerogenerador desarrollado y la velocidad del viento. Se obtuvo una potencia eólica disponible (en verde) con un crecimiento exponencial conforme se incrementa la velocidad del viento y con la eficiencia de la turbina se estimó la potencia aerodinámica (azul) que puede

extraerse de la energía cinética del viento y la potencia eléctrica generada considera la eficiencia del generador.

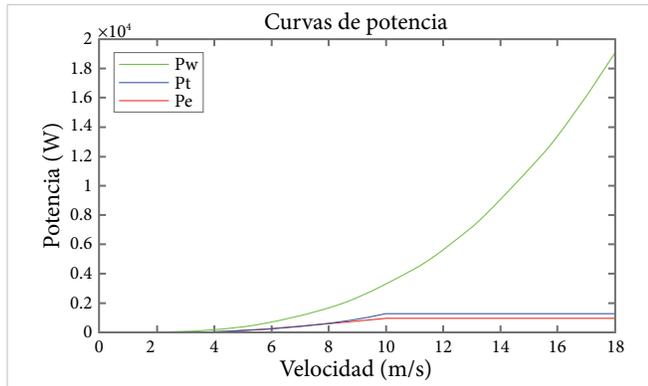


Figura 9. Potencia eólica disponible, aerodinámica y eléctrica en el aerogenerador.

B. PRUEBAS

Para realizar las pruebas correspondientes del aerogenerador se utilizó un multímetro digital, el cual permite medir magnitudes eléctricas, siendo las más comunes el voltaje e intensidad de corriente, lo que posibilitó estimar la potencia.

En la Figura 10 se muestra la gráfica del voltaje generado en un tiempo de 24 s, el mínimo es de 1.48 V y su pico máximo 18.97 V, estableciéndose a los 24 s en 18.31 V, con una velocidad promedio del viento de 6 m/s.

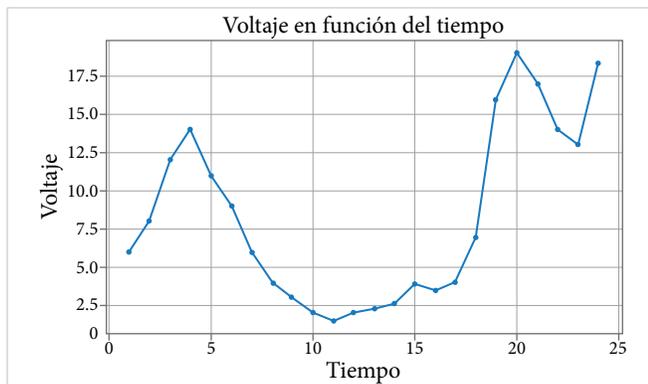


Figura.10. Gráfica del comportamiento del voltaje en función del tiempo.

IV. CONCLUSIONES

El viento es un recurso que está a disposición de todos. El que las personas puedan implementar proyectos como este, genera un cambio social, sobre todo en aquellos

lugares donde no se cuenta con energía eléctrica y se puede producir mediante un aerogenerador casero. La importancia de que este proyecto es significativa, ya que se puede realizar a partir de materiales reciclables y comúnmente encontrados en el mercado, además, de ser manufacturado de una manera sencilla, lo que hace posible que pueda ser replicado. El comprender cuál es la funcionalidad de cada componente ayuda a que puedan ser reemplazados por otros que se tengan a la disposición cuando así sea necesario. El diseño propuesto para cada componente cumple con su finalidad de trabajo logrando el objetivo principal de construir un prototipo de aerogenerador y que este produzca energía eléctrica.

El aerogenerador resulta fácil de instalar y una vez puesto en marcha no se encuentran fallas en los componentes que impidan su funcionamiento. Los gastos que se generaron en la realización del proyecto se pueden ver como una inversión, ya que, desde el punto de vista económico, es posible recuperar la inversión a corto plazo por la producción de energía eléctrica.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría de Energía, *Balance Nacional de Energía 2023*. México, 2025.
- [2] NREL, *Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad*. Santa Fe, Nuevo México: Departamento de Energía EE.UU., 2007.
- [3] L. De Miguel, "Estudio de viabilidad de la introducción al mercado y diseño de un molino aerogenerador lento para uso doméstico", proyecto final de grado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2015.
- [4] D. M. Almazo, "Diseño y Manufactura de una Hélice para el Ventilador del Túnel de Viento A-X/8M", tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2012.
- [5] A. Ramírez, "Diseño de Álabes, Rotor y Transmisión de un Generador Eólico de eje Horizontal de 500 W", tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Pachuca, Pachuca de Soto, 2019.
- [6] J. F. Manwell, J. G. McGowan y A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, design and application*, 2.ª ed. Wiley, 2009.

- [7] I. H. Abbott y A. E. Von Doenhoff, *Theory of Wing Sections. Including a Summary of Airfoil Data*. Nueva York: Dover Publications, 1958.
- [8] E. N. Jacobs y R. M. Pinkerton, “Test of N.A.C.A. airfoils in the variable density wind tunnel. Series 44 and 64”, NASA, rep. n.º NACA-TN-401, 2013.
- [9] F. P. Bleier, *Fan Handbook: Selection, Application, and Design*. Nueva York: McGraw-Hill Education, 1998.
- [10] Z. R. Shu, Q. S. Li y P. Chan, “Statistical Analysis of Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Hong Kong”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 101, pp. 644-657, 2015, doi: [10.1016/j.enconman.2015.05.070](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.070).
- [11] M. Villarubia, *Ingeniería de la Energía Eólica*. España: Alfaomega, 2013.
- [12] “Curvas de Potencia de los Aerogeneradores”. AeroGeneradores.com. <https://aerogeneradores.com/curvas-de-potencia-de-los-aerogeneradores/> (accedido: sept. 10, 2023).
- [13] “Comparar las curvas de potencia de los aerogeneradores”. wind-turbine-models.com. <https://es.wind-turbine-models.com/powercurves> (accedido: sept. 10, 2023).

RECONOCIMIENTOS

A mi exalumna Laura Pamela Castro, por su contribución para este trabajo. Al CONHACYT por los fondos para la realización de este proyecto. Al Instituto Politécnico Nacional, la Universidad Politécnica de Sinaloa y la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por las facilidades otorgadas y el apoyo.

Identificadores algebraicos para un sistema de suspensión pasivo basado en inersor

Algebraic identifiers for an inerter-based passive suspension system

Edrei Yael Santos García¹ ✉ , Eduardo Barredo Hernández^{2,3} , José Gabriel Mendoza Larios¹ ,
Jesús Francisco Canseco Díaz¹ 

¹Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México

²Universidad Politécnica de Tapachula, Tapachula, Chiapas, México

³Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México

RESUMEN

En este trabajo se enfoca en el análisis y la formulación de identificadores para las propiedades físicas de una suspensión de un cuarto de vehículo, como la masa suspendida, rigidez de los resortes, el amortiguamiento y la inercia, utilizando una red mecánica basada en inersor. La metodología empleada para obtener estos identificadores se conoce como identificación algebraica. Para desarrollar los estimadores algebraicos, se utilizó el modelo matemático de una suspensión pasiva implementando la red mecánica C4 (TID), considerando los efectos de inercia traslacional. Los identificadores algebraicos propuestos permiten calcular los valores de los parámetros físicos del sistema en dos situaciones distintas: bajo una fuerza armónica constante y con una señal aleatoria que simula la dinámica de un camino. El análisis numérico de los identificadores muestra que es viable obtener los valores de los parámetros de masa, amortiguamiento, rigidez e inercia de la suspensión pasiva en un intervalo de tiempo muy corto, no superior a 2 segundos.

