



# INGENIERÍA INDUSTRIAL







# INGENIERÍA INDUSTRIAL

*Ingeniería Industrial*

Revista de la Facultad de Ingeniería  
de la Universidad de Lima

Carrera de Ingeniería Industrial

Edición Número 47, diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47>

**DIRECTOR**

Marcos Fernando Ruiz-Ruiz, Universidad de Lima, Perú

<https://orcid.org/0000-0001-5147-8512>

**EDITORA**

María Teresa Noriega-Araníbar, Universidad de Lima, Perú

<https://orcid.org/0000-0001-6824-1415>

**EDITOR ASOCIADO**

Edilberto Miguel Avalos-Ortecho, Universidad de Lima, Perú

<https://orcid.org/0000-0003-0939-634X>

**ASISTENTE EDITORIAL**

María Laura Pecca Cacha

© Universidad de Lima

Fondo Editorial

Av. Javier Prado Este 4600

Urb. Fundo Monterrico Chico

Santiago de Surco, Lima, Perú

Código postal 15023

Teléfono (511) 437-6767, anexo 30131

[fondoeditorial@ulima.edu.pe](mailto:fondoeditorial@ulima.edu.pe)

[www.ulima.edu.pe](http://www.ulima.edu.pe)

Edición, diseño, diagramación y carátula: Fondo Editorial de la Universidad de Lima

Publicación semestral

Los trabajos firmados son de responsabilidad de los autores.

*Ingeniería Industrial* se publica bajo la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY)

ISSN 2523-6326 (en línea)

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú n.º 2020-08605



## COMITÉ EDITORIAL

Gabriela Laura Gallardo, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0003-1426-8430>

Wilfredo Román Hernández Gorriti, Universidad de Lima, Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-6122-4935>

Silvia Ponce Álvarez, Universidad de Lima, Perú  
<https://orcid.org/0000-0003-1583-7113>

José L. Zayas-Castro, University of South Florida, Estados Unidos  
<https://orcid.org/0000-0001-7374-3479>

Marcos Leandro Silva Oliveira, Universidad de la Costa, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-7771-5085>

Hugo Romero-Bonilla, Universidad Técnica de Machala, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-7846-0512>

Neyfe Sablón-Cossío, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-6691-0037>

Marco Antonio Díaz Martínez, Tecnológico Nacional de México, México  
<https://orcid.org/0000-0003-1054-7088>

Clara Inés Pardo-Martínez, Universidad del Rosario, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-8556-319X>

## COMITÉ CIENTÍFICO

Dra. Ruth Isabel Murrugarra Munares, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile  
<https://orcid.org/0000-0002-7043-7983>

Dr. Igor Lopes-Martínez, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba  
<https://orcid.org/0000-0002-1249-8833>

Dra. María Julia Brunette, The Ohio State University, Estados Unidos  
<https://orcid.org/0000-0001-7932-5964>

Dra. María Lau, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú  
<https://orcid.org/0000-0001-9058-7789>

Dr. Fabricio Paredes-Larroca, Universidad de Lima, Perú  
<https://orcid.org/0000-0001-8857-9253>

Dr. Alberto Edel León, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-2260-3086>

Dr. Alexandre Carlos Brandão Ramos, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Brasil  
<https://orcid.org/0000-0001-8844-5116>

Dra. Martha Ruth Manrique Torres, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-3870-4965>

Dr. Yonni Angel Cuero-Acosta, Universidad del Rosario, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0001-9565-3968>

Dr. Lei Zhao, Tsinghua University, China  
<https://orcid.org/0000-0002-1028-9632>

Dra. Iara Tammela, Universidade Federal Fluminense, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0002-8914-6326>

Dra. Marcela Amaro Rosales, Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Investigaciones Sociales, México  
<https://orcid.org/0000-0002-1647-8901>

Dr. Felipe Schoemer Jardim, Universidade Federal Fluminense, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0001-9066-887X>

Dr. Héctor Enrique Gonzales Mora, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-8455-3432>

Dr. Daniel Eduardo Lazo Martinez, Curtin University, Australia  
<https://orcid.org/0000-0003-1757-5444>

Dr. Gibrán Sayeg-Sánchez, Tecnológico de Monterrey, México  
<https://orcid.org/0009-0009-6694-6142>

Dr. Wilfredo Yushimito, Instituto Politécnico Rensselaer, Estados Unidos  
<https://orcid.org/0000-0002-5528-2477>

Dra. Carmen Pérez-Camino, Universidad de Sevilla, España  
<https://orcid.org/0000-0001-7652-9582>

Dr. S. Nallusamy, Jadavpur University, India  
<https://orcid.org/0000-0003-1446-3332>

Dr. Joaquín Julián Pastor Pérez, Universidad Miguel Hernández, España  
<https://orcid.org/0000-0002-3065-2494>

## COMITÉ EVALUADOR

Álex Vidal Paredes	Universidad de Lima, Lima, Perú
Bertha Díaz Garay	Universidad de Lima, Lima, Perú
Carlos Enrique Pérez Mata	Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México
Cristian Urbina Suasnabar	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú
Edison Omar Martínez-Mora	Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador
Fabricio Paredes-Larroca	Universidad de Lima, Lima, Perú
Francisco Canibe Cruz	Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila, México
Gustavo Alberto Díaz Díaz	Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra, Santiago de los Caballeros y Santo Domingo, República Dominicana
Jorge Alfonso Lara-Pérez	Universidad Autónoma de Ciudad de Juárez, Ciudad de Juárez, México
José Carlos Trejo García	Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México
Manuel Antonio Arenas Méndez	Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, Pánuco, Veracruz, México
Nicolás Salazar Medina	Universidad de Lima, Lima, Perú
Núria Arimany Serrat	Universidad Central de Cataluña, Barcelona, Cataluña, España
Ramón Cevallos Cedeño	Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España
Renier Esquivel García	Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

# ÍNDICE

PRESENTACIÓN	9
FOREWORD	11
GESTIÓN DE LA PRODUCCIÓN / PRODUCTION MANAGEMENT	13
Propuesta de mejora para el control y el manejo de un almacén con productos de papelería / Improvement proposal for the control and management of a warehouse with stationery products	15
<i>Cittlali Villamil, Salvador Montesinos González, Carlos Vázquez Cid de León</i>	
Diseño de una herramienta de apoyo para la selección de tecnologías de AIDC en procesos logísticos / Design of a support tool for the selection of AIDC technologies in logistics processes	32
<i>María Alejandra Ríos Córdova, Igor Lopes-Martínez, Roxana Alemán Bravo</i>	
Evaluación de una política de inventario de suministros médicos de mayor rotación en centros de salud de tercer nivel ubicados en zonas de acceso difícil / Evaluation of high-turnover inventory policies for medical supplies in tertiary healthcare centers in remote areas	57
<i>Daniel Andrés Gutiérrez Yepes, Luis Tarazona-Torres</i>	
Gestión de inventarios de una compañía importadora de repuestos de transmisión de potencia de maquinaria pesada / Inventory management for an import company of power transmission spare parts for heavy machinery	79
<i>Mateo Núñez-Oviedo, Luis Tarazona-Torres</i>	
Mitigación de riesgos disergonómicos: manipulación manual de estructuras metálicas para líneas de transmisión de electricidad / Mitigating disergonomic risks: Manual manipulation of metallic structures for electric power transmission lines	103
<i>Yober Jenry Arteaga-Irene, Katherine Pretel-Ruiz, Rocío Shirley Chaupis-Ramos, Danny Daniel Medina-Aguilar</i>	
CALIDAD Y MEDIOAMBIENTE / QUALITY AND ENVIRONMENT	127
Obtención de celobiosa a partir de la hidrólisis enzimática parcial de la celulosa de cáscara de arroz / Obtaining cellobiose from the partial enzymatic hydrolysis of rice husk cellulose	129
<i>Humberto Ayala Armijos, Nicole Romero Calle, Braulio Madrid Celí, Ramiro Quezada Sarmiento, Edgar Tinoco Gálvez, Richard Chávez Abad</i>	

<b>Estrategia para el desarrollo de la competencia investigativa en estudiantes universitarios de la carrera de Ingeniería Industrial: estudio de caso de la Universidad Instituto Irapuato / Strategy for the development of research competence in university students: Irapuato Institute University case study</b>	<b>145</b>
<i>Miguel Ángel Guerra Olivares, José Néstor Peraza Balderrama</i>	
<b>INGENIERÍA DE NEGOCIOS / BUSINESS ENGINEERING</b>	<b>159</b>
<b>Mejora de los indicadores NPS y FCR en una empresa del sector <i>call center</i> / Improvement of the NPS and FCR indicator in a company in the call center sector</b>	<b>161</b>
<i>Alonso Fernandino García Gallo</i>	
<b>CIENCIA Y TECNOLOGÍA / SCIENCE AND TECHNOLOGY</b>	<b>189</b>
<b>Simulador de luz artificial para paneles solares: diseño y construcción en el Perú / Artificial light simulator for solar panels: Design and construction in Peru</b>	<b>201</b>
<i>William Fernando Fernández Goicochea, Mario Dayvid Carbajal Ccoyllo</i>	
<b>La manufactura aditiva como elemento imprescindible de la industria 4.0 en beneficio de la ingeniería: un análisis bibliométrico / Additive manufacturing as an essential element of industry 4.0 for the benefit of engineering: A bibliometric analysis</b>	<b>209</b>
<i>Marco Antonio Díaz-Martínez, Reina Verónica Román-Salinas, Santos Ruíz-Hernández, Nicolás Alberto Hernández-Cortés, Vania Iraís González-Rubín</i>	
<b>DATOS DE LOS AUTORES</b>	<b>239</b>

# PRESENTACIÓN

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7428>

Es un honor presentar la edición número 47 de nuestra revista *Ingeniería Industrial*, un espacio dedicado a la difusión del conocimiento y la innovación en nuestra disciplina. En esta ocasión, hemos recopilado diez artículos que reflejan la diversidad y la relevancia de la ingeniería industrial en el contexto actual, los cuales abordan temas cruciales como la optimización de inventarios en centros de salud, la implementación de políticas de mejora continua en *call centers* y el diseño de sistemas de iluminación solar para paneles en diversas regiones del Perú. Estas investigaciones no solo destacan la importancia de la eficiencia y la sostenibilidad, sino que también subrayan el papel fundamental de la ingeniería industrial en la solución de problemas complejos y en la mejora de procesos en diferentes sectores.

Además, en esta edición, se exploran innovaciones en manufactura aditiva y su integración en la Industria 4.0, lo que pone de manifiesto cómo la ingeniería industrial se adapta y evoluciona ante los desafíos tecnológicos contemporáneos. Cada artículo es un testimonio del compromiso de nuestros autores con la excelencia y la investigación aplicada. Agradecemos sinceramente al comité editorial y al comité científico por su dedicación y esfuerzo en la revisión y selección de los artículos. También extendemos nuestro agradecimiento a todos los autores y revisores que han contribuido a esta edición, haciendo posible la difusión de conocimientos que enriquecen a nuestra comunidad profesional.

*Marcos Fernando Ruiz-Ruiz*

*Director*





# FOREWORD

We are proud to present the 47th issue of *Ingeniería Industrial*, a journal dedicated to fostering knowledge and innovation in our field. This edition brings together ten articles that showcase the breadth and significance of industrial engineering in today's world. The topics covered include inventory optimization in healthcare facilities, the implementation of continuous improvement strategies in call centers, and the development of solar lighting systems for panels in various regions of Peru. These studies emphasize not only the importance of efficiency and sustainability but also the critical role of industrial engineering in addressing complex challenges and enhancing processes across diverse sectors.

This issue also delves into groundbreaking advancements in additive manufacturing and its integration into Industry 4.0, illustrating how industrial engineering continues to adapt and evolve in the face of contemporary technological demands. Each article reflects the authors' dedication to excellence and applied research.

We extend our heartfelt gratitude to the editorial and scientific committees for their meticulous work in reviewing and curating this collection of articles. Our sincere thanks also go to the authors and reviewers whose contributions have made this issue possible, helping to advance and enrich the professional community we serve.

*Marcos Fernando Ruiz-Ruiz*

*Director*



**GESTIÓN  
DE LA PRODUCCIÓN**  

---

**Production Management**





# PROPUESTA DE MEJORA PARA EL CONTROL Y EL MANEJO DE UN ALMACÉN CON PRODUCTOS DE PAPELERÍA

CITLALI VILLAMIL

<https://orcid.org/0009-0002-1078-3486>

Instituto de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca,  
México

SALVADOR MONTESINOS GONZÁLEZ\*

<https://orcid.org/0000-0001-6006-7790>

Instituto de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca,  
México

CARLOS VÁZQUEZ CID DE LEÓN

<https://orcid.org/0000-0003-2067-0565>

Instituto de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca,  
México

Recibido: 17 de mayo del 2024 / Aceptado: 15 de julio del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7023>

**RESUMEN.** La gestión de inventarios es fundamental para equilibrar existencias, reducir costos y evitar retrasos en los pedidos, identificando productos de alta demanda. Este trabajo se enfocó en desarrollar un sistema integral de inventario para el almacén de una empresa de papelería, que mejorara el control de productos mediante la técnica ABC. La investigación, de naturaleza descriptiva, analizó las características del sistema de inventario en la papelería y propuso áreas de mejora. Se implementó una clasificación jerárquica de los productos que permitió una gestión más precisa en compras, previsiones y políticas de reordenamiento, lo que permitió minimizar riesgos de obsolescencia y desperdicio en productos de baja rotación. El método aplicado facilitó la toma de decisiones estratégicas al ofrecer una visión clara de la estructura del inventario y optimizar la eficiencia operativa para satisfacer las demandas de los clientes.

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [villamilcitla1234@gmail.com](mailto:villamilcitla1234@gmail.com); [smontesinos@mixteco.utm.mx](mailto:smontesinos@mixteco.utm.mx); [carlosvazquezc@mixteco.utm.mx](mailto:carlosvazquezc@mixteco.utm.mx)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

PALABRAS CLAVE: inventarios / control de inventarios / almacenes / distribución física de bienes / proceso de mejora continua / industria de productos de papel

## IMPROVEMENT PROPOSAL FOR THE CONTROL AND MANAGEMENT OF A WAREHOUSE WITH STATIONERY PRODUCTS

**ABSTRACT.** Inventory management is essential for balancing stock levels, reducing costs, and preventing order delays by identifying high-demand products. This work focused on developing a comprehensive inventory system for the warehouse of a stationery company, enhancing product control using the ABC technique. The research, descriptive in nature, analyzed the characteristics of the inventory system in the stationery store and proposed areas for improvement. A hierarchical classification of products was implemented, allowing for more accurate management in purchasing, forecasting, and reordering policies, minimizing the risks of obsolescence and waste in low-turnover products. The applied method facilitated strategic decision-making by providing a clear view of the inventory structure and optimizing operational efficiency to meet customer demands.

**KEYWORDS:** inventories / inventory control / warehouses / physical distribution of goods / continuous improvement process / paper products industry

## INTRODUCCIÓN

La ingeniería industrial cumple un papel fundamental en la gestión de inventarios, pues utiliza métodos científicos para optimizar los recursos y procesos en las organizaciones. A lo largo de esta investigación, se puede observar cómo esta disciplina aborda diversos desafíos, desde la optimización de la producción hasta la logística. En esencia, se enfoca en desarrollar soluciones eficaces y sostenibles que promuevan el éxito de las organizaciones en un entorno empresarial cada vez más competitivo y globalizado (Corella & Olea, 2023).

Muchas empresas en México enfrentan la ausencia de una estrategia que garantice su permanencia en el mercado. Su falta de liquidez les impide adaptarse a los cambios del entorno, pero, a pesar de ello, es posible gestionarlas de manera adecuada incluso con recursos limitados (Arellano et al., 2017). Con tal fin, este trabajo presenta una propuesta de organización y control para gestionar los inventarios de una empresa comercializadora. El objetivo principal es diseñar un sistema integral de inventario en el almacén que permita mejorar de manera efectiva el control de los productos mediante la implementación del método ABC (Álvarez & Wilson, 2020; Coronel et al., 2021; Macías et al., 2020).

El control de inventarios es fundamental para mantener un equilibrio adecuado entre las existencias de un almacén y los productos con alta demanda (Tai et al., 2019). Además, tiene un papel clave en la reducción de costos porque evita el deterioro de los materiales, al identificar de manera oportuna los productos que no presentan una rotación adecuada y no requieren reabastecimiento inmediato (Bofill et al., 2017). En resumen, el control de inventarios optimiza la gestión de existencias para mejorar la eficiencia operativa de una empresa (Salas-Navarro et al., 2017).

Una gestión más eficiente no solo impulsa las ventas, sino que también mejora la capacidad de la empresa para atender las solicitudes de los clientes de manera oportuna y eficaz (Castro & Salas, 2022; Montesinos-González, 2022; Panchi-Mayo et al., 2017), de manera que aumenten las utilidades y se obtengan ventajas competitivas (Ovalles et al., 2017). La base de cualquier empresa reside en la atención cuidadosa a los productos que entran y salen, lo que subraya la importancia de una gestión eficiente del inventario (Castro & Salas, 2022; Zhaolin & Qi, 2017). Por ello, este trabajo se enfoca en mejorar el funcionamiento de la empresa con un enfoque particular en la gestión de sus productos.

En cambio, si la función de manejo no opera de manera eficiente, las ventas no contarán con el material necesario para funcionar, lo que provocará la insatisfacción de los clientes y una disminución en los resultados esperados (Torres et al., 2017). En consecuencia, las utilidades se verán afectadas y los resultados deseados no se alcanzarán.

Finalmente, al concluir esta investigación, es importante proporcionar una visión clara sobre la implementación del sistema ABC en una empresa, destacando tanto sus ventajas como sus desventajas, lo cual es crucial para entender el estudio. Mantener un inventario bien organizado permitiría reducir los tiempos de entrega, lo que posibilitaría atender de forma expedita los pedidos de los clientes. De esta manera, se puede lograr su satisfacción y fidelidad, contribuyendo a un crecimiento sostenible del negocio.

## METODOLOGÍA

Esta investigación se clasifica como investigación aplicada según su finalidad, ya que, siguiendo a Torres y Navarro (2007), se distingue por abordar un problema específico con un objetivo final claramente definido, estrechamente relacionado con el desarrollo práctico. En este caso, el propósito principal es analizar una situación concreta, cuyo resultado es la estructuración de un sistema integral de inventario en el almacén de una empresa de papelería. Este sistema busca mejorar de manera efectiva el manejo de los productos y agiliza su control mediante la implementación de la técnica ABC. Además, por su alcance, es una investigación descriptiva (Hernández et al., 2014), pues con este trabajo se logra un panorama general del tema o problema en cuestión, a fin de generar propuestas de mejora continua (Montesinos et al., 2020), en busca de optimizar el control del almacén de la papelería considerando herramientas de ingeniería industrial.

Ahora bien, los métodos usados en la investigación son de distintos tipos, dependiendo del objetivo final o tipo de conocimiento que se quiera generar (Hernández et al., 2014). Con base en ello, este trabajo de investigación estaría dentro de los métodos de acción, aquellos que buscan transformar la realidad, como son los métodos de trabajo o producción, que intentan llevar a cabo una mejora continua en pequeñas empresas (Rojas, 2013). Para lograr lo anterior, las principales técnicas de recolección de información para la investigación fueron tanto fuentes primarias como secundarias, por lo que se consultó información bibliográfica sobre el tema y se llevó a cabo un trabajo de investigación de campo.

Las actividades realizadas como parte del diseño de la investigación fueron las siguientes:

- *Búsqueda y selección.* Se accedió a bases de datos como Redalyc, SciELO y CONACYT, evaluando las palabras clave para encontrar información más relevante relacionada con el tema de investigación.
- *Criterios de inclusión.* Se recopilaron los datos obtenidos a través de técnicas e instrumentos de investigación y se agrupó la información posteriormente. Finalmente, se realizó la descripción del tratamiento estadístico utilizando gráficos, tablas y diagramas generados a partir del análisis de los datos.

- *Criterios de exclusión.* Se descartaron documentos fuera del rango de los últimos cinco años, principalmente todos aquellos productos académicos o documentos que no hubiesen sido publicados en revistas indexadas.
- *Análisis de datos y cribaje.* Se realizó un diagnóstico inicial de la empresa y se identificó los procesos clave en el área de almacén (recepción, almacenamiento y despacho), con el objetivo de generar acciones correctivas que permitan proponer mejoras en la gestión de inventarios, alineadas con las necesidades específicas del área.

## RESULTADOS

Para generar una propuesta de mejora en el control de almacén de productos de papelería, se elaboró y aplicó una lista de verificación utilizando la herramienta 5S; las preguntas fueron formuladas a todos los colaboradores del almacén de la empresa comercializadora. Esta herramienta es efectiva para evaluar y asegurar la implementación adecuada de las actividades en el entorno de trabajo, en este caso, en el almacén.

La evaluación abarcó las cinco etapas de la herramienta 5S, cada una con cinco apartados, sumando un total de veinticinco ítems. El puntaje total del instrumento es de cien puntos, lo que indica el cumplimiento de todos los requisitos si se obtiene la calificación máxima. Cada apartado se evaluó en una escala de cero a cuatro, en la que cero representa un desempeño deficiente y cuatro un desempeño excelente.

### *Resultado de la lista de verificación 5S*

Una vez obtenidas las respuestas, se procedió a analizar los resultados y se plasmó la información en una matriz de resultados (véase la Tabla 1). La lista de verificación fue elaborada por el personal del almacén, compuesto por el encargado de la tienda, dos auxiliares y dos choferes. Los puntajes del test oscilaron entre 22 y 44. Para las calificaciones generales, se calculó un promedio de la suma individual de cada categoría en comparación con el puntaje máximo posible, que es 20 (dado que son 5 categorías con un puntaje máximo de 4 cada una). El promedio total se obtuvo sumando los promedios individuales de cada categoría (Villamil, 2024).

Los resultados mostrados en la Tabla 1 evidencian la necesidad de efectuar mejoras en la organización del área de almacén, ya que se obtuvo una puntuación de solo 40 puntos de un total de 100.



**Tabla 1**  
Matriz de resultados

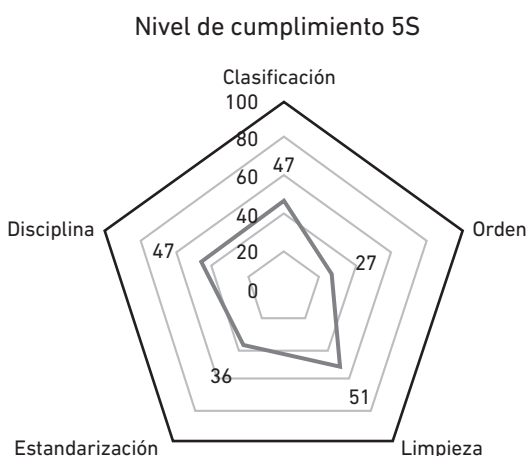
	Clasificación										Orden										Limpieza										Estandarización										Disciplina					Total									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5		6	7	8	9	10	21	22	23	24
Jefe de bodega	2	2	2	1	2	9	0	1	0	1	1	3	2	1	0	1	5	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	4	22																		
Subjefe	3	1	2	1	1	8	1	1	0	1	2	5	2	1	1	2	2	8	2	1	0	1	1	5	2	1	1	5	2	1	2	1	1	1	7	33																			
Auxiliar 1	2	1	1	2	1	7	0	1	0	1	2	4	1	1	0	2	1	5	1	1	0	0	1	3	1	0	1	1	0	1	1	0	3	22																					
Auxiliar 2	1	0	0	1	0	2	0	1	0	0	1	2	2	1	0	0	1	4	1	0	0	1	1	3	3	2	1	1	1	1	1	1	8	19																					
Auxiliar 3	2	1	1	1	1	6	1	1	0	1	1	4	2	1	1	2	2	8	1	1	1	1	2	6	2	2	2	2	2	1	0	7	31																						
Chofer 1	2	2	2	2	1	9	2	0	0	1	2	5	2	1	2	3	3	11	1	2	2	2	2	9	2	3	2	2	2	1	10	44																							
Chofer 2	2	1	2	0	1	6	1	1	0	1	1	4	3	1	2	2	2	10	2	2	1	2	2	9	2	2	1	1	2	1	2	8	37																						
Promedio	9/20						5/20				10/20				7/20							9/20															40/100																		

*Nota. De Propuesta de mejora para la planeación y control de inventarios en una empresa comercializadora.*  
por C. Villamil, 2024, p. 69 ([http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/14566.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/14566.pdf)).

Además, se comparó los resultados obtenidos y el porcentaje ideal para cada apartado de la metodología aplicada. Esto se representó mediante un diagrama radial que expone el nivel de cumplimiento de las 5S, tal como se observa en la Figura 1. La línea gruesa externa del diagrama representa el 100 % de cada criterio de evaluación de la metodología 5S, que sería el objetivo ideal. En contraste, la línea gruesa interna muestra los resultados obtenidos, lo que subraya la necesidad de mejorar el sistema actual.

**Figura 1**

*Diagrama radial del nivel de cumplimiento de las 5S*



*Nota. De Propuesta de mejora para la planeación y control de inventarios en una empresa comercializadora, por C. Villamil, 2024, p. 70 ([http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/14566.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/14566.pdf)).*

En relación con la identificación de problemas en el almacén de artículos, la Figura 2 muestra la falta de orden en el área de trabajo. Se identificaron objetos innecesarios que obstruyen las actividades de los colaboradores, lo que lleva a un acomodo inadecuado de los materiales y a zonas de trabajo desorganizadas. Además, se notó una falta de limpieza que dificulta la manipulación y la ejecución de movimientos y maniobras operativas. Estos problemas respaldan la calificación obtenida en la lista de verificación y el diagrama de telaraña presentado anteriormente. Los valores numéricos de cada variable se representan en una escala, lo que facilita la visualización y comparación del desempeño o situación en relación con esas variables. Esta representación es útil para analizar el rendimiento en diferentes áreas e identificar tanto los puntos fuertes como los débiles.

## Figura 2

*Evidencias de limpieza y orden del almacén*

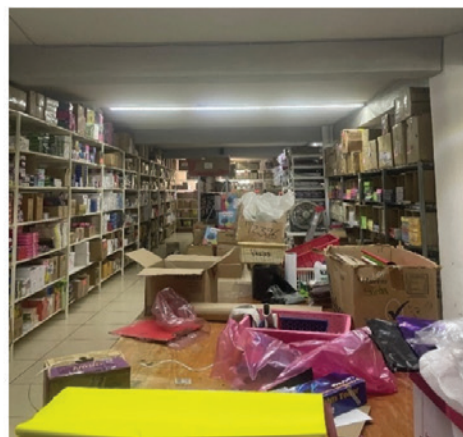


*Nota. De Propuesta de mejora para la planeación y control de inventarios en una empresa comercializadora, por C. Villamil, 2024, p. 71 ([http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/14566.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/14566.pdf)).*

En la Figura 3, se observa que las estanterías carecen de etiquetas o señalizaciones, solo se han colocado códigos en algunas cajas según el producto correspondiente. Esta falta de etiquetado genera confusión, desorden y desconocimiento sobre la existencia de los productos, lo que provoca retrasos en la operación.

## Figura 3

*Evidencia del área de trabajo por desorganización*

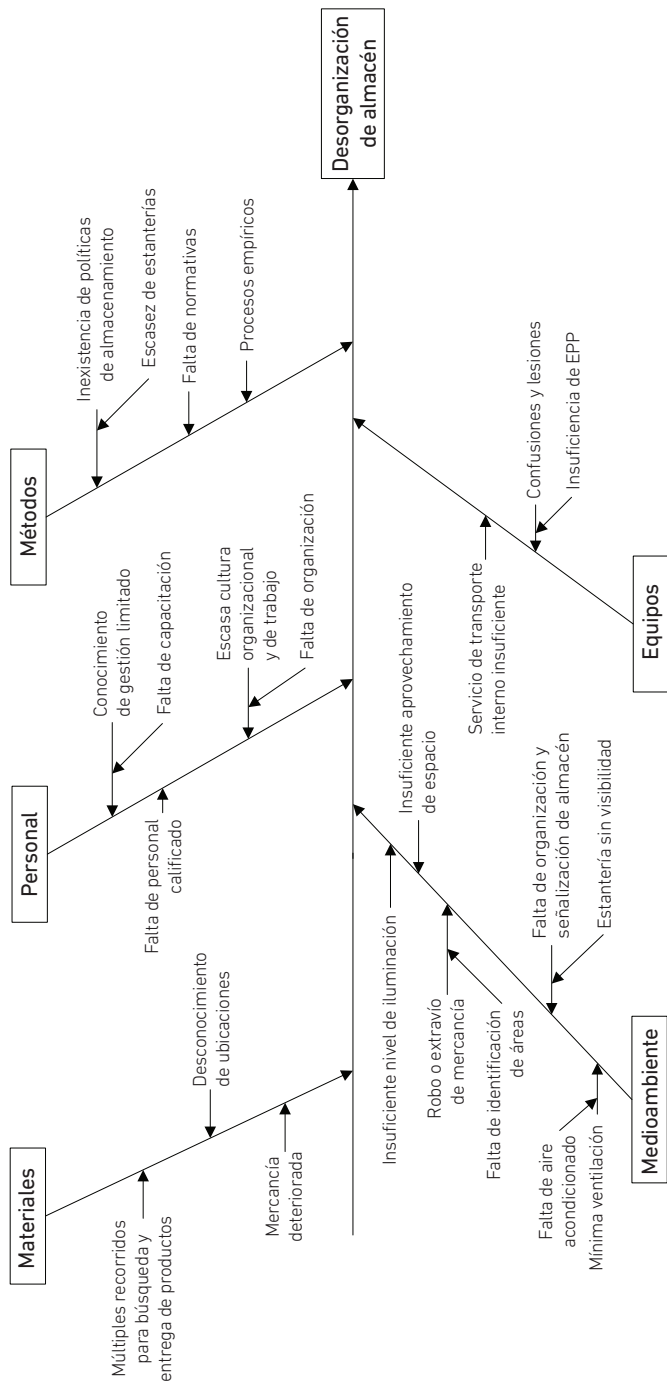


*Nota. De Propuesta de mejora para la planeación y control de inventarios en una empresa comercializadora, por C. Villamil, 2024, p. 72 ([http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/14566.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/14566.pdf)).*

En la Figura 4, se presenta el diagrama de Ishikawa, que resultó ser una herramienta valiosa para identificar las causas raíz del problema de desorganización del almacén. Este diagrama permitió analizar los factores involucrados al clasificar las diversas causas que contribuyen a la falta de orden en el área (Villamil, 2024). Para desarrollar el diagrama, se realizaron una serie de preguntas a los trabajadores involucrados y se clasificó las diferentes causas en niveles. Entre las causas destacadas se encuentran: la falta de capacitación del personal, la necesidad de actualizar los procesos, la falta de reparación o reemplazo de equipos y la revisión de las políticas de inventario, entre otras.

Finalmente, otro de los problemas identificados fue que no existía una clasificación de los 23 689 productos que estaban registrados en el sistema. Entonces, se procedió a realizarla considerando quince categorías, según el tipo de artículo y que básicamente pertenecieran al mismo campo semántico. Esta agrupación se observa en la Tabla 2 (Villamil, 2024).

**Figura 4**  
Diagrama de Ishikawa de la desorganización del almacén



Nota. Adaptado de *Propuesta de mejora para la planeación y control de inventarios en una empresa comercializadora*, por C. Villamil, 2024, p. 74 ([http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/14566.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/14566.pdf)).



**Tabla 2***Artículos agrupados en categorías para su organización*

N.º.	Categoría	N.º de artículos	N.º	Categoría	N.º de artículos
1	Papelería	6705	9	Didácticos	619
2	Regalos	3526	10	Ferretería	223
3	Bisutería	3206	11	Paraguas	133
4	Juguetería	2552	12	Perfumería	132
5	Cosméticos	1877	13	Abarrotes	120
6	Temporada	1559	14	Navideño	102
7	Mercería	1479	15	Equipo de cómputo	46
8	Manualidades	1410			
Total					23 689

*Nota.* De *Propuesta de mejora para la planeación y control de inventarios en una empresa comercializadora*, por C. Villamil, 2024, p. 76 ([http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/14566.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/14566.pdf)).

Al terminar la clasificación de los distintos ítems, considerando tanto el modelo como el tipo de producto en las quince categorías definidas, se procedió a aplicar el método de inventario ABC, con el fin de gestionar el control del inventario de manera efectiva y determinar la inversión para controlar su manejo. Los pasos para realizar la clasificación ABC fueron los siguientes:

1. *Calcular el valor de cada artículo.* Multiplicar la cantidad de cada artículo por su precio unitario para obtener el valor total de cada artículo en el inventario.
2. *Ordenar los artículos por valor total.* Clasificar los artículos desde el valor total más alto al más bajo. Esto permitió identificar los productos más costosos en el inventario.
3. *Dividir en categorías.* Clasificar los productos en tres categorías basadas en su valor relativo, generalmente denominadas A, B y C.
4. *Clasificar por rangos.* Dividir los artículos en las siguientes categorías:
  - Categoría A: representa el 0-80 % del valor total del inventario.
  - Categoría B: representa el 81-95 % del valor total del inventario.
  - Categoría C: representa el 96-100 % del valor total del inventario.

Este método ayuda a enfocar los esfuerzos de control y gestión en los productos que tienen un impacto más significativo en el valor total del inventario. En la Tabla 3 se presenta el resultado de la investigación de Villamil (2024).