PALABRAS CLAVE: dispositivo inersor; identificación algebraica; parámetros físicos; suspensión pasiva.

ABSTRACT

In this work, the focus is on the analysis and formulation of identifiers for the physical properties of a quarter-vehicle suspension, such as suspended mass, spring stiffness, damping, and inertia, using a mechanical network based on an inerter. The methodology employed to obtain these identifiers is known as algebraic identification. To develop the algebraic estimators, the mathematical model of a passive suspension was utilized by implementing the C4 mechanical network (TID), considering the effects of translational inertia. The proposed algebraic identifiers allow for the calculation of the physical parameter values of the system in two distinct situations: under a constant harmonic force and with a random signal that simulates road dynamics. The numerical analysis of the identifiers shows that it is feasible to obtain the values of mass, damping, stiffness, and inertia parameters of the passive suspension within a very short time interval, not exceeding 2 seconds.

KEYWORDS: inerter device; algebraic identification; physical parameters; passive suspension.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Edrei Yael Santos García

INSTITUCIÓN: Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM)

DIRECCIÓN: Av. Dr. Modesto Seara Vázquez núm. 1, Acatlima, C. P. 69004, Huajuapán de León, Oaxaca, México

CORREO ELECTRÓNICO: sede31yael@gmail.com

Fecha de recepción: 11 de octubre de 2024. **Fecha de aceptación:** 28 de marzo de 2025. **Fecha de publicación:** 9 de abril de 2025.



I. INTRODUCCIÓN

Algunos de los objetivos principales de una suspensión en un automóvil son garantizar una adecuada maniobrabilidad del vehículo al mantener la posición correcta de los neumáticos; reducir las fuerzas de aceleración, frenado y giro; brindar confort a los pasajeros y estabilizar el vehículo [1]. En el mercado automotriz existe una gran variedad de suspensiones, sin embargo, la más destacada es la pasiva, que integra elementos mecánicos que almacenan y disipan energía. Por ende, este sistema tiende ser más simple y económico tanto en diseño como en construcción [2]. Por lo general, una suspensión debe cumplir con dos objetivos importantes: proporcionar elasticidad y amortiguación. La elasticidad permite absorber las irregularidades del camino, mientras que la amortiguación reduce y controla las oscilaciones provocadas por las variaciones de carga [2], [3].

Es bien sabido que estos objetivos se pueden lograr al emplear elementos resistivos y amortiguadores viscosos, sin embargo, al integrar un inersor al arreglo mecánico de la suspensión permite mejorar la respuesta vibratoria del sistema al modificar la distribución de fuerzas [4]. El inersor es un dispositivo mecánico que no solo almacena energía vibratoria, sino que también genera un efecto de rigidez negativa, el cual puede asistir al movimiento de una estructura. Es importante mencionar que este efecto dinámico se activa y varía en función del cambio de la frecuencia de excitación. Desde su invención, se han realizado múltiples investigaciones y se ha experimentado en varias aplicaciones en sistemas mecánicos y especialmente en aplicaciones automotrices, como en suspensiones del automóvil y sistemas de dirección para motocicletas [5], [6].

Ahora bien, por ser dispositivos mecánicos estos tienden a desgastarse debido a las irregularidades del camino y, por ello, es necesario su replazo o mantenimiento. Cuando estos dispositivos se desgastan, sus parámetros físicos cambian, como el coeficiente amortiguamiento cuando el amortiguador se deteriora, al igual que el coeficiente de rigidez del resorte y la inercia del inersor. Al cambiar los valores de estos dispositivos se pierde la sintonización del sistema y por lo tanto su eficiencia. Lamentablemente, no hay una forma directa de medir estos parámetros, solo de someter a la suspensión a ciertas pruebas de laboratorio en donde se realizan mediciones y cálculos, para obtener dichos valores. En la actualidad, existen metodologías capaces de identi-

car estos parámetros [7], [8], sin embargo, por naturaleza los sistemas tienden a complicarse y por ende su cálculo. No obstante, existe una técnica novedosa denominada identificación algebraica [9], la cual determina los parámetros físicos de un sistema utilizando el modelo matemático. Asimismo, con esta metodología es posible operar en el dominio de la frecuencia utilizando cálculo operacional para sistemas lineales, así como en el dominio del tiempo para sistemas tanto lineales como no lineales [10], [11], [12].

Los estimadores se llevan a cabo en línea y en tiempo continuo. Una de las características de la identificación algebraica es que ofrece relaciones de identificación que son completamente independientes de las condiciones iniciales del sistema. Además, este método tiene excelentes propiedades de robustez frente a diversas perturbaciones, como incertidumbres paramétricas, dinámicas no modeladas y ruido [13], [14], [15]. En la literatura se observó que esta técnica ha sido utilizada para definir los coeficientes de amortiguamiento y rigidez de una suspensión pasiva [16] y estimar el deterioro del coeficiente de amortiguamiento de una suspensión semiactiva [17]. Adicionalmente, también se ha aplicado para determinar parámetros en sistemas rotodinámicos [18], [19], [20].

Por lo tanto, en este documento de investigación se muestra el desarrollo de estimadores paramétricos cuyo objetivo es determinar los valores de los parámetros de amortiguamiento, rigidez, inercia y masa suspendida de una suspensión de un cuarto de automóvil, implementando una red mecánica denominada en la literatura como TID (Tuned-Inerter-Damper). Esta red mecánica consiste en una combinación en paralelo de un resorte y un amortiguador, los cuales están conectados en serie a un inersor.

II. METODOLOGÍA

Esta investigación se llevó a cabo siguiendo cada fase de la metodología que se muestra a continuación:

- 1) Revisión de la literatura sobre la técnica de identificación algebraica en sistemas.
- 2) Definición del problema y la realización del modelo matemático de la suspensión de un cuarto de vehículo implementando la red mecánica TID.

- 3) Desarrollo de los identificadores aplicando la metodología de identificación algebraica en el dominio de la frecuencia, puesto que el sistema es lineal. Cabe señalar que los identificadores se desarrollaron para condiciones de excitación armónica y aleatoria.
- 4) Simulación numérica de los modelos matemáticos basados en identificadores algebraicos.
- 5) Análisis de los resultados obtenidos y conclusiones.

MODELADO MATEMÁTICO DE UNA SUSPENSIÓN DE UN CUARTO DE VEHÍCULO

En la [Figura 1](#) se representa un diagrama del modelo de una suspensión de un cuarto de vehículo implementado el TID. Este arreglo ha demostrado ser más eficiente en mitigar vibraciones en una suspensión en comparación de otras redes [21]. Al agregar esta red mecánica a la suspensión se incrementa el número de coordenadas generalizadas, al igual que los grados de libertad. En este caso, el sistema tiene tres grados de libertad.

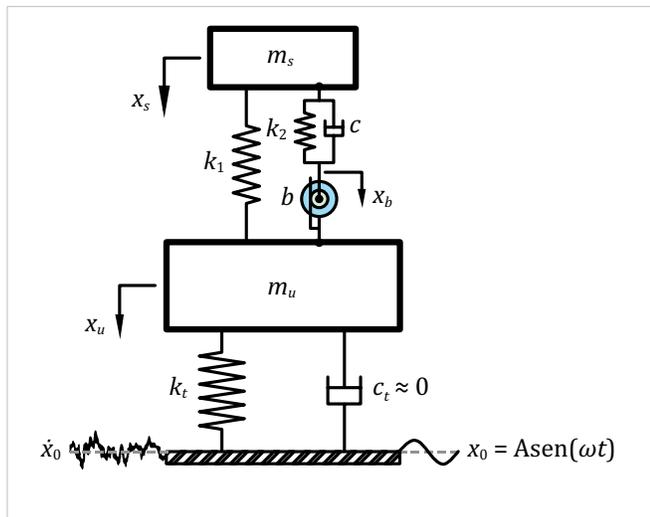


Figura 1. Esquemático de una suspensión de un cuarto de automóvil implementando el TID.

El modelo matemático de la suspensión de tres grados de libertad que se observa en la [Figura 1](#), se puede obtener aplicando el formulismo de Euler-Lagrange [22], donde se definen las coordenadas y fuerzas generalizadas. Asimismo, se determina la energía disipativa y el Lagrangiano (a partir de la energía cinética y potencial). Posteriormente, se calculan las derivadas parciales respecto al tiempo y se obtienen las ecuaciones de segundo

orden que rigen el comportamiento dinámico del sistema:

$$m_u \ddot{x}_u + b(\ddot{x}_u - \ddot{x}_b) + k_t(x_u - x_0) + k_1(x_u - x_s) = 0 \quad (1)$$

$$m_s \ddot{x}_s + c(\dot{x}_s - \dot{x}_b) + k_1(x_s - x_u) + k_2(x_s - x_b) = 0 \quad (2)$$

$$b(\ddot{x}_b - \ddot{x}_u) + c(\dot{x}_b - \dot{x}_s) + k_2(x_b - x_s) = 0 \quad (3)$$

donde los parámetros de masa suspendida y no suspendida, amortiguamiento, rigidez de los tres resortes e inercia del sistema están representados por m_s , m_u , c , k_1 , k_2 , k_t y b , respectivamente. Además, las tres coordenadas generalizadas están representadas por x_u , x_s , x_b y x_0 es el movimiento del terreno al que se somete la suspensión. En la ecuación (1) implícitamente se encuentra la perturbación x_0 que se somete en la base de la [Figura 1](#), al tener el producto de $k_t x_0$ se tiene la fuerza de excitación F_0 en la base de la suspensión.

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS

Para la aplicación de la técnica de identificación algebraica se requiere del modelo matemático del sistema y enseguida se desarrollan los estimadores algebraicos correspondientes. Como se comentó anteriormente, esta metodología se puede aplicar de dos maneras: en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Como el modelado de la suspensión es lineal, se opta en desarrollar la identificación de parámetros en el dominio de la frecuencia.

A. Desarrollo de los identificadores para los parámetros físicos b y k_1

Se pretende identificar los parámetros del coeficiente de rigidez del resorte k_1 y la inercia del inersor b . Para iniciar, se toma la ecuación (1), se despeja F_0 , y se tiene la ecuación diferencial:

$$m_u \ddot{x}_u + b(\ddot{x}_u - \ddot{x}_b) + k_t x_u + k_1(x_u - x_s) = F_0 \quad (3)$$

Después, a la ecuación (3) se le aplica la transformada de Laplace y de esta manera se encuentra ahora en el dominio de la frecuencia:

$$m_u \{s^2 X_u(s) - s x_u(0) - \dot{x}_u(0)\} + b \{s^2 (X_u(s) - X_b(s)) - s(x_u(0) - x_b(0)) - (\dot{x}_u(0) - \dot{x}_b(0))\} + k_t X_u(s) + k_1 \{X_u(s) - X_s(s)\} = F_0(s) \quad (4)$$

Luego, la ecuación (4) se deriva dos veces respecto a s , lo que conduce a la eliminación de las condiciones iniciales del sistema, obteniendo la siguiente ecuación:

$$m_u \left\{ 2X_u(s) + 4s \frac{d}{ds} X_u(s) + s^2 \frac{d^2}{ds^2} X_u(s) \right\} + b \left\{ 2 \left[X_u(s) - X_b(s) \right] + 4s \frac{d}{ds} \left[X_u(s) - X_b(s) \right] + s^2 \frac{d^2}{ds^2} \left[X_u(s) - X_b(s) \right] \right\} + k_t \left\{ \frac{d}{ds} X_u(s) \right\} + k_1 \left\{ \frac{d^2}{ds^2} \left[X_u(s) - X_s(s) \right] \right\} = \frac{d^2}{ds^2} F_0(s) \quad (5)$$

Posteriormente, se multiplican ambos lados de la ecuación (5) por s^{-2} , lo cual lleva a una expresión libre de derivadas en el dominio del tiempo,

$$m_u \left\{ 2s^{-2} X_u(s) + 4s^{-1} \frac{d}{ds} X_u(s) + \frac{d^2}{ds^2} X_u(s) \right\} + b \left\{ 2s^{-2} \left[X_u(s) - x_b(s) \right] + 4s^{-1} \frac{d}{ds} \left[X_u(s) - X_b(s) \right] + \frac{d^2}{ds^2} \left[X_u(s) - X_b(s) \right] \right\} + k_t \left\{ s^{-2} \frac{d}{ds} X_u(s) \right\} + k_1 \left\{ s^{-2} \frac{d^2}{ds^2} \left[X_u(s) - X_s(s) \right] \right\} = s^{-2} \frac{d^2}{ds^2} F_0(s) \quad (6)$$

Se observa que la ecuación (6) está en el dominio de la frecuencia, por lo que se necesita pasarla al dominio del tiempo. Para realizar esto se utilizan las inversas de la transformada de Laplace de las reglas de la derivada y del cociente:

$$m_u \left\{ 2 \int^{(2)} x_u(t) - 4 \int t x_u(t) + t^2 x_u(t) \right\} + b \left\{ 2 \int^{(2)} \left[x_u(t) - x_b(t) \right] - 4 \int t \left[x_u(t) - x_b(t) \right] + t^2 \left[x_u(t) - x_b(t) \right] \right\} + k_t \left\{ \int^{(2)} t^2 x_u(t) \right\} + k_1 \left\{ \int^{(2)} t^2 \left[x_u(t) - x_s(t) \right] \right\} = \int^{(2)} t^2 F_0(t) \quad (7)$$

Dado que los parámetros b y k_1 son desconocidos, es necesario identificarlos. Como solo se tiene una ecuación, se requiere una adicional con la finalidad de tener un sistema con dos ecuaciones y dos incógnitas, por este motivo se integra la ecuación (7) y ahora se obtiene la ecuación (8):

$$m_u \left\{ 2 \int^{(3)} x_u(t) - 4 \int^{(2)} t x_u(t) + \int t^2 x_u(t) \right\} + b \left\{ 2 \int^{(3)} \left[x_u(t) - x_b(t) \right] - 4 \int^{(2)} t \left[x_u(t) - x_b(t) \right] + \int t^2 \left[x_u(t) - x_b(t) \right] \right\} + k_t \left\{ \int^{(3)} t^2 x_u(t) \right\} + k_1 \left\{ \int^{(3)} t^2 \left[x_u(t) - x_s(t) \right] \right\} = \int^{(3)} t^2 F_0(t) \quad (8)$$