**Tabla 3**  
*Aplicación ABC*

N° de productos	ID	Producto	Categoría	Unitario (\$)	Total de existencias	Valor total (\$)	Porcentaje acumulado relativo	Porcentaje acumulado	Clasificación ABC
1	7502233377803	Hoja Scribe Ecológica empaque verde carta 10 paquetes c/500 hojas blanco	Papelería	1365,00	255	348,075	1,90	1,90	A
2	3154148517597	Lápiz Maped 74371 Triangular bote con 72 piezas surtido HB 2	Papelería	275,00	1095	301,125	1,65	3,55	A
3	7215	Fomi chino 4 cartas con diamantina 1 pieza surtido en pliego	Papelería	28,00	8001	224,028	1,22	4,77	A
4	7501214999416	Contact Acme o barrilito 7020 y 7020a autoadherible rollo de 45 x 20 m transparente PVC	Papelería	260,00	748	194,480	1,06	5,84	A
5	7506129430894	Libreta Scribe 1007510 Raya caja con 36 piezas con imagen	Papelería	893,00	212	189,316	1,03	6,87	A
6	4715709223211	Corrector Manny 1250 1 pieza de 12 ml blanco lápiz	Papelería	26,00	285	7,410	0,04	80,01	B
7	7501428711071	Marcador Azor 26912Aquarelo junior paquete con 12 piezas surtido punto fino	Papelería	85,00	87	7,395	0,04	80,05	B
8	7502212480463	Folders Scool 3820 media ceja carta con 25 piezas tonos bright cartulina	Papelería	175,00	42	7,350	0,04	80,09	B
9	7501102614506	Kola Loka PEC-044 Brocha 8 piezas de 5g transparente	Papelería	262,00	28	7,336	0,04	80,13	B
10	7703486035551	Bolígrafo Paper Mate 1.0 Kilométrico caja con 12 piezas verde mediano	Papelería	45,00	163	7,335	0,04	80,17	B
11	7501091864593	Agenda Dipak 7554074401 Delux 2018 Justin Bieber 1 pieza mediana doble arillo y pasta dura	Papelería	110,00	1	110,000	0,00	100,00	C
12	6046	Hoja Scribe papel bond 1 hoja carta blanca	Papelería	0,50	199	99,500	0,00	100,00	C
13	2047	Globo Nacional 14 de febrero paquete con 200 25 piezas rojo corazón	Papelería	56,00	1	56,000	0,00	100,00	C
14	7501091852316	Agenda Dipak Básica 2017 1 pieza chica doble arillo y pasta dura	Papelería	33,00	1	33,000	0,00	100,00	C
15	4467	Marca texto chino diferentes 1 pieza surtido	Papelería	7,00	3	21,000	0,00	100,00	C

*Nota.* Adaptado de *Propuesta de mejora para la planeación y control de inventarios en una empresa comercializadora*, por C. Villamil, 2024, sección Anexos ([http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/145666.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/145666.pdf)).

Es importante señalar que el criterio utilizado para aplicar el método ABC fue el costo total, calculado al multiplicar la cantidad de cada artículo por su precio unitario. Posteriormente, se clasificaron los productos analizando su participación estimada en el inventario. Esta información se presenta en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Análisis según el método de inventario ABC*

Participación estimada	Clasificación	Total de productos
0-80 %	A	18 951,2
81-95 %	B	3553,3
96-100 %	C	1184,4

*Nota. De Propuesta de mejora para la planeación y control de inventarios en una empresa comercializadora, por C. Villamil, 2024, p. 86 ([http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/14566.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/14566.pdf)).*

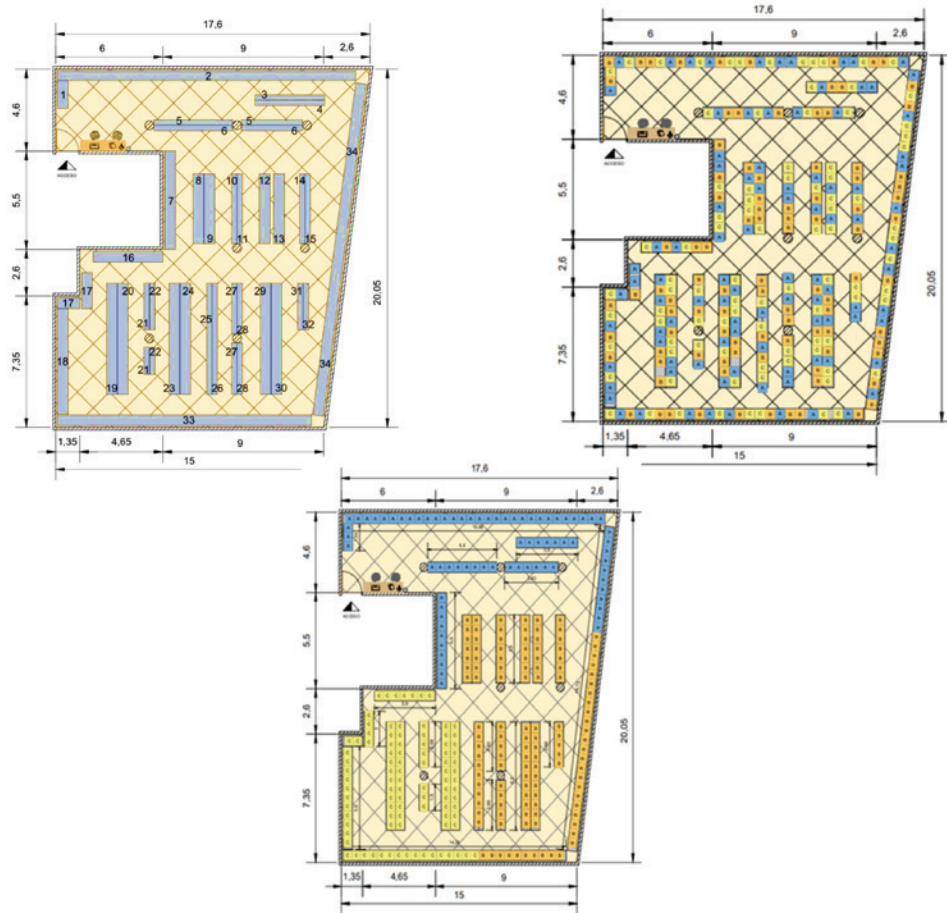
Como parte de las propuestas de mejora, también se generó una propuesta de redistribución de las mercaderías dentro del almacén, considerando los siguientes puntos:

- Los productos clasificados como A deberán ubicarse cerca de la puerta de ingreso.
- Los productos clasificados como B deberán ubicarse en puntos estratégicos.
- Los productos clasificados como C deberán ubicarse de manera esparcida.

En la Figura 5, de izquierda a derecha se observa el plano del almacén que se realizó para identificar áreas y espacio; en el plano del centro se observa cómo estaba la ubicación antes de los cambios. En la última imagen (derecha) se presenta la zonificación basada en los datos de la clasificación ABC como propuesta de mejora. Cabe anotar en los planos que el espacio físico del almacén no es rectangular, por lo cual fue difícil generar propuestas, pero la alternativa de distribución buscó que el uso del espacio diera un máximo aprovechamiento del área a partir del análisis riguroso (Villamil, 2024).

**Figura 5**

*Representación del plano del almacén de la empresa y propuesta de mejora de distribución*



*Nota. De Propuesta de mejora para la planeación y control de inventarios en una empresa comercializadora, por C. Villamil, 2024, pp. 88, 89 y 91 ([http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/14566.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/14566.pdf)).*

El plano del almacén propuesto utilizó una distribución de planta en U, lo que facilitó un desplazamiento más fluido en los espacios y redujo los tiempos de recorrido, lo que mejoró el flujo de trabajo y aumentó la eficiencia en la ejecución de los procesos.

## DISCUSIÓN

La técnica ABC permite clasificar el inventario de acuerdo con un parámetro definido, que indica cuáles son los materiales más relevantes según el criterio seleccionado; asimismo, orienta y es una referencia para enfocarse en los más importantes para tomar

decisiones futuras. Para lograr lo anterior, se utilizó el diagrama de Ishikawa para identificar las causas potenciales que provocaban una inadecuada gestión del inventario, lo que permitió llevar a cabo una redistribución del área. Cabe mencionar que no se tienen resultados cuantitativos de la implementación, dado que no se realizó, debido a que el alcance de la investigación solo fue presentar una propuesta.

Este método, al clasificar los productos en categorías según su importancia, ofrece una visión clara de la estructura del inventario y actúa como una guía estratégica para la toma de decisiones. Así, la empresa puede gestionar las compras con mayor precisión, ajustar los niveles de inventario de acuerdo con la demanda y optimizar los recursos disponibles (Veloz & Parada, 2017).

La implementación efectiva del método ABC mejora el almacenamiento al dar prioridad a los productos de alta rotación (categoría A), lo cual asegura que estén siempre disponibles para satisfacer la demanda del cliente. Además, ayuda a identificar productos de baja rotación (categorías B y C), a fin de reducir el riesgo de obsolescencia y minimizar los costos asociados con el almacenamiento prolongado (Jara-Cordero et al., 2017; Rahdar et al., 2017; Ramos et al., 2020).

Finalmente, este método aplicado en la investigación es una herramienta estratégica que permite a las organizaciones adaptarse ágilmente a las dinámicas del mercado, tomar decisiones informadas y mejorar sus indicadores de eficiencia y rentabilidad (Arellano et al., 2017; Ramos et al., 2020, Villamil, 2024).

## CONCLUSIONES

Las empresas comercializadoras se centran en la compra, venta o distribución de productos para facilitar el flujo de bienes y servicios desde los fabricantes o proveedores hasta los consumidores finales, otras empresas o intermediarios.

En el departamento de inventarios, la política principal será realizar revisiones semestrales del inventario para mitigar riesgos, como la apropiación indebida de activos, robos, desvalorización y pérdidas por obsolescencia.

La implementación de medidas de control adecuadas y herramientas de medición de desempeño no solo permite una gestión más eficaz de los recursos, sino que también ayuda a identificar áreas de mejora y a optimizar la asignación de activos para cumplir con las demandas cambiantes del mercado.

Dadas las debilidades identificadas en el control de inventarios de la empresa, se propuso la aplicación del método ABC. Esta propuesta incluye la creación de mecanismos necesarios para una correcta ejecución de los procedimientos, aplicando el método ABC para conocer el nivel de rotación de los productos y evaluar el desempeño del manejo

del inventario. Se espera que esta implementación mejore en un 45 % el manejo del inventario en la empresa.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

**Citlali Villamil:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, visualización. **Salvador Montesinos González:** conceptualización, administración de proyecto, recursos, *software*, visualización, escritura-borrador original, redacción (revisión y edición). **Carlos Vázquez Cid de León:** conceptualización, análisis formal, metodología.

## 6. REFERENCIAS

- Álvarez, Y., & Wilson, J. (2020). Método ABC para mejorar la gestión de los inventarios en la empresa comercializadora Escambray Guantánamo. *Revista Cubana de Finanzas y Precios*, 4(3), 19-28.
- Arellano, O., Quispe, G., Ayaviri, D., & Escobar-Mamani, F. (2017). Estudio de la aplicación del método de costos ABC en las mypes del Ecuador. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19(1), 33-46. <https://doi.org/10.18271/ria.2016.253>
- Bofill, P., Sablón, N., & Florido, R. (2017). Procedimiento para la gestión de inventario en el almacén central de una cadena comercial cubana. *Universidad y Sociedad*, 9(1). <http://ref.scielo.org/grd2jq>
- Castro, J., & Salas, C. (2022). La gestión de las mercancías desde una perspectiva de los inventarios en prendas de vestir. *Revista Científica Ecociencia*, 9(2), 77-98. <https://doi.org/10.21855/ecociencia.92.650>
- Corella, L., & Olea, J. (2023). Desarrollo de un sistema de control de inventario para una empresa comercializadora de sistemas de riego. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 24(1). <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.1.006>
- Coronel, S., Gavidia, L., & Oblitas, R. (2021). Propuesta de sistema de control basado en método ABC para determinar el *stock* de mercaderías en Kalito Distribuciones, Jaén 2021. *Ciencia Latina. Revista Científica Multidisciplinar*, 5(6), 10575-10591. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v5i6.1098\\_](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.1098_)
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.

- Jara-Cordero, S., Sánchez-Partida, D., & Martínez-Flores, J. (2017). Análisis para la mejora en el manejo de inventarios de una comercializadora. *Revista de Ingeniería Industrial*, 1(1), 1-18. [https://www.ecorfan.org/republicofperu/research\\_journals/Revista\\_de\\_Ingenieria\\_Industrial/vol1num1/Revista\\_de\\_Ingenier%C3%ADa\\_Industrial\\_V1\\_N1\\_1.pdf](https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Industrial/vol1num1/Revista_de_Ingenier%C3%ADa_Industrial_V1_N1_1.pdf)
- Macías, R., León, A., & Limón, C. (2020). Supply chain analysis by ABC classification: The case of a Mexican company. *Revista Academia & Negocios*, 4(2), 83-94. <https://revistas.udec.cl/index.php/ran/article/view/2552>
- Montesinos-González, S. (2022). Mejora continua de un posgrado en México aplicando el QFD. *DYNA*, 89(222), 106-114. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.101794>
- Montesinos González, S., Vázquez Cid de León, C., Maya Espinoza, I., & Gracida Gracida, E. (2020). Mejora continua en una empresa en México: estudio desde el ciclo Deming. *Revista Venezolana de Gerencia*, 25(92), 1863-1883. <https://doi.org/10.37960/rvg.v25i92.34301>
- Ovalles, J., Gisbert, V., & Pérez, A. (2017). Herramientas para el análisis de causa raíz (ACR). *3C Empresas*. <http://dx.doi.org/10.17993/3cemp.2017.especial.1-9>
- Panchi-Mayo, V., Armas-Heredia, I., & Chasi-Solórzano, B. (2017). Los inventarios y el costo de producción en las empresas industriales del Ecuador (Revisión). *ROCA. Revista Científico-Educacional de la Provincia de Granma*, 13(4), 254-264. <https://revistas.udg.co.cu/index.php/roca/article/view/288>
- Rahdar, M., Wang, L., & Hu, G. (2017). A tri-level optimization model for inventory control with uncertain demand and lead time. *International Journal of Production Economics*, 195, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.011>
- Ramos, E., Huacchillo, L., & Portocarrero, Y. (2020). El sistema de costos ABC como estrategia para la toma de decisiones empresarial. *Universidad y Sociedad*, 12(2), 178-183. <http://ref.scielo.org/6ng3zt>
- Rojas, R. (2013). *Guía para realizar investigaciones sociales* (38.ª ed.). Plaza y Valdés.
- Salas-Navarro, K., Miguél-Mejía, H., & Acevedo-Chedid, J. (2017). Metodología de gestión de inventarios para determinar los niveles de integración y colaboración en una cadena de suministro. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25(2). <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000200326>
- Tai, A., Xie, Y., He, W., & Ching, W.-K. (2019). Joint inspection and inventory control deteriorating items with random maximum lifetime. *International Journal of Production Economics*, 207, 144-162. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.03.020>
- Torres, Z., & Navarro, J. (2007). *Conceptos y principios fundamentales de epistemología y de metodología. El método científico*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

- Torres, C., Saleté, M., & Delgado, C. (2017). Costeo de productos en la industria panadera utilizando el método ABC. *Interciencia*, 42(10). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33953313004>
- Veloz, C., & Parada, O. (2017). Métodos para mejorar la eficiencia y la toma de decisiones en la gestión de inventarios. *Ciencia UNEMI*, 10(22), 29-38. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol10iss22.2017pp29-38p>
- Villamil, C. (2024). *Propuesta de mejora para la planeación y control de inventarios en una empresa comercializadora* [Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca]. Repositorio Institucional de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. [http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/14566.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/14566.pdf)
- Zhaolin, L., & Qi, F. (2017). Robust inventory management with stock-out substitution. *International Journal of Production Economics*, 193, 813-826. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.011>



# DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DE APOYO PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE AIDC EN PROCESOS LOGÍSTICOS

MARÍA ALEJANDRA RÍOS CÓRDOVA\*

<https://orcid.org/0000-0001-5788-4589>

Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba

IGOR LOPES-MARTÍNEZ

<https://orcid.org/0000-0002-1249-8833>

Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba

ROXANA ALEMÁN BRAVO

<https://orcid.org/0000-0002-8686-6790>

Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba

Recibido: 28 de mayo del 2024 / Aceptado: 13 de junio del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7063>

**RESUMEN.** En las cadenas de suministro actuales, el uso de las tecnologías de identificación y captura automática de datos (AIDC) permite que la información que fluya sea estandarizada y fiable, así como obtener una serie de ventajas relacionadas con ahorro de tiempo y costos. En Cuba, el uso de estas tecnologías no se encuentra regulado en las leyes nacionales y las empresas, en su mayoría, no las utilizan, se considera que a causa del desconocimiento de su efectividad. En esta investigación se analizan las tecnologías AIDC: específicamente los sistemas de códigos de barras y los sistemas de radiofrecuencia, su funcionamiento y beneficios de su utilización en las cadenas suministro. A partir de la necesidad existente, se diseñó una herramienta basada en un procedimiento

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autora corresponsal

Correos electrónicos en orden de aparición: [mariale.rc2000@gmail.com](mailto:mariale.rc2000@gmail.com); [ilopes@ind.cujae.edu.cu](mailto:ilopes@ind.cujae.edu.cu); [ralemanbravo5@gmail.com](mailto:ralemanbravo5@gmail.com)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

que establece una guía para la selección de tecnologías que se pueden implementar en procesos logísticos. Se emplea la herramienta diseñada para casos de estudio a fin de conocer su aplicación y modo de uso.

PALABRAS CLAVE: identificación automática / códigos de barra / sistemas de identificación por radiofrecuencia / normalización / cadena de suministro

## DESIGN OF A SUPPORT TOOL FOR THE SELECTION OF AIDC TECHNOLOGIES IN LOGISTICS PROCESSES

ABSTRACT. In current supply chains, the use of AIDC technologies allows the information that flows to be standardized and reliable, as well as obtaining a series of advantages related to saving time and costs. In Cuba, the use of these technologies is not regulated by national laws and most companies do not use them, considering ignorance of their effectiveness as the cause. This article analyzes AIDC technologies: specifically, bar code systems and radio frequency systems, their operation and benefits of their use in supply chains. Based on the existing need, a tool was designed based on a procedure that establishes a guide for the selection of technologies to be implemented in logistics processes. The tool designed is used for Case Studies to know its application and mode of use.

KEYWORDS: automatic identification / bar coding / radio frequency identification systems / standardization / supply chain management

## INTRODUCCIÓN

La cadena de suministro comprende los procesos necesarios para la fabricación de un producto; independientemente del número de organizaciones que intervengan, estas forman una gran red única de organizaciones en cuyo interior hay un flujo de información, productos y recursos monetarios (Fontalvo-Herrera et al., 2019). Para una efectiva gestión de la cadena de suministro, la información que se intercambia entre cada uno de los actores debe ser estandarizada y de calidad para poder lograr un mejor entendimiento, facilitar la organización y el análisis de los datos y la trazabilidad (Valdés-Lefebvre et al., 2022). La calidad se atribuye a la toma de decisiones basada en datos confiables, es decir que cumplan con los requisitos establecidos para su uso (Agüero Zardón et al., 2017). Importantes publicaciones técnicas muestran cifras millonarias por las pérdidas económicas de las empresas por este concepto (Vilalta Alonso & Espinosa Álvarez-Buylla, 2010).

Para lograr que la información obtenida sea de calidad, se deben considerar las tecnologías de identificación y captura automática de datos (AIDC, por sus siglas en inglés), esto es, una serie de tecnologías que posibilitan la obtención de información sin entrada de datos manual. Esto se debe a que las cadenas de suministros, por la gran cantidad de transacciones que se generan en ellas, requieren información para la planeación y control de las operaciones de cada uno de los actores y la trazabilidad del producto (Correa Espinal et al., 2010).

Las tecnologías de AIDC tienen un uso ampliamente difundido y su funcionamiento se aborda en numerosas literaturas; incluso, existen normativas internacionales que las respaldan, entre ellas la ISO/IEC 15424:2008, la ISO 17367:2013, la ISO/FDIS 29161:2016 y la ISO/IEC 14443:2018. En el ámbito regulador cubano, si bien existen decretos y resoluciones que rigen la identificación única de los productos a partir de los estándares globales —como el Decreto 29/2020, De la Gestión de Inventarios (GOC-2021-04-02); y la Resolución 167/2020, Regulaciones para la Gestión de los Inventarios de las Entidades de la Economía que participan en el Comercio Interno (GOC-2021-05-02)—, no se propone el uso de tecnologías de AIDC. Sin embargo, aunque su uso no es exigido, la competitividad de las empresas y la satisfacción de los clientes se ve elevada al implementarlas.

En Cuba, la mayoría de las empresas no utilizan las tecnologías de AIDC en las operaciones logísticas, lo que es una debilidad del sistema logístico cubano (Lopes-Martínez et al., 2018a, 2018b; Lopes-Martínez et al., 2019; Rodríguez-Rius et al., 2021; Valdés-Lefebvre et al., 2022). Así lo demuestra un estudio precedente realizado por la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE) a once empresas pertenecientes a un grupo empresarial cubano. Una de las causas que generan esta problemática podría estar relacionada con el desconocimiento de cuál es la tecnología efectiva.

En este estudio, en las once empresas pertenecientes al grupo empresarial analizado, se observaron los diferentes procesos y se realizó una encuesta que buscaba comprobar, entre otros aspectos, la utilización de sistemas de identificación automática de los códigos de la entidad en los procesos logísticos de almacenaje y transporte. Finalmente, se concluyó que ninguna usa tecnologías de AIDC, específicamente lectores de códigos de barras o RFID, para estos procesos, sino que son exclusivamente empleados en las entidades comerciales en el punto de contacto con el cliente.

En las cadenas de suministro, son muchos los usos de las herramientas de identificación automática: permiten cerrar brechas, ahorrar costos, prevenir pérdidas, tener una trazabilidad en tiempo real y una mayor confiabilidad de cantidades y características del producto que se produce, almacena y transporta (Baquero Vanegas, 2019). Los procesos logísticos en los que pueden observarse mayores beneficios mediante la aplicación de las tecnologías de AIDC son aprovisionamiento, gestión de almacenes, producción, distribución y cliente, así como la logística inversa para el caso específico de los sistemas RFID (Correa Espinal et al., 2010).

Lo anteriormente expuesto evidencia la necesidad de la implementación de tecnologías de AIDC para un mejor funcionamiento de la cadena de suministro en Cuba; el tipo de herramienta que se utilice depende en gran medida del sector, así como de las características de la empresa y los impactos que se pretendan generar. Por esta razón, el objetivo que se persigue es el diseño de una herramienta que facilite la selección de estas tecnologías una vez conocidos los beneficios que se pueden obtener. El no uso de los estándares de codificación por los actores de la cadena limita considerablemente la implementación de las tecnologías de Auto-ID (Lopes-Martínez et al., 2018a), debido a que la base de su uso es que el pilar "identificar" se encuentre resuelto; el uso de la herramienta se ve restringido a aquellas empresas que al menos tengan identificado este pilar.

Las cadenas de suministro han evolucionado y se han vuelto más seguras y eficientes gracias a las tecnologías de la informática y las comunicaciones (Rodríguez-Rius et al., 2021), lo que, en los procesos logísticos cubanos, debe convertirse en una meta en el corto plazo. Una de las causas de su poca o nula utilización es el desconocimiento de las ventajas que se pueden obtener y del procedimiento para su elección según las características del escenario de uso. Por tanto, esta investigación tiene como objetivo diseñar una herramienta de apoyo a la selección de tecnologías de AIDC en los procesos logísticos

## **METODOLOGÍA**

La investigación fue de tipo aplicado con un enfoque cuantitativo para cumplimentar el objetivo propuesto. Se utilizó un enfoque de investigación y desarrollo (I+D) que involucró etapas iterativas de diseño, implementación y evaluación de la herramienta.

El alcance del estudio se centró en la caracterización de la situación internacional y nacional con respecto a los estándares GS1 y al uso de tecnologías de AIDC, a partir del análisis documental físico y electrónico de artículos científicos, resoluciones y normas vigentes internacionalmente y en Cuba, así como en el diseño, desarrollo y validación de la herramienta con macros de Excel y su comparación con otras herramientas existentes en el mercado. Además, se analizaron propuestas publicadas en sitios web de entidades internacionales relacionadas con la fabricación y comercialización de tecnologías de AIDC.

Para llevar a cabo el diseño de la herramienta se implementa la siguiente metodología:

1. Colectar y procesar información sobre el funcionamiento técnico de las tecnologías de AIDC estudiadas: sistemas de códigos de barras unidimensionales, bidimensionales y sistemas RFID, mediante el análisis bibliográfico.
2. Definir los criterios comunes para la elección de tecnologías de AIDC a partir del análisis de propuestas publicadas en sitios web de entidades internacionales relacionadas con la fabricación y comercialización de estas tecnologías.
3. Diseñar y desarrollar la herramienta de apoyo a la selección de tecnologías de AIDC en los procesos logísticos a partir de los criterios definidos, mediante el uso de la herramienta Microsoft Excel con una interfaz de usuario que permita ingresar sus requisitos.
4. Validar y evaluar la herramienta diseñada; se somete a estudios de usabilidad para evaluar su efectividad y utilidad en la selección de tecnologías de AIDC.

Entre los métodos empleados durante la investigación, se destacan la observación directa, las entrevistas a especialistas, el estudio de artículos de revistas de impacto en la materia abordada, así como el uso de Microsoft Excel y Microsoft Visio.

### **Sistema de estándares GS1**

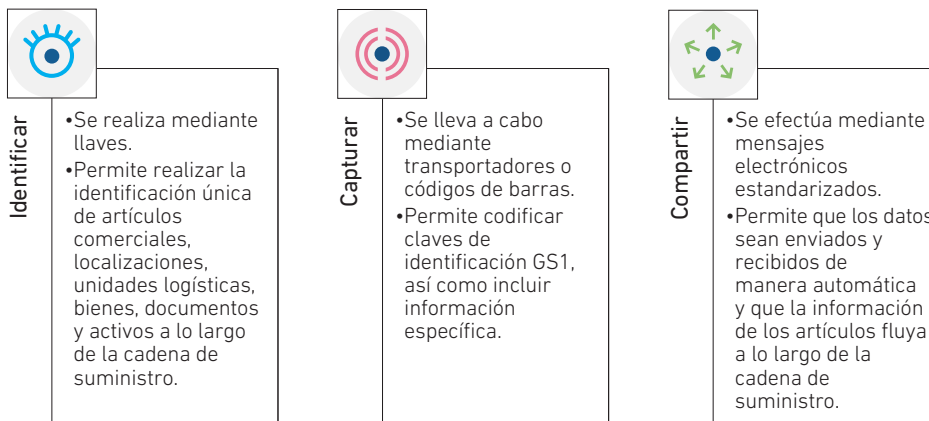
El sistema Global Standards One (GS1) es un conjunto de estándares que permite la administración eficiente de las cadenas de abastecimiento multisectorial y mundial mediante la identificación inequívoca de productos, unidades de embarque, bienes, localizaciones y servicios (GS1 Colombia, 2018).

Los estándares GS1 son el lenguaje común para identificar, capturar y compartir los datos a lo largo de la cadena de suministro, asegurando que la información importante sea accesible, precisa y fácil de entender (GS1 Spain, s. f.). Como constituyen una forma estandarizada, posibilitan un mayor entendimiento y mejora significativa de la eficiencia y competitividad de los diferentes procesos en los sectores industriales que los utilizan.

Los estándares GS1 pueden dividirse en tres pilares cuyas características y funciones se muestran en la Figura 1.

**Figura 1**

*Funciones de los estándares GS1*



*Nota.* Adaptado de *Estándares GS1 SPAIN*, por GS1 Spain, s. f. (<https://www.gs1es.org/estandares-gs1/>).

En el presente trabajo se abordan los estándares de captura que proporcionan los medios para obtener los datos que se transportan directamente en objetos físicos, uniendo el mundo físico y el mundo de la información electrónica (Valdés-Lefebvre et al., 2022), mediante códigos de barras unidimensionales y bidimensionales o etiquetas EPC de identificación por radiofrecuencia (RFID). La captura es necesaria, pues permite a las organizaciones centrarse en cómo utilizar la información, y no en cómo obtenerla.

La captura automática de datos ha logrado la utilización más eficiente de los recursos, disminuyendo el error humano en el control de la mercadería, el tiempo prolongado en el conteo de inventarios y las confusiones en los pedidos, de tal manera que el personal asignado solo se dedica al control e inspección para evitar robos y pérdidas materiales (Mejía Gomez et al., 2013). Además, posibilitan el incremento de la eficiencia operacional, ya que el registro y el procesamiento de información son más rápidos y eficaces, logrando seguir el producto por su paso a través de la cadena de suministro (León-Duarte et al., 2020); y al realizarse la captura automática, existe una mayor exactitud en la información obtenida. Todas estas ventajas contribuyen a generar menores costos operativos que se ven directamente reflejados como ahorro en las empresas (Casaretto Inga, 2020).

Las tecnologías que permiten la implementación de los sistemas basados en los estándares GS1 son las de identificación automática de los datos de los productos [Auto-ID] (Lopes-Martínez et al., 2018a); también conocidas como tecnologías de AIDC,

a su vez posibilitan decodificar la información incluida en las etiquetas que contienen la identificación de los artículos. Entre las tecnologías de AIDC, se pueden mencionar las de código de barras y radiofrecuencia, que contribuyen a que los flujos de información en la gestión de la cadena de suministro se realicen de manera eficiente (Correa Espinal et al., 2010). Por esta razón, la presente investigación se centra en los estándares de captura y los medios para capturar la información, por lo que se procede a explicar el funcionamiento de estas tecnologías, así como los beneficios que pueden generar en la cadena de suministro.

### Métodos de captura: explicaciones tecnológicas

#### *Sistema de código de barras*

El código de barras es una herramienta que sirve para capturar información de forma automática. Permite identificar productos, servicios, localizaciones y activos de manera única a nivel mundial (GS1 Colombia, 2010).

Para el funcionamiento de un sistema de código de barras, se necesita una serie de componentes, los cuales se muestran en la Figura 2. Como elemento inicial, es necesario tener la etiqueta con el código que se haya determinado para el artículo en cuestión; se la imprime utilizando impresoras específicas, y se la adhiere a los objetos que se va a identificar o, en ocasiones, se la incluye en el envase o embalaje del producto. Posteriormente, cuando se requiere conocer la información contenida, se lee la etiqueta con el lector: su láser empieza a leer el código de barras en un espacio blanco, continúa pasando hasta la última línea y termina en el espacio blanco siguiente, lo cual activa el sistema de información, recupera y registra la información relacionada.

**Figura 2**








*Componentes del sistema de código de barras*



*Nota.* Adaptado de *Planeación de un sistema de identificación por radiofrecuencia en un centro de distribución* (p. 4), por M. H. Martínez Garay, 2017, Repositorio Institucional de la Universidad Militar Nueva Granada.

Los códigos de barras pueden ser clasificados en unidimensionales y bidimensionales. Los unidimensionales son una representación visual de los códigos GTIN (Valdés-Lefebre et al., 2022), para el caso de la utilización de los estándares GS1. Por otra parte, los códigos bidimensionales constituyen una evolución de los anteriores y contienen una mayor cantidad de información almacenada en un espacio más reducido. La Tabla 1 muestra la estructura de los códigos clasificados en unidimensionales y bidimensionales de acuerdo con los estándares GS1.

**Tabla 1**  
*Estructuras de identificadores GS1*

Códigos unidimensionales	Códigos bidimensionales
<p>EAN/UPC</p> 	<p>GS1 DataMatrix</p> 
<p>GS1-128</p> 	<p>GS1 QR Code</p> 
<p>ITF-14</p> 	<p>GS1 Composite Barcode</p> 
<p>GS1 DataBar</p> 	

*Nota.* Adaptado de *Estándares GS1 para código de barras y código electrónico de producto (EPC)*, por GS1 Uruguay, s. f. (<https://gs1uy.org/que-hacemos/estandares-gs1/>).



## RFID

La tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) es una tecnología de comunicación inalámbrica que facilita la identificación automática y captura de datos sin la necesidad de intervención humana (Gupta et al., 2015). Se utiliza para la captura y rastreo de datos sobre un determinado producto a través de ondas de radiofrecuencia. Esta tecnología permite identificar de manera única productos de una misma familia, de modo que estos se encontrarán diferenciados en cualquier punto de la cadena de suministro.

El modo de funcionamiento de los sistemas RFID, como se puede observar en la Figura 3, tiene lugar a través de una etiqueta que contiene los datos de identificación del objeto al que se encuentra adherida; esta genera una señal de radiofrecuencia captada por la antena y, a su vez, interpretada por el transpondedor lector. La señal es enviada a la computadora en código binario, y una base de datos que contiene la información de los diferentes productos es la encargada de presentar el contenido al usuario final (Medranda, 2016). Las ondas en el sistema RFID son electromagnéticas, y la energía radiada por estas ondas se denomina *radiación electromagnética*, que se compone por longitud de onda, amplitud, velocidad y frecuencia.

**Figura 3**

*Funcionamiento de un sistema RFID*



*Nota.* De *Identificación RFID*, por Baroig, s. f. (<https://baroig.com/impresion-etiquetado/sistema-rfid-etiquetas-identificacion-activos/>).

La tecnología *near field communication* (NFC), al igual que la RFID, utiliza las ondas electromagnéticas entre dos antenas de espira a una frecuencia específica para transmitir información a corta distancia. La información es almacenada en etiquetas y transmitida a

los lectores dentro de un cierto rango físico (Giese et al., 2019). Es una tecnología basada en comunicaciones de muy corta distancia (no más de 10 cm) que, con los protocolos de seguridad adecuados, permite que unos dispositivos se autentiquen frente a otros y se puedan validar transacciones (Andrés García & Okazaki, 2012); se utiliza en los teléfonos móviles y en las tarjetas de crédito para pagar sin contacto (Khalil et al., 2020).