Ya con las ecuaciones (7) y (8) se tiene un sistema de ecuaciones de 2×2 , que conduce a un sistema de ecuaciones simultáneo de la forma siguiente:

$$P(t)\Theta = Q(t) \quad (9)$$

donde $\Theta = \{b, k_1\}^T$ es el vector de parámetros que se van a identificar y $P(t)$, $Q(t)$ son matrices de tamaño 2×2 y 2×1 , respectivamente, las cuales están dadas por:

$$P(t) = \begin{pmatrix} a_{11}(t) & a_{12}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) \end{pmatrix}, \quad Q(t) = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$$

siendo:

$$a_{11}(t) = 2 \int^{(2)} \left[x_u(t) - x_b(t) \right] - 4 \int t \left[x_u(t) - x_b(t) \right] + t^2 \left[x_u(t) - x_b(t) \right]$$

$$a_{21}(t) = 2 \int^{(3)} \left[x_u(t) - x_b(t) \right] - 4 \int^{(2)} t \left[x_u(t) - x_b(t) \right] + \int t^2 \left[x_u(t) - x_b(t) \right]$$

$$a_{12}(t) = \int^{(2)} t^2 \left[x_s(t) - x_u(t) \right]$$

$$a_{22}(t) = \int^{(3)} t^2 \left[x_u(t) - x_s(t) \right]$$

$$b_1 = \int^{(2)} t^2 F_0(t) - m_u \left\{ 2 \int^{(2)} x_u(t) - 4 \int t x_u(t) + t^2 x_u(t) \right\} - k_t \left\{ \int t^2 x_u(t) \right\}$$

$$b_2 = \int^{(3)} t^2 F_0 - m_u \left\{ 2 \int^{(3)} x_u(t) - 4 \int^{(2)} t x_u(t) + \int t^2 x_u(t) \right\} - k_t \left\{ \int^{(3)} t^2 x_u(t) \right\}$$

De la solución de la expresión (9) se obtienen los identificadores de los parámetros desconocidos:

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{\Delta_1(t)}{\det[P(t)]} \\ k_1 &= \frac{\Delta_2(t)}{\det[P(t)]} \end{aligned} \right\} \forall t \in (t_0, t_0 + \epsilon)$$

B. Desarrollo de los identificadores para los parámetros físicos k_2 y m_s

De la misma forma, se estiman los parámetros de la masa suspendida m_s , que representa la cuarta parte de la masa del chasis del automóvil y el coeficiente de rigidez k_2 del resorte de la suspensión. Se toma la ecuación (2), se hace el mismo tratamiento matemático de la ecuación (1) y, posteriormente, se tiene la siguiente ecuación en el dominio del tiempo:

$$m_s \left\{ 2 \int^{(2)} x_s(t) - 4 \int t x_s(t) + t^2 x_s(t) \right\} + c \left\{ -2 \int^{(2)} t(x_s(t) - x_b(t)) + \int t^2(x_s(t) - x_b(t)) \right\} + k_1 \left\{ \int^{(2)} t^2(x_s(t) - x_u(t)) \right\} + k_2 \left\{ \int^{(2)} t^2(x_s(t) - x_b(t)) \right\} = 0 \quad (10)$$

Ahora bien, como se identificará m_s y k_2 de la ecuación (10), se despejan estos parámetros y, en consecuencia, los coeficientes c y k_1 se consideran como datos de entrada y todo esto conduce a la siguiente ecuación:

$$m_s \left\{ 2 \int^{(2)} x_s(t) - 4 \int t x_s(t) + t^2 x_s(t) \right\} + k_2 \left\{ \int^{(2)} t^2(x_s(t) - x_b(t)) \right\} = c \left\{ 2 \int^{(2)} t(x_s(t) - x_b(t)) - \int t^2(x_s(t) - x_b(t)) \right\} - k_1 \left\{ \int^{(2)} t^2(x_s(t) - x_u(t)) \right\} \quad (11)$$

$$m_s \left\{ 2 \int^{(3)} x_s(t) - 4 \int^{(2)} t x_s(t) + \int t^2 x_s(t) \right\} + k_2 \left\{ \int^{(3)} t^2(x_s(t) - x_b(t)) \right\} = c \left\{ 2 \int^{(3)} t(x_s(t) - x_b(t)) - \int^{(2)} t^2(x_s(t) - x_b(t)) \right\} - k_1 \left\{ \int^{(3)} t^2(x_s(t) - x_u(t)) \right\} \quad (12)$$

Luego se integra una vez la ecuación (11), para poder formar un sistema de ecuaciones de 2×2 con dos incógnitas. Así pues, las ecuaciones (11) y (12) dan como resultado un sistema de ecuaciones de la forma (9), las cuales se muestran a continuación:

$$P(t) = \begin{pmatrix} c_{11}(t) & c_{12}(t) \\ c_{21}(t) & c_{22}(t) \end{pmatrix}, \quad Q(t) = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}$$

siendo

$$c_{11}(t) = 2 \int^{(2)} x_s(t) - 4 \int t x_s(t) + t^2 x_s(t)$$

$$c_{21}(t) = 2 \int^{(3)} x_s(t) - 4 \int^{(2)} t x_s(t) + \int t^2(x_s(t))$$

$$c_{12}(t) = \int^{(2)} t^2(x_s(t) - x_b(t))$$

$$c_{22}(t) = \int^{(3)} t^2(x_u(t) - x_b(t))$$

$$d_1 = c \left\{ 2 \int^{(2)} t(x_s(t) - x_b(t)) - \int t^2(x_s(t) - x_b(t)) \right\} - k_1 \left\{ \int^{(2)} t^2(x_s(t) - x_u(t)) \right\}$$

$$d_2 = c \left\{ 2 \int^{(3)} t(x_s(t) - x_b(t)) - \int^{(2)} t^2(x_s(t) - x_b(t)) \right\} - k_1 \left\{ \int^{(3)} t^2(x_s(t) - x_u(t)) \right\}$$

Al solucionar el sistema se obtienen los parámetros desconocidos:

$$\left. \begin{aligned} m_s &= \frac{\Delta_1(t)}{\det[P(t)]} \\ k_2 &= \frac{\Delta_2(t)}{\det[P(t)]} \end{aligned} \right\} \forall t \in (t_0, t_0 + \epsilon)$$

C. Identificador del amortiguamiento c

Por último, para identificar el parámetro c se sigue el mismo procedimiento mostrado anteriormente y considerando la ecuación (3) se tiene la siguiente expresión en el dominio del tiempo:

$$b \left\{ 2 \int^{(2)} (x_u(t) - x_b(t)) - 4 \int t(x_u(t) - x_b(t)) + \int t^2(x_u(t) - x_b(t)) \right\} + c \left\{ -2 \int^{(2)} t(x_b(t) - x_s(t)) + \int t^2(x_b(t) - x_s(t)) \right\} + k_2 \left\{ \int^{(2)} t^2(x_b(t) - x_s(t)) \right\} = 0 \quad (13)$$

Como anteriormente, ya se estimaron los parámetros tanto b y k_2 , se toman como datos de entrada y por lo tanto el único parámetro desconocido es c . Entonces, se despeja la variable desconocida de la ecuación (13) y se tiene la siguiente expresión:

$$c = \frac{n(t)}{d(t)} \quad (14)$$

donde

$$n(t) = b \left\{ -2 \int^{(2)} (x_u(t) - x_b(t)) + 4 \int t(x_u(t) - x_b(t)) - \int t^2(x_u(t) - x_b(t)) \right\} - k_2 \left\{ \int^{(2)} t^2(x_b(t) - x_s(t)) \right\}$$

$$d(t) = \left\{ -2 \int^{(2)} t(x_b(t) - x_s(t)) + \int t^2(x_b(t) - x_s(t)) \right\}$$

Este parámetro es válido siempre y cuando $d(t) \neq 0$ y es identificable cuando se cumpla la condición de:

$$c = \begin{cases} \text{arbitrario} & t \in [t_0, t_0 + \epsilon) \\ \frac{n(t)}{d(t)} & t > t_0 + \epsilon \end{cases}$$

Es importante mencionar que tanto $P(t)$ como $Q(t)$ dependen solamente de la respuesta vibratoria del sistema. Además, Θ se puede identificar algebraicamente si se cumple que $\det[P(t)] \neq 0$ [9]. En la literatura, se ha verificado que esta condición se mantiene en al menos

un pequeño intervalo de tiempo $[t_0, t_0 + \epsilon]$, tal que $\epsilon > 0$ y suficientemente pequeño.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente apartado se muestran las simulaciones correspondientes para los estimadores de los parámetros físicos de una suspensión pasiva de un cuarto de automóvil implementando el TID (Figura 1). Cabe mencionar que se realizaron dos simulaciones distintas en Matlab/Simulink: en la primera se consideró una fuerza de excitación armónica y en la segunda se le aplicó una señal aleatoria. Para ambos casos, los valores físicos empleados se muestran en la Tabla 1. Además, Runge-Kutta es el método numérico empleado para resolver las ecuaciones del sistema.

TABLA 1
PARÁMETROS FÍSICOS DE LA SUSPENSIÓN IMPLEMENTANDO EL TID [22]

PARÁMETRO	VALOR
b	217 kg
k_1	22000 N/m
k_2	10000 N/m
c	1067 N·s/m
k_t	190000 N/m
m_s	320 kg
m_u	45 kg

SIMULACIÓN DE LOS IDENTIFICADORES DE LA SUSPENSIÓN SOMETIDA A UNA FUERZA ARMÓNICA

Para la simulación de los identificadores de los parámetros físicos m_s , c , b , k_1 y k_2 , respectivamente, se consideró como dato de entrada una señal armónica de la forma siguiente:

$$x_0 = 0.2\text{sen}(10t) \quad (15)$$

donde x_0 es el desplazamiento alcanzado en la base del sistema, con una amplitud de ± 0.2 m y una frecuencia de 10 rad/s, el cual representa un camino con irregularidades de amplitud constante de forma sinusoidal, proporcionando una excitación ideal para analizar el comportamiento de los identificadores y su capacidad de estimación en condiciones controladas. En la Figura 2 se muestra la señal armónica de vibración dada por la ecuación (15).

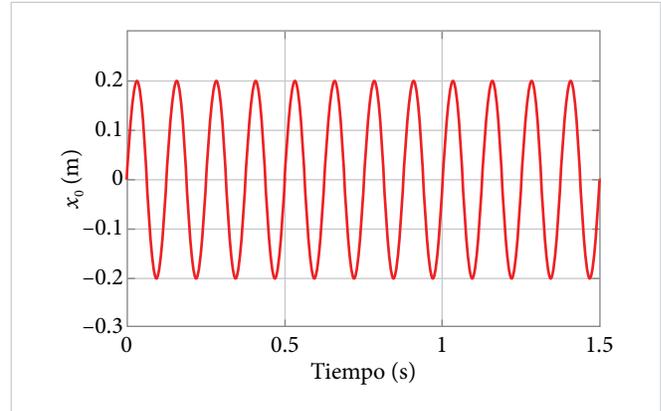


Figura 2. Respuesta vibratoria del sistema de una señal de entrada tipo armónica.

En las Figuras 3 a 7 se proporciona una representación clara de cómo el identificador ajusta los parámetros a lo largo del tiempo, mostrando la eficacia y precisión de la técnica implementada.

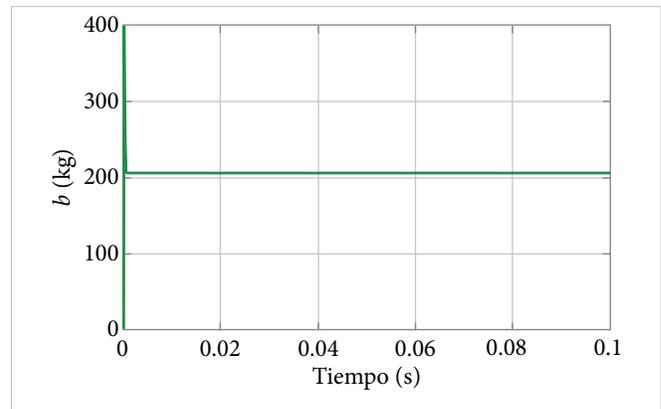


Figura 3. Identificación de la inercia b del inersor de la suspensión bajo excitación de tipo armónica.

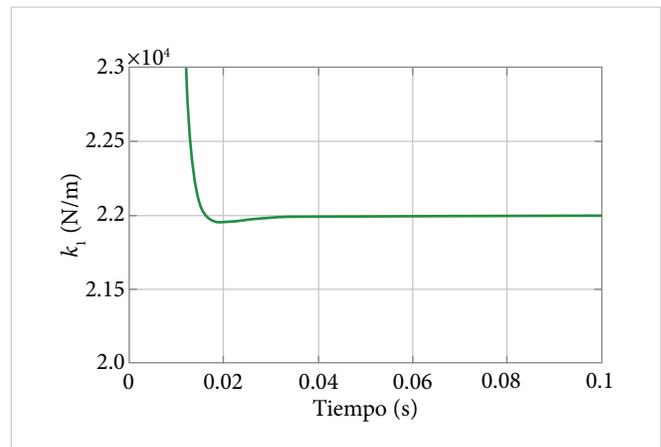


Figura 4. Identificación del coeficiente de rigidez del resorte k_1 de la suspensión bajo excitación de tipo armónica.

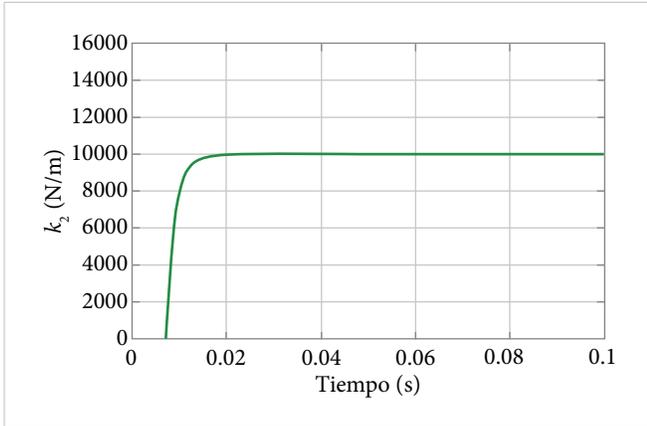


Figura 5. Identificación del coeficiente de rigidez del resorte k_2 de la suspensión bajo excitación de tipo armónica.