Las tecnologías de AIDC analizadas coinciden en su uso para la colecta de información de diferentes elementos sin la necesidad de entrada de datos de forma manual; estudios han demostrado que, con información recopilada manualmente, el porcentaje de errores que ingresan durante la captura de datos es de 300 caracteres. Sin embargo, con la captura automática de información, los usuarios pueden esperar una tasa de error de menos de 1 carácter en 1 millón (Acosta, 2015). En cuanto a los aspectos técnicos, existen algunos atributos que difieren entre las tecnologías. Lotlikar et al. (2013) realizan una comparación entre las tecnologías de códigos de barras, códigos QR y RFID, a la que se pueden adicionar atributos: tasa de lectura, seguridad (León-Duarte et al., 2020) y durabilidad (Medranda, 2016), lo que se sintetiza en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Comparación entre código de barras unidimensional, código de barras bidimensional y RFID*

Atributo	Código 1D	Código 2D	RFID
Línea visual	Requerida	Requerida	No requerida
Orientación dependiente	Sí	No	No
Rango de lectura	Corta distancia	Generalmente 10 veces la diagonal del código (Valdés-Lefebvre et al., 2022)	Pasivas: decenas de metros Activas: de 10 a 100 metros generalmente (Medranda, 2016)
Identificación	Un tipo de producto	Cualquier artículo de manera única	Cada producto de manera individual
Lectura/escritura	Solo lectura	Solo lectura	Lectura y escritura
Tasa de lectura	Una etiqueta a la vez	Una etiqueta a la vez	Varias etiquetas a la vez
Actualización	No modificable	No modificable	Pueden reescribirse
Automatización	Mayormente, requiere humanos para operar	Necesita de los humanos para operar	No requiere de intervención humana
Capacidad de datos	Hasta 24 caracteres (León-Duarte et al., 2020)	Superior a 7089 caracteres	De 100 a 1000 caracteres
Capacidad de información	Muy baja	Baja	Mayor que Código 1D y Código 2D
Durabilidad de las etiquetas	Corta	Corta, cierto grado de degradación	Larga, limitada por la unión entre la antena y el chip

*(continúa)*

(continuación)

Atributo	Código 1D	Código 2D	RFID
Confiabilidad	Etiquetas dañadas, manchadas y arrugadas no funcionan	Mecanismo de corrección de errores	Tasa de lectura casi perfecta
Seguridad	Información fácilmente reproducida	Información fácilmente reproducida	La información puede ser encriptada y borrada

*Nota.* Adaptado de "Comparative study of Barcode, QR-code and RFID System", por T. Lotlikar, R. Kankapurkar, A. Parekar y A. Mohite, 2013, *System. International Journal of Computer Technology and Applications*, 4(5), p. 821 (<https://studylib.net/doc/18917112/comparative-study-of-barcode--qr>).

A pesar de que los sistemas RFID presentan mayores prestaciones, los sistemas de códigos de barras son los más utilizados en el mundo, debido a su bajo costo en comparación con otras herramientas de identificación automática. Además, los sistemas de códigos de barras presentan una gran madurez operacional, facilidad y confiabilidad de uso, ya que tienen una presencia más prolongada en el mercado internacional.

## RESULTADOS

Las tecnologías descritas con anterioridad —código de barras unidimensionales y bidimensionales, y RFID— tienen como propósito común brindar trazabilidad a un producto o proceso, y como se ha expuesto, su utilización conlleva una serie de beneficios para la cadena de suministro. Sin embargo, la elección de una tecnología u otra depende de una serie de factores propios de la empresa que las implemente, así como de las características técnicas propias de dichas tecnologías. La selección va más allá del tipo de código que se desea escanear; incluye también una serie de criterios para que la decisión sea la más acertada. A partir de una recopilación y análisis realizados en sitios oficiales de fabricantes de herramientas de AIDC y artículos de revistas de impacto en la materia abordada, se determinaron los criterios más frecuentes, los cuales se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Criterios definidos para el diseño de la herramienta*

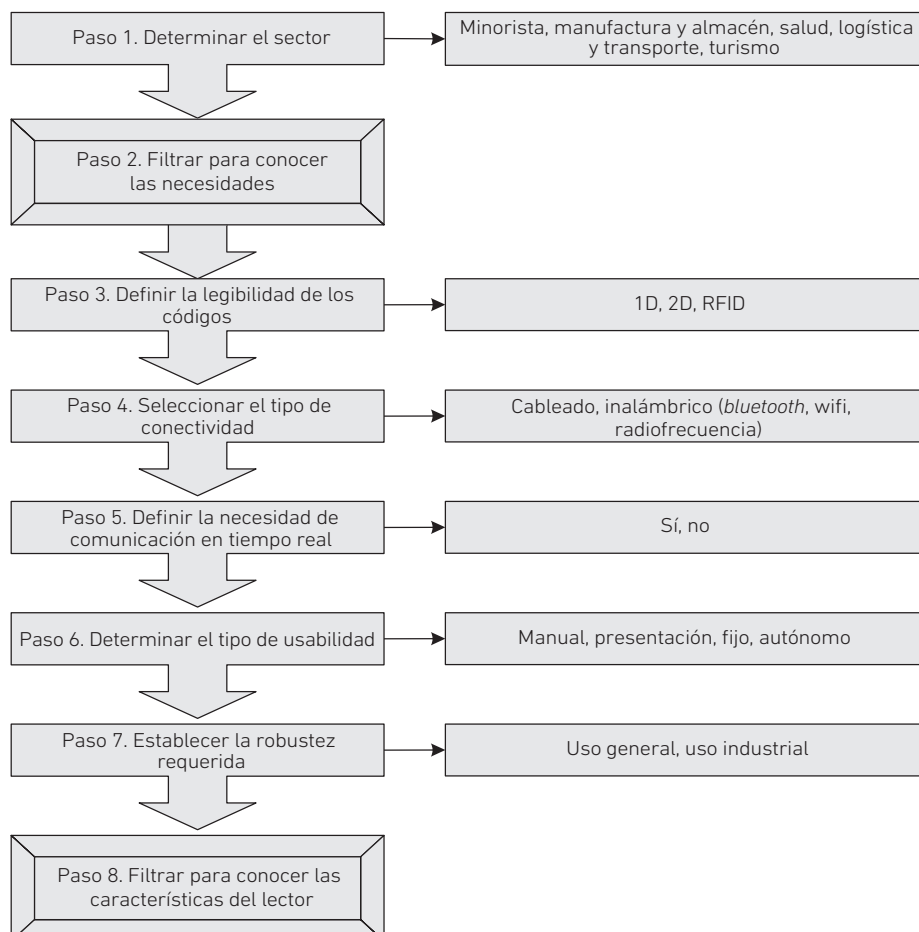
N.º	Criterio	Referencia
1	Sector	Datalogic (s. f.), Zebra Technologies (s. f.-a)
2	Legibilidad	Zebra Technologies (s. f.a), Honeywell (s. f.), Microscan (2015), GS1 Canada (2018), Alli (2021)
3	Conectividad	Zebra Technologies (s. f.-a), Honeywell, (s. f.), Garg (2012), Microscan (2015), GS1 Canada (2018), Alli (2021)
4	Comunicación en tiempo real	Garg (2012), GS1 Canada (2018), Alli (2021)
5	Usabilidad	Datalogic (s. f.), Zebra Technologies (s. f.-a), Honeywell (s. f.), Garg (2012), GS1 Canada (2018), Alli (2021)
6	Robustez	Zebra Technologies (s. f.-a), Garg (2012), GS1 Canada (2018), Alli (2021)

A partir de estos criterios, se diseña una herramienta de apoyo a la selección de tecnologías de Auto-ID en los procesos logísticos, en Microsoft Excel mediante el uso de macros. La función de la herramienta es filtrar, a partir de los atributos introducidos por el usuario mediante listas desplegables con opciones predeterminadas, el contenido existente en la base de datos y mostrar las características principales de la tecnología de AIDC que se va a implementar.

En la Figura 4, se definen los pasos sobre la base de los criterios previamente establecidos y los atributos que se deben tener en cuenta cuando se requiera implementar un lector de código de barras o RFID, y que constituyen la base de la herramienta.

**Figura 4**

*Pasos para la selección de una tecnología de captura automática de datos*



La entidad que va a implementar las tecnologías debe realizar un análisis detallado para determinar qué equipo de AIDC es más eficiente para sus procesos logísticos y para apoyar las actividades de cada proceso (GS1 Canada, 2018).

A continuación, se explican de forma detallada los pasos que conforman el procedimiento propuesto en la Figura 4.

- *Paso 1. Determinar el sector.* El usuario debe definir el sector en el que se implementará la tecnología. Existen numerosos tipos de lectores con características específicas para múltiples funciones; por esta razón, su utilización en los diferentes sectores permite generar beneficios de acuerdo con sus necesidades.
- *Paso 2. Filtrar para, a partir del sector, conocer las aplicaciones.* El usuario debe pulsar el botón de filtrar y la herramienta mostrará las necesidades/aplicaciones de acuerdo con el sector seleccionado.
- *Paso 3. Definir la legibilidad de los códigos.* El usuario define qué tipo de códigos utiliza la empresa en cuestión. Actualmente, existen códigos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y códigos basados en identificación por radiofrecuencia (RFID); todos los lectores se encuentran equipados para realizar la lectura de códigos 1D, pero no ocurre lo mismo para los códigos 2D, que requieren tecnologías basadas en el uso de cámaras; o para los RFID, que deben operar con radiofrecuencia. Los lectores pueden leer varios tipos de códigos en las categorías 1D, 2D y RFID. En el caso de las empresas que utilicen códigos no convencionales, se deben consultar las fichas técnicas de los lectores que se van a implementar para definir su compatibilidad.
- *Paso 4. Seleccionar el tipo de conectividad.* El usuario selecciona el tipo de conectividad del lector; las tecnologías pueden ser cableadas, que por lo general utilizan conexión USB, o inalámbricas, que pueden ser a través de *bluetooth*, wifi o radiofrecuencia. En los dispositivos que utilizan conexión con cable, el movimiento se ve limitado para efectuar la lectura de un código, por lo que, si es necesario desplazarse a distancias mayores a las que pueda permitir el cable, se recomienda el uso de herramientas inalámbricas para la transmisión de datos. Aquellos dispositivos inalámbricos equipados con tecnología *bluetooth* pueden moverse de 10 hasta 100 metros sin obstáculos intermedios en línea con la base receptora; y en el caso de la tecnología wifi, será necesario equipar el área con una red wifi y varios escáneres se podrán conectar a la misma antena. También existen lectores que se comunican a través de radio conectados a una base o, en algunos casos, a una antena que ejerce de receptor y con un funcionamiento similar al *bluetooth*.

- *Paso 5. Definir la necesidad de comunicación en tiempo real.* El usuario debe definir si es necesario que la información sea recibida o no en tiempo real por el equipo servidor que almacena y procesa la información, pues existen lectores que disponen de una memoria interna, lo que no permite que los datos capturados se transmitan al momento; una comunicación en tiempo real puede ser garantizada con escáneres cableados, por comunicación *bluetooth* y por wifi.
- *Paso 6. Determinar el tipo de usabilidad.* El usuario determina si el lector se debe clasificar como manual, de presentación, fijo o autónomo. La elección debe realizarse en correspondencia con las necesidades del usuario y que aporten comodidad de manejo. Los dispositivos manuales son los más ampliamente difundidos por su sencillez de empleo; deben ser ergonómicos y livianos para la comodidad de los operarios; funcionan a través de un mecanismo activado cuando se coloca frente a este un código de barras y, en ocasiones, al apretar un botón. Los lectores de presentación están diseñados para colocarse sobre una encimera, un mostrador o un soporte fijo, y no requieren ser sujetados por un operario para utilizarlos; además, tienen amplias áreas de lectura para reducir la necesidad de apuntar (Logiscenter, s. f.); es necesario considerar el tamaño que ocupará este dispositivo. Los escáneres fijos son los formatos más especializados porque deben integrarse en un sistema automatizado más grande; están desarrollados para montarse en una línea transportadora, siempre encendidos o activados mediante un sensor o controlador externo cuando los elementos pasen por delante. Finalmente, los lectores autónomos brindan más funcionalidades que las de un simple escáner, pues posee también las funcionalidades de una computadora; permiten tener una total libertad de movimiento necesaria en determinados procesos.
- *Paso 7. Establecer la robustez requerida.* El usuario establece el ambiente donde se utilizará el lector, general o industrial, pues de acuerdo con esto debe ser un lector más o menos robusto. En este sentido, es necesario comprobar el nivel de protección internacional (IP, por sus siglas en inglés), respaldado por la norma internacional IEC 60529, en la cual a cada dispositivo se le asignan dos dígitos en dependencia del grado de resistencia con que haya sido equipado; el primer dígito hace referencia a la protección contra la penetración de objetos sólidos, que va desde el 0 hasta el 6; y el segundo dígito, a la protección contra la penetración de líquidos, que va desde el 0 hasta el 8. Además, se debe considerar el riesgo y frecuencia de caídas accidentales del aparato y elegir un modelo lo suficientemente robusto. También se debe considerar su uso en interiores y/o exteriores, exposición a frío o calor extremo, sujeto a productos químicos corrosivos/agresivos (Alli, 2021).

- **Paso 8. Filtrar para conocer las características del lector.** El usuario pulsa el botón de filtrar para conocer las características técnicas que debe presentar el lector que va a implementar.

Para utilizar la herramienta diseñada, las empresas cubanas deben trabajar en el reconocimiento de la necesidad de utilización de las tecnologías de AIDC y conocer los estándares de identificación necesarios en caso de no estar implementados. La implementación de las tecnologías de Auto-ID puede representar altos costos, por lo que es necesario analizar y evaluar los costos y beneficios, no solo desde la perspectiva económica, sino también social, teniendo como base el hecho de que la implementación de este sistema en la cadena aumentará su eficacia y disminuirá los riesgos y brechas de seguridad (Rodríguez-Rius et al., 2021).

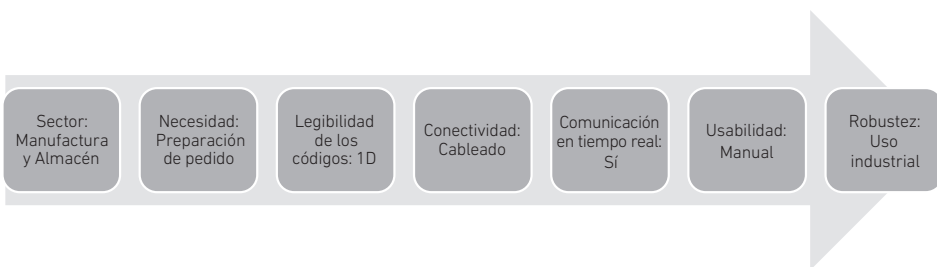
### Casos de estudio

En primer lugar, se presenta lo obtenido en el caso de estudio: Empresa A del sector manufacturero. Se realizó un análisis de la situación de la empresa con respecto al empleo de herramientas de AIDC en los procesos llevados a cabo en el almacén de productos terminados: preparación de pedidos, embalaje y despacho. Los productos terminados en estuches primarios que se almacenan cuentan con etiquetas con códigos unidimensionales; el pilar de identificación no es utilizado en ningún otro nivel de embalaje: caja o paleta, sino que se emplean etiquetas humanamente legibles, que no garantizan la identificación única, por lo que no se aprovechan las ventajas que ofrecen los códigos de barras. Para un correcto funcionamiento de las tecnologías de AIDC, es necesaria la implementación de los estándares en cada nivel de empaque, lo cual no constituye un objetivo de la presente investigación.

Al emplear la herramienta para la selección de la tecnología de AIDC más efectiva, se tienen en cuenta los atributos que dan respuesta a los criterios establecidos que quedarían para este escenario, específicamente del proceso de *picking* o preparación de pedidos, como muestra la Figura 5.

**Figura 5**

*Escenario de uso de la herramienta en la Empresa A*



Estos atributos se definen a partir de las características propias de la empresa y del proceso analizado. Se selecciona como sector el de manufactura y almacén, debido a que el análisis se realiza en el almacén de productos terminados de la Empresa A. La necesidad es la del proceso de *picking* o preparación de pedidos, por ser uno de los procesos que tienen lugar en este almacén. La fase de acondicionamiento de los pedidos ocurre en un lugar específico del almacén, luego de realizados los recorridos para la recogida de la mercancía. Los códigos empleados por la empresa en los envases primarios para sus diferentes productos son EAN-13, un tipo de código unidimensional; por eso, se buscan lectores de códigos que cumplan con esta funcionalidad exclusivamente. En cuanto a la conectividad, se requiere de un lector de códigos cableado, pues, una vez que los productos estén ubicados en el mismo lugar, se procede al escaneo y, con comunicación en tiempo real, los datos pueden ser registrados en el sistema ERP utilizado por la empresa e ir descontando los artículos que conformarán el pedido. Se define un lector manual para que un operario pueda utilizarlo y escanear cada producto durante el proceso de preparación de pedidos. Respecto a la robustez, se quiere una tecnología de uso industrial por el ambiente en el que será utilizado.

Luego de definidos los atributos, se obtiene, a través de la herramienta, que será necesario utilizar un lector de códigos de barras cableado y manual resistente, y se procede a buscar una tecnología en el mercado que cumpla con estas características.

Según Markets and Markets (2020), se identifica a Honeywell, Datalogic, Zebra Technologies, Sick AG y Cognex Corporation como las principales empresas en el mercado de las tecnologías de AIDC. Por esta razón, se buscan tecnologías de estas marcas como propuestas de solución al caso de estudio. Las características del lector de códigos que se requiere coinciden con los datos suministrados por las fichas técnicas, lo que puede observarse en la Tabla 4 para el lector A del fabricante Sick AG.

**Tabla 4**

*Ficha técnica del lector A*

Lector D: escáner portátil de mano	
Legibilidad	1D
Tipo de códigos	Codabar, Code 39, Code 32, UPC-A, UPC-E, Standard and Industrial 2 of 5, Interleaved & Matrix 2 of 5, Code 128, UCC/EAN-128, Code 11, Code 93, German ITF Postal Code, Mainland China Postal Code Telepen, MSI/Plessey, UK/Plessey, Limited/Expanded GS1 DataBar, Code 39 Trioptic, IATA, UPC/EAN/JAN
Distancia de lectura	20 mm a 850 mm
Diseño	Variante con conexión de cable
Interfaz de comunicación	Ethernet, PROFINET, EtherCAT®, Serial, PROFIBUS DP, DeviceNet™, USB, PS/2

*(continúa)*



(continuación)

Lector D: escáner portátil de mano	
Aplicación	Industrial
Grado de protección	IP 65
Temperatura de operación	-10 °C a 50 °C

Nota. Adaptado de IDM16x. *Industrial mobile reliability. Mobile handheld scanners*, por Sick, s. f. ([https://cdn.sick.com/media/familyoverview/5/55/255/familyOverview\\_IDM16x\\_g222255\\_en.pdf](https://cdn.sick.com/media/familyoverview/5/55/255/familyOverview_IDM16x_g222255_en.pdf)).

En segundo lugar, se presenta lo obtenido en el caso de estudio: Empresa B del sector manufacturero. Se realizó un análisis de la situación de la empresa con respecto al empleo de herramientas de AIDC en los procesos llevados a cabo en el almacén de materias primas: recepción, control de calidad, seguimiento de productos y selección. La materia prima es recibida de diferentes proveedores, que cuentan con distintas estructuras para la codificación de sus productos. Algunos utilizan códigos estandarizados en los empaques primarios, otros en embalajes primarios y secundarios, y otros no los utilizan. Para un correcto funcionamiento de las tecnologías de AIDC, se necesita la implementación de los estándares en cada nivel de empaque, lo cual no constituye un objetivo de la presente investigación.

Al emplear la herramienta para la selección de la tecnología de AIDC más efectiva, se tienen en cuenta los atributos que dan respuesta a los criterios establecidos que quedarían para este escenario, específicamente del proceso de archivado y selección, como muestra la Figura 6.

### Figura 6

Escenario de uso de la herramienta en la Empresa B



Estos atributos se definen a partir de las características propias de la empresa y del proceso analizado. Se selecciona como sector el de manufactura y almacén, debido a que el análisis se realiza en el almacén de materias primas de la Empresa B; la necesidad es la del proceso de seguimiento de productos, uno de los procesos que tienen lugar en

este almacén. Los códigos de las materias primas que recibe el almacén son EAN-13, GS1 128, GS1 DataMatrix y GS1 QR Code; al utilizar tanto códigos unidimensionales como bidimensionales, se busca lectores de códigos que cumplan con estas funcionalidades de escaneo. En cuanto a la conectividad, se necesita un lector de códigos inalámbrico por las condiciones del almacén estudiado: un espacio grande con 57,8 × 48,72 metros, con cuatro niveles de estanterías, y se requiere que el lector tenga comunicación en tiempo real para que los datos puedan ser registrados en el sistema ERP utilizado por la empresa. Se define un lector manual para que un operario pueda utilizarlo y escanear cada producto durante el proceso de seguimiento de productos. Respecto a la robustez, se demanda una tecnología resistente a caídas por la altura de las estanterías (5 metros), por tanto, un equipo de uso industrial con IP 65 o superior; y no se ha de tener en cuenta la exposición a temperaturas extremas, pues la temperatura que debe tener el almacén es de 15 °C a 25 °C.

Luego de definidos los atributos, se concluye que será necesario utilizar un lector de códigos de barras inalámbrico, manual y resistente (2D), y se procede a buscar una herramienta en el mercado que cumpla con estas características. Estas coinciden con los datos suministrados por las fichas técnicas, lo que puede observarse en la Tabla 5 para el lector B del fabricante Zebra Technologies.

**Tabla 5**

*Ficha técnica del lector B*

Lector H: escáner ultrarresistente	
Legibilidad	1D y 2D
Tipo de Códigos	1D: Code 39, Code 128, Code 93, Codabar/NW7, Code 11, MSI Plessey, UPC/EAN, I 2 of 5, Korean 3 of 5, GS1 DataBar, Base 32 (Italian Pharma) 2D: PDF417, Micro PDF417, Composite Codes, TLC-39, Aztec, DataMatrix, MaxiCode, QR Code, Micro QR, Chinese Sensible (Han Xin), Postal Codes
Diseño	Manual
Robustez	Resistente a caídas de 3 m sobre concreto
Conexión	Inalámbrica
Interfaz de comunicación	Ethernet, PROFINET, EtherCAT®, Serial, PROFIBUS DP, DeviceNet™, USB, PS/2
Aplicación	Industrial
Grado de protección	IP 65
Temperatura de operación	-20 °C a 50 °C

*Nota.* Adaptado de *DS3600-ER Ultra-Rugged Scanner. Unstoppable performance for extended range 1D/2D barcode scanning*, por Zebra Technologies, s. f.-b (<https://www.zebra.com/us/en/products/spec-sheets/scanners/ultra-rugged-scanners/ds36x8-er.html>).

## DISCUSIÓN

El impacto de las tecnologías Auto-ID se evidencia en el tamaño del mercado global de identificación automática y captura de datos, que se valoró en 54 580 millones de dólares en el 2022, y se espera que se expanda a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR, por sus siglas en inglés) del 12 % del 2023 al 2030 (Grand View Research, s. f.).

Para Valdés-Lefebvre et al. (2022), en el contexto de las empresas cubanas, el paso inicial para la utilización de las tecnologías de AIDC consistiría en abordar los problemas de identificación y clasificación, comenzando con la organización y estandarización de la información, y garantizando la implementación de códigos en todos los niveles de embalaje. Una vez logrado esto, se pasaría a seleccionar la tecnología más adecuada para capturar estos datos; a partir de la aplicación de la herramienta diseñada en los diferentes escenarios de uso, se evidencia que el procedimiento propuesto establece una guía que permite que las entidades identifiquen las necesidades de una forma estandarizada, que facilita la selección de propuestas de tecnologías con mayor efectividad en ese proceso.

## CONCLUSIONES

El análisis del estado actual de utilización de las tecnologías de AIDC permite determinar que su implementación se encuentra limitada por la no utilización de los estándares de codificación en el país y por desconocimiento a la hora de seleccionar la tecnología más eficiente. En las normativas cubanas vigentes se define el uso de estándares de identificación, pero los estándares de captura no se mencionan. La comprensión de la necesidad de uso de los estándares de captura constituye la base para la implementación de las tecnologías de AIDC.

Se diseña una herramienta basada en un procedimiento que establece una guía para la selección de tecnologías de AIDC en procesos logísticos, por la complejidad de la decisión, solo teniendo en cuenta las características técnicas y precios. Esta herramienta permite elegir las características de los dispositivos de AIDC que se van a adquirir: sector, legibilidad, conectividad, comunicación en tiempo real, usabilidad y robustez, para que este proceso se realice con mayor efectividad.

La herramienta diseñada se implementó en dos entidades para ayudar en el proceso de identificación de los posibles dispositivos que podrían adquirir, según las necesidades reales de los procesos estudiados. Con el resultado, se buscaron en el mercado tecnologías que dieran respuesta a estas necesidades de acuerdo con las características técnicas definidas por los fabricantes.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

**María Alejandra Ríos Córdova:** escritura-borrador original, redacción-revisión y edición, conceptualización, *data curation*, metodología, investigación, *software*, visualización, validación. **Igor Lopes Martínez:** redacción-revisión y edición, supervisión, conceptualización, validación. **Roxana Alemán Bravo:** redacción-revisión y edición.

## REFERENCIAS

- Acosta, O. (2015). *Metodología para la implementación de un proyecto de automatización y codificación, a partir de un sistema de captura automática y la utilización de códigos de barra en agroindustrias y cadenas de abastecimiento* [Tesis de licenciatura, Universidad de La Sabana]. Repositorio Institucional de la Universidad de La Sabana. <http://hdl.handle.net/10818/15498>
- Agüero Zardón, L., Vilalta Alonso, J. A., Garza Ríos, R., & Urquiola García, I. (2017). Diagnóstico de la calidad de los datos siguiendo el enfoque de la ISO 9001:2015. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 4(2). <https://dilemascontemporaneoseduccionpoliticayvalores.com/index.php/dilemas/article/view/395>
- Alli, S. (2021). Barcoding an automatic identification and data capture system in healthcare settings. *The Pharma Innovation*, 10(1), 187-200. <https://www.thepharmajournal.com/archives/?year=2021&vol=10&issue=1&ArticleId=5508>
- Andrés García, J. C., & Okazaki, S. (2012). El uso de los códigos QR en España. *Distribución y Consumo*, 22(123), 46-62. <http://hdl.handle.net/10486/663503>
- Baquero Vanegas, H. A. (2019). *El aporte que genera la implementación de un sistema de radiofrecuencia (RFID) a la cadena de suministro* [Tesis de licenciatura, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional de la Universidad Militar Nueva Granada. <http://hdl.handle.net/10654/35707>
- Baroig. (s. f.). *Identificación RFID*. <https://baroig.com/impresion-etiquetado/sistema-rfid-etiquetas-identificacion-activos/>
- Casaretto Inga, F. A. (2020). *Implementación de código de barras para la gestión de inventarios en los almacenes de la empresa DD Logistic EIRL* [Tesis de licenciatura, Universidad Inca Garcilaso de la Vega]. Repositorio Institucional de la Universidad Inca Garcilaso de la Vega. <http://repositorio.uigv.edu.pe/handle/20.500.11818/5252>

- Correa Espinal, A., Álvarez López, C. E., & Gómez Montoya, R. A. (2010). Sistemas de identificación por radiofrecuencia, código de barras y su relación con la gestión de la cadena de suministro. *Estudios Gerenciales*, 26(116), 115-141. [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(10\)70126-1](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(10)70126-1)
- Datalogic. (s. f.). *Products: Find your product*. <https://www.datalogic.com/eng/products-hp-16.html>
- Fontalvo-Herrera, T., De-la-Hoz-Granadillo, E., & Mendoza-Mendoza, A. (2019). Los procesos logísticos y la administración de la cadena de suministro. *Saber, Ciencia y Libertad*, 14(2), 102-112. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2019v14n2.5880>
- Garg, N. (2012). Improving business logistics using barcode scanners. *International Journal of Computer Applications*, 50(15). <https://doi.org/10.5120/7844-0815>
- Giese, D., Liu, K., Sun, M., Syed, T., & Zhang, L. (2019). Security analysis of near-field communication(NFC) payments. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.10623>
- Grand View Research. (s. f.). *Automatic identification and data capture market size, share & trends analysis report by component (hardware, software, services), by end-user (retail, BFSI, healthcare), by region, and segment forecasts, 2023-2030*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/automatic-identification-data-capture-market-report>
- GS1 Canada. (2018). *Barcode scanning equipment selection criteria: A guide to choosing appropriate scanning equipment*. [https://www.gs1ca.org/files/aidc\\_-\\_selecting\\_bar\\_code\\_scanning\\_equipment\\_eng.pdf](https://www.gs1ca.org/files/aidc_-_selecting_bar_code_scanning_equipment_eng.pdf)
- GS1 Colombia. (2010). *Guía de calidad sistema GS1. Guía práctica de apoyo - Estudio calidad sistema GS1 2010*. <https://gs1co.org/sites/default/files/libreria/Guía de Calidad Sistema GS1.pdf>
- GS1 Colombia. (2018). *Guía de identificación GS1*. <https://www.colombiaproductiva.com/getattachment/6f51faa7-2053-411b-962d-3f9c7e0ed560/Guia-de-Identificacion-GS1.aspx>
- GS1 Spain. (s. f.). *Estándares GS1 SPAIN*. <https://www.gs1es.org/estandares-gs1/>
- GS1 Uruguay. (s. f.). *Estándares GS1 para código de barras y código electrónico de producto (EPC)*. <https://gs1uy.org/que-hacemos/estandares-gs1/>
- Gupta, G., Kundu, T., & Appanna Codanda, A. (2015). An integrated conceptual framework for RFID enabled healthcare. *Independent Journal of Management & Production*, 6(4), 946-961. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449544332007>

- Honeywell. (s. f.). *Barcode Scanners*. <https://sps.honeywell.com/us/en/products/productivity/barcode-scanners>
- Khalil, G., Doss, R., & Chowdhury, M. (2020). A novel RFID-based anti-counterfeiting scheme for retail environments. *IEEE Access*, 8, 47952-47962. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2979264>
- León-Duarte, J. A., Re-Iñiguez, B. M., & Romero-Dessens, L. F. (2020). Ventajas del uso de sistemas de trazabilidad electrónica en procesos de manufactura. *Información Tecnológica*, 31(1). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100237>
- Logiscenter. (s. f.). *Guía de compra: lectores de código de barras*. <https://blog.logiscenter.com/elegir-el-lector-de-codigo-de-barras-adecuado>
- Lopes-Martínez, I., Paradela-Fournier, L., Rodríguez-Acosta, J., Castillo-Feu, J. L., Gómez-Acosta, M., & Cruz-Ruiz, A. (2018a). Using AUTO-ID technologies in the Cuban drug logistics system to increase its safety and efficiency. *Sistemas & Telemática*, 16(44), 35-48. <https://doi.org/10.18046/syt.v16i44.2727>
- Lopes-Martínez, I., Paradela-Fournier, L., Rodríguez-Acosta, J., Castillo-Feu, J. L., Gómez-Acosta, M. I., & Cruz-Ruiz, A. (2018b). The use of GS1 standards to improve the drugs traceability system in a 3PL Logistic Service Provider. *DYNA*, 85(206), 39-48. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.69616>
- Lopes-Martínez, I., Padilla-Aguiar, D., Paradela-Fournier, L., & Rodríguez-Rivero, G. (2019). Diseño de una metodología para la estandarización de los sistemas de codificación y clasificación de productos en empresas cubanas, 2019. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 15(28). <https://doi.org/10.18270/cuaderlam.v15i28.2682>
- Lotlikar, T., Kankapurkar, R., Parekar, A., & Mohite, A. (2013). Comparative study of Barcode, QR-code and RFID System. *International Journal of Computer Technology and Applications*, 4(5), 817-821. <https://studylib.net/doc/18917112/comparative-study-of-barcode--qr>
- Markets and Markets. (2020). *Automatic identification and data capture market with COVID-19 impact analysis by product (Barcodes, Smart Cards, OCR Systems, RFID Products, and Biometric Systems), offering (hardware, software, and services), vertical, and geography - Global Forecast to 2025*. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/automatic-identification-data-capture-market-194254012.html>
- Martínez Garay, M. H. (2017). *Planeación de un sistema de identificación por radiofrecuencia en un centro de distribución* [Tesis de especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional de la Universidad Militar Nueva Granada. <http://hdl.handle.net/10654/17090>

- Medranda, S. (2016). Tecnología RFID al servicio de la logística. *Reto*, 4(4), 77-90. <https://doi.org/10.23850/23338059.609>
- Mejía Gomez, S., Yepes Simonds, D., & Arango Alzate, B. (2013). Gestión e implementación del RFID en las empresas. *Revista Gestión de las Personas y Tecnología*, 6(17), 49-56. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477847109006>
- Microscan. (2015). *Five things to know before choosing an embedded data acquisition device*. <https://cdn.thomasnet.com/ccp/10025951/209857.pdf>
- Rodríguez-Rius, C., Serrallonga-Trujillo, C., Lopes-Martínez, I., & Núñez-Cabrales, A. (2021). La trazabilidad en el sistema logístico de medicamentos en Cuba y el uso de las tecnologías de autoidentificación. *VacciMonitor*, 30(2), 51-59. <https://vaccimonitor.finlay.edu.cu/index.php/vaccimonitor/article/view/265>
- Sick.(s.f.). *IDM16x.Industrialmobilereliability.Mobilehandheldscanners*. [https://cdn.sick.com/media/familyoverview/5/55/255/familyOverview\\_IDM16x\\_g222255\\_en.pdf](https://cdn.sick.com/media/familyoverview/5/55/255/familyOverview_IDM16x_g222255_en.pdf)
- Valdés-Lefebvre, G., Lopes-Martínez, I., Delgado-Fernández, T., & Herrera-Leyva, Y. (2022). Etiquetado inteligente en la industria farmacéutica cubana. *Ingeniería Industrial*, 43(2), 80-89. <http://ref.scielo.org/vvr4vv>
- Vilalta Alonso, J. A., & Espinosa Álvarez-Buylla, M. (2010). Metodología para el diagnóstico de la calidad de los datos. *Ingeniería Industrial*, 29(2). <https://rii.cujae.edu.cu/index.php/revistaind/article/view/15>
- Zebra Technologies. (s. f.-a). *¿Cuál es el mejor escáner para usted?* [https://connect.zebra.com/scanselector\\_la\\_es](https://connect.zebra.com/scanselector_la_es)
- Zebra Technologies. (s. f.-b). *DS3600-ER Ultra-Rugged Scanner*. <https://www.zebra.com/us/en/products/spec-sheets/scanners/ultra-rugged-scanners/ds36x8-er.html>





# EVALUACIÓN DE UNA POLÍTICA DE INVENTARIO DE SUMINISTROS MÉDICOS DE MAYOR ROTACIÓN EN CENTROS DE SALUD DE TERCER NIVEL UBICADOS EN ZONAS DE ACCESO DIFÍCIL

DANIEL ANDRÉS GUTIÉRREZ YEPES

<https://orcid.org/0009-0008-6556-2043>

Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes,  
Bogotá, Colombia

LUIS TARAZONA-TORRES\*

<https://orcid.org/0000-0003-0567-6926>

Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes,  
Bogotá, Colombia

Recibido: 20 de mayo del 2024 / Aceptado: 8 de julio del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7221>

**RESUMEN.** Este estudio tuvo como objetivo evaluar una política de inventario para suministros médicos de alta rotación en centros de salud de tercer nivel ubicados en zonas de difícil acceso. La investigación fue de tipo aplicado, con un diseño no experimental, alcance descriptivo y enfoque cuantitativo. Se seleccionó como caso de estudio una clínica situada en el municipio de Leticia, una región de Colombia caracterizada por su difícil acceso. Se evaluaron escenarios estocásticos en comparación con el contexto actual de la clínica, aplicando el método estocástico  $(S, T)$ , debido a que cumplía con las características requeridas para el centro de salud en cuestión. Los resultados demostraron que este método optimiza significativamente los costos, principalmente debido a la variación de los parámetros relacionados con la política, como la cantidad económica de pedido, la frecuencia de pedido, el inventario de seguridad y los niveles de satisfacción del servicio proporcionado.