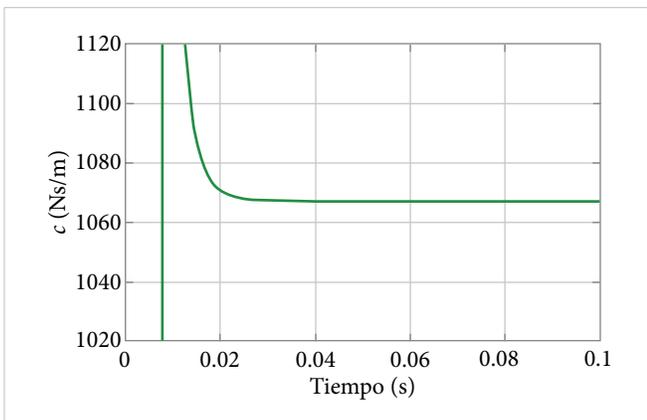


Figura 6. Identificación del coeficiente de amortiguamiento c de la suspensión bajo excitación de tipo armónica.

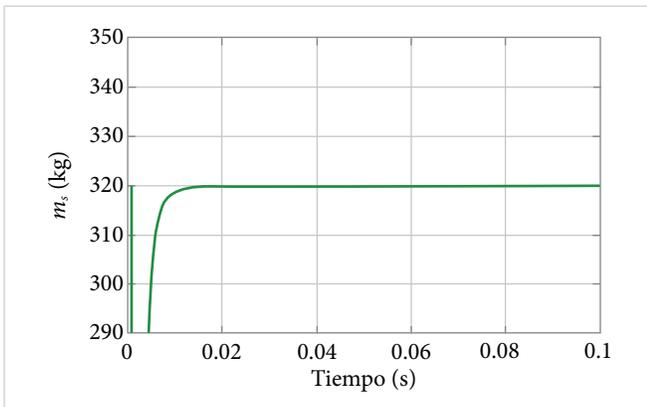


Figura 7. Identificación de la masa suspendida m_s de un cuarto de vehículo de la suspensión bajo excitación de tipo armónica.

En estas gráficas se observa el valor identificado para cada parámetro, permitiendo constatar la evolución y la convergencia de los valores estimados hacia los valores reales. Además, se puede distinguir posibles fluctuaciones y la estabilidad del proceso de identificación, lo cual

es importante para validar la robustez de la metodología empleada. Estas observaciones son necesarias para evaluar el rendimiento de los modelos de los identificadores y su aplicabilidad en casos reales, donde la precisión y la rapidez de identificación son importantes para el correcto funcionamiento del sistema.

Del análisis de las gráficas mostradas en las Figuras de la 3 a la 7 se muestra que los identificadores obtenidos convergen rápidamente a los parámetros físicos, en tiempos muy pequeños. Esta rápida convergencia indica la eficacia de la técnica de identificación y, con ello, se demuestra la capacidad de estimar los parámetros de la suspensión de un cuarto de automóvil sometida bajo una fuerza de excitación de tipo armónica.

SIMULACIÓN DE LOS IDENTIFICADORES DE LA SUSPENSIÓN SOMETIDA A UNA EXCITACIÓN DE TIPO ALEATORIA

En esta sección se reseñan pruebas de robustez de los estimadores desarrollados por medio de la técnica de identificación algebraica y para ello se le aplica una señal de entrada aleatoria a la suspensión, que simula un perfil irregular de carretera o camino. En la [Tabla 2](#) se muestran los niveles de rugosidad utilizados para generar las excitaciones estocásticas de la superficie de la carretera [23]. Estas evaluaciones son importantes, puesto que se puede observar la capacidad de los estimadores desarrollados para trabajar ante variaciones inesperadas y oscilaciones en las condiciones de entrada del modelo de la suspensión. De esta manera, es posible asegurar que los identificadores obtenidos funcionan ante situaciones de operación realista.

TABLA 2
RUGOSIDAD DE LA CARRETERA NORMA ISO 8608 [22]

GRADO DEL PERFIL DE LA CARRETERA	$G_x(\eta_0)(10^{-6}) \text{ m}^3, \eta_0 = 0.1 \text{ [m}^{-1}\text{]}$ MEDIA GEOMÉTRICA
Clase A	16
Clase B	46
Clase C	256
Clase D	1024
Clase E	4096
Clase F	65536
Clase G	262144

Esta señal irregular de la carretera se genera a partir de una ecuación diferencial estocástica:

$$\dot{x}_0 = -2\pi f_0 x_0(t) + 2\pi\eta W(t)\sqrt{G_x(\eta_0)V(t)} \quad (16)$$

donde $f_0 = 0.0628$ Hz es la frecuencia de corte, $\eta = 0.1$ [m⁻¹] refleja la frecuencia espacial, $G_x(\eta_0)$ corresponde al coeficiente de rugosidad de la carretera, $W(t)$ se trata de un proceso estocástico estacionario (ruido blanco gaussiano), $V(t)$ es la velocidad de desplazamiento simulado y x_0 es el perfil irregular de la superficie de la carretera [24], [25].

Los perfiles artificiales son generados a partir de la ecuación diferencial (16). Para la simulación se considera el perfil de clase C para la señal aleatoria. En la Figura 8 se muestra que los desplazamientos x_0 varían aproximadamente entre un rango ± 0.4 m, lo que implica oscilaciones en la base del sistema. Este comportamiento es propio de un camino de rugosidad moderada, correspondiente a un perfil de clase C, que permite simular de manera más cercana el comportamiento del movimiento de un vehículo y obtener un desempeño de los identificadores en situaciones más realistas.

En la Figura 8 se observa la señal de clase C a una velocidad de 20 km/h.

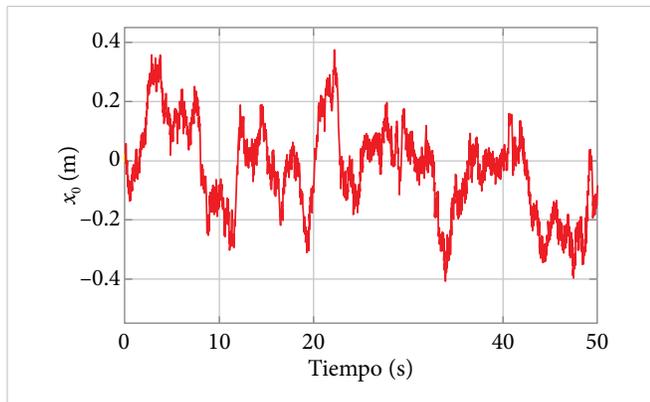


Figura 8. Perfil artificial de la carretera de clase C.

En las Figuras 9 a 13 se puede observar el comportamiento de los estimadores desarrollados ante una señal aleatoria.

Las líneas punteadas indican los valores reales de los parámetros, mientras que las líneas continuas muestran los resultados estimados que se desarrollaron. Los estimadores han demostrado una buena capacidad para mantener la precisión en poco tiempo a no más de 0.02 segundos.