**PALABRAS CLAVE:** control de inventarios / suministros médicos / centros de salud / logística empresarial / demanda estocástica

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [da.gutierrez@uniandes.edu.co](mailto:da.gutierrez@uniandes.edu.co); [le.tarazona@uniandes.edu.co](mailto:le.tarazona@uniandes.edu.co)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## EVALUATION OF INVENTORY POLICIES FOR HIGH-TURNOVER MEDICAL SUPPLIES IN TERTIARY HEALTHCARE CENTERS IN REMOTE AREAS

**ABSTRACT.** This study aimed to evaluate an inventory policy for high-turnover medical supplies in tertiary healthcare centers located in areas with difficult access. The research was applied in nature, featuring a non-experimental design, descriptive scope, and quantitative approach. A clinic in the municipality of Leticia, a region in Colombia known for its challenging access, was selected as the case study. Stochastic scenarios were assessed in comparison with the clinic's current context, utilizing the stochastic (S, T) method as it met the necessary characteristics for the healthcare center. The results concluded that this method significantly optimizes costs, primarily due to variations in policy parameters such as economic order quantity, order frequency, safety stock, and service satisfaction levels.

**KEYWORDS:** inventory control / medical supplies / health centers / business logistics / stochastic demand

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, cuando se habla de asistencia médica, garantizar servicios de calidad y contar con la mayor disponibilidad de recursos posible es indispensable para cualquier entidad prestadora de servicios sanitarios. Por esta razón, la productividad, la optimización de recursos y la reducción de faltantes tienen un papel fundamental en el control de gestión de inventario de suministros médicos. En los últimos años, este tema ha sido abordado por grandes organizaciones internacionales como la Organización Panamericana de la Salud, que ha propuesto una *Guía práctica para la planificación de la gestión del suministro de insumos estratégicos* (2006). En ella, considera factores como análisis de costos, tiempos de entrega, análisis del déficit de demanda, información estadística sobre utilización de suministros e identificación de patrones de consumo. Esta publicación pretende ser una referencia internacional para instituciones de atención médica alrededor del mundo.

Según Caicedo et al. (2022), uno de los principales obstáculos en la logística de abastecimiento es el proceso de entrega, pues en muchos casos no se tiene en cuenta zonas de difícil acceso. Esto genera complicaciones en los tiempos de entrega de los productos, daños y/o pérdidas de estos, lo que provoca malestar en los usuarios y repercute negativamente en las empresas, porque se ven desabastecidas para cubrir la demanda de los clientes.

Los centros de salud no son ajenos a este problema. Al ser uno de los servicios que por derecho se debe cubrir en todas partes del mundo, tienen que estar lo suficientemente abastecidos para satisfacer la demanda de los usuarios según corresponda (Hernández et al., 2022). En Colombia, la situación no es diferente: del total de departamentos del país, nueve presentan zonas de difícil acceso (Decreto 521, 2010, artículo 8), por lo que los centros de salud de estos lugares enfrentan el reto de obtener los suministros médicos requeridos a tiempo para abordar múltiples procedimientos, consultas y complejas operaciones, las cuales dependen completamente de que los suministros estén disponibles (Ruíz et al., 2024).

Estos centros de salud ubicados en zonas de acceso difícil no cuentan con políticas de inventarios robustas. En consecuencia, tienen problemas en cuanto a desinformación de déficit de *stock* de suministros y la frecuencia adecuada para hacer una orden de pedido de estos, lo que genera gastos innecesarios y tiempos de demora altos. Al tratarse de una organización que presta servicios de salud, es de vital importancia obtener estos suministros médicos a tiempo, por lo que la implementación de políticas de inventarios cuyo objetivo sea integrar pronósticos precisos, considerando los retos geográficos y económicos a los que se pueden enfrentar dichas instituciones, es imperativo para el éxito de la red de salud.

De acuerdo con la Resolución 1442 (2013), un centro de salud de tercer nivel es aquel que se encarga de realizar prestaciones médico-quirúrgicas de alta complejidad con disponibilidad de subespecialidades y uso de equipos que permiten ejecutar procedimientos de alto riesgo; se caracterizan por su dependencia en cuanto a los suministros médicos relacionados con estas actividades. Para conseguir estos suministros, las clínicas deben tener alianzas estratégicas con proveedores dentro y fuera del país con el fin de cumplir sus requerimientos, además de contar con políticas de inventario debidamente estructuradas (Snowdon et al., 2021).

El centro de salud objeto de estudio es una clínica de tercer nivel de complejidad ubicada en el municipio de Leticia, en el departamento de Amazonas, una zona de acceso difícil de Colombia. En esta clínica, la administración de inventarios se hace mediante hojas de cálculo donde se registran todos los movimientos del inventario. Este método no ayuda a que la administración de la clínica pueda tomar decisiones más acertadas sobre la cantidad de pedido que debería realizar a fin de minimizar costos, definir cuándo debería realizar el pedido, o si debería considerar mantener suministros de reserva (*stock* de seguridad) ante una demora en la entrega de los suministros por estar en zona de acceso difícil, entre otros.

En este contexto, la aplicación de políticas de gestión de inventario estocásticas, como los modelos de revisión continua  $Q, R$ , y el modelo de revisión periódica  $S, T$ , se presentan como posibles soluciones factibles. Estos modelos de inventarios buscan generar pronósticos optimizados para datos con demanda cierta o incierta. De esta forma, se busca llegar a un inventario de seguridad apto para cubrir los cambios inesperados en la demanda de la clínica, con el fin de minimizar los costos totales involucrados en la política de inventario. Por otro lado, se encontrará una cantidad económica de pedido, la frecuencia con la que esta se pedirá durante el año para disminuir los costos de requerimiento, de mantener el inventario, de la compra de suministros médicos y por faltantes (Nahmias, 2007).

Teniendo en cuenta la problemática, es importante que las organizaciones en el ámbito de la salud tengan como prioridad implementar políticas de gestión de inventarios estructuradas con el fin de satisfacer la demanda de la población, al igual que minimizar sus costos. Reducir estos costos les permitirá maximizar su presupuesto operacional, así como poder cubrir más demanda.

Partiendo de las necesidades específicas de la clínica, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo evaluar una política de inventario de los suministros médicos con mayor rotación en centros de salud de tercer nivel ubicados en zonas de acceso difícil? Para responder a esta pregunta, se plantea el siguiente objetivo general para la investigación: evaluar una política de inventario del suministro médico con mayor rotación en centros de salud de tercer nivel ubicados en zonas de acceso

difícil. Partiendo de este objetivo y considerando la clínica caso de estudio, surgieron los siguientes objetivos específicos de la investigación: (1) realizar un diagnóstico sobre el manejo actual de los inventarios de los suministros médicos con mayor rotación; (2) determinar el comportamiento de la demanda de cada suministro médico, a fin de identificar el de mayor rotación de inventario; (3) efectuar un análisis de costos, nivel de inventario deseado, inventario de seguridad y valor esperado de faltantes de la política de inventarios evaluada para el suministro médico de mayor rotación.

Se realizó una revisión de literatura para un mejor entendimiento de cómo se abordó el problema de estudio en los últimos años. La Tabla 1 muestra el resumen de esta revisión de literatura correspondiente a políticas de inventarios, organizada por autor y categorizada en función de varios aspectos clave: el tipo de demanda, estocástica y determinística; y parámetros como la cantidad económica de pedido ( $Q$ ), el tiempo de ciclo de pedido ( $T$ ), la cantidad de faltantes ( $n(S)$ ), la probabilidad de no faltantes ( $\alpha$ ), la probabilidad de cubrir la demanda con las existencias ( $\beta$ ), el nivel de inventario máximo ( $S$ ) y el *stock* de seguridad ( $SS$ ), además de si se consideró una evaluación de costos.

En la lista de investigaciones mostradas, considerando el tipo de demanda, se visualiza que han sido más desarrolladas las políticas de inventario para demandas estocásticas. Este es el caso del estudio realizado por Srivastava et al. (2023), que planteó un conjunto de políticas de inventarios de importancia en diferentes contextos empresariales con demanda estocástica; al igual que Triana (2022), Chen et al. (2022) y Rehman et al. (2023), que toman como referencia los trabajos sobre gestión de inventarios en sectores específicos como el hospitalario y el textil. Estos estudios tratan políticas de gestión de inventarios y hacen un análisis detallado de los costos de las empresas, buscando optimizar las cantidades y el tiempo de pedido. En comparación, el presente artículo también analiza variables como el inventario de seguridad promedio, el número de faltantes, la probabilidad de no tener faltantes y la probabilidad de cubrir la demanda con las existencias. Se toman como base los ejemplos correspondientes a los estudios de Assiddiqi et al. (2022) y Baek (2024) sobre políticas de demanda estocástica aplicadas a cadenas de suministro con referencias precederas, en donde se busca la reducción del número de faltantes.

Por otro lado, Aguilar (2023) aplica una metodología  $S, T$  para demanda estocástica, y trata el nivel de inventario y el inventario de seguridad, al igual que la cantidad óptima de pedido, con el fin de minimizar costos. Además, discute cómo la mejora de decisiones clave en el ámbito organizacional es vital para satisfacer las necesidades de demanda de los clientes; sin embargo, su análisis se limita a determinar los parámetros de  $Q$  y  $T$ , mientras que la presente investigación está considerando todos los parámetros mencionados en la Tabla 1. Teniendo en cuenta las estructuras matemáticas tomadas de Nahmias (2007), se aplica la metodología relacionada con los modelos estocásticos y

se concluye cuáles son los posibles mejores métodos de gestión de inventario, como el modelo  $S, T$  y el modelo  $Q, R$ . Por su parte, Chang et al. (2024) realizaron una viabilidad de los métodos estocásticos para abordar situaciones de demanda variable y transitoria en el tiempo, lo que se relaciona con los fines de la presente investigación. Blancas-Rivera et al. (2023) ajustan una política de gestión de inventarios al modelo  $s, S$ , con el objetivo de minimizar el costo total descontado por medio de la optimización de estrategias de pedido. Khakbaz et al. (2024) y Ma et al. (2024) aplican la política EOQ en una empresa minorista para minimizar los costos totales relacionados con el inventario y la devolución y vencimiento de productos.

Hosseinfard et al. (2021), Mallidis et al. (2022) y Saithong y Luong (2022) propusieron modelos de gestión de inventarios que tienen como objetivo minimizar costos y generar un mayor volumen de ventas para las empresas a través de sistemas de revisión de inventario periódicos. Esto suma a la presente investigación, ya que, por información de la clínica caso de estudio, se entiende que tiene una demanda incierta, por lo que en general desarrolla una revisión continua de su inventario; sin embargo, podría optarse por modelos de revisión periódica que son más efectivos si se manejan volúmenes significativos de suministros.

Finalmente, Kilic y Tarim (2024), Vidal y Guerrero (2024), San-José et al. (2023) y Pham et al. (2022) tratan políticas de inventario con escenarios de demanda determinística con el fin de minimizar los costos relacionados con el inventario. Encuentran niveles de cantidad de pedido óptimos y tiempos de entrega viables para las empresas; sin embargo, en la vida real las demandas tienen un comportamiento más bien incierto, por lo que debería optarse por modelos estocásticos. También se consideró el análisis de Zheng et al. (2023) y O'Neill y Sanni (2018), quienes estudian los riesgos ocasionados por la incertidumbre de tiempos de llegada de inventarios en cadenas de suministro con demanda determinística y afectaciones geográficas de difícil acceso, en las que se busca encontrar el balance entre la cantidad de pedido y los costos que implica cubrir estas brechas relacionadas con la incertidumbre.

Habiendo realizado la revisión de literatura, se determina que la brecha de conocimiento que esta investigación pretende cubrir se centra en la falta de estudios desarrollados en centros de salud de tercer nivel, particularmente en la evaluación de su efectividad para optimizar la gestión de suministros médicos en contextos geográficamente desafiantes. La mayoría de la literatura existente se enfoca en clínicas urbanas con modelos de gestión de inventarios bien establecidos, o enfocadas en otro tipo de actividad económica, pero hay una notable carencia de investigaciones que aborden las dificultades específicas y soluciones prácticas para centros de salud ubicados en este tipo de zonas. Esta investigación contribuirá a llenar este vacío proporcionando un marco práctico y adaptado para la gestión de inventarios en estas instituciones a fin de

mejorar la disponibilidad de suministros médicos críticos y reducir costos operativos sustancialmente.

**Tabla 1**

*Revisión de literatura correspondiente a política de inventarios*

Autor	Demanda		Parámetros					Evaluación de costos		
	Estocástica	Determinística	Q	T	n(S)	$\alpha$	$\beta$		S	SS
Aguilar (2023)	x		x	x						x
Assiddiqi et al. (2022)	x		x	x	x			x	x	x
Baek (2024)	x		x							x
Blancas-Rivera et al. (2023)	x		x	x				x	x	x
Chang et al. (2024)	x		x							x
Chen et al. (2022)	x		x	x	x	x	x	x	x	x
Hosseinfard et al. (2021)		x	x							x
Khakbaz et al. (2024)	x		x	x					x	x
Kilic y Tarim (2024)	x	x	x	x						x
Ma et al. (2024)	x		x	x						
Mallidis et al. (2022)	x			x						x
O'Neill y Sanni (2018)	x		x	x	x	x	x		x	x
González (2020)	x		x	x	x				x	x
Pham et al. (2022)		x	x	x						
Rehman et al. (2023)	x		x	x					x	x
Saithong y Luong (2022)	x		x	x						x
San-José et al. (2023)		x	x							x
Srivastava et al. (2023)	x		x	x					x	x
Vidal y Guerrero (2024)		x	x	x						x
Yan et al. (2024)	x			x						x
Zheng et al. (2023)	x		x	x					x	x

## METODOLOGÍA

La investigación utilizó un enfoque experimental, descriptivo y cuantitativo. Se centró en una clínica que trabaja con más de cien suministros médicos con diferentes referencias; y presenta problemas como la deficiencia en el control de inventario por la estocasticidad de la demanda; asimismo, afronta desafíos en cuanto a los altos costos relacionados con el control del inventario de varios de sus suministros médicos. Por otro lado, cuenta con desafíos geográficos por estar dentro de zonas de acceso difícil, lo que causa que, en ciertos pedidos, los tiempos de entrega sean variables, por lo que le no le resulta fácil a la clínica hacer pronósticos certeros que puedan satisfacer la demanda de la población de una forma eficiente.

Se llevó a cabo una metodología para minimizar el valor de faltantes de la clínica, optimizando la cobertura operacional, con el objetivo de reducir los costos de control de inventario de esta. Los datos de la investigación fueron suministrados por la clínica. La metodología de esta investigación siguió un procedimiento que considera cada objetivo específico. Para el primer objetivo específico, se realizó lo siguiente:

- En primer lugar, para seleccionar los suministros médicos más relevantes para el análisis, se elaboró una gráfica de Pareto de los principales suministros con mayor rotación de la clínica.
- Se desarrollaron gráficas de la rotación de inventario respecto al periodo de rotación para cada suministro seleccionando.
- Se analizó el comportamiento del inventario para medir sus niveles inferiores y superiores, la cantidad de faltantes, el inventario de seguridad y los periodos de ingreso de suministros.

El segundo objetivo específico se trabajó de la siguiente forma:

- Se realizaron gráficas de la demanda mensual en un periodo de 12 meses para cada suministro seleccionado.
- Se determinó el comportamiento de la demanda de cada suministro médico, y se escogió el más significativo para realizar el análisis.

Para el tercer objetivo específico, se consideró el siguiente procedimiento:

- Sobre la base de los objetivos específicos previos y la revisión de literatura, se decidió aplicar la política de inventario  $(S, T)$ . Para realizar los cálculos relacionados con esta política, se asume que los datos siguen una distribución normal con media  $(\mu)$  y desviación estándar  $(\sigma)$  definida para cada uno. Se calcularon todos los parámetros necesarios para aplicar las fórmulas 7 y 4. La desviación estándar también se encuentra usando los datos mensuales de la demanda. Los parámetros de costos relacionados con la tasa de mantener inventario  $(i)$ , el costo



unitario de suministros ( $c$ ) y el costo de realizar un pedido ( $K$ ) corresponden a valores estimados proporcionados por la clínica. El valor correspondiente a los demás parámetros requeridos para el procedimiento se encontró aplicando las fórmulas descritas en la Tabla 2. Al encontrar cada parámetro, se debe estandarizar a una sola medida de tiempo; en este caso, se escogió trabajar los datos de forma anual.

- Se asumió que los datos presentaban una distribución normal, con media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) definida para cada uno. Esto se realizó por conveniencia.
- Se aplicó la política de inventarios seleccionada, considerando determinar una cantidad económica de pedido ( $Q$ ) definido, teniendo en cuenta una probabilidad del nivel de satisfacción de la demanda ( $\beta$ ) mínimo del 88 %. Se encontraron los valores de nivel de inventario deseado ( $S$ ),  $SS_t$ ,  $\beta$  y  $T$  aplicando las fórmulas respectivas del diagrama de fórmulas. Se encontró el valor de  $Q$  que satisficiera la condición de  $\beta$  y que minimizara los costos. Este valor se halló llevando a cabo una búsqueda de forma matemática cambiando los parámetros relacionados con  $Q$ .
- Una vez encontrada esta cifra, se deben realizar pruebas usando valores distintos de la probabilidad de no tener faltantes ( $\alpha$ ) manteniendo las magnitudes de  $Q$  y  $T$  constantes. El valor de  $T$  usado en este paso corresponde a un dato proporcionado por la clínica; de esta forma, se mide el cambio de  $\sigma$  frente a los costos para seleccionar el valor que los minimice, manteniendo la condición de tener una probabilidad de  $\beta$  de por lo menos el 88 %.
- Al tener los valores de  $Q$  y  $\alpha$ , se debe analizar la variación de los costos al cambiar el valor de  $T$ . Para ver estas oscilaciones, se debe repetir el mismo proceso, esta vez cambiando la constante  $T$  por una variable; siguiendo este patrón, se encontró el valor de  $T$  que minimiza los costos. En este caso, se realizó la comparación de costos de forma disgregada para ver el comportamiento de cada costo en específico.
- Se llevan a cabo las gráficas de costos totales con relación a  $\alpha$  y  $\beta$ , costos disgregados referentes a  $T$ ,  $SS_t$  con respecto a  $\alpha$  y el valor esperado de faltantes en relación con los cambios de  $T$ .
- Con esta aplicación, se determina y analiza el nivel superior de inventario,  $SS_t$ ,  $T$ ,  $S$ ,  $Q$  y  $\alpha$  finales.
- Se realizó un análisis de costos para ambas aplicaciones considerando los siguientes datos:  $c_{total}$ ,  $k_{total}$ ,  $h_{total}$  y  $\rho_{total}$ . De esta forma, se lleva a cabo una comparación entre los costos totales obtenidos en el análisis de forma teórica, habiendo aplicado el método estocástico  $S$ ,  $T$ , y los costos reales correspondientes de la situación actual suministrados por la clínica.

**Tabla 2**

*Fórmulas usadas en el análisis*

Número	Fórmula
1	$K_{total} = \frac{K}{T}$
2	$c_{total} = c\lambda$
3	$h_{total} = h\left(\frac{Q}{W} + S - \lambda(T + \tau)\right)$
4	$C_{total} = K_{total} + c_{total} + h_{total} + \rho_{total}$
5	$\rho_{total} = p * \left(\frac{n(s)}{T}\right)$
6	$SS_t = Z\sigma_{T+\tau}$
7	$n(S) = \sigma_{(T+\tau)}L(Z)$
8	$\beta = 1 - \left(\frac{n(S)}{\lambda T}\right)$
9	$S = \mu_{(T+\tau)} + \sigma_{(T+\tau)}Z$
10	$Q = \lambda T$
11	$h = ic$
12	$\rho = (1,5c) - c$

*Nota.* Adaptado de "Determinación del costo del inventario con el método híbrido", por J. Izar, C. Ynzunza y R. Sarmiento, 2012, *Conciencia Tecnológica*, 44, pp. 30-35; y de *Análisis de la producción y las operaciones*, por S. Nahmias, 2007, McGraw Hill.

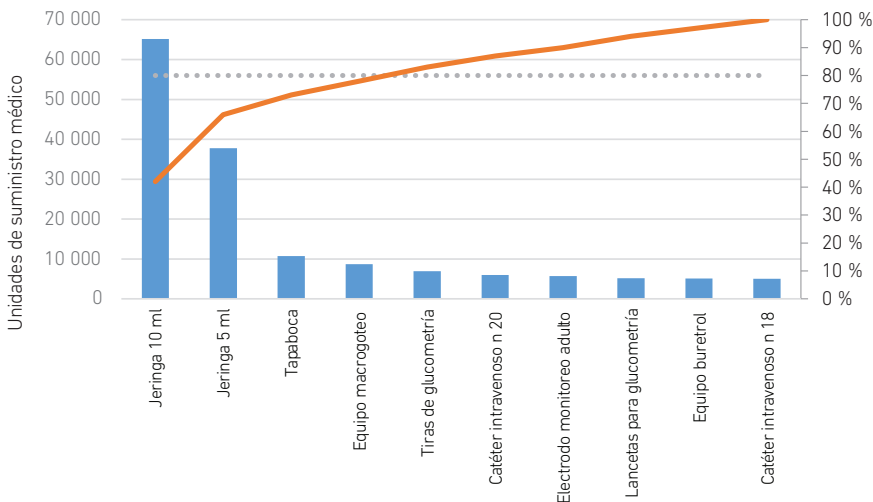
**RESULTADOS**

**Diagnóstico sobre el manejo actual de los inventarios de los suministros médicos**

Se llevó a cabo un diagrama de Pareto basado en los suministros médicos más usados por la clínica. La Figura 1 muestra los resultados de la representación gráfica.

**Figura 1**

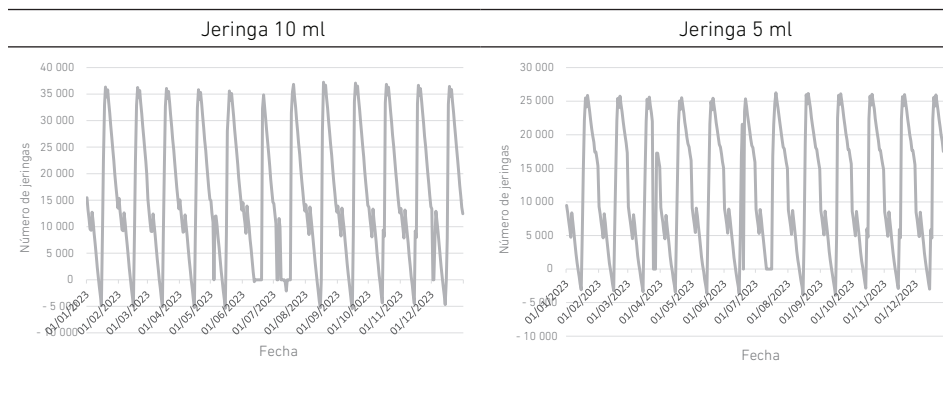
Diagrama de Pareto de los suministros médicos con mayor rotación en la clínica



Al analizar la Figura 1, se puede concluir que los suministros médicos con mayor rotación, y los más relevantes para el estudio, son las referencias correspondientes a las jeringas de 10 y 5 ml. Esto se debe a que, en comparación con los demás suministros, estos representan el 80 % de la rotación total de inventarios para la clínica. Una vez que se definieron los suministros médicos que serán objeto del análisis, se procedió a desarrollar las gráficas de la rotación mensual por un periodo de 12 meses para ambos suministros definidos. Se tomó como año de referencia el 2023. Esta representación se puede observar en la Figura 2.

**Figura 2**

Gráficas de rotación de inventario mensual por 12 meses de ambas referencias de jeringas



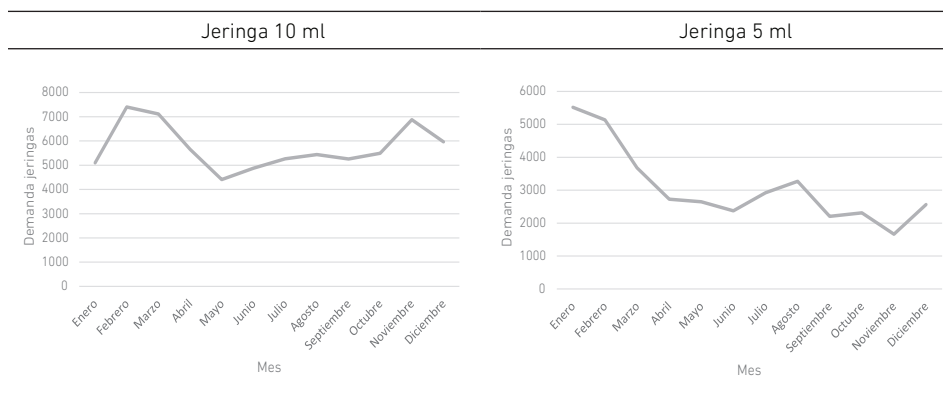
Al llevar a cabo un análisis de las gráficas de rotación de inventario, se visualiza que el inventario es negativo en la mayoría de los periodos; esto significa que la clínica tiene un alto porcentaje de faltantes para estas dos referencias de suministros médicos en varios meses del año. Los valores negativos repetitivos en las gráficas de rotación de inventarios dan a entender que la clínica no cuenta con niveles de seguridad en cuanto a existencias disponibles de suministros, suficientes como para tener una reserva estable, con capacidad de suplir la demanda en caso de contar con imprevistos. Por último, se evidencia que el periodo de ingreso de los suministros se ejecuta cada dos meses.

### Determinación el comportamiento de la demanda de cada suministro médico

Se realizaron gráficas de la demanda mensual por un periodo de 12 meses para cada suministro médico, como se puede ver en la Figura 3. Al analizar el comportamiento de las gráficas de demanda, se puede concluir que el requerimiento mensual de la jeringa de 10 ml oscila entre las 4500 hasta las 7400 unidades, en contraste con la demanda mensual de la jeringa de 5 ml, que oscila entre las 1600 hasta las 5600 unidades. De forma gráfica, se puede apreciar claramente un comportamiento con tendencia decreciente en la jeringa de 5 ml y una dinámica estacionaria en la jeringa de 10 ml.

**Figura 3**

*Gráficas de demanda mensual por 12 meses de ambas referencias de jeringas*



Al desarrollar el análisis de las gráficas de la rotación mensual del inventario de ambas referencias por un periodo de un año, se pueden ver amplias similitudes entre el comportamiento gráfico de los suministros versus la tendencia apreciada en la metodología estocástica de control de inventarios ( $S, T$ ). Esto se debe a que el inventario tiende a subir a un nivel predeterminado cada cierto lapso de tiempo específico.

Por otro lado, teniendo en cuenta el comportamiento de las gráficas de la rotación mensual del inventario (Figura 2) y la tendencia estocástica mostrada por los datos

de la demanda (Figura 3), se decidió llevar a cabo el escrutinio del suministro médico correspondiente siguiendo la metodología de control de inventarios ( $S, T$ ).

Por último, se optó por desarrollar el análisis de la referencia correspondiente a la jeringa de 10 ml de forma exclusiva, teniendo en cuenta su participación dentro de la curva de Pareto, al igual que la similitud en el comportamiento del inventario de ambas referencias. Ambos suministros presentan un comportamiento estocástico, con tendencias de rotación de inventario similares al presentado de forma gráfica en la metodología ( $S, T$ ).

### **Análisis detallado de los costos de la política de inventarios evaluada para los suministros médicos de mayor rotación de la clínica**

En la Tabla 3, se presentan los valores iniciales de los parámetros requeridos determinados con la formulación mostrada.

**Tabla 3**

*Parámetros requeridos para la aplicación del método  $S, T$*

	Valor	Unidades
$\mu$	5738,83	Jeringas
$\sigma$	932,4	Jeringas
$i$	0,02	
$c$	397	COP
$h$	7,94	COP
$K$	13 041 450	COP
$p$	238,2	COP

Los parámetros con los que se inicializó el método son suministrados por la clínica; asimismo, se llevó a cabo el procedimiento matemático correspondiente a la búsqueda de  $Q$ . La Tabla 4 presenta los resultados del cálculo de un valor de  $Q$  que se ajusta a un valor de  $\beta$  mínimo del 88 %.

**Tabla 4**

*Resultados anuales de búsqueda del valor óptimo*

	Valor	Unidades
$Q$	11 478	Jeringas
$\alpha$	85 %	
$T$	0,16	Años
$\tau$	0,04	Años

(continúa)

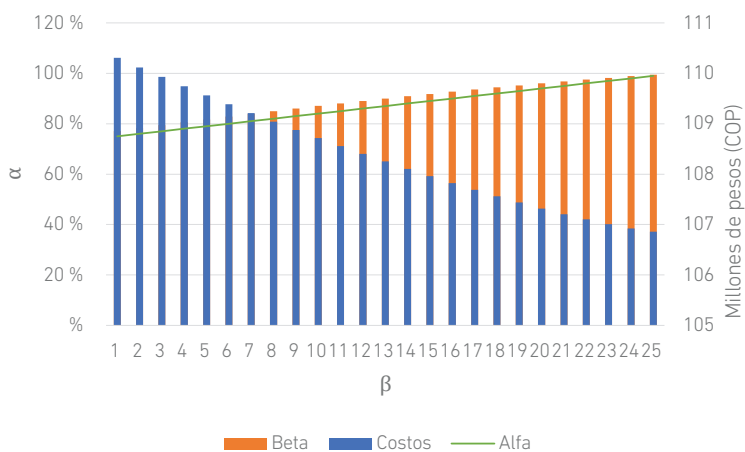
(continuación)

	Valor	Unidades
$S$	15 706	Jeringas
$SS_t$	1520	Jeringas
$\beta$	88,04 %	
Costos totales	110 147 978	COP

La Tabla 4 también muestra los resultados obtenidos con la aplicación de las fórmulas de la Tabla 2. El valor encontrado de  $Q$  es de 11 478 jeringas, que corresponde a la cantidad que debe pedir la clínica cada vez que realiza una orden de jeringas de 10 ml, con el fin de satisfacer la condición mínima correspondiente a una probabilidad estimada de  $\beta$ . De manera análoga, se determina que el inventario de seguridad que deberá tener la clínica para cubrir esta demanda es de 1528 unidades de jeringas de la referencia de 10 ml; así, se entiende que este es el valor mínimo que tendrá que estar disponible permanentemente, con el fin de cubrir faltantes en caso de una situación imprevista que afecte la demanda. Del mismo modo, se realizó una gráfica de costos al variar los valores  $\alpha$  y  $\beta$ , que se expone en la Figura 4.

**Figura 4**

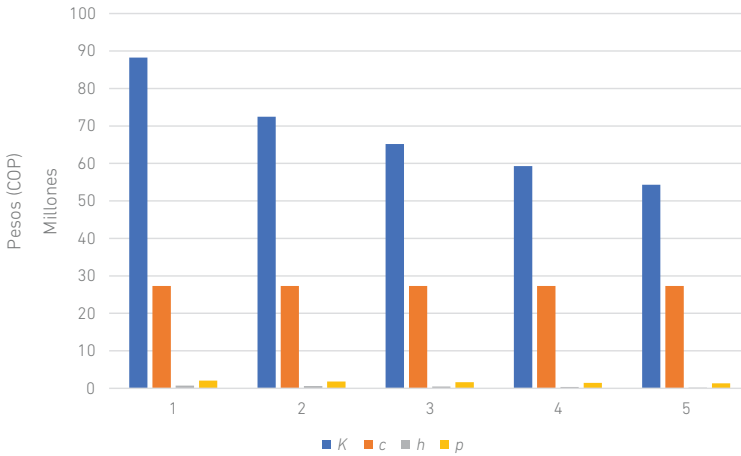
Diagrama de  $\alpha$  y  $\beta$  vs. costos totales (COP)



La gráfica triple comparativa revela el cambio en los costos al variar ambos parámetros, y conforme a esto se puede concluir que, para lograr un valor que sea proporcional al parámetro mínimo de  $\beta$  objetivo, cambiando únicamente el valor de  $Q$  óptimo encontrado, la clínica deberá incurrir en costos totales anuales mínimos de 110 147 978 COP (pesos colombianos). Por otro lado, se realizó el procedimiento para encontrar el valor de  $T$  que minimiza los costos disgregados. La Figura 5 muestra los resultados de este procedimiento.