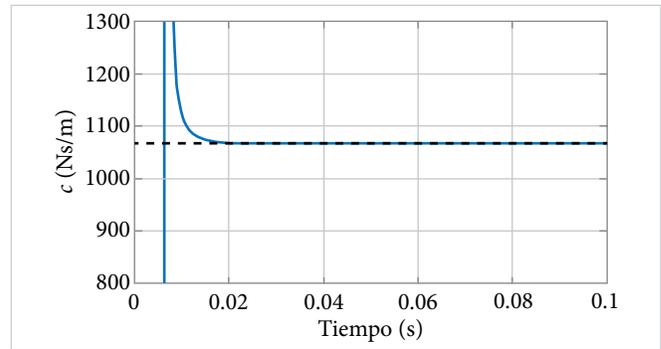


Figura 9. Respuesta del identificador del coeficiente de amortiguamiento c bajo excitación aleatoria.

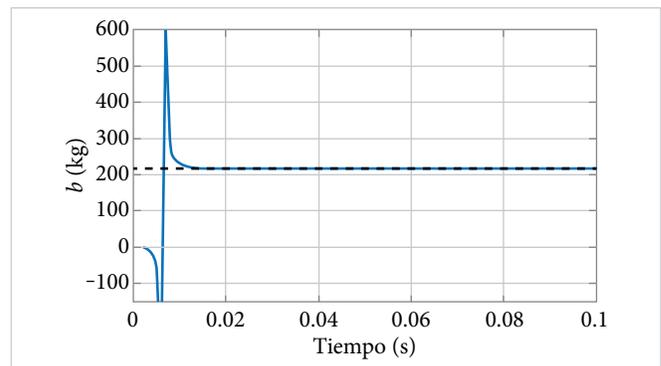


Figura 10. Respuesta del identificador de inercia b del inersor bajo excitación aleatoria.

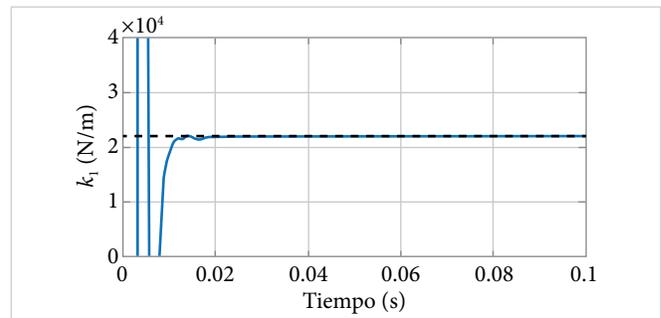


Figura 11. Respuesta del identificador del coeficiente de rigidez del resorte k_1 bajo excitación aleatoria.

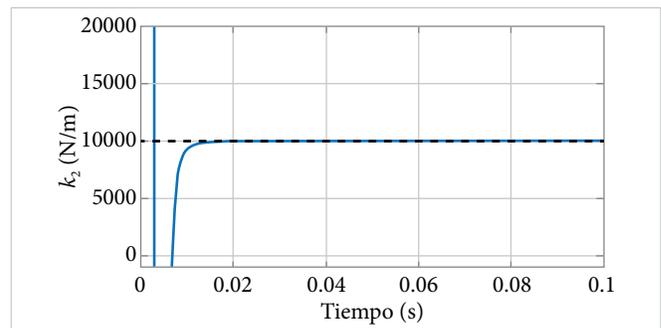


Figura 12. Respuesta del identificador del coeficiente de rigidez del resorte k_2 bajo excitación aleatoria.

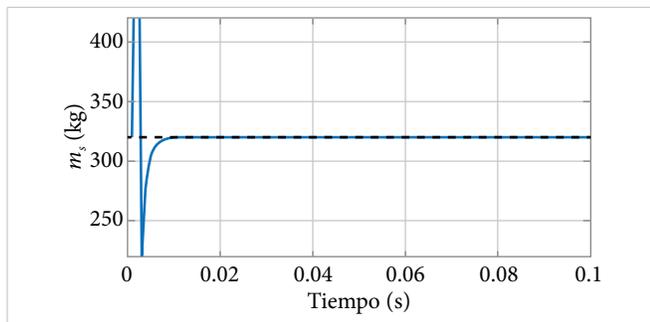


Figura 13. Respuesta del identificador de la masa suspendida m_s bajo excitación aleatoria.

En las Figuras 9 a 13 se puede observar el comportamiento de los estimadores desarrollados bajo excitación de tipo aleatoria. Las líneas punteadas indican los valores reales de los parámetros, mientras que las líneas continuas muestran los resultados estimados que se desarrollaron. Los estimadores han demostrado una buena capacidad para mantener la precisión en poco tiempo a no más de 0.02 segundos.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el diseño de los identificadores de los parámetros físicos de una suspensión de un cuarto de automóvil, implementando una red mecánica TID. Para determinar los parámetros se empleó la técnica de identificación algebraica, utilizando el modelo matemático de la suspensión pasiva que se muestra en la Figura 1. Con lo anterior, se lograron obtener los parámetros físicos de la masa suspendida, inercia del inersor, coeficiente de rigidez de los resortes que integran a la configuración de la suspensión pasiva y el coeficiente de amortiguamiento del amortiguador viscoso. Además, como los identificadores algebraicos solo dependen de la respuesta vibratoria del sistema, se implementaron dos fuentes de excitación diferentes: una armónica y otra aleatoria.

La implementación de la metodología de identificación algebraica demostró ser sencilla tanto en el modelado matemático como en la simulación, en comparación con otras técnicas de identificación reportadas en la literatura.

En las simulaciones realizadas, se observó que, al implementar la señal armónica, los estimadores convergen a los valores físicos en un tiempo menor de 0.02 segundos, con excepción del parámetro del amortiguador, ya que se identifica completamente en un tiempo de 0.3

segundos aproximadamente. En las gráficas, se observa como los estimadores se estabilizan alrededor de los valores reales, lo que es importante ya que refleja la estabilidad de los identificadores.

Por otro lado, en las pruebas realizadas con una señal de entrada aleatoria, utilizada para simular la dinámica de la carretera, los identificadores se obtuvieron completamente en un tiempo de 0.02 segundos. Es importante mencionar que, con base en los resultados obtenidos al aplicar una excitación de tipo aleatoria, los identificadores convergen a sus valores físicos reales. Por lo tanto, se corrobora su correcto funcionamiento y se demuestra que pueden adaptarse a cualquier condición del camino que se encuentre dentro de la norma ISO 8608.

Estos resultados confirman que los estimadores obtenidos mediante técnica de identificación algebraica presentan buenas características de robustez frente a dinámicas no modeladas, incertidumbre en los parámetros y la presencia de ruido. La estabilización de los estimadores hacia los valores físicos reales se logra en tiempos muy cortos, no superiores a 0.02 segundos, lo que sigue siendo más rápido en comparación con otras técnicas de identificación reportadas en la literatura. Esto no solo resalta la eficacia de esta metodología para su aplicación en situaciones reales, sino que también permite una sintonización correcta del sistema, contribuyendo al mantenimiento de un rendimiento óptimo de la suspensión pasiva de un vehículo.