**Figura 5**

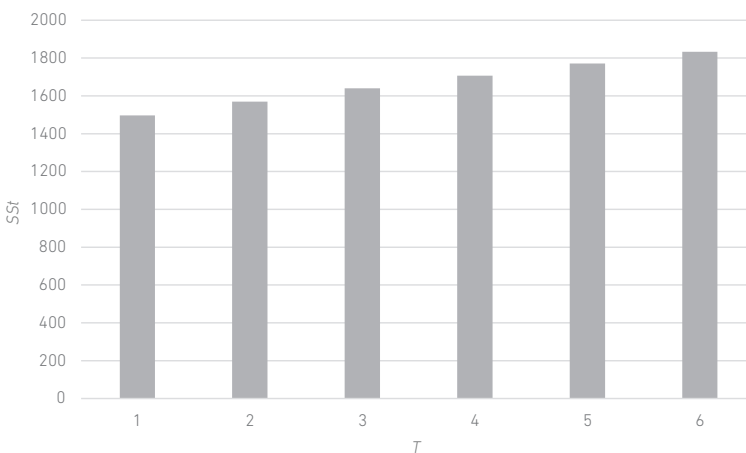
Gráfica de  $T$  mensual con respecto a los costos desgregados anuales



Teniendo los resultados del análisis de costos usando como variable  $T$ , se puede determinar que si la clínica cambia la periodicidad con la que realiza pedidos a un valor de  $T$  anual igual a 3, podrá disminuir sus costos totales en un 31 %, en comparación que si usa un  $T$  de 2 (valor que se emplea en la actualidad). Esto se debe a que el costo más elevado en el que incurre la clínica se registra al momento de realizar los pedidos, por lo que pedir menos veces al año implica reducción de costos significativa para la misma. Correspondiente a esto, se realizó una comparación entre la variación de  $SS$  con respecto a  $T$ . La Figura 6 muestra estos resultados.

**Figura 6**

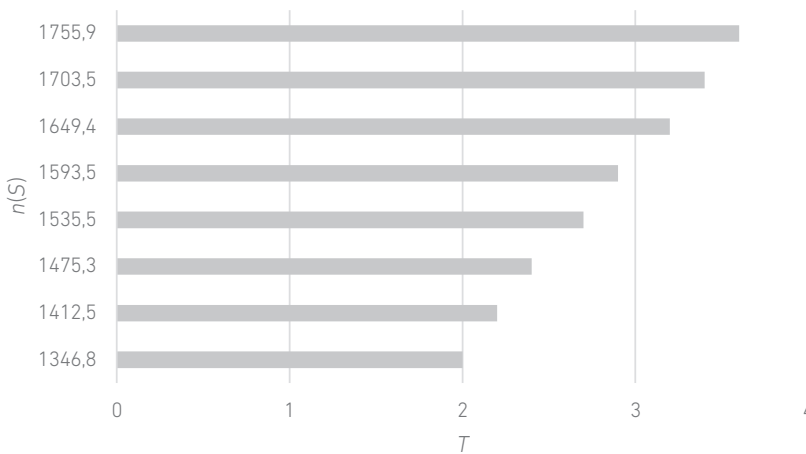
Diagrama de  $SS$  con respecto a  $T$  mensual



A partir de la Figura 6, se concluye que mientras se tenga una frecuencia de pedido menor, manteniendo el  $Q$  hallado previamente para cada pedido, el  $SS$  que ha de mantener la clínica será mayor. Esto se debe a que tendrá que contar con una mayor cantidad de inventario guardado en caso de encontrarse con algún imprevisto que afecte la demanda. Por otro lado, la Figura 7 muestra los resultados del diagrama comparativo entre la variación de  $T$  con respecto al valor esperado de faltantes  $n(S)$ .

**Figura 7**

*Diagrama de  $n(S)$  con respecto a  $T$  mensual*



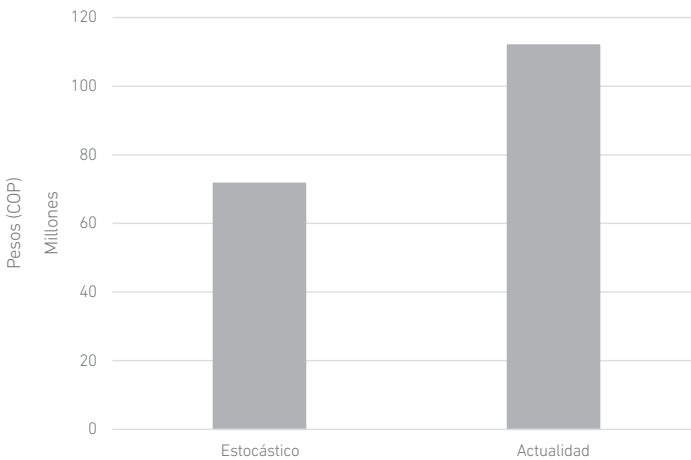
Se puede observar que  $n(S)$  muestra un comportamiento creciente a medida que se aumenta  $T$ . Esto quiere decir que, para cumplir el objetivo de la clínica de minimizar el número de faltantes, teniendo en cuenta los costos, se debe usar un valor de  $T$  mensual igual a 3.

Por último, se realizó la comparación de costos. La Figura 8 muestra los resultados de la comparación entre los costos hallados en el análisis realizado (usando los parámetros obtenidos anteriormente) y los costos reales que tiene la clínica en la actualidad al tratarse de la jeringa de 10 ml.



**Figura 8**

*Diagrama comparativo de costos*



Al aplicar el escenario estocástico usando la metodología *S, T*, la clínica incurriría en costos anuales iguales a los 71 708 827 COP, en comparación con los 112 000 000 COP (aproximadamente) que gasta en la actualidad en la gestión de inventario correspondiente a las jeringas de 10 ml. Por lo tanto, el análisis realizado sugiere la aplicación de la metodología estocástica, cambiando todos los parámetros actuales de la clínica por los encontrados anteriormente, lo cual significaría una reducción de más del 30 % de los costos totales para esta referencia de jeringas; así resulta un ahorro considerable para la clínica.

## DISCUSIÓN

La implementación del modelo de gestión de inventarios estocástico *S, T*, propuesto por Nahmias (2007), plantea un enfoque con gran aplicabilidad y flexibilidad para el sector hospitalario. El análisis realizado presenta una gran reducción de los costos de inventario para la clínica manteniendo el valor de  $\beta$  correspondiente al 88 %. Esta adaptabilidad es argumentada también por Aguilar (2023). Según este análisis, la metodología estocástica *S, T* optimiza la gestión de inventarios, destacando la utilidad de poder ajustar la frecuencia de pedido *T* en función de la demanda específica del mercado. Por otro lado, Kilic y Tarim (2024) subrayan la variabilidad dentro de la elección de un método de control de inventarios en pequeñas y medianas empresas, enfatizando en la sensibilidad que se debe tener al escoger un método según características como el acceso a proveedores, demanda variable y problemas en la cadena de suministro.

Además, introducir un nuevo modelo de gestión de inventarios para la referencia de jeringas de 10 ml implica nuevos retos empresariales para la clínica, como lo sugiere González (2020), quien aborda la importancia de entender la funcionalidad de las políticas de inventarios frente a cambios inesperados en la demanda. La adaptabilidad es de gran importancia al tratarse del sector hospitalario, como señalan Triana (2022), Chen et al. (2022) y Rehman et al. (2023), por ser un sector con gran variabilidad en la demanda. Considerando esta variabilidad, el inventario de seguridad destaca por ser necesario para combatir la demanda incierta en este sector. Tener un buen manejo al calcular este inventario prueba ser de gran ayuda al momento de mitigar los costos de faltantes, maximizando la satisfacción del cliente.

Por último, Yan et al. (2024) enfatizan la importancia de tener políticas con mejoras continuas, proyectándolas a largo plazo. Al aplicar estos ajustes operacionales dentro de la clínica, se podrá generar un plan de acción a largo plazo, con una política de gestión de inventarios enfocada en suministros médicos, cuyo objetivo no sea solo reducir costos, sino también mejorar la satisfacción de los clientes de la clínica al estar más preparada para soportar la naturaleza variable de la demanda.

## CONCLUSIONES

Se logra evaluar una política de inventario del suministro médico con mayor rotación de un centro de salud ubicado en una zona de acceso difícil. Este análisis consistió en la aplicación del método estocástico  $S, T$ , por medio del cual se encontraron parámetros clave para la toma de decisiones de la empresa, como son  $Q, T, S, SS, \alpha, \beta, n(S)$  y los costos totales relacionados con la gestión de inventarios de la jeringa de 10 ml. Al llevar a cabo este análisis, se determina la efectividad del método establecido, pues consigue una reducción en el nivel de faltantes, al igual que en los costos actuales de la clínica en más del 30 %.

En cuanto a los objetivos específicos, se realizó un diagnóstico sobre el manejo actual de los suministros médicos de la clínica caso de estudio, y se determinó por medio de un diagrama de Pareto la gran contribución a la rotación de suministros médicos de parte de las jeringas de 5 y 10 ml. Una vez identificados, se elaboraron las gráficas de rotación de inventario para cada una de estas referencias de jeringas, a fin de encontrar los niveles superiores e inferiores del inventario. Habiendo realizado estas gráficas, se confirmó que la metodología  $S, T$  era la más adecuada para llevar a cabo el análisis.

Por otro lado, se determinó el comportamiento de la demanda de los suministros médicos correspondientes, definiendo así la naturaleza estocástica de las jeringas. Asimismo, se concluyó que se llevaría a cabo el análisis de la metodología de inventarios únicamente con la referencia correspondiente a la jeringa de 10 ml, basándose en el

comportamiento similar de ambas referencias, al igual que la participación mayoritaria de esta referencia dentro del diagrama de Pareto.

Se llevó a cabo el análisis de costos, así como de todos los parámetros relacionados con estos dentro de la metodología. Se encontró que los valores de  $Q$ ,  $T$ ,  $S$ ,  $SS_t$  y  $\alpha$  que minimizan los costos, manteniendo una probabilidad de  $\beta$  mínima del 88 %, son de 11 478,3; 15 706; 1952 y 85 % respectivamente. Los costos totales que se encontraron siguiendo la metodología  $S$ ,  $T$  proponen un ahorro de más del 30 % en comparación con los costos actuales, lo cual supone un ahorro considerable para la clínica.

Se sugiere a la clínica llevar a cabo más estudios detallados usando la metodología  $S$ ,  $T$  aplicada en este análisis, con el fin de solidificar los resultados correspondientes a la jeringa de 10 ml. Al realizar más estudios usando otras referencias y más años de datos base, se podrá determinar una política aún más robusta, que logre una reducción mayor en los costos mencionados anteriormente. De esta forma, la clínica podrá adoptar una nueva política de gestión de inventarios para sus suministros médicos con mayor rotación, teniendo más certeza de poder enfrentarse a los retos que puedan surgir en un futuro.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Para la investigación titulada “Evaluación de una política de inventario de suministros médicos con mayor rotación en centros de salud de tercer nivel ubicados en zonas de acceso difícil”, los autores declaran que no existen conflictos de intereses financieros, personales o profesionales que puedan influir en los resultados del estudio. Ninguno de los autores ha recibido financiamiento o mantiene relaciones que puedan afectar la objetividad e integridad de esta investigación.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

**Daniel Andrés Gutiérrez Yepes:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, *software*, visualización, escritura-borrador original, redacción: revisión y edición. **Luis Tarazona-Torres:** conceptualización, metodología, supervisión, validación, redacción: revisión y edición.

## REFERENCIAS

Aguilar, C. (2023). *Optimización de la gestión de inventarios en cadenas de suministros de alimentos mediante aprendizaje por refuerzo* [Tesis de bachiller, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca de la Universidad de los Andes. <https://hdl.handle.net/1992/73187>

- Assiddiqi, M., Anantadjaya, S., Ahmad, I., Le, K., Iswanto, A., Trung, N., Al-Sudani, A., Huy, D., & Mutlak, D. (2022). Integrated pricing and inventory control for perishable products, taking into account the lack of backlog and inventory management policy by the seller. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 47(4), 371-382. <https://doi.org/10.2478/fcds-2022-0020>
- Baek, J. (2024). On the control policy of a queuing–inventory system with variable inventory replenishment speed. *Mathematics*, 12(2), artículo 194. <https://doi.org/10.3390/math12020194>
- Blancas-Rivera, R., Cruz-Suárez, H., Portillo-Ramírez, G., & López-Ríos, R. (2023). (s, S) Inventory policies for stochastic controlled system of Lindley-type with lost-sales. *AIMS Mathematics*, 8(8), 19546-19565. <https://doi.org/10.3934/math.2023997>
- Caicedo, Y., Lozano, J., & Leiva, M. (2022). *Análisis del transporte para el ingreso y salida de bienes a la ciudad de Leticia* [Proyecto de investigación, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/55601>
- Chang, X., Kwok, W., & Wong, G. (2023). Demand uncertainty, inventory, and cost structure. *Contemporary Accounting Research*, 41(1), 226-254. <https://doi.org/10.1111/1911-3846.12918>
- Chen, C. N., Lai, C. H., Lu, G. W., Huang, C. C., Wu, L. J., Lin, H. C., & Chen, P. S. (2022). Applying simulation optimization to minimize drug inventory costs: A study of a case outpatient pharmacy. *Healthcare*, 10(3), artículo 556. <https://doi.org/10.3390/healthcare10030556>
- Decreto 521 del 2010. Por el cual se reglamentan parcialmente el inciso 6.º del artículo 24 de la Ley 715 del 2001 y el artículo 2.º de la Ley 1297 del 2009, en lo relacionado con los estímulos para los docentes y directivos docentes de los establecimientos educativos estatales ubicados en las zonas de difícil acceso. 17 de febrero del 2010. Diario oficial 47.626. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=38908> (Colombia).
- González, A. (2020). Un modelo de gestión de inventarios basado en estrategia competitiva. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 28(1), 133-142. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000100133>
- Hernández, N., Roldán, D., Zamora, P., & Rosas, J. (2022). Neoliberalismo y subjetividades en la pandemia por COVID-19: casos México y Colombia. *Estudios Sociales Contemporáneos*, 27, 131-154. <https://doi.org/10.48162/rev.48.046>

- Hosseinifard, Z., Shao, L., & Talluri, S. (2021). Service-level agreement with dynamic inventory policy: The effect of the performance review period and the incentive structure. *Decision Sciences*, 53(5), 802-826. <https://doi.org/10.1111/deci.12506>
- Izar, J., Ynzunza, C., & Sarmiento, R. (2012). Determinación del costo del inventario con el método híbrido. *Conciencia Tecnológica*, 44, 30-35. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94425393006>
- Khakbaz, A., Alfares, H., Amirteimoori, A., & Tirkolaee, E. B. (2024). A novel cross-docking EOQ-based model to optimize a multi-item multi-supplier multi-retailer inventory management system. *Annals of Operation Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05790-9>
- Kilic, O., & Tarim, S. (2024). A simple heuristic for computing non-stationary inventory policies based on function approximation. *European Journal of Operational Research*, 316(3), 899-905. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.02.016>
- Ma, B., Mao, B., Liu, S., Meng, F., & Liu, J. (2024). Managing physical inventory and return policies for omnichannel retailing. *Computers & Industrial Engineering*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109986>
- Mallidis, I., Sariannidis, N., Vlachos, D., Yakavenka, V., Aifadopoulou, G., & Zopounidis, K. (2022). Optimal inventory control policies for avoiding food waste. *Operational Research*, 22(1), 685-701. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00554-w>
- Nahmias, S. (2007). *Análisis de la producción y las operaciones* (5.ª ed.). McGraw Hill.
- O'Neill, B., & Sanni, S. (2018). Profit optimisation for deterministic inventory systems with linear cost. *Computers & Industrial Engineering*, 122, 303-317. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.032>
- Organización Panamericana de la Salud. (2006). *Guía práctica para la planificación de la gestión del suministro de insumos estratégicos*. <https://www.paho.org/es/node/34962>
- Pham, T., Sahasontaravuti, S., & Buddhakulsomsiri, J. (2022). Determining (s, S) inventory policy for healthcare system: A case study of a hospital in Thailand. *International Journal of Knowledge and Systems Science*, 13(1). <https://doi.org/10.4018/ijkss.306258>
- Rehman, A., Mian, S., Usmani, Y., Abidi, M., & Mohammed, M. (2023). Modelling and analysis of hospital inventory policies during COVID-19 pandemic. *Processes*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/pr11041062>
- Resolución 1442 [Ministerio de Salud y Protección Social de la República de Colombia]. Por la cual se adoptan las Guías de Práctica Clínica (GPC) para el manejo de las

- Leucemias y Linfomas en niños, niñas y adolescentes, Cáncer de Mama, Cáncer de Colon y Recto, Cáncer de Próstata y se dictan otras disposiciones. 6 de mayo del 2013. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-1442-de-2013.pdf>
- Ruíz, E., Adarme, W., & Gaitán, H. (2024). Estrategia de abastecimiento colaborativo para el sector salud derivado de un estudio clínico de COVID-19. *Ingeniería y Desarrollo*, 42(1), 47-67. <https://doi.org/10.14482/inde.42.01.345.555>
- Saithong, C., & Luong, H. (2022). A periodic review order-up-to inventory policy in the presence of stochastic supply disruption. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 40(2), 181-199. <https://doi.org/10.1504/ijise.2022.121069>
- San-José, L., Sicilia, J., González-de-la-Rosa, M., & Febles-Acosta, J. (2023). Optimal production-inventory policy for products with time-dependent demand pattern and backlogged shortages. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/23302674.2023.2203834>
- Snowdon, A., Saunders, M., & Wright, A. (2021). Key characteristics of a fragile healthcare supply chain: Learning from a pandemic. *Healthcare Quarterly*, 24(1), 36-43. <https://doi.org/10.12927/hcq.2021.26467>
- Srivastava, M., Mehta, P., & Swami, S. (2023). Retail inventory policy under demand uncertainty and inventory-level-dependent demand. *Journal of Advances in Management Research*, 20(2), 217-233. <https://doi.org/10.1108/jamr-08-2022-0177>
- Triana, I. (2022). *Modelo de inventarios bajo demandas estacionales* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional de la Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/57461>
- Vidal, G., & Guerrero, C. (2024). Deterministic inventory models with non-perishable product: A comparative study. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 15, 2500-2517. <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02267-1>
- Yan, X., Chao, X., & Lu, Y. (2024). Optimal control policies for dynamic inventory systems with service level dependent demand. *European Journal of Operational Research*, 314(3), 935-949. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.11.005>
- Zheng, M., Cui, N., Zhang, Y., Zhang, F., & Shi, V. (2023). Inventory policies and supply chain coordination under logistics route disruption risks. *Sustainability*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310093>

# GESTIÓN DE INVENTARIOS DE UNA COMPAÑÍA IMPORTADORA DE REPUESTOS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA DE MAQUINARIA PESADA

MATEO NÚÑEZ-OVIEDO

<https://orcid.org/0009-0008-2611-669X>

Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes,  
Bogotá, Colombia

LUIS TARAZONA-TORRES\*

<https://orcid.org/0000-0003-0567-6926>

Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes,  
Bogotá, Colombia

Recibido: 15 de mayo del 2024 / Aceptado: 13 de junio del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7116>

**RESUMEN.** Este estudio tuvo como objetivo hacer un análisis de la gestión de inventarios de una compañía importadora de repuestos de transmisión de potencia. La investigación fue del tipo aplicado, con diseño no experimental, alcance descriptivo y enfoque cuantitativo. Se tomó como caso una empresa importadora de productos desde China. Se evaluaron escenarios determinísticos y estocásticos comparándolos con el escenario actual de la empresa, y se aplicaron métodos relacionados con cada escenario, considerando también el comportamiento de la demanda y haciendo un análisis de los modelos con pronósticos de esta. Se concluyó que el método estocástico, específicamente el modelo  $(S, T)$ , ha resultado ser más rentable en comparación con el escenario actual y el determinístico, principalmente por la reducción de faltantes y la homogeneidad en el comportamiento del inventario.

**PALABRAS CLAVE:** control de inventarios / maquinaria / repuestos / transmisión de potencia / cadena de suministro / empresas / importación

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\*Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [m.nunezo@uniandes.edu.co](mailto:m.nunezo@uniandes.edu.co); [le.tarazona@uniandes.edu.co](mailto:le.tarazona@uniandes.edu.co)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## INVENTORY MANAGEMENT FOR AN IMPORT COMPANY OF POWER TRANSMISSION SPARE PARTS FOR HEAVY MACHINERY

**ABSTRACT.** The aim of this study was to analyse the inventory management of a company that imports power transmission spare parts. The study was of the applied type, with a non-experimental design, descriptive scope, and quantitative approach. A company importing its products from China was taken as a case study. Deterministic and stochastic scenarios were evaluated in comparison with the company's current scenario and methods related to each scenario were applied, also considering the behavior of demand, and analyzing the models with forecasts of these. It was concluded that the stochastic method, specifically the  $(S, T)$  model, has proved to be more profitable compared to the current scenario and the deterministic one, mainly due to the reduction of shortages and the homogeneity in the behavior of the inventory.

**KEYWORDS:** inventory control / machinery / spare parts / power transmission / supply chain / business enterprises / imports



## INTRODUCCIÓN

El sector global de repuestos para la transmisión de potencia, crucial para la operatividad de maquinaria industrial, depende en gran medida de importaciones, en especial, en mercados con complejos procesos aduaneros y regulaciones locales. Productores clave de Estados Unidos, Alemania, China, Japón e Italia dominan este mercado con productos como engranajes, correas y cadenas. En Colombia, la gestión de inventarios enfrenta desafíos significativos debido al uso de políticas empíricas que no consideran un análisis detallado de rotación de productos, lo que lleva a escasez o exceso de inventario, que afecta la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta a la demanda del mercado (Chopra & Meindl, 2008).

La falta de métodos basados en pronósticos precisos conduce a decisiones arbitrarias sobre las cantidades que se deben pedir, generando ineficiencias, obsolescencia del producto y pérdida de valor comercial. Implementar políticas de inventario robustas que integren análisis de rotación y pronósticos precisos es crucial para mitigar estos problemas y fortalecer la operatividad empresarial.

En este contexto, la adopción de políticas como la cantidad económica de pedido (EOQ) y modelos como el de revisión continua  $Q, nR$ , y el de revisión periódica  $S, T$ , se presentan como soluciones eficaces. Estos métodos, diseñados para situaciones con demanda conocida o incierta, buscan optimizar los costos de gestión de inventarios y asegurar una cantidad adecuada de *stock* que satisfaga la demanda sin incurrir en costos excesivos de almacenamiento o escasez.

Ante esta problemática, es importante que las empresas de este sector consideren gestionar adecuadamente sus políticas de inventario, ya que podría tener repercusiones importantes en los costos asociados en la adquisición de los productos. Por eso, la presente investigación plantea la siguiente pregunta: ¿cómo determinar la política de inventario adecuada para minimizar costos totales anuales en la cadena de suministros de una empresa de repuestos de transmisión de potencia? Para dar una respuesta, se plantearon los siguientes objetivos de la investigación: (1) para un caso determinista, establecer la política de inventario que minimice los costos totales anuales; (2) definir pronósticos y aplicar la política debida; (3) en un caso estocástico, determinar la política de inventario que minimice los costos totales anuales; (4) realizar un análisis comparativo entre casos para determinar la mejor política según el tipo de producto.

A partir de la revisión de literatura realizada, se tiene que la gestión de inventarios es crucial para la eficiencia operativa y la rentabilidad en diversas industrias. Los modelos de inventario se clasifican en determinísticos y probabilísticos, adecuados para diferentes contextos. Según Nahmias (2007), los modelos determinísticos proporcionan predictibilidad y facilidad de gestión, mientras que los modelos probabilísticos ofrecen flexibilidad en entornos inciertos. Bai y Zhong (2008) señalan los retos de gestionar

inventarios a nivel internacional, enfatizando la variabilidad de proveedores y las fluctuaciones de demanda. La revisión de González (2020) y de Parga-Prieto y Aranda-Pinilla (2018) sugiere el uso de técnicas heurísticas como Silver-Meal y Wagner-Whitin para adaptar los inventarios a cambios en mercados competitivos.

En sectores más específicos, la gestión de inventarios enfrenta desafíos únicos relacionados con la demanda estacional y la gestión de productos. Ardila (2010), Triana (2022), Martínez Arteaga (2016) y Rodríguez y Vidal (2009) discuten la importancia de métodos especializados para controlar eficazmente estos inventarios. La innovación y la mejora continua también son fundamentales en la gestión de inventarios. Alves et al. (2017) desarrollaron un algoritmo para controlar inventarios con demandas estocásticas, mejorando la optimización y la calidad del servicio. Ballou (2004) señala que las estrategias de inventarios deben alinearse con las metas del servicio al cliente, incluyendo pronósticos de demanda, programación de compras y decisiones de almacenamiento. Carvajal y Amaya (2011) propusieron un modelo mate-heurístico para mejorar la coordinación de inventarios bajo restricciones presupuestarias y de transporte compartido. Contreras Juárez et al. (2018) aplicaron el modelo EOQ y un modelo de revisión continua para demandas inciertas en la industria de la construcción, a fin de proporcionar soporte a las decisiones de niveles de inventarios y reducir costos operativos.

La gestión efectiva de inventarios es vital para garantizar la estabilidad financiera de las empresas. Restrepo et al. (2020) afirman que una gestión adecuada de inventarios es crucial para mantener la solvencia financiera. Monisola (2013) enfatiza la importancia de técnicas científicas y el uso de tecnologías de la información y comunicación (TIC) para una mejor toma de decisiones. Pérez Hualtibamba y Wong Aitken (2018) propusieron una metodología de gestión de inventarios basada en el análisis ABC, optimizando la cantidad económica de pedido, el punto de reorden y el número óptimo de pedidos, lo cual resultó en una reducción de costos y un aumento en la productividad. Rangel Vega (2016) también destacó la aplicación de modelos ABC y EOQ sin faltantes, mejorando el aprovechamiento de recursos y reduciendo costos operativos. Por otra parte, Gonçalves et al. (2020) se enfocan en el problema de dimensionamiento de *stocks* de seguridad e indican varios vacíos que afectan a su solución. También, Baron et al. (2017) subrayan la importancia de determinar un nivel óptimo de reorden *s* y un nivel de pedido *S*.

Respecto al uso de tecnologías de la información para la gestión moderna de inventarios, Arango et al. (2011), Guzmán-Camacho et al. (2014), Rojas Mancipe (2011) y Silva Gómez (2017) plantean la aplicación de estrategias de coordinación de inventarios gestionadas por el proveedor, además del uso de EDI (*electronic data interchange*) para mejorar las políticas de abastecimiento. Wiśniewski (2021) sugiere que la información sobre pronósticos debe ser accesible y gestionada en la nube, permitiendo actualizaciones en tiempo real. Esta revisión de literatura sugiere que la implementación de modelos avanzados de gestión de inventarios y tecnologías de la información puede mejorar

significativamente la eficiencia operativa y la competitividad de las empresas, abordando las particularidades de diversos sectores y adaptándose a entornos inciertos.

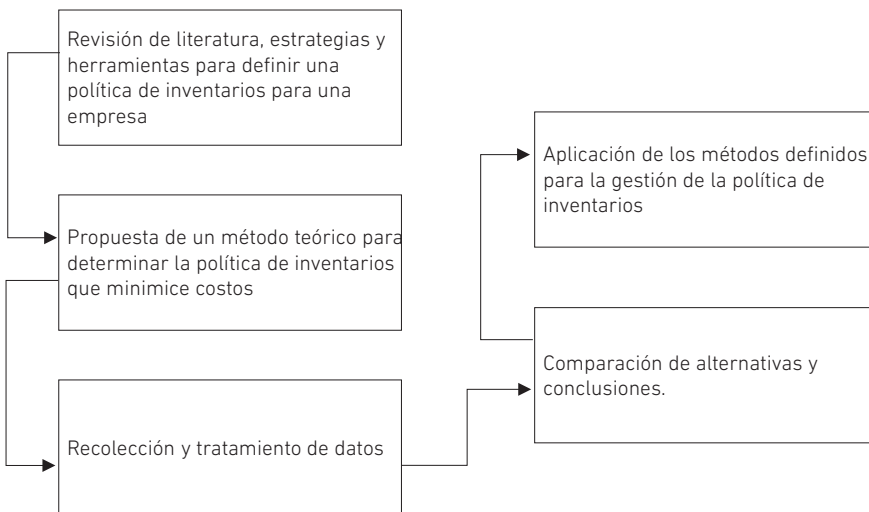
## METODOLOGÍA

La investigación utilizó un enfoque aplicado, no experimental, descriptivo y cuantitativo, centrado en una empresa que importa productos desde China e incluye una cadena de transmisión con 40 referencias distribuidas nacionalmente. La compañía enfrenta retos para mantener un nivel óptimo de inventario debido a una demanda variable, por lo que ha implementado revisiones mensuales de inventario para adaptarse a los bajos niveles, aunque el proceso de fabricación de las cadenas toma cerca de cuatro meses desde el pago anticipado. Los desafíos comprenden largos tiempos de entrega que, a veces, resultan en la superación del inventario disponible y agotamiento de productos. Es necesario mejorar la gestión de inventarios y explorar métodos más sofisticados para responder a la volatilidad de la demanda.

La investigación siguió un proceso estructurado, mostrado en la Figura 1, que comenzó con una revisión de literatura para explorar estrategias y herramientas existentes en la gestión de inventarios. Posteriormente, se propuso un método teórico para minimizar los costos de inventario y se llevó a cabo la recolección y tratamiento de datos necesarios para aplicar y validar este método. El proceso investigativo culminó en la aplicación práctica de los métodos definidos y una evaluación comparativa de estrategias para determinar la más eficiente y efectiva para la empresa. Este enfoque sistemático y basado en datos subraya la importancia de una planificación cuidadosa y adaptativa en la gestión de inventarios.

**Figura 1**

*Procedimiento metodológico*



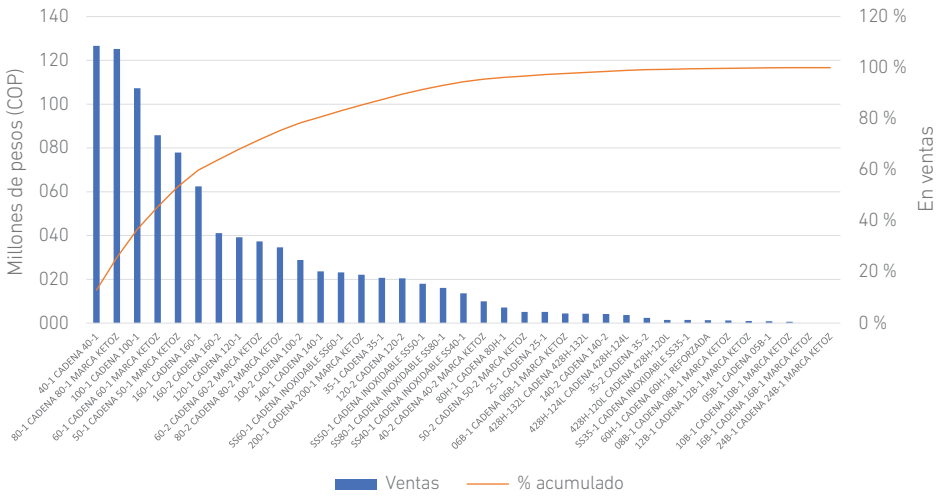
La propuesta teórica para establecer una política de inventarios implica un análisis minucioso de variables clave, como la demanda de productos, costos logísticos y tiempos de entrega. Se examinan modelos teóricos existentes como el modelo de revisión continua ( $Q, R$ ), heurísticas para el cálculo del tamaño de lote y el modelo de lote económico de pedido, adaptándolos a las particularidades del negocio, como la importación y la variabilidad de la demanda. La integración de técnicas de pronóstico y la implementación de modelos estocásticos y heurísticos mejoran la capacidad de prever la demanda futura. Establecer políticas de reorden y niveles de inventario apunta a optimizar los costos totales, incluyendo inventarios de seguridad para mitigar riesgos. Este enfoque teórico se valida mediante análisis de sensibilidad y simulaciones, permitiendo ajustes continuos para responder a variaciones en la demanda y condiciones del mercado, en busca de la mejora continua en la eficiencia de la gestión de inventarios.

El análisis de los costos actuales de la compañía abarca un periodo de 21 meses desde enero del 2022 hasta septiembre del 2023, tiempo en el que se realizaron cuatro importaciones con intervalos variados. Esta variabilidad complica la determinación de cantidades óptimas para satisfacer la demanda del mercado. Además, la retención prolongada de mercancía implica costos adicionales de almacenamiento, estimados en un 2 % del inventario, incluyendo costos de capital y almacenamiento. Un análisis de Pareto se enfoca en las categorías con mayores ventas para evaluar el movimiento de productos eficientemente, destacando la importancia de concentrar el análisis en productos clave para optimizar la toma de decisiones.

En la Figura 2, se presenta el análisis de Pareto que indica las cinco referencias más vendidas: cadenas 40-1, 80-1, 100-1, 60-1 y 160-1. Basándose en estas referencias, se desarrollarán tres escenarios que consideran los costos operativos, evaluando tanto la situación actual como escenarios hipotéticos con demanda estocástica y demanda determinística.

**Figura 2**

*Pareto de ventas cadena de transmisión*



Para el escenario determinístico, se evaluaron tres heurísticas: lote por lote, Silver-Meal y POQ. Se seleccionó finalmente la heurística POQ por su capacidad de ofrecer un periodo fijo que facilita la determinación de costos para todas las categorías, mientras que lote por lote y Silver-Meal se descartaron por su impracticabilidad y mayor frecuencia de pedidos, respectivamente, lo que incrementaría los costos (Nahmias, 2007). Se planea evaluar dos escenarios de tiempo de entrega: uno centrado en la categoría más vendida, la 40-1, y otro basado en el tiempo estándar de entrega para la mayoría de las categorías, manteniendo constantes los parámetros de costo y demanda del escenario actual y calculando el *stock* de seguridad (SS) a partir del promedio de demanda del periodo estudiado.

Durante la recopilación de datos, se analizaron registros históricos de ventas e inventarios para establecer la variabilidad en la demanda y los costos, asegurando la consistencia y confiabilidad de los datos con el sistema contable de la empresa. Se identificaron variables clave como costos, inventarios, niveles de servicio y cantidades de pedido. El tratamiento de los datos incluyó técnicas estadísticas para identificar patrones y tendencias. Los resultados se presentan en gráficos y tablas que resaltan las implicaciones para una gestión eficiente de inventarios. Este análisis apoya el diseño de una política de inventarios que minimiza costos y mejora la operatividad de la empresa. A continuación, se muestra la nomenclatura utilizada en este estudio.

$R$ : referencia de la cadena  $r \in R$

$N$ : importación  $n \in N$

$K_r$ : costo total de pedir la referencia  $r \in R$

$C_r$ : costo total de adquirir la referencia  $r \in R$

$h_r$ : costo de mantener la referencia  $r \in R$

$p_r$ : costo por faltantes de la referencia  $r \in R$

$k_{rn}$ : costo de pedir la referencia  $r \in R$  en la importación  $n \in N$

$c_{rn}$ : costo de adquirir la referencia  $r \in R$  en la importación  $n \in N$

$u_{rn}$ : número de unidades pedidas de la categoría  $c \in C$  en la importación  $n \in N$

$w_{rn}$ : peso de las unidades pedidas de la referencia  $r \in R$  en la importación  $n \in N$

$v_r$ : precio de venta de la referencia  $r \in R$

Para determinar el costo de pedido  $k_n$  para la referencia 40-1, se consideró el porcentaje de participación del producto con respecto al costo total de los productos, y se multiplicó por el valor de la importación. Este proceso se hace para cada una de las cuatro importaciones con el fin de obtener el costo de pedir para cada una de ellas. Los precios fueron los siguientes: \$21 063 300,00, equivalentes al 8 % del valor total de la primera importación; \$114 521 400,00, correspondientes al 33 % del valor total de la segunda importación; \$13 740 860,00, que representan el 4,8 % del valor de la tercera importación. Posteriormente, se realizó la multiplicación del precio de pedido de cada importación por su porcentaje respectivo para obtener el  $k$  de cada importación.

$$k_{40-1,1} = \$6\,247\,500 * 8 \% = \$516\,731,51$$

$$k_{40-1,2} = \$6\,792\,000 * 4,8 \% = \$328\,798,98$$

$$k_{40-1,3} = \$6\,138\,000 * 33 \% = \$2\,029\,873,03$$

Después de obtener los valores para cada  $k_n$ , se procede a multiplicarlos por el porcentaje que abarca la importación  $n$  en el total de las unidades pedidas durante el periodo contemplado. Es decir, en la primera importación se pidieron 3050 unidades y el total de unidades pedidas en los 21 meses fue de 23 857; entonces, el peso de la importación 1 será el número de unidades pedidas en la importación sobre el total de unidades pedidas.

$$w_{40-1,1} = \frac{u_{40-1,1}}{\sum_{n \in N} u_{40-1,n}} = 12,78 \%$$

Obteniendo los pesos de cada una de las importaciones, se multiplicaron por el respectivo costo de pedir para cada importación.

$$K_{40-1} = \sum_{n \in N} w_{40-1,n} * k_{40-1,n} = \$1\,678\,974,20 \text{ (COP)}$$

Los costos de adquirir  $C$  para la referencia 40-1 en cada una de las importaciones se muestran a continuación:

$$c_{40-1,1} = \$6906, c_{40-1,2} = \$6258,00, c_{40-1,3} = \$6436,00$$

Con estos costos se realizó una suma producto entre los valores de adquirir y los pesos de la importación  $p_{rn}$ .

$$C_{40-1} = \sum_{n \in N} c_{40-1,n} * w_{40-1,n} = \$6357,32$$

Para el cálculo del costo de inventario  $h$ , se asumió una tasa de mantener el inventario del 2 % mensual. Se obtuvo el siguiente costo de inventario por mes:

$$h = 2 \% * C_{40-1} = \$127,15$$

Para el cálculo de costos por faltantes, se realizó lo siguiente (pues es un costo unitario):

$$C_{40-1} - v_{40-1} = \$10\,000,00 - \$6357,32 = \$3642,68$$

Después de analizar los datos, se observó que algunos periodos no registraron ventas debido a la falta de inventario en ciertas referencias. Para minimizar el impacto de estos faltantes en el análisis de la cantidad a pedir y los costos asociados, se decidió sustituir estos periodos sin ventas por el promedio de la demanda. Este ajuste permite un análisis más representativo al considerar la demanda potencial en los meses afectados por la escasez de inventario.

Para el escenario determinístico, se tuvo en cuenta la heurística POQ, que determinó una cantidad económica  $EOQ = \sqrt{\frac{2K_n D(h+p)}{h * p}}$ , donde  $D$  es igual al promedio de la demanda de los 21 meses contemplados. Para encontrar  $T$  dividimos la cantidad EOQ por la demanda,  $T = \frac{EOQ}{D}$  (Nahmias, 2007). El costo por faltantes para cada categoría  $n$  se obtuvo calculando el número de periodos en los que no se vendió una unidad de dicha categoría, luego se dividió por el número total de periodos analizados para obtener el porcentaje en el que hubo faltantes. Posteriormente, se multiplica la demanda de cada mes por el porcentaje de faltantes y se multiplica por el costo de faltantes asociado a la categoría  $n$ .

Para la heurística Silver-Meal, en la cual se evalúa en qué periodo es más económico pedir la demanda de los siguientes hasta que se alcance la demanda esperada (Nahmias, 2007). Para el cálculo de pronósticos, se evalúa la tendencia que siguen las ventas de los 21 meses. Puede haber cuatro tipos de comportamiento: estacionario, con tendencia, con estacionalidad, y con tendencia y estacionalidad. Después de eso se determina el método de pronóstico por analizar.

Si la demanda tiene comportamiento estacionario, se utilizará la suavización exponencial simple, que inicializa el pronóstico con el promedio de los datos y continúa con el pronóstico del periodo:  $F_t = aD_{t-1} + (1 - a)F_{t-1}$ . Ya con el pronóstico de todos los meses, se encuentra el error:  $e_t = F_t - D_t$ . Posteriormente, se halla el error medio:  $ME = \frac{\sum e_t}{n}$ , y se minimiza el  $a$ ,  $MIN a$ , donde  $0,1 < a < 0,3$ , como muestra Nahmias (2007).

Una vez establecida la política de inventarios basada en el método teórico propuesto, comenzó la aplicación práctica integrando decisiones del modelo en los procesos operativos de la empresa, e implementando políticas de reorden y niveles de inventario óptimos. Durante esta fase, se monitorearon los niveles de inventario y costos, realizando un análisis comparativo con prácticas anteriores para evaluar la eficacia de la nueva política. Se observaron métricas como los niveles de inventario, costos operativos y eficiencia en la gestión de la demanda. Se identificaron desafíos y áreas de mejora, ajustando la política según fuese necesario. Las conclusiones del análisis destacaron que la nueva política mejoró la optimización de costos, la respuesta a la demanda variable y la mitigación de riesgos de importación. Se propusieron recomendaciones para futuros ajustes, promoviendo un enfoque dinámico y adaptable a cambios del mercado. Esta fase no solo marcó el fin del ciclo de implementación, sino que también sentó las bases para una mejora continua e innovación en la gestión de inventarios, alineada con los objetivos organizativos y las exigencias del entorno empresarial.

## RESULTADOS

### Evaluación del escenario actual

La Tabla 1 muestra los resultados de costos por categoría de producto para el escenario actual. La categoría 40-1 tiene el mayor costo de pedido debido a la alta cantidad de unidades solicitadas y al espacio que ocupa en el contenedor. Por ejemplo, en la importación de julio del 2022, la categoría 40-1 representó más del 60 % del espacio del contenedor. Las cadenas 160-1 y 100-1 presentan altos costos de adquisición por su gran tamaño, mientras que la 40-1 resulta ser la más económica gracias a la gran cantidad que se solicita a la fábrica.



**Tabla 1**

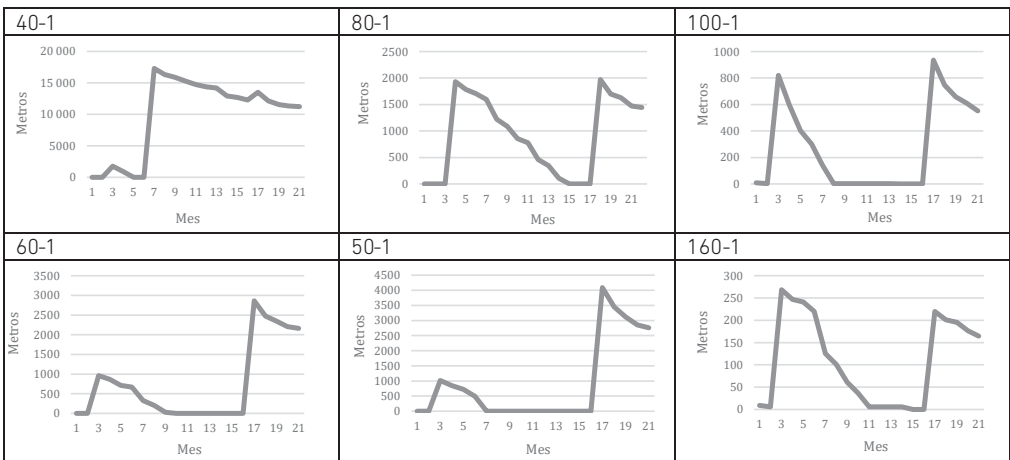
*Costos por categoría de productos para el escenario actual*

	r = 40-1	r = 80-1	r = 100-1	r = 60-1	r = 50-1	r = 160-1
$K_r$	\$1 678 974,20	\$1 291 010,19	\$1 273 089,78	\$847 573,75	\$966 717,48	\$730 483,41
$C_r$	\$6357,32	\$25 296,67	\$38 428,25	\$14 196,03	\$9 813,00	\$94 464,00
$h_r$	\$127,15	\$505,93	\$768,57	\$283,92	\$196,26	\$1889,28
$p_r$	\$3642,68	\$14 703,33	\$18 071,75	\$8303,97	\$5987,00	\$43 036,00

En la Figura 3 se observa la variabilidad en el inventario de la cadena 40-1: ausencias totales de stock durante cuatro meses y niveles bajo 5000 metros en los primeros seis meses. Aumentos significativos ocurren en los meses 3, 7 y 17, más notable en el mes 7, cuando el inventario supera los 15 000 metros. Si bien se incrementan los costos de mantenimiento, se reduce la necesidad de pedidos futuros. En contraste, la cadena 80-1 tiene un patrón más estable, con alrededor de 2000 metros, pero enfrenta tres meses de desabastecimiento antes de cada pedido, lo que afecta las ventas. La cadena 100-1 muestra 10 meses sin inventario, lo que indica pérdidas significativas en ventas. Las cadenas 60-1 y 50-1 reflejan variabilidad, con pedidos que aumentan considerablemente tras periodos sin stock, mientras que la cadena 160-1 tiene dos importantes recepciones de mercancía, aunque el último pedido fue menor pese a la escasez previa, desviándose de la política habitual de aumentar pedidos tras un desabastecimiento.

**Figura 3**

*Inventarios por categoría de productos para el escenario actual*



La Tabla 2 detalla los costos de operación para seis referencias de productos durante 21 meses, categorizados en costos de pedir, adquirir y mantener. La referencia 40-1 resulta ser la más costosa con un total de \$183 208 118,51, principalmente por los altos costos de adquisición (\$151 666 565,60) y mantenimiento (\$26 504 630,31). La referencia 100-1 también presenta costos significativos, aunque menores, sumando \$100 764 175,17. Las referencias 60-1 y 50-1 tienen costos totales de \$90 620 287,17 y \$78 781 707,11 respectivamente, influenciados principalmente por los costos de adquisición. Finalmente, la referencia 160-1 tiene el costo total más bajo de \$65 555 074,21, pero con un costo de mantenimiento relativamente alto en comparación con su costo de adquisición. Estos datos subrayan la variabilidad de los costos asociados a cada referencia y la importancia de su consideración en la gestión de inventarios.

**Tabla 2**

*Costos totales de operación en 21 meses para el escenario actual*

Referencia	40-1	80-1	100-1
Costo de pedir	\$5 036 922,60	\$2 582 020,38	\$2 546 179,56
Costo de adquirir	\$151 666 565,60	\$115 732 250,00	\$93 764 930,00
Costo de mantener	\$26 504 630,31	\$11 244 165,96	\$4 453 065,61
Costo total	\$183 208 118,51	\$129 558 436,34	\$100 764 175,17
Referencia	60-1	50-1	160-1
Costo de pedir	\$1 695 147,50	\$1 933 434,97	\$1 460 966,82
Costo de adquirir	\$84 430 862,50	\$74 824 125,00	\$57 623 040,00
Costo de mantener	\$4 494 277,17	\$2 024 147,14	\$6 471 067,39
Costo total	\$90 620 287,17	\$78 781 707,11	\$65 555 074,21

### Resultado para el escenario determinístico

Las heurísticas POQ y Silver-Meal fueron evaluadas utilizando la demanda actual para determinar cuál de ellas reduce más efectivamente los costos. La heurística POQ resultó ser más viable, ya que permite establecer un periodo de ciclo fijo, facilitando la evaluación de costos para las seis categorías analizadas bajo un mismo intervalo de tiempo ( $T$ ). En cambio, la heurística Silver-Meal mostró una variabilidad significativa en los tiempos económicos de pedido para cada referencia, como se observa en la Figura 4 (los cuadros sombreados indican el periodo en que se pide), lo que llevó a su descarte. Finalmente, se decidió emplear la heurística POQ con periodos de ciclo fijos de seis y siete meses ( $T = 6$  y  $T = 7$ ) para simplificar y unificar el proceso de pedido.

**Figura 4**

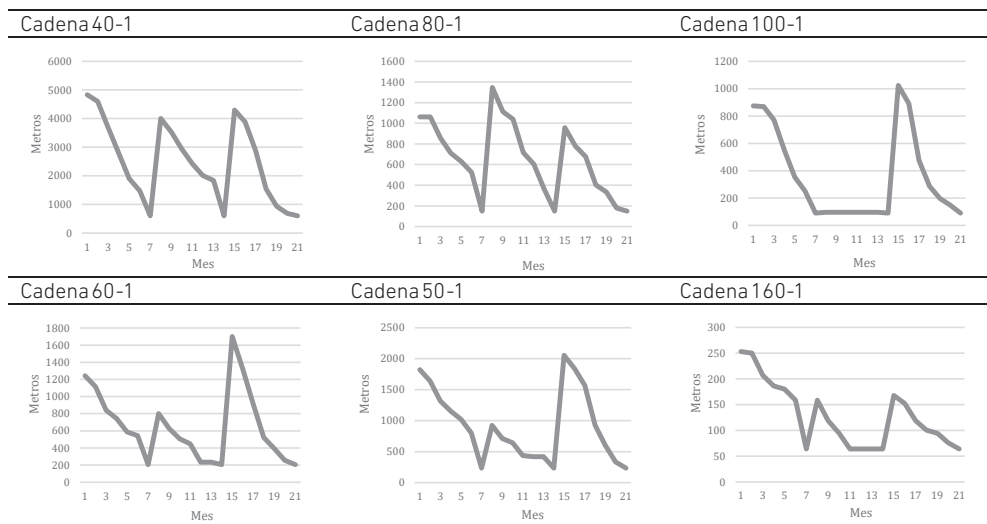
*Tiempos de pedido según la política Silver-Meal*

		Silver Meal																									
Mes	Aug-21	Sep-21	Oct-21	Nov-21	Dec-21	Jan-22	Feb-22	Mar-22	Apr-22	May-22	Jun-22	Jul-22	Aug-22	Sep-22	Oct-22	Nov-22	Dec-22	Jan-23	Feb-23	Mar-23	Apr-23	May-23	Jun-23	Jul-23	Aug-23	Sep-23	
40-1																											
80-1																											
100-1																											
60-1																											
50-1																											
160-1																											

La Figura 5 muestra que el inventario de todas las referencias se mantiene sin agotarse completamente, gracias a la implementación de un *stock* de seguridad. Este método reduce el riesgo de desabastecimiento y cubre la demanda continua, aunque aumenta los costos de mantenimiento del inventario. En el análisis actual, se observa que más de tres referencias experimentaron agotamientos temporales, destacando el impacto económico de mantener un alto nivel de *stock* de seguridad. En cuanto a las cadenas 40-1, 60-1, 50-1 y 160-1, todas exhiben un patrón de inventario regular con un ciclo definido que alcanza el nivel de seguridad antes de hacer nuevos pedidos. Las cadenas 60-1 y 50-1, sin embargo, presentan variabilidad en las ventas que requiere ajustes en los pedidos. La cadena 100-1, aunque con un ciclo no definido y siete meses sin ventas, sigue un patrón similar.

**Figura 5**

*Inventarios por categoría para un escenario determinístico*



La Tabla 3 resume los costos totales de operación de seis referencias de producto durante 21 meses en un escenario determinístico, incluyendo costos de pedir, de adquirir, de mantener y por faltantes. La referencia 40-1 muestra un alto costo total de \$95 970 183,67, principalmente por adquisición y mantenimiento, sin incurrir en costos

por faltantes. En contraste, la 80-1 tiene el costo total más alto de \$121 919 283,84, inflado por \$4 802 415,40 en costos por faltantes. La 100-1 presenta el mayor costo por faltantes de \$12 600 730,53, contribuyendo a un total de \$86 027 161,18. Las referencias 60-1, 50-1 y 160-1 también registran costos totales considerables; sobresale la 160-1 por \$4 434 854,92 en costos por faltantes.

**Tabla 3**

*Costos totales de operación en 21 meses para un escenario determinístico*

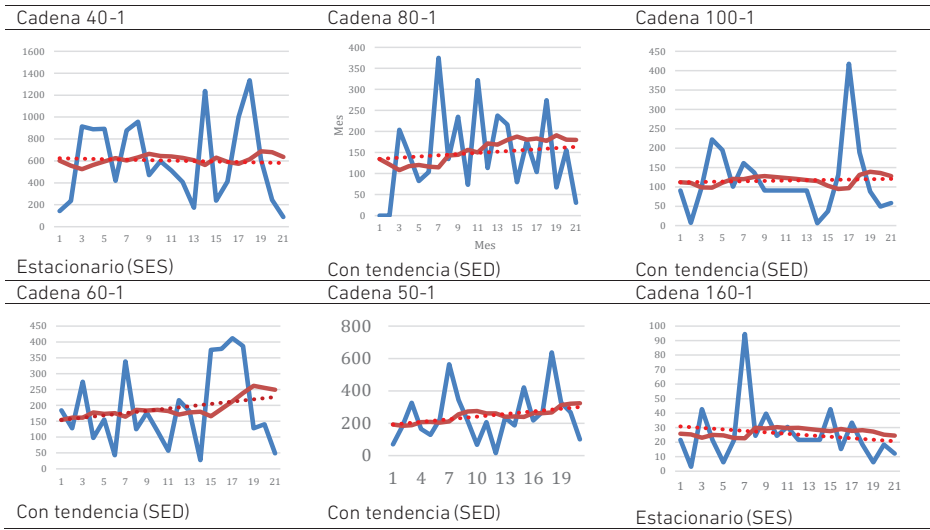
	40-1	80-1	100-1
Costo de pedir	\$5 036 922,60	\$3 873 030,57	\$3 819 269,34
Costo de adquirir	\$84 312 221,14	\$82 983 426,25	\$76 414 026,15
Costo de mantener	\$6 621 039,94	\$6 983 473,69	\$5 793 865,68
Costo por faltantes	\$0	\$4 802 415,40	\$12 600 730,53
Costo total	\$95 970 183,67	\$121 919 283,84	\$86 027 161,18
	60-1	50-1	160-1
Costo de pedir	\$2 542 721,25	\$2 900 152,45	\$2 191 450,23
Costo de adquirir	\$56 711 500,03	\$50 092 865,02	\$42 929 164,80
Costo de mantener	\$3 880 100,32	\$3 810 603,79	\$5 226 409,73
Costo por faltantes	\$1 579 687,07	\$1 473 598,91	\$4 434 854,92
Costo total	\$67 723 891,75	\$60 969 186,46	\$60 669 308,00

**Pronósticos y aplicación de la política adecuada**

La Figura 6 compara la demanda real con los pronósticos para seis cadenas de productos utilizando modelos estacionarios (SES) y con tendencia (SED) a lo largo de 21 meses. En cadenas como la 40-1 y 160-1, donde se aplicó el modelo estacionario, los pronósticos se alinean razonablemente bien con la demanda plana, aunque no captan completamente los picos. Para las cadenas 80-1, 100-1, 60-1 y 50-1, modeladas con tendencia, los pronósticos siguen la tendencia general, pero fallan en prever picos abruptos y variaciones agudas, especialmente notable en la cadena 100-1 hacia el final del periodo.

**Figura 6**

*Demanda vs. pronóstico*



La Tabla 4 presenta los costos totales proyectados durante un periodo de 12 meses para seis referencias de producto. La referencia 80-1 registra el costo total más alto con \$88 120 436,58, dominado por un elevado costo de adquisición de \$76 799 770,42. En comparación, la referencia 100-1 también tiene costos significativos, que suman \$60 069 111,41, con un costo de adquisición de \$54 340 354,79. Las referencias 40-1 y 60-1 muestran costos totales de \$43 091 670,44 y \$44 122 102,96, respectivamente, cuyo costo de adquisición es el componente más grande para ambas. La referencia 50-1 cuenta con un costo total de \$41 040 800,70, y la referencia 160-1 posee el costo total más bajo entre los productos analizados, con \$21 921 292,82, lo que refleja costos más equilibrados entre pedir, adquirir y mantener.

**Tabla 4**

*Costos totales a 12 meses para los datos pronosticados*

	40-1	80-1	100-1
Costo de pedir	\$1 678 974,20	\$2 582 020,38	\$3 819 269,34
Costo de adquirir	\$36 978 991,32	\$76 799 770,42	\$54 340 354,79
Costo de mantener	\$4 433 704,93	\$8 738 645,78	\$1 909 487,27
Costo total	\$43 091 670,44	\$88 120 436,58	\$60 069 111,41

(continúa)

(continuación)

	60-1	50-1	160-1
Costo de pedir	\$2 542 721,25	\$1 933 434,97	\$1 460 966,82
Costo de adquirir	\$40 168 509,49	\$37 057 644,05	\$18 663 257,91
Costo de mantener	\$1 410 872,22	\$2 049 721,68	\$1 797 068,09
Costo total	\$44 122 102,96	\$41 040 800,70	\$21 921 292,82

### Resultados del escenario estocástico

Para el escenario determinístico, se planteó el análisis utilizando los modelos  $Q$ ,  $R$  y  $S$ ,  $T$ ; si bien ambos son factibles, el modelo que más se ajusta a la cadena de abastecimiento de la compañía es un modelo  $S$ ,  $T$ , ya que define un periodo de tiempo fijo en el cual se debe realizar la orden y se calculará cuántas unidades de cada categoría faltan para alcanzar el nivel deseado de inventario. Para la realización de este método, se utilizan los mismos valores de  $k$ ,  $c$ ,  $h$ ,  $p$ , del escenario actual, puesto que se van a considerar todos los escenarios con las mismas condiciones y datos históricos. Para la media  $\mu$ , se tomó el promedio de los datos. Para la desviación  $\sigma$ , se tomó la desviación poblacional de los datos. Todos estos datos por referencia se pueden apreciar en la Tabla 5.

**Tabla 5**

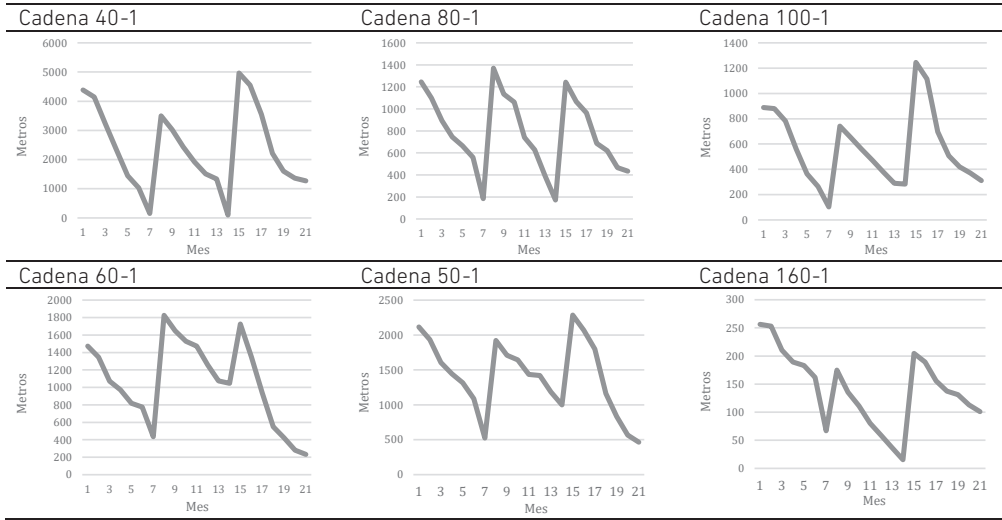
*Parámetros para el escenario estocástico por referencia*

	40-1	80-1	100-1	60-1	50-1	160-1
$\mu$	602,83	163,31	116,21	190,23	246,13	25,76
$\sigma$	371,27	88,82	89,52	123,06	154,70265	19,22
$a$	77 %	76 %	70 %	76 %	77 %	69 %
$Q$	3990	912,94	620,48	1065,73	1557,162	141,15
$T$	7	7	7	7	7	7
$S$	8179,82	2036,93	2211,63	2584,8	3350,49	342,67
$SS$	945,87	251,91	164,67	302,01	396,89	33,52

La Figura 7 muestra los inventarios de seis categorías de productos bajo un escenario estocástico a lo largo de 21 meses. Cada gráfico revela fluctuaciones notables en los niveles de inventario. La cadena 40-1 experimenta oscilaciones significativas, alcanzando picos y valles pronunciados. De manera similar, las cadenas 80-1 y 100-1 exhiben patrones de alza y baja con cierta regularidad. Las cadenas 60-1 y 50-1 también reflejan variabilidad en sus inventarios, con subidas y bajadas en el tiempo, aunque la cadena 50-1 presenta un pico particularmente alto hacia la mitad del periodo observado. Por último, la cadena 160-1, aunque con menos amplitud en las fluctuaciones, sigue un patrón de picos y caídas.

**Figura 7**

*Inventarios por categoría para el escenario estocástico*



La Tabla 5 presenta los costos totales de operación para seis categorías de productos durante un periodo de 21 meses en un escenario estocástico, desglosando los costos en ordenar, adquirir, mantener y faltantes. En todas las categorías, el costo de adquirir domina el gasto total. Para la referencia 40-1, los costos ascienden a \$95 259 517 con un notable monto asignado a faltantes de \$90 013,55. La 80-1 y 100-1 tienen costos totales de \$93 465 120,48 y \$109 989 738,79 respectivamente, pero también muestran cifras significativas en faltantes. Las referencias 60-1, 50-1 y 160-1 tienen costos totales de \$66 520 560,27, \$60 090 978,46 y \$59 895 803,09 respectivamente, entre las cuales la 160-1 presenta el menor costo en faltantes con \$80 514,93.

**Tabla 5**

*Costos totales de operación para 21 meses para el escenario estocástico*

	40-1	80-1	100-1
Ordenar	\$239 853	\$184 430	\$181 870
Adquirir	\$3 832 374	\$3 771 974	\$4 465 755
Mantener	\$373 927	\$389 314	\$439 162
Faltantes	\$90 013 55	\$105 001,75	\$150 820,35
Total (mes)	\$4 536 168	\$4 450 720	\$5 237 607
Total (periodo)	\$95 259 517	\$93 465 120,48	\$109 989 738,79

(continúa)

(continuación)

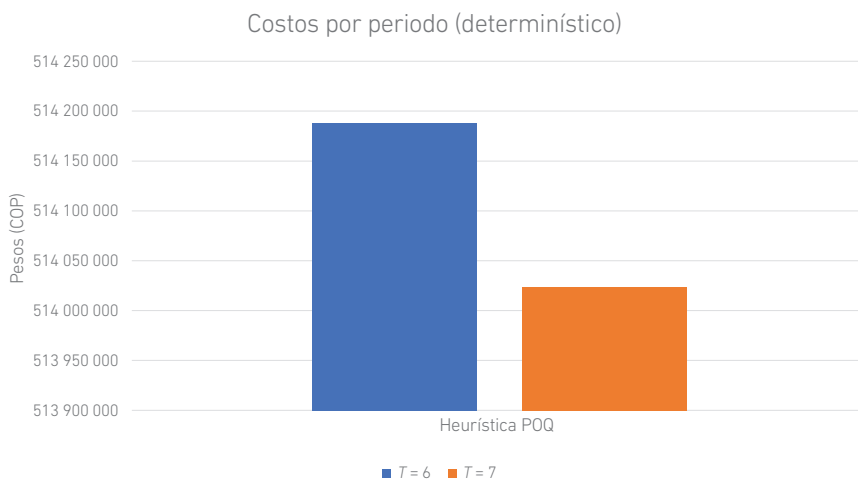
	60-1	50-1	160-1
Ordenar	\$121 082	\$138 102	\$104 355
Adquirir	\$2 700 548	\$2 415 304	\$2 433 626
Mantener	\$274 785	\$246 966	\$233 685
Faltantes	\$71 230,79	\$61 102,97	\$80 514 93
Total (mes)	\$3 167 646	\$2 861 475	\$2 852 181
Total (periodo)	\$66 520 560,27	\$60 090 978,46	\$59 895 803,99

### Comparación de costos

En la comparación de las dos mejores instancias para el método determinístico, que se expone en la Figura 8, se evaluaron los periodos  $T = 6$  y  $T = 7$ . Al analizar los costos, se encontró que realizar pedidos cada siete meses permite a la empresa ahorrar \$ 164 256,65. Aunque este ahorro no es considerablemente alto, contribuye a la reducción de costos operativos. Por lo tanto, se decidió adoptar un ciclo de pedido de cada siete meses ( $T = 7$ ) como la estrategia más costo-efectiva.

**Figura 8**

Comparación de costos por periodo para escenario determinístico

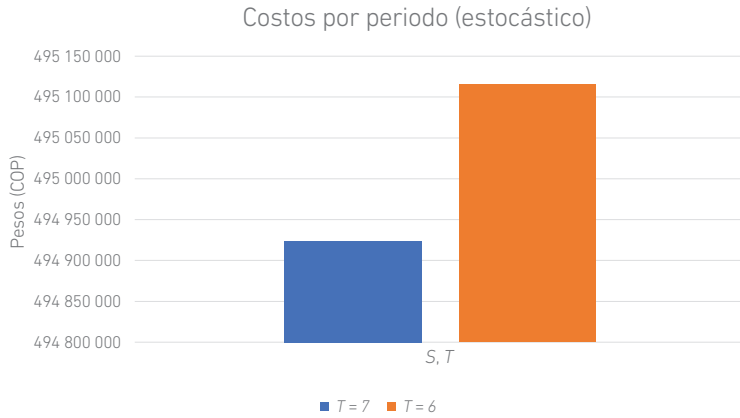


La Figura 9 muestra una comparación de los costos operativos para dos periodos de revisión del inventario bajo un escenario estocástico, específicamente con ciclos de pedido  $T = 7$  y  $T = 6$ . En el gráfico, se observa que el costo total para el ciclo  $T = 7$  es aproximadamente \$493 700 000, mientras que para el ciclo  $T = 6$  es cercano a \$494 300 000, lo que evidencia un ahorro al optar por un ciclo de pedido más largo ( $T = 7$ ). Aunque la reducción no es significativamente grande, representa una disminución en los costos operativos en comparación con el ciclo más corto ( $T = 6$ ).



**Figura 9**

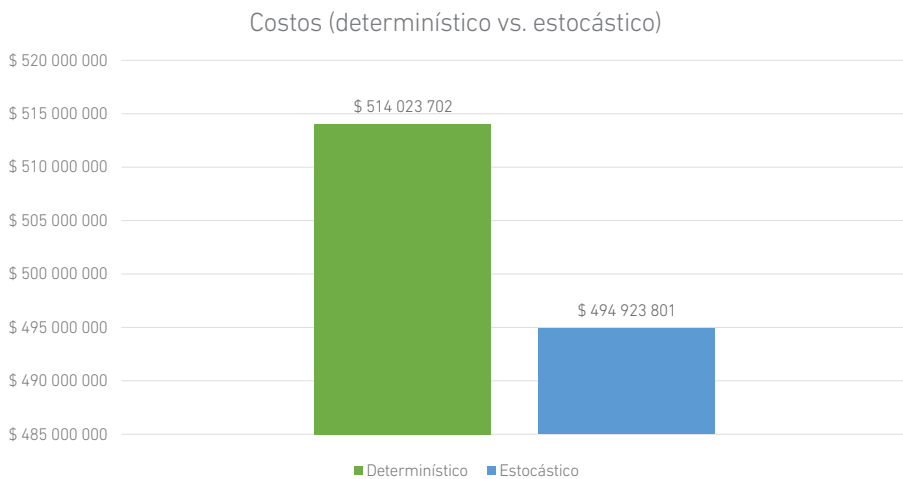
Tabla de comparación de costos por periodo para escenario estocástico



La Figura 10 ilustra una comparación de los costos totales asociados con dos enfoques de gestión de inventario: determinístico y estocástico. Según el gráfico, el enfoque determinístico incurre en un costo considerablemente más alto, que asciende a \$514 023 701,52, en comparación con el enfoque estocástico, que presenta un costo de \$494 923 801,31. Esto sugiere que, en este caso, el enfoque estocástico es más eficiente desde el punto de vista de costos, ahorrando aproximadamente \$20 358 187,21, lo que indica una ventaja económica en optar por métodos que consideren la variabilidad y la incertidumbre inherentes en la gestión del inventario.

**Figura 10**

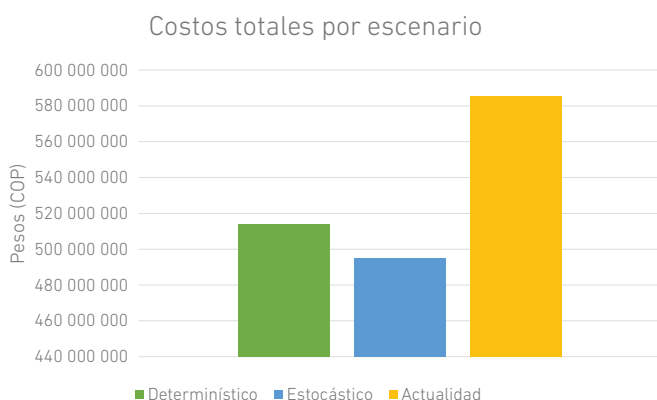
Diagrama de costos por cada alternativa



La Figura 11 muestra los costos totales asociados con tres diferentes escenarios de gestión de inventario: determinístico, estocástico y la situación actual de la empresa. Según el gráfico, el escenario actual es el más costoso, con un gasto total cercano a \$580 000 000. En contraste, el escenario determinístico presenta costos significativamente más bajos, aproximadamente \$500 000 000, mientras que el escenario estocástico presenta el costo más reducido de los tres, alrededor de \$480 000 000. Este análisis sugiere que tanto los enfoques determinístico como estocástico de gestión de inventario resultan en ahorros considerables en comparación con el enfoque actual, pero destaca especialmente la eficiencia del modelo estocástico en términos de costos.