REFERENCIAS

- [1] L. Cheung, W. O. Wong y L. Cheng, "Optimization of a hybrid vibration absorber for vibration control of structures under random force excitation", *JSV*, vol. 332, n.º 3, pp. 494-509, 2013, doi: [10.1016/j.jsv.2012.09.014](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.09.014).
- [2] F. Scheibe y M. C Smith, "Analytical solutions for optimal ride comfort and tyre grip for passive vehicle suspensions", *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 47, n.º 10, pp. 1229-1252, 2009, doi: [10.1080/00423110802588323](https://doi.org/10.1080/00423110802588323).
- [3] Y. Hu, M. Z. Q. Chen y Z. Shu, "Passive vehicle suspensions employing inerters with multiple performance requirements", *JSV*, vol. 333, n.º 8, pp. 2212-2225, 2014, doi: [10.1016/j.jsv.2013.12.016](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.12.016).
- [4] M. C. Smith, "Synthesis of mechanical networks: the inerter", en *IEEE Transactions on Automatic Control*,

- vol. 47, n.º 10, pp. 1648-1662, oct. 2002, doi: [10.1109/TAC.2002.803532](https://doi.org/10.1109/TAC.2002.803532).
- [5] M. Z. Q. Chen, C. Papageorgiou, F. Scheibe, F.-c. Wang y M. C. Smith, "The missing mechanical circuit element", en *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 9, n.º 1, pp. 10-26, First Quarter 2009, doi: [10.1109/MCAS.2008.931738](https://doi.org/10.1109/MCAS.2008.931738).
- [6] S. Evangelou, D. J. N. Limebeer, R. S. Sharp and M. C. Smith, "Steering compensation for high-performance motorcycles", *2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (IEEE Cat. No. 04CH37601)*, Nassau, Bahamas, 2004, pp. 749-754, vol. 1, doi: [10.1109/CDC.2004.1428746](https://doi.org/10.1109/CDC.2004.1428746).
- [7] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice-Hall, 1987.
- [8] S. Sagara, Z. Y. Zhao, "Numerical integration approach to on-line identification of continuous-time systems", *Automatica*, vol. 26, n.º 1, pp. 63-74, en., 1990, doi: [10.1016/0005-1098\(90\)90158-E](https://doi.org/10.1016/0005-1098(90)90158-E).
- [9] M. Fliess y H. Sira-Ramírez, "An algebraic framework for linear identification", *ESAIM: COCV*, vol. 9, pp. 151-168, feb., 2003, doi: [10.1051/cocv:2003008](https://doi.org/10.1051/cocv:2003008).
- [10] L. A. Baltazar-Tadeo, J. Colín-Ocampo, A. Abúndez-Pliego, J. G. Mendoza-Larios, E. Martínez-Rayón, A. García-Villalobos, "Balancing of Asymmetric Rotor-Bearing Systems Using Modal Masses Array Calculated by Algebraic Identification of Modal Unbalance", *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 12, pp. 4765-4788, sept., 2023, doi: [10.1007/s42417-023-01151-9](https://doi.org/10.1007/s42417-023-01151-9).
- [11] J. G. Mendoza-Larios et al., "An Algebraic Approach for Identification of Rotordynamic Parameters in Bearings with Linearized Force Coefficients", *Mathematics*, vol. 9, n.º 21, pp. 27-47, oct, 2021, doi: [10.3390/math9212747](https://doi.org/10.3390/math9212747).
- [12] L. A. Baltazar-Tadeo et al., "An Integrated Balancing Method for Asymmetric Rotor-Bearing Systems: Algebraic Identification, Modal Balancing, and Active Balancing Disks", *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 11, n.º 2, pp. 619-645, jul., 2022, doi: [10.1007/s42417-022-00598-6](https://doi.org/10.1007/s42417-022-00598-6).
- [13] H. Sira-Ramirez y M. Fliess, "On discrete-time uncertain visual based control of planar manipulators: an online algebraic identification approach", *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002*, Las Vegas, NV, EUA, 2002, pp. 4509-4514, vol. 4, doi: [10.1109/CDC.2002.1185084](https://doi.org/10.1109/CDC.2002.1185084).
- [14] S. Fuchshumer, "Algebraic linear identification, modeling, and applications of flatness-based control", disertación doctoral, Johannes Kepler Universität Linz, Linz, 2005.
- [15] M. Fliess, S. Fuchshumer, K. Schlacher y H. Sira-Ramirez, "Discrete-time linear parametric identification: An algebraic approach", presentado en *2èmes Journées Identification et Modélisation Expérimentale-JIME'2006*, 2006.
- [16] E. Chávez, R. Castillo y J. M. Pablo, "Identificación algebraica en línea de los coeficientes de amortiguamiento y rigidez de una suspensión pasiva de un cuarto de automóvil", Repositorio Nacional CONACYT, 2017.
- [17] D. Hernandez-Alcantara, R. Morales-Menendez, L. Amezcua-Brooks, O. Sename y L. Dugard, "Fault estimation methods for semi-active suspension systems", *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, México, 2015, pp. 1-5, doi: [10.1109/ROPEC.2015.7395138](https://doi.org/10.1109/ROPEC.2015.7395138).
- [18] J. Colín-Ocampo, J. G. Mendoza-Larios, A. Blanco-Ortega, A. Abúndez-Pliego, E. S. Gutiérrez-Wing, "Determinación del Desbalance en Sistemas Rotor-cojinete a velocidad constante: Método de Identificación Algebraica", *Ingenier. mecáni. tecnolog. desarroll.*, vol. 5, n.º 4, pp. 385-394, 2016.
- [19] J. G. Mendoza-Larios, J. Colín-Ocampo, A. Blanco-Ortega, A. Abúndez-Pliego, E. S. Gutiérrez-Wing, "Balanceo Automático de un Sistema Rotor-Cojinete: Identificador Algebraico en Línea del Desbalance Para un Sistema Rotodinámico", *Rev. Iberoam. Autom. Inform. Ind.*, vol. 13, n.º 3, pp. 281-292, 2016, doi: [10.1016/j.riai.2016.03.004](https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.03.004).
- [20] S. J. Landa-Damas et al., "A simplified Model for the On-Line Identification of Bearing Direct-Dynamic Parameters Based on Algebraic Identification (AI)", *Mathematics*, vol. 11, n.º 14 pp. 01-26, jul., 2023, doi: [10.3390/math11143131](https://doi.org/10.3390/math11143131).
- [21] E. Barredo, J. G. Mendoza, L. A. Baltazar, y S. J. Landa, "Identificación algebraica de los parámetros físicos de

un sistema rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 21, n.º 1, pp. 4-12, feb. 2024, doi: [10.20983/culcyt.2024.1.2.1](https://doi.org/10.20983/culcyt.2024.1.2.1).

- [22] G. E. Zheng, W. Weirui, L. I. Guangping y R. Daogong. “Design, parameter optimisation, and performance analysis of active tuned inerter damper (TID) suspension for vehicle”, *JSV*, vol. 525, n.º 116750, 2022, doi: [10.1016/j.jsv.2022.116750](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.116750).
- [23] F. A. E. Pirani, “Mathematical methods of classical mechanics (graduate texts in mathematics, 60)”, *Bulletin of The London Mathematical Society*, vol. 14, pp. 65-66, 1982.
- [24] B. Huang, C.-Y. Hsieh, F. Golnaraghi y M. Moallem, “Development and optimization of an energy-regenerative suspension system under stochastic road excitation”, *JSV*, vol. 357, pp. 16-34, nov. 2015.
- [25] E. Barredo. (2020). “Cuantificación de la capacidad de regeneración de energía en vehículos sujetos a vibración estocástica”, tesis de doctorado, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México, 2020.