**Figura 11**

*Diagrama de costos por cada alternativa*



## DISCUSIÓN

La implementación efectiva de modelos determinísticos y estocásticos en la gestión de inventarios ha mostrado un impacto significativo en la reducción de periodos sin inventario, en contraste con el escenario actual, que presenta riesgos de desabastecimiento considerable. Según investigaciones de Bai y Zhong (2008), la elección del modelo de inventario adecuado puede variar ampliamente dependiendo de las condiciones del mercado y la variabilidad de los proveedores, lo que resalta la necesidad de un enfoque adaptable y sensible a contextos internacionales. Tanto el modelo determinístico, con opciones de  $T = 6$  y  $T = 7$ , como el estocástico (método  $S, T$ ) han optimizado la gestión de inventarios, como sostienen Parga-Prieto y Aranda-Pinilla (2018) al destacar la utilidad de técnicas heurísticas avanzadas para ajustar los periodos de pedido en función de las demandas del mercado.

Además, la introducción de un inventario de seguridad en ambos modelos representa un cambio estratégico crucial en la gestión de inventarios, siguiendo las sugerencias de

González (2020) sobre la importancia de utilizar coeficientes de variación y suavización exponencial para responder a cambios en la demanda. Este enfoque es especialmente relevante en industrias como la textil y la de productos perecederos, donde, según Triana (2022) y Rodríguez y Vidal (2009), es crítico adaptar los métodos de pedido para gestionar eficazmente las peculiaridades de la demanda estacional y los ciclos de vida cortos. El inventario de seguridad ha probado ser esencial para mitigar riesgos y asegurar una operatividad continua, reflejando la innovación y mejora continua en los procesos de inventario, como mencionan Rojas Mancipe (2011) y Silva Gómez (2017).

Estos ajustes estratégicos no solo fortalecerán la estabilidad operativa de la empresa, sino que también reducirán significativamente los costos asociados con la escasez de inventario. Esto demuestra la importancia de adaptar estrategias de inventario para enfrentar efectivamente la variabilidad en la demanda y los desafíos en la cadena de suministro.

## CONCLUSIONES

La implementación del método determinístico mediante la heurística POQ ha demostrado que un tiempo de ciclo de siete meses optimiza los costos de gestión de inventarios y aumenta la robustez del sistema frente a fluctuaciones de demanda. Este método ha mejorado notablemente la eficiencia en la gestión de inventarios, aunque es vital continuar monitoreando y adaptando las estrategias debido a la variabilidad de la demanda. En contraste, el escenario actual carece de un ciclo definido, lo que ha llevado a frecuentes faltantes y excesos de inventario, lo que indica desequilibrios entre la oferta y la demanda, y genera costos adicionales.

Por otro lado, el método estocástico, específicamente el modelo  $(S, T)$ , ha resultado ser más rentable en comparación con el escenario actual y el determinístico, principalmente por la reducción de faltantes y la homogeneidad en el comportamiento del inventario. La adopción de un ciclo de pedidos cada siete meses ha equilibrado efectivamente la oferta y la demanda, facilitando una gestión más coherente y previniendo escasez o excesos. Este modelo estocástico se adapta mejor a la variabilidad y la incertidumbre del mercado, permitiendo a la empresa responder de manera más efectiva a los cambios del entorno.

En conclusión, la transición al modelo estocástico  $(S, T)$  y la frecuencia de pedidos cada siete meses mejorarían significativamente la gestión de inventarios. La implementación de un *stock* de seguridad y la elección adecuada de estrategias, como la heurística POQ, contribuirían a una cadena de suministro más eficiente y adaptable. Dada la variabilidad inherente en la demanda del mercado, se recomienda utilizar modelos estocásticos que consideren la incertidumbre y permitan una planificación más flexible

y dinámica, en contraste con los modelos determinísticos, que asumen una demanda constante y predecible.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Para la investigación titulada “Gestión de inventarios de una compañía importadora de repuestos de transmisión de potencia de maquinaria pesada”, los autores declaran que no existen conflictos de intereses financieros, personales o profesionales que puedan influir en los resultados del estudio. Ninguno de los autores ha recibido financiamiento o mantiene relaciones que puedan afectar la objetividad e integridad de esta investigación.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

**Mateo Núñez-Oviedo:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, *software*, visualización, escritura: borrador-original, redacción: revisión y edición. **Luis Tarazona-Torres:** conceptualización, metodología, supervisión, validación, redacción: revisión y edición.

## REFERENCIAS

- Alves, P., Delgado, K., Freire, A., & Silva, V. (2017). Sistema para resolver o problema de roteamento e inventário com demanda estocástica: comparando diferentes heurísticas na relaxação lagrangeana. En J. M. David & A. Pimienta (Coords.), *2017: Actas del XIII Simposio Brasileño de Sistemas de Información* (pp. 555-562). <https://doi.org/10.5753/sbsi.2017.6087>
- Arango, M. D., Adarme-Jaimes, W., & Otorno, M. A. (2011). Coordinación de abastecimiento con información compartida en pymes agroalimentarias colombianas. *DYNA*, *78*(167), 203-212. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8748>
- Ardila, J. A. (2010). *Selección de un modelo de coordinación de inventarios para la bodega y farmacias auxiliares de un hospital público en Bogotá* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca de la Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/11490>
- Bai, L., & Zhong, Y. (2008). *Improving inventory management in small business: A case study* [Tesis de maestría, Universidad de Jönköping]. Repositorio Institucional de la Universidad de Jönköping. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Ahj%3Adiva-1136>
- Ballou, R. H. (2004). *Logística. Administración de la cadena de suministro*. Pearson Educación.

- Baron, O., Berman, O., & Perry, D. (2017). Continuous review inventory models for perishable items with leadtimes. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 34(3), 317-342. <https://doi.org/10.1017/S0269964817000225>
- Carvajal, J., & Amaya, C. (2011). *Un enfoque mate-heurístico para solucionar el problema de distribución e inventario con múltiples productos, múltiples minoristas y un solo centro de distribución con restricciones de presupuesto, un caso de estudio: sistema de abastecimiento de medicamentos en una caja de compensación familiar, seccional salud* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca de la Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/11360>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación* (3.ª ed.). Pearson Educación.
- Contreras Juárez, A., Atziry Zúñiga, C., Martínez Flores, J. L., & Sánchez Partida, D. (2018). Gestión de políticas de inventario en el almacenamiento de materiales de acero para la construcción. *Revista Ingeniería Industrial*, 17(1), 5-22. <https://doi.org/10.22320/S07179103/2018.01>
- Gonçalves, J. N. C., Carvalho, M. S., & Cortez, P. (2020). Operations research models and methods for safety stock determination: A review. *Operations Research Perspectives*, 7, 100164 <http://dx.doi.org/10.1016/j.orp.2020.100164>
- González, A. (2020). Un modelo de gestión de inventarios basado en estrategia competitiva. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 28(1), 133-142. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000100133>
- Guzmán-Camacho, C. H., Salazar-Sanabria, H., & Adarme-Jaimes, W. (2014). Coordinación de inventarios en la recolección de leche cruda. Caso región Sugamuxi-Colombia. *DYNA*, 81(186), 259-266. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.45216>
- Martínez Arteaga, M. F. (2016). *Diagnóstico del control de inventarios en las panaderías de tipo microempresa de la ciudad de Pasto (Colombia) y modelo matemático para la gestión de inventarios* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca de la Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/13938>
- Monisola, O. (2013). An assessment of inventory management in small and medium scale industrial enterprises in Nigeria. *European Journal of Business and Management*, 5(28), 150-158. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/EJBM/article/view/8727>
- Nahmias, S. (2007). *Análisis de la producción y las operaciones* (5.ª ed.). McGraw Hill.
- Parga-Prieto, A. T., & Aranda-Pinilla, J. A. (2018). Políticas de inventario para demandas con tendencia y aleatoriedad. Caso comercializadora de lubricantes. *Inventum*, 13(24), 50-57. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.13.24.2018.50-57>

- Pérez Hualtibamba, M. M., & Wong Aitken, H. G. (2018). Gestión de inventarios en la empresa SOHO Color Salón & Spa en Trujillo (Perú), en 2018. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 14(27). <https://doi.org/10.18270/cuaderlam.v14i27.2457>
- Rangel Vega, L. (2016). *Definir el modelo de gestión de inventarios para múltiples productos, dentro del procedimiento de compras en Civalco Ltda.* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca de la Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/13789>
- Restrepo, M. C., Chamorro, C., & Carvajal, D. (2020). El control interno de los inventarios: su incidencia en la gestión financiera de “Due Amici Pizzería”. *Revista Activos*, 18(2), 137-163. <https://doi.org/10.15332/25005278/6264>
- Rodríguez, J. A., & Vidal, C. J. (2009). A heuristic method for the inventory control of short life-cycle products. *Ingeniería y Competitividad*, 11(1), 37-55. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323535004>
- Rojas Mancipe, A. (2011). *Simulación de una cadena de abastecimiento productor-comprador con un mecanismo de coordinación de inventarios según el modelo VMI con demanda estocástica* [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca de la Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/14742>
- Silva Gómez, J. (2017). *Programación de pedidos y optimización de la cadena de suministro de Black Jack Importaciones SAS* [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca de la Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/61863>
- Triana, I. D. (2022). *Modelo de inventarios bajo demandas estacionales* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca de la Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/57461>
- Wiśniewski, J. W. (2021). Forecasting in small business management. *Risks*, 9(4), 69. <https://doi.org/10.3390/risks9040069>

# MITIGACIÓN DE RIESGOS DISERGNÓMICOS: MANIPULACIÓN MANUAL DE ESTRUCTURAS METÁLICAS PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ELECTRICIDAD

YOBER JENRY ARTEAGA-IRENE\*

<https://orcid.org/0000-0001-7965-9876>

Departamento de Producción y Gestión Industrial, Facultad de Ingeniería Industrial,  
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

KATHERINE PRETEL-RUIZ

<https://orcid.org/0009-0000-2630-7738>

Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Industrial,  
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

ROCÍO SHIRLY CHAUPIS-RAMOS

<https://orcid.org/0009-0000-4681-2352>

Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Industrial,  
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

DANNY DANIEL MEDINA-AGUILAR

<https://orcid.org/0009-0002-7745-6295>

Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Industrial,  
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Recibido: 16 de mayo del 2024 / Aceptado: 2 de julio del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7124>

**RESUMEN.** La energía eléctrica es un *commodity* fundamental para la sociedad. Sin embargo, la instalación y el montaje de la infraestructura para su generación y distribución plantean desafíos ergonómicos intrincados para los trabajadores. En este contexto, el objetivo del estudio fue evaluar y mitigar los riesgos disergonómicos relacionados con las actividades de carga y descarga de estructuras metálicas de líneas de transmisión de

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [yarteagai@unmsm.edu.pe](mailto:yarteagai@unmsm.edu.pe); [katherine.pretel@unmsm.edu.pe](mailto:katherine.pretel@unmsm.edu.pe); [rocio.chaupis@unmsm.edu.pe](mailto:rocio.chaupis@unmsm.edu.pe); [danny.medina@unmsm.edu.pe](mailto:danny.medina@unmsm.edu.pe)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

electricidad. La investigación identificó inicialmente las zonas de incomodidad mediante el diagrama de Corlett y Bishop, seguido por la clasificación de posturas a través del método REBA. Posteriormente, los niveles de riesgo se cuantificaron utilizando el *software* Ergonautas y, finalmente, se formularon e implementaron acciones de mejora para mitigar los riesgos identificados. Los resultados revelaron incomodidad prevalente en las regiones lumbar, dorsal y pie derecho. Además, las medidas de intervención reportaron una reducción significativa del riesgo “muy alto”, “alto” y “medio” en 44 %, 7 % y 6 %, respectivamente.

PALABRAS CLAVE: ergonomía / seguridad industrial / líneas eléctricas / método REBA / riesgos disergonómicos

## MITIGATING DISERGONOMIC RISKS: MANUAL MANIPULATION OF METALLIC STRUCTURES FOR ELECTRIC POWER TRANSMISSION LINES

ABSTRACT. Electricity is a fundamental commodity for society. However, the installation and assembly of infrastructure for its generation and distribution pose intricate ergonomic challenges for workers. In this context, the study aimed to evaluate and mitigate disergonomic risks related to the activities of loading and unloading metallic structures for electrical transmission lines. Initially, the research identified discomfort zones using the Corlett and Bishop diagram, followed by the classification of postures through the REBA method. Subsequently, risk levels were quantified using Ergonautas software, and finally, improvement actions were formulated and implemented to mitigate the identified risks. The results revealed prevalent discomfort in the lumbar, dorsal, and right foot regions. Additionally, the intervention measures reported a significant reduction in “very high”, “high”, and “medium” risk levels by 44 %, 7 %, and 6 %, respectively.

KEYWORDS: ergonomics / industrial safety / transmission lines / REBA method / disergonomic risks



## INTRODUCCIÓN

### Contexto

Con el advenimiento de la llamada cuarta revolución industrial y la evolución de los sistemas de producción (Arteaga-Irene & Chan, 2021), a nivel mundial las actividades laborales que demanda la industria se encuentran en un estado dinámico de constante evolución. En la medida que los sistemas industriales adoptan nuevas tecnologías emergentes, también se demanda la mejora de la calidad del trabajo para el ser humano. Sin embargo, hoy en día, muchas personas aún se ven obligadas a laborar en empleos sin las condiciones mínimas que garanticen su seguridad y salud. De acuerdo con las cifras de la Organización Internacional del Trabajo (2019), la mayoría de los 3300 millones de personas empleadas en el mundo en el 2018 no gozaban de un nivel suficiente de seguridad, bienestar material e igualdad de oportunidades.

La problemática relacionada con las condiciones de trabajo no es propia de la era contemporánea; en realidad, su origen se remonta a la Primera Revolución Industrial, entre 1760 y 1840, específicamente al invento de la máquina de vapor. En ese entonces, la operación de esta máquina estaba supeditada a la experiencia en el uso de la misma, y surge lo que hoy en día se denomina la interacción hombre-máquina (Niebel & Freivalds, 2009). Más adelante, en 1857, Woitej Yastembowsky introdujo el término *ergonomía* (Bravo & Espinoza, 2016), y a partir de ese momento se empieza a desarrollar teorías y modelos de la actividad laboral humana. Hoy en día, la ergonomía es considerada esencial en el lugar de trabajo, ya que tiene como objetivo optimizar la interacción entre los trabajadores, las herramientas y el entorno para mejorar la productividad y la seguridad, al mismo tiempo que se minimiza el riesgo de lesiones.

Dada la importancia y la trascendencia de la ergonomía, diversos investigadores han desarrollado una variedad de métodos, modelos y técnicas que permiten hacer una evaluación y cuantificación de los riesgos disergonómicos, tales como *checklists* y cuestionarios (Norman et al., 2006), el método *Rapid Entire Body Assessment* (REBA) (Hignett & McAtamney, 2000), etcétera. Mientras que otros académicos se han centrado en la aplicación de estas herramientas en distintos sectores de la industria, tales como minería (Rodríguez-Ruiz et al., 2019), alimentos (Pincay et al., 2021) y salud (Paredes & Vázquez, 2018; Morales et al., 2017), entre otros.

Por otro lado, han surgido una serie de organizaciones que promueven y difunden conocimientos y avances en materia de ergonomía. Las más relevantes son la International Ergonomics Association (IEA) y la Human Factors and Ergonomics Society (HFES). En esta misma línea, instituciones como la International Organization for Standardization (ISO) en los últimos veinte años han venido publicando una serie de estándares como ISO 9241, ISO 6385, ISO 11228, etcétera, orientados a definir criterios patrones bajo los cuales las

organizaciones deben gestionar la ergonomía en los espacios de trabajo. Adicionalmente, diversos gobiernos de distintos países han venido regulando aspectos asociados a ergonomía laboral. Entre los pioneros están Suecia y Reino Unido, que a inicios de 1950 y 1970, respectivamente, establecieron normas y estándares que enfatizaban la importancia del diseño del lugar de trabajo y el bienestar de los trabajadores. En el Perú, las acciones tomadas en aspectos regulatorios son básicas, ya que a la fecha solo se dispone de la Resolución Ministerial 375-2008-TR (2008) en materia de ergonomía. Tal como argumenta Soares (2006), en este país solo algunas compañías multinacionales realizan intervenciones relacionadas con ergonomía laboral, debido a que las regulaciones no son lo suficientemente fuertes, de manera que en el sector empresarial todas o la mayoría de las organizaciones tengan que desplegar esfuerzos orientados a la adopción de tales prácticas en sus operaciones.

Una situación similar es la que experimenta la compañía objeto del presente estudio, en la cual hay una falta de políticas orientadas a la adopción de prácticas de ergonomía laboral. La firma está inmersa en el rubro de diseño, suministro, construcción, montaje y puesta en operación de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. Como parte de sus operaciones, se realizan actividades de manipulación manual de estructuras metálicas de líneas de transmisión de electricidad. Específicamente, en el proceso de carga y descarga de tales estructuras con camión grúa. Desde el punto de vista ergonómico, estas tareas se consideran de naturaleza compleja, ya que presentan una serie de características que ponen en riesgo la seguridad y salud de los trabajadores y, por ende, constituyen el foco del presente estudio. La Tabla 1 resume dichas peculiaridades.

La ejecución de estas tareas demanda en promedio 16 personas, quienes están expuestas a diario a condiciones de trabajo inapropiadas, tales como posturas forzadas, sobrecarga postural y movimientos repetitivos. Esta situación ha generado lesiones musculoesqueléticas serias en trabajadores en distintas ocasiones. El hecho más reciente se remonta a inicios del 2023, cuando se reportó un accidente de trabajo incapacitante. Se prevé que la pasividad frente a la situación podría potencialmente materializar hechos que conduzcan a la incapacidad permanente y, por tanto, a la degradación de la salud de los trabajadores. Tomando en cuenta este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar los riesgos disergonómicos en la actividad de carga y descarga de estructuras metálicas de líneas de transmisión de electricidad realizada con camión grúa, e implementar acciones de mejora para mitigarlos.

**Tabla 1***Características de las tareas de carga y descarga de estructuras metálicas*

Tipología	Descripción
Levantamiento pesado	Las estructuras metálicas empaquetadas son muy pesadas (más de 200 kg) y requieren una fuerza significativa para levantarlas y moverlas manualmente.
Posturas forzadas	La manipulación manual de estructuras metálicas a menudo requiere de la adopción de posturas de levantamiento incómodas para los trabajadores.
Movimientos repetitivos	Cargar y descargar estructuras metálicas implica movimientos repetitivos en el operador de grúa (movilización de manos y cuello por más de cuatro veces por minuto) y el operario de empaquetado (movilización de manos, cuello y brazos de dos a tres veces por minuto). Estos pueden provocar trastornos traumáticos acumulativos y otros problemas musculoesqueléticos con el tiempo.
Espacio limitado	El espacio de trabajo en el camión grúa es limitado, lo que dificulta las maniobras seguras de trabajadores.
Vibraciones	Los camiones grúa pueden producir vibraciones durante las operaciones de elevación y bajada.
Diseño inadecuado de herramientas	Las barretas hechas para el armado de paquetes de estructuras metálicas no están diseñadas ergonómicamente, por lo que provocan tensión física innecesaria en los operadores y reducen la eficiencia.
Estabilidad y control de carga	Garantizar la estabilidad de las estructuras metálicas durante el izaje y la descarga es fundamental. Si no se controla la carga correctamente, se pueden producir accidentes, caída de objetos y lesiones.
Factores ambientales	Condiciones climáticas (viento, lluvia y temperaturas extremas) generan desafíos adicionales en las operaciones de carga y descarga.
Presión de tiempo	En la mayoría de los casos, las operaciones de carga y descarga se realizan con sentido de urgencia.

### Literatura relevante

Diversos investigadores han abordado la problemática de los riesgos disergonómicos en distintos ambientes laborales. A continuación, se presentan los estudios más relevantes tanto en el ámbito nacional como internacional.

Arana et al. (2007) y Lluquay y Muyulema (2015) llevaron a cabo evaluaciones ergonómicas con metodologías y objetivos distintos. El primer estudio utilizó los métodos LEST (Laboratorio de Economía y Sociología del Trabajo) y RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*) para identificar factores que afectan a trabajadores de selección y molido de plástico reciclado, mientras que el segundo estudio empleó el *software* ERGO IBV para analizar los aspectos psicológicos del estrés laboral en el personal docente y administrativo. Los resultados alcanzados por Arana et al. (2007) mostraron que el 70 % de los procesos analizados presentan puntuación de nivel de 3 y 2 en el lado derecho

e izquierdo de las zonas del cuerpo, respectivamente, por lo que es necesario realizar modificaciones urgentes en las tareas y/o puestos de trabajo. Por su parte, Lluquay y Muyulema (2015) determinaron que el estrés es un precursor de enfermedades bajo determinadas circunstancias, además de evidenciar que existe una relación entre el estrés causado por la ansiedad, depresión e insatisfacción laboral, y los trastornos de salud en el corto y largo plazo. Aunque ambos estudios resaltan la necesidad de acciones de mejora y aportan información valiosa para promover el bienestar de los trabajadores, se limitan a realizar evaluaciones diagnósticas y no se especifica las acciones para mitigar los riesgos.

De manera similar, Rodríguez-Ruiz et al. (2019) y Pincay et al. (2021) examinaron los riesgos musculoesqueléticos en contextos ocupacionales diferentes. En el primer caso, se efectuó la evaluación ergonómica de las tareas realizadas en minería subterránea utilizando los métodos ERIN (Evaluación del Riesgo Individual) y REBA; mientras que, en el segundo caso, se investigaron las posturas inadecuadas y los trastornos musculoesqueléticos utilizando el método REBA en trabajadores que llevan a cabo levantamiento de frutas. Los resultados obtenidos por Rodríguez-Ruiz et al. (2019) señalaron que, de las 13 posturas evaluadas, en las tareas perforación de frente y limpieza, el nivel de riesgo es “alto” y, en las tareas de desatado de rocas, sostenimiento, perforación de frente y voladura, el nivel de riesgo es “alto” y “muy alto”. En contraste, los hallazgos de Pincay et al. (2021) reportaron que el 14,4 % de los alzadores de fruta padecían lesiones musculoesqueléticas, siendo la más significativa el dolor en espalda baja. Aunque ambos estudios sugirieron medidas de intervención, estas no fueron llevadas a la práctica para verificar su efectividad en la mitigación de los riesgos.

En la misma línea, Paredes y Vázquez (2018) y Morales et al. (2017) exploraron los trastornos musculoesqueléticos (TME) en personal de enfermería en áreas de unidades de cuidados intensivos (UCI) y medicina interna en hospitales en Valladolid (España) y en Tena (Ecuador), respectivamente. Ambos estudios utilizaron el método REBA para analizar las posturas de trabajo y la exposición a riesgos disergonómicos. Los resultados hallados por Paredes y Vázquez (2018) mostraron que el 100 % de las trabajadoras presentan molestias musculoesqueléticas, con una alta prevalencia de TME en el cuello (94,1 %), hombros (64,7 %), zona dorso-lumbar (88,2 %), codo o antebrazo (18,8 %) y muñeca o manos (18,8 %). Además, se identificó una relación causal entre los TME y factores como la edad, antigüedad en el servicio de UCI y otras variables ergonómicas. Por otro lado, Morales et al. (2017) encontraron que el 23 % de enfermeras presentan un riesgo “alto” de TME, principalmente asociado a tareas como la colocación de pacientes en sillas de ruedas y camillas, así como la aplicación de fuerza de empuje y arrastre. Aunque estos estudios se limitan a hacer evaluaciones diagnósticas, ambos destacan la importancia de evaluar y prevenir los TME en el personal de enfermería y profesionales de la salud.

Otros estudios conducidos en el Perú abordan la evaluación de riesgos disergonómicos en la industria metalmeccánica. Por ejemplo, Guevara y Martínez (2019) se enfocaron en la carga postural como factor de riesgo disergonómico en soldadores de tuberías metálicas. Se utilizó el diagrama de Corlett y Bishop, la hoja de campo REBA y una herramienta de *software* para evaluar las posturas y los riesgos asociados. Los resultados destacaron como posturas críticas la posición recostado y arrodillado, y de pie para soldar la parte inferior y la parte superior de las tuberías metálicas, respectivamente, lo que llevó a la implementación de un plan de acciones correctivas para mejorar las condiciones ergonómicas. En contraste, el estudio de Sosa y Polo (2023) se centró en la gestión de carga postural para reducir los TME en maniobras de izaje, en las cuales inicialmente no se realizaba gestión alguna de riesgos disergonómicos; por ende, el nivel de expectativa de la gestión postural era de 90,4 % de insatisfacción en los 52 operarios evaluados. Posteriormente, se hizo una evaluación integral utilizando REBA y OWAS (*Ovako Working Posture Assessment System*) y se implementaron acciones de mitigación. Los resultados obtenidos indicaron que el nivel de satisfacción se revirtió a 98,1 %, los descansos médicos se redujeron de 9,6 % en el 2019 a 0 % entre el 2020 y el 2021. De la misma manera, el ausentismo laboral disminuyó considerablemente de 21,2 % en el 2019 a 15,4 % en el 2020, y a 0 % en el 2021. Tanto Guevara y Martínez (2019) como Sosa y Polo (2023) resaltan la importancia de abordar los riesgos disergonómicos e implementar acciones preventivas y correctivas para mejorar las condiciones de trabajo en la industria metalmeccánica.

Los estudios revisados ilustran la importancia de la gestión de riesgos disergonómicos en diversos entornos laborales; sin embargo, la mayoría de estos se han limitado a evaluaciones diagnósticas. Además, no se ha encontrado evidencia de investigaciones que aborden problemáticas similares en la industria de líneas de transmisión de electricidad. Por lo tanto, se avizora un vacío que amerita ser estudiado para promover la salud y el bienestar de los trabajadores en dicho sector.

## METODOLOGÍA

### Participantes

La población considerada para la investigación comprendió a los 19 colaboradores de la compañía objeto del estudio, específicamente a aquellos trabajadores dedicados a las tareas de carga y descarga de estructuras metálicas de líneas de transmisión. La muestra se determinó mediante muestreo no probabilístico por conveniencia (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018) y estuvo compuesta por 16 trabajadores varones físicamente saludables, quienes ejecutan directamente las tareas en mención en proyectos de la región Junín (Perú). Además, estos reportan un rango de edad de 25 a 55 años, un rango de peso

de 55 a 90 kg, un rango de talla de 1,52 a 1,70 metros, y un rango de tiempo de laborar en la empresa de 0,5 a 7 años. Los criterios de selección y/o exclusión fueron la ausencia de cualquier tipo de trastorno musculoesquelético, dolor lumbar, alguna enfermedad general diagnosticada previamente, problemas de equilibrio y aparentes desviaciones posturales.

### **Procedimiento**

Procedimentalmente, el presente estudio siguió cuatro etapas de manera secuencial. En la primera, para la identificación de molestias que perciben los trabajadores en las distintas partes del cuerpo, se utilizó el diagrama de Corlett y Bishop (Corlett & Bishop, 1976). En la segunda etapa, para la tipificación de las posturas (adoptadas por los trabajadores participantes en la investigación) que presentan mayor riesgo disergonómico en la actividad bajo estudio, se aplicó del método REBA (Hignett & McAtamney, 2000). En la tercera etapa, para la cuantificación de los riesgos disergonómicos asociados a la tarea bajo estudio, se utilizó el *software* en línea Ergonautas (Diego-Mas, 2015; Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2015; Sumaiya & Muzammil, 2022). En la etapa final de este estudio, se plantearon e implementaron medidas de acción para mitigar los riesgos cuantificados siguiendo los conceptos y criterios de controles de ingeniería y controles administrativos (Muñoz, 2015; Schulte et al., 2008). Posteriormente, se realizó una evaluación posimplementación para cuantificar el impacto de la implementación de estas acciones en la reducción de los niveles de riesgo.

### **Hipótesis**

Dadas las características del estudio, las hipótesis formuladas, nula ( $H_0$ ) y alterna ( $H_1$ ), están orientadas a evaluar el efecto de la implementación de las medidas de acción para la mitigación de riesgos disergonómicos en las actividades materia de estudio.

- $H_0$ : no existe diferencia significativa entre los niveles de riesgo de la evaluación inicial y los niveles de riesgo posimplementación de las acciones de mejora propuestas.
- $H_1$ : existe diferencia significativa entre los niveles de riesgo de la evaluación inicial y los niveles de riesgo posimplementación de las acciones de mejora propuestas.

## **RESULTADOS**

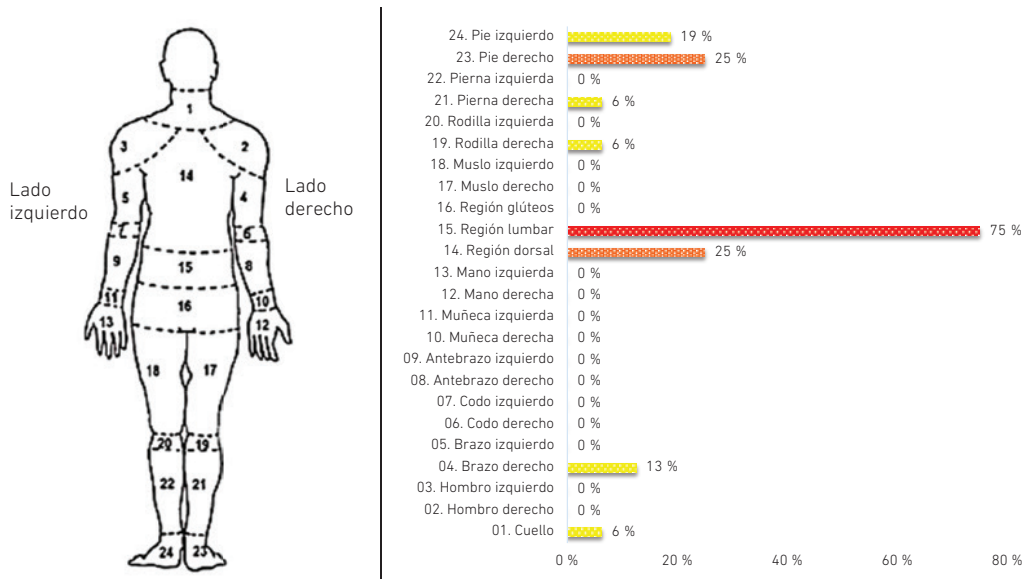
### **Análisis de riesgos disergonómicos y efectividad de las acciones de mejora**

Los resultados obtenidos en la aplicación del diagrama de Corlett y Bishop indicaron que los dolores percibidos con más frecuencia se localizan en la región lumbar (zona

15), región dorsal (zona 14) y pie derecho (zona 23) con un 75 %, 25 % y 25 % de sujetos de estudio que reportaron experimentar dolor en dichas partes del cuerpo, respectivamente. Véase la Figura 1.

**Figura 1**

*Resultados de la aplicación del diagrama de Corlett y Bishop*



Luego de procesar los datos recogidos en la hoja de campo REBA y determinar los ángulos de las posturas adoptadas utilizando el *software* Ergonautas, los resultados mostraron que los trabajadores adoptan posturas forzadas, entre las cuales son las más evidentes las de flexión (inclinado hacia adelante, forzando la curvatura de la columna vertebral), inclinación lateral (cuerpo inclinado hacia un lado, lo que puede afectar el equilibrio y la alineación de la columna), y agacharse o arrodillarse (lo que puede poner tensión en las rodillas y la espalda baja). Véase la Figura 2.

## Figura 2

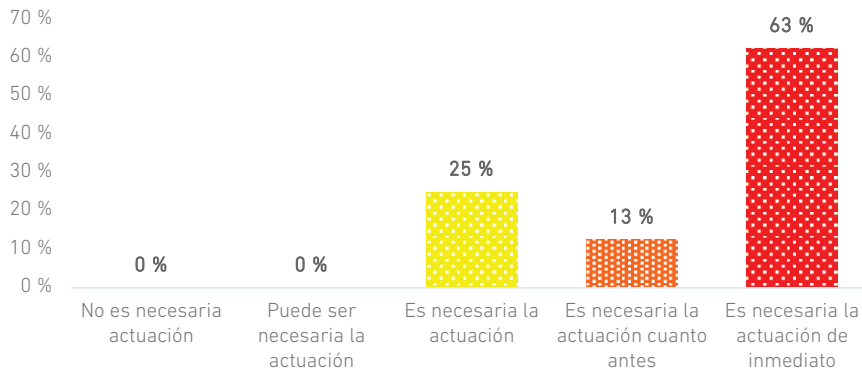
Medición de los ángulos de las posturas adoptadas por los trabajadores



La información recogida en la hoja de campo REBA y los ángulos cuantificados en las fotografías (Figura 2) fueron procesados nuevamente con Ergonautas para cuantificar los riesgos. La Figura 3 presenta la distribución de niveles de riesgo entre los trabajadores participantes. La barra roja indica que se necesita tomar acciones inmediatas en el 63 % de trabajadores (10 participantes), ya que los puntajes oscilan entre 11 y 15, lo que corresponde a un riesgo muy alto. La barra naranja sugiere implementar acciones cuanto antes para el 13 % (2 trabajadores), puesto que reportaron puntajes entre 8 y 10, clasificados como de riesgo alto. La barra amarilla indica que la implementación de acciones es necesaria para el 25 % (4 trabajadores), pero con menor celeridad que en los dos casos anteriores, pues los puntajes, en este caso, oscilan entre 4 y 7, y corresponden a un nivel de riesgo medio. En otras palabras, el 100 % de trabajadores implicados en las tareas de carga y descarga de estructuras metálicas de líneas de transmisión demandan de la implementación de acciones orientadas a mitigar los riesgos musculoesqueléticos identificados.

## Figura 3

Resultados del porcentaje de actuación





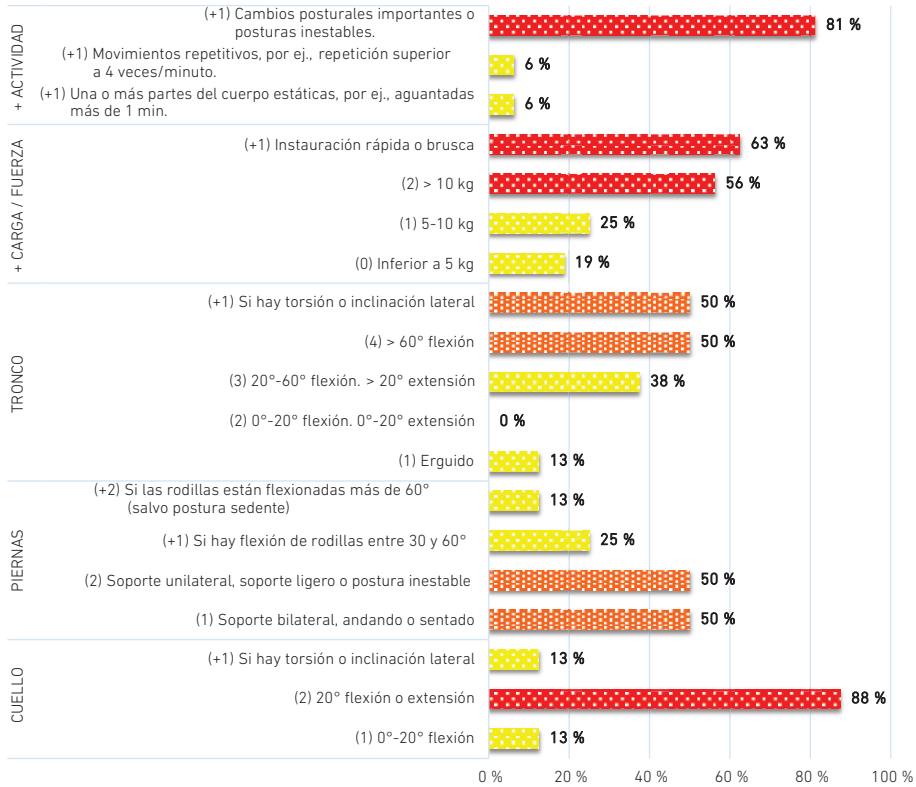
El procesamiento de los datos obtenidos a través de la hoja de campo REBA con Ergonautas también permitió realizar el análisis detallado de las posturas de trabajo adoptadas por los trabajadores. De acuerdo con los criterios del método REBA, para el análisis el cuerpo se divide en dos partes: los segmentos del grupo A (tronco, cuello y piernas) y los segmentos del grupo B (brazos, antebrazos y muñecas). Los resultados se presentan en las Figuras 4 y 5.

En los segmentos del grupo A (Figura 4) se muestra que, mientras se ejecuta la tarea de carga y descarga de estructuras metálicas de líneas de transmisión de electricidad, las posturas de trabajo adoptadas demandan la flexión del tronco a más de 60° en el 50 % de los trabajadores, además de requerir la inclinación lateral o rotación de este en la misma proporción de trabajadores. Este nivel de flexión es uno de los más críticos según los criterios del método REBA, el cual podría traducirse en trastornos musculoesqueléticos. Adicionalmente, en menor proporción, se reporta un 38 % de trabajadores que flexionan o extienden el tronco entre 20° y 60°. Este nivel de flexión o extensión aparentemente es menos dañino para el trabajador; sin embargo, tanto la flexión como la extensión del tronco pueden tener efectos negativos en el cuerpo si se realizan de forma excesiva (frecuencia) o incorrecta. Generalmente, se considera que la flexión excesiva, mayor de 60°, del tronco puede ser peor para la columna vertebral en comparación con la extensión del tronco. Por otro lado, la extensión moderada del pecho, como estar de pie con una buena postura, puede ayudar a mantener la curvatura natural de la columna y brindar apoyo a la parte superior del cuerpo.

Con relación a las posturas adoptadas en el cuello (Figura 4), la realización de la tarea materia de estudio requiere la flexión o extensión de esta parte del cuerpo en más de 20° en el 88 % de los trabajadores, además de la inclinación o giro de la cabeza hacia uno de los lados. Estos resultados reflejan una de las situaciones más significativas y críticas de la tarea bajo estudio. Los efectos asociados directamente a este nivel de flexión son la tensión e incomodidad en los músculos del cuello y los hombros, y el aumento de la presión sobre la columna vertebral. Mientras que los niveles de extensión reportados pueden generar efectos como la tensión de los músculos de la parte posterior del cuello y la parte superior de la espalda, causando molestias y rigidez, así como la presión sobre las articulaciones facetarias, las pequeñas articulaciones que conectan las vértebras de la columna.

**Figura 4**

Resultados para las posturas adoptadas por los segmentos del grupo A



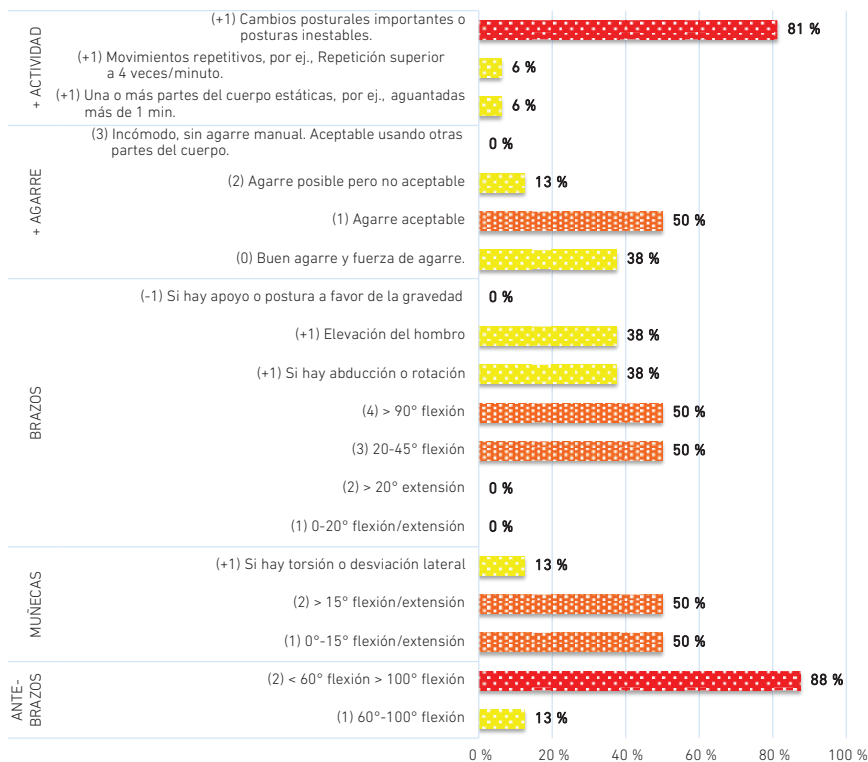
Los resultados más relevantes en las posturas adoptadas en las piernas (Figura 4) por los trabajadores muestran que en el 50 % de los casos estos toman una postura inestable (soporte unilateral o ligero del peso en una de las piernas) y en el 13 % de los casos hay flexión de una o ambas rodillas mayores a 60°. Flexionar las rodillas en ángulos superiores a 60° puede tener una serie de efectos en el cuerpo del trabajador, y es fundamental tener precaución al realizar dichos movimientos. Algunos efectos son distensiones, esguinces, daños en el cartílago articular de la rodilla, dolor e inflamación en la parte delantera de la rodilla, tensión y desgarramiento del menisco, y tendinitis. Es importante mencionar que la flexión de la rodilla es un movimiento normal y esencial para la realización de diversas actividades como ponerse en cuclillas y arrodillarse; sin embargo, la flexión profunda de la rodilla debe abordarse con precaución para evitar que los efectos antes mencionados se materialicen.

Por otro lado, producto de las posturas adoptadas por el trabajador en los segmentos del grupo B (Figura 5), en el 50 % de los casos hay flexión de los brazos que excede los

90°, y en el 50 % de los casos también se reporta flexión que oscila entre los 20° y 45°. Además, en el 38 % de los casos el brazo está abducido o rotado y los hombros por encima de la elevación normal. Los aspectos más críticos de estos resultados están asociados al primer grupo, ya que mantener posturas con brazos flexionados mayor a 90° puede comprometer particularmente la región de los hombros y la parte superior de la espalda. Algunos de los efectos son la fatiga muscular y molestias producto de la mayor tensión en los músculos de los hombros, así como el pinzamiento de los tejidos blandos (como los tendones del manguito de los rotadores), que puede provocar inflamación, dolor y movilidad reducida del hombro, desgarras y tendinitis.

**Figura 5**

*Resultados para las posturas adoptadas por los segmentos del grupo B*



En lo que respecta a las posturas que adopta el antebrazo (Figura 5), se reportaron flexiones que fueron menores a los 60° o mayores a los 100° en el 88 % de los trabajadores participantes en el estudio, mientras que en el 13 % de los casos se reportaron valores de flexión que fluctuaban entre los 60° y 100°. Si la flexión y extensión de esta se realizan con alta frecuencia, los efectos pueden ser el síndrome del túnel carpiano, la tendinitis, el codo de tenista, el dedo en gatillo, el dolor de antebrazo y codo, entre otros.

Además de las posturas del antebrazo, también se llevó a cabo la evaluación de las posturas que adoptan las muñecas (Figura 5). Los resultados mostraron que en el 50 % de los casos la flexión y/o extensión de las muñecas exceden los 15°, mientras que el otro 50 % está por debajo de este nivel. Además, los hallazgos revelaron que en un 13 % de los casos las posturas demandan desviación o giro lateral de las muñecas. Cuando se supera los 15° de flexión y/o extensión, se considera un estado crítico de acuerdo con el método de evaluación del presente estudio y pueden materializarse una serie de efectos no deseados, tales como el síndrome del túnel carpiano, la tendinitis, lesiones por esfuerzo repetitivo, dedo en gatillo, dolor de muñeca y mano, etcétera.

Otro aspecto no menos importante es la calidad del agarre (Figura 5) de las estructuras metálicas manipuladas. Este no representa un problema para la actividad, ya que, según los resultados de la evaluación, en el 38 % de los casos se considera “bueno”, en el otro 38 % de los casos “aceptable”, y en el 13 % de los casos “no aceptable”. Por lo tanto, no se evidenció aquí una oportunidad sustancial de mejora.

En la etapa final del estudio, se diseñaron e implementaron seis medidas de acción para mitigar los riesgos iniciales. Dos de las acciones fueron controles de ingeniería, y las cuatro restantes fueron controles administrativos. Las Tablas 2 y 3 resumen las razones de utilidad de cada una de estas.

**Tabla 2**

*Controles de ingeniería implementados*

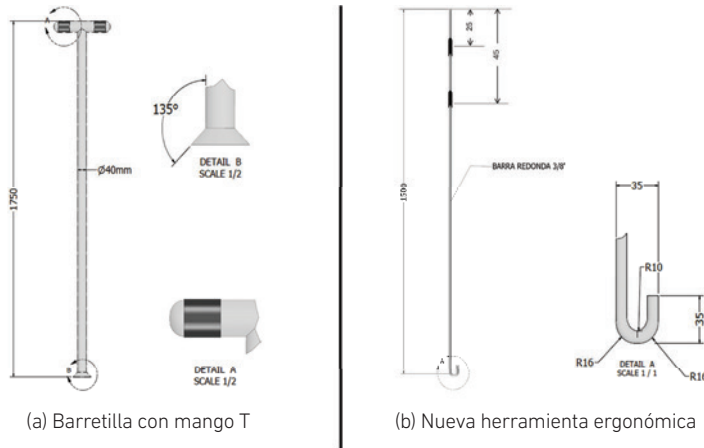
Medida	Propósito/justificación
Implementación de barretilla con mango de goma	Los trabajadores involucrados hacen uso de barretillas convencionales para la ejecución de las tareas. Estas herramientas no cuentan con las características ergonómicas necesarias mínimas, por lo que se planteó el uso de una barretilla con mango de goma T. Véase la Figura 6(a).
Diseño e implementación de herramienta ergonómica para pasar las eslingas sintéticas de extremo a extremo	El diseño e implementación de una herramienta de esta naturaleza reduce los riesgos por adopción de posturas forzadas cuando los trabajadores están empaquetando las estructuras metálicas, previo a la manipulación por el camión grúa para la carga y descarga. Esta acción requirió de la participación de trabajadores quienes hacen el trabajo mecánico y de profesionales familiarizados con la ingeniería de métodos y ergonomía laboral. Véase la Figura 6(b).

**Tabla 3***Controles de ingeniería implementados*

Medida	Propósito/justificación
Rotación de personal de la actividad de carga y descarga (por lo menos) cada 21 días	Esta medida se basa en que el descanso prolongado en intervalos más largos puede ayudar a mitigar la fatiga del trabajador y reducir el riesgo de accidentes debido al cansancio. Los empleados bien descansados están más alertas y concentrados, lo que mejora la seguridad general en el lugar de trabajo.
Pausas activas cada dos horas	Las pausas activas cada dos horas, en las que los trabajadores realizan ejercicios de estiramientos de piernas, movimiento de cintura, estiramientos de brazos y manos, fueron esenciales por dos razones. Primero, el estiramiento de piernas ayuda a aliviar la tensión en la parte inferior del cuerpo, promoviendo el flujo sanguíneo y la flexibilidad, lo que reduce el riesgo de rigidez y posibles lesiones (Ekelund et al., 2015). Segundo, los movimientos de la cintura mejoran la movilidad de la columna y disminuyen la tensión en los músculos de la espalda (Roffey et al., 2010).
Campañas trimestrales de concientización	Las campañas trimestrales de concientización contra la exposición a riesgos ergonómicos fueron muy beneficiosas por dos razones. Primero, estas ayudan en la prevención de problemas musculoesqueléticos a través de la educación a los empleados sobre la importancia de adoptar posturas de trabajo adecuadas (Occupational Safety and Health Administration, s. f.). Segundo, estas refuerzan la promoción de una cultura de salud y seguridad (National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion, s. f.).
Monitorear los riesgos disergonómicos con una frecuencia mínima semestral	El seguimiento y monitoreo frecuente de los riesgos disergonómicos y las acciones implementadas se realizó por seis meses. Estas actividades son fundamentales por las siguientes razones. Primero, la evaluación de la efectividad de las acciones implementadas para verificar si los riesgos identificados se mantienen en niveles aceptables. Segundo, para dar cumplimiento a las regulaciones. En el Perú se cuenta con la Ley 29783 y la RM 375-2008-TR en materia de seguridad y salud en el trabajo, y ergonomía, respectivamente.

**Figura 6**

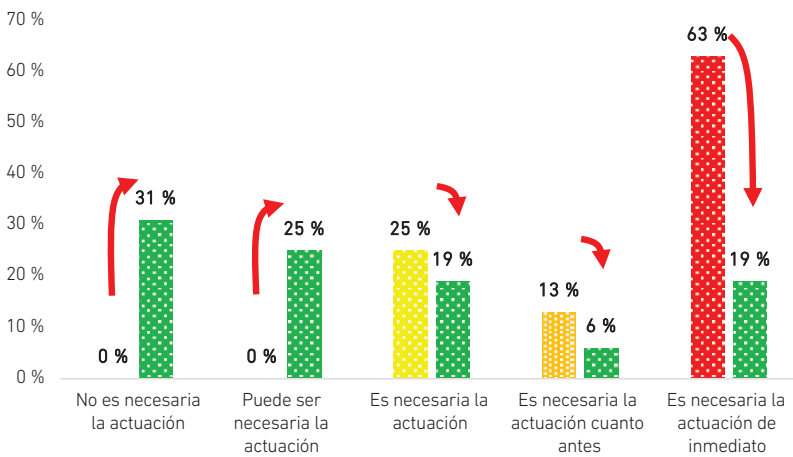
*Herramientas implementadas*



El impacto de las acciones de mejora en la mitigación de los riesgos fue evaluado luego de seis meses de su implementación. La Figura 7 resume los resultados.

**Figura 7**

*Resultados del porcentaje de actuación posimplementación*



Las barras de color amarillo, naranja y rojo muestran los niveles de actuación inicial presentados previamente en la Figura 3, mientras que las barras de color verde representan los niveles de actuación después de la implementación de las acciones de mejora. Los niveles de riesgo se redujeron en 44 % (de 63 % a 19 %), 7 % (de 13 % a 6 %) y 6 % (de 25 % a 19 %) para los casos en los que se requería “actuación inmediata”,

“actuación cuanto antes” y “la actuación puede ser necesaria”, respectivamente. Lo más resaltante es el impacto en la reducción de riesgos en los que se requería tomar medidas de control de manera inmediata, lo que nos lleva a reforzar la idea de que las acciones de mejora tuvieron un efecto positivo en la mitigación de los riesgos disergonómicos.

Otro aspecto importante que confirma la efectividad de las acciones de mejora es el efecto que se observa en los niveles de actuación donde esta “no es necesaria” y “puede ser necesaria”. Los valores mostrados para ambos casos ahora son 31 % y 25 % respectivamente, mientras que antes era 0 %. En otras palabras, al mitigarse los riesgos poniendo en práctica las medidas de acción, los riesgos disergonómicos ahora están en niveles ideales y, por ende, no representan un peligro latente, en el 56 % de los casos, para los trabajadores que ejecutan las actividades relacionadas con la carga y descarga de estructuras metálicas de líneas de transmisión de electricidad.

### Contrastación de hipótesis

Utilizando IBM SPSS 25, se realizó la prueba de Wilcoxon (Rosner et al., 2006; Harris & Hardin, 2013) para la comprobación de la hipótesis nula ( $H_0$ ) y alterna ( $H_1$ ). Los resultados se muestran en las Tablas 4 y 5, respectivamente.

**Tabla 4**

*Prueba de rangos con signo de Wilcoxon*

	Rangos	N	Rango promedio	Suma de rangos
Riesgos antes - riesgos después	Rangos negativos	13 <sup>a</sup>	7,00	91,00
	Rangos positivos	0 <sup>b</sup>	0,00	0,00
	Empates	3 <sup>c</sup>		
	Total	16		

*Nota.* <sup>a</sup> Riesgos antes < riesgos después. <sup>b</sup> Riesgos antes > riesgos después. <sup>c</sup> Riesgos antes = riesgos después.

**Tabla 5**

*Estadístico de prueba<sup>a</sup>*

Detalle	Riesgos antes - riesgos después
Z	-3,275 <sup>b</sup>
Sig. asintótica (bilateral)	0,001

*Nota.* <sup>a</sup> Prueba de rangos con signo de Wilcoxon. <sup>b</sup> Se basa en rangos positivos.

Como el valor de  $p = 0,001 < \alpha = 0,05$ , se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ). Se indica que existe una diferencia significativa entre los niveles de riesgo antes y después de la intervención. Dicho de otra manera, la implementación de las medidas de acción tuvo un efecto positivo en la mitigación de los riesgos disergonómicos de las actividades materia de estudio.

## DISCUSIÓN

Los hallazgos de la investigación revelan una prevalencia notable de la sensación de dolor en la región lumbar, con un 75 % de los participantes que reportaron molestias. Estos resultados son consistentes con la investigación previa realizada por Pincay et al. (2021), quienes reportaron una incidencia del 35,7 % de dolor dorsal y lumbar entre los trabajadores. De igual forma, Paredes y Vázquez (2018) identificaron un 88,2 % de individuos con dolor en la zona lumbar y dorsal, mientras que Morales et al. (2017) encontraron dolor dorsal en un 70 % de los trabajadores. Adicionalmente, el trabajo de Guevara y Martínez (2019) mostró un 75 % de trabajadores con dolor en la región lumbar. Estos hallazgos convergentes subrayan colectivamente la importancia de gestionar los riesgos disergonómicos que afectan el área lumbar y dorsal, lo que la convierte en una zona de preocupación que justifica estrategias de intervención específicas.

Los resultados obtenidos en el presente estudio indicaron que el 63 % y el 25 % de los trabajadores experimentan riesgos "muy altos" y "altos", respectivamente. Estos hallazgos son congruentes con las investigaciones realizadas por Rodríguez-Ruiz et al. (2019), Paredes y Vázquez (2018), Guevara y Martínez (2019), y Pincay et al. (2021), quienes reportaron niveles de riesgos "altos" y/o "muy altos" en el 53,8 %, 92 %, 100 % y 12,88 % de las poblaciones de estudio, respectivamente. Estos resultados subrayan la urgencia de acciones inmediatas en el lugar de trabajo, además de resaltar la utilidad y eficacia del método REBA como una herramienta valiosa para identificar los riesgos ergonómicos en distintos entornos laborales.

Aunque varios de los estudios conducidos se han realizado sobre personal administrativo (Lluguay & Muyulema, 2015), recolectores de frutas (Pincay et al., 2021) y personal de enfermería (Paredes & Vázquez, 2018; Morales et al., 2017), y no guardan relación directa con el rubro de líneas de transmisión de electricidad; cada uno de ellos han proporcionado valiosas perspectivas en diversos entornos laborales. Cada uno de estos estudios tuvo el propósito de abordar los desafíos y preocupaciones ergonómicas únicas presentes en sus respectivos entornos de trabajo. Por ejemplo, mientras los estudios sobre personal administrativo (Lluguay & Muyulema, 2015) y alzadores de frutas (Pincay et al., 2021) se centraron en movimientos repetitivos y manipulación manual de objetos, las investigaciones sobre el personal de enfermería (Paredes & Vázquez, 2018; Morales et al., 2017) exploraron las demandas físicas asociadas con el cuidado de pacientes.



En contraste, el presente estudio se adentró en actividades de carga y descarga en el ámbito de las líneas de transmisión de electricidad, un rubro dentro del sector de la energía con escasez de literatura publicada que aborde problemáticas desde la arista de la ergonomía laboral.

La evaluación de los riesgos posimplementación de las acciones de mejora evidenció que los niveles de riesgo inicial se redujeron en un 44 % en la categoría de "riesgo muy alto", en 7 % en la categoría de "riesgo alto" y en 6 % en la categoría de "riesgo medio". Sin embargo, es importante resaltar que estos resultados solo reflejan la efectividad en el corto plazo (seis meses después la implementación), por lo que se recomienda continuar con el monitoreo y seguimiento respectivos a fin de garantizar que las mejoras percibidas sean sostenibles tanto a mediano como largo plazo. Esto permitirá realizar una evaluación en términos de reducción de accidentes, descansos médicos y ausentismo laboral, tal como lo hicieron Sosa y Polo (2023).

## CONCLUSIONES

Los resultados del estudio mostraron que, entre los trabajadores que realizan la tarea bajo evaluación, el dolor más frecuentemente reportado se localiza en la región lumbar, informado por el 75 % de los participantes, seguido por la región dorsal y el pie derecho, cada uno mencionado por el 25 % de los trabajadores. En la segunda etapa, se reveló que los trabajadores adoptan posturas forzadas, particularmente flexión, inclinación lateral y posición en cuclillas o de rodillas, lo que puede provocar trastornos musculoesqueléticos. El análisis de las posturas de trabajo para el grupo A (tronco, cuello y piernas) indicó que más del 60 % de los trabajadores adoptaron posturas críticas de flexión, potencialmente perjudiciales para la columna vertebral. En el grupo B (brazos, antebrazos y muñecas), el 50 % de los trabajadores tenían los brazos flexionados más de 90°, lo que podría comprometer las regiones del hombro y la parte superior de la espalda. Además, el 88 % de los trabajadores mostraron flexiones del antebrazo inferiores a 60° o superiores a 100°, lo que plantea riesgos como el síndrome del túnel carpiano y la tendinitis. En cuanto a las posturas de las muñecas, el 50 % superó los 15° en flexión y/o extensión, lo que podría conducir al síndrome del túnel carpiano y otros problemas relacionados.

Las acciones de mitigación se centraron en la implementación de barretillas con mango de goma T, diseñar herramientas ergonómicas para pasar de un extremo a otro las eslingas sintéticas (véanse las Figuras 6(a) y 6(b), respectivamente), realizar monitoreos disergonómicos cada seis meses, rotación del personal por lo menos cada 21 días, realizar pausas activas cada dos horas y efectuar campañas trimestrales de concientización contra la exposición a los riesgos disergonómicos y de masajes para liberar la tensión muscular en la espalda y zona lumbar. La adopción de estas medidas de acción para la ejecución de tareas de carga y descarga de estructuras metálicas

redujo los niveles de riesgo en 44 % en la categoría de “riesgo muy alto”, en 7 % en la categoría de “riesgo alto” y en 6 % en la categoría de “riesgo medio”. Este efecto es positivo, ya que indica que ahora los trabajadores ejecutan las actividades asociadas a carga y descarga de estructuras metálicas de líneas transmisión en condiciones seguras en el 56 % de los casos.

Aunque esta investigación se enfocó en trabajadores de líneas de transmisión, los principios, hallazgos y recomendaciones ergonómicas derivadas de este pueden generalizarse a otras organizaciones que realizan actividades que impliquen manipulación manual de cargas. Sin embargo, es esencial considerar cuidadosamente el contexto y las condiciones en las que se llevan a cabo las tareas. Se deben tener en cuenta varios factores, como las particularidades de los entornos laborales, las tareas y la demografía de la fuerza laboral. Además, la efectividad de las medidas de intervención propuestas debe evaluarse antes de su implementación para determinar su aplicabilidad e impacto.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

**Yober Jenry Arteaga-Irene:** conceptualización, metodología, administración de proyecto, recursos, visualización, redacción: revisión y edición. **Katherine Pretel-Ruiz:** análisis formal, investigación, recursos, validación, redacción: revisión y edición. **Rocío Shirley Chaupis-Ramos:** investigación, administración del proyecto, escritura: borrador original. **Danny Daniel Medina-Aguilar:** análisis formal, validación, visualización, escritura: borrador original.

## REFERENCIAS

- Arana, N., Sáenz, D., & Floriano, C. (2007, 25-28 de abril). *Evaluación ergonómica de la empresa procesos y servicios industriales utilizando los métodos RULA, LEST y procesamiento de imágenes* [Presentación de paper]. IX Congreso Internacional de Ergonomía Semac y XIII Reunión binacional de Ergonomía MÉXICO-EUA, Ciudad de México, México. <https://bit.ly/semac-org-mx-Evaluac-ergonomics-RULALEST>
- Arteaga-Irene, Y. J., & Chan, W. K. V. (2021). Additive manufacturing global challenges in the industry 4.0 era. En R. Qiu, K. Lyons & W. Chen (Eds.), *AI and analytics for smart cities and service systems* (pp. 316-336). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-90275-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-90275-9_26)

- Bravo, V. P., & Espinoza, J. R. (2016). Factores de riesgo ergonómico en personal de atención hospitalaria en Chile. *Ciencia & Trabajo*, 18(57), 150-153. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-24492016000300150>
- Corlett, E. N., & Bishop, R. (1976). A technique for assessing postural discomfort. *Ergonomics*, 19(2), 175-182. <https://doi.org/10.1080/00140137608931530>
- Diego-Mas, J. A. (2015). *Evaluación postural mediante el método REBA*. Ergonautas. Universidad Politécnica de Valencia. <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/reba/reba-ayuda.php>
- Ekelund, U., Ward, H., Norat, T., Luan, J., May, A., Weiderpass, E., Sharp, S., Overvad, K., Østergaard, J., Tjønneland, A., Johnsen N., Mesrine, S., Fournier, A., Fagherazzi, G., Trichopoulou, A., Lagiou, P., Trichopoulos, D., Li, K., Kaaks, R., Ferrari, P., ... Riboli, E. (2015). Physical activity and all-cause mortality across levels of overall and abdominal adiposity in European men and women: the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition Study (EPIC). *The American Journal of Clinical Nutrition*, 101(3), 613-621. <https://doi.org/10.3945/ajcn.114.100065>
- Guevara, N. G., & Martínez, J. (2019). *Prevención de riesgos disergonómicos en el proceso de soldadura de tuberías metálicas de 24 en una empresa minera. Arequipa. 2018* [Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero de Seguridad Industrial y Minera, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio institucional de la Universidad Tecnológica del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/1791>
- Harris, T., & Hardin, J. W. (2013). Exact Wilcoxon signed-rank and Wilcoxon Mann-Whitney ranksum tests. *The Stata Journal*, 13(2), 337-343. <https://doi.org/10.1177/1536867X1301300208>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill Interamericana.
- Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31(2), 201-205. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3)
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2015). *Posturas de trabajo: evaluación del riesgo - Año 2015*. <https://www.insst.es/documentacion/material-tecnico/documentos-tecnicos/posturas-trabajo-evaluacion-del-riesgo-2015>
- Ley 29783 del 2011. Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo. 20 de agosto del 2011. *Diario oficial El Peruano*. <https://www.gob.pe/institucion/congreso-de-la-republica/normas-legales/462576-29783>
- Lluguay, D. J., & Muyulema, J. C. (2015). *Análisis ergonómico del personal docente y administrativo de la Facultad de Mecánica* [Tesis de licenciatura, Escuela Superior

- Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional DSpace ESPOCH. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4178>
- Morales, L. A., Aldás, D. S., Collantes, S. M., & Freire, J. V. (2017). Ergonomía del trabajo de enfermeras en el manejo manual de pacientes con metodología REBA y MAPO. *Ojeando la Agenda*, 48, 1-17. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6105590>
- Muñoz, C. A. (2015). Estudio de accidentes eléctricos y peligro del arco eléctrico. Introducción a un programa de seguridad eléctrica. *Ciencia & Trabajo*, 17(53), 122-127. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-24492015000200005>
- National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion. (s. f.). *Work-related musculoskeletal disorders & ergonomics*. <https://c914.short.gy/musculoskeletal-disorders/index.html>
- Niebel, B., & Freivalds, A. (2009). *Ingeniería industrial. Métodos, estándares y diseño de trabajo* (12.ª ed.). McGraw Hill.
- Norman, K., Alm, H., Tornqvist, E. W., & Toomingas, A. (2006). Reliability of a questionnaire and an ergonomic checklist for assessing working conditions and health at call centres. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 12(1), 53-68. <https://doi.org/10.1080/10803548.2006.11076671>
- Occupational Safety and Health Administration. (s. f.). *Ergonomics*. <https://www.osha.gov/ergonomics>
- Organización Internacional del Trabajo. (2019). *Perspectivas sociales y del empleo en el mundo. Tendencias 2019*. [https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@dgreports/@dcomm/@publ/documents/publication/wcms\\_713013.pdf](https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@dgreports/@dcomm/@publ/documents/publication/wcms_713013.pdf)
- Paredes, M., & Vázquez, M. (2018). Estudio descriptivo sobre las condiciones de trabajo y los trastornos musculoesqueléticos en el personal de enfermería (enfermeras y AAEE) de la Unidad de Cuidados Intensivos Pediátricos y Neonatales en el Hospital Clínico Universitario de Valladolid. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, 64(251), 161-199. [https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S0465-546X2018000200161&script=sci\\_abstract](https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S0465-546X2018000200161&script=sci_abstract)
- Pincay, M. E., Chiriboga, G. A., & Vega, V. (2021). Posturas inadecuadas y su incidencia en trastornos musculoesqueléticos. *Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo*, 30(2), 161-168. [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S3020-11602021000200161&lng=es&nrm=iso&tlng=es](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S3020-11602021000200161&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

- Resolución Ministerial 375-2008-TR del 2008 [Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo]. Aprueban la Norma Básica de Ergonomía y de Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico. 28 de noviembre del 2008. <https://www.gob.pe/institucion/mtpe/normas-legales/394457-375-2008-tr>
- Rodríguez-Ruíz, Y., Pérez-Mergarejo, E., & Barrantes-Pastor, W. A. (2019). Evaluación de la exposición a factores de riesgo de desórdenes musculoesqueléticos de tareas de minería subterránea. *Scientia et Technica*, 24(2), 256-263. <https://doi.org/10.22517/23447214.20061>
- Roffey, D., Wai, E., Bishop, P., Kwon, B., & Dagenais, S. (2010). Causal assessment of workplace manual handling or assisting patients and low back pain: Results of a systematic review. *The Spine Journal*, 10(7), 639-651. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2010.04.028>
- Rosner, B., Glynn, R. J., & Lee, M. L. T. (2006). The Wilcoxon signed rank test for paired comparisons of clustered data. *Biometrics*, 62(1), 185-192. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2005.00389.x>
- Schulte, P., Geraci, C., Zumwalde, R., Hoover, M., & Kuempel, E. (2008). Occupational risk management of engineered nanoparticles. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5(4), 239-249. <https://doi.org/10.1080/15459620801907840>
- Soares, M. M. (2006). Ergonomics in Latin America: Background, trends and challenges. *Applied Ergonomics*, 37(4), 555-561. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.04.014>
- Sosa, N. R., & Polo, J. C. (2023). Métodos de gestión de carga postural para reducir trastornos musculoesqueléticos en maniobras de izaje. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(51). <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.24971>
- Sumaiya, M. S., & Muzammil, M. (2022). Postural assessment of a load-lifting task for females: A comparative assessment of OWAS and REBA method. En D. Bijulal, V. Regi Kumar, S. Subramoniam, R. Iqbal & V. Khanzode, V. (Eds.), *Technology-enabled work-system design* (pp. 131-140). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1884-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1884-0_13)



**CALIDAD  
Y MEDIOAMBIENTE**  

---

**Quality and Environment**





# OBTENCIÓN DE CELOBIOSA A PARTIR DE LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA PARCIAL DE LA CELULOSA DE CÁSCARA DE ARROZ

HUMBERTO AYALA ARMIJOS\*

<https://orcid.org/0000-0003-0148-4433>

NICOLE ROMERO CALLE

<https://orcid.org/0009-0004-0767-9738>

BRAULIO MADRID CELI

<https://orcid.org/0000-0002-8494-1304>

RAMIRO QUEZADA SARMIENTO

<https://orcid.org/0000-0002-9552-8486>

EDGAR TINOCO GÁLVEZ

<https://orcid.org/0009-0007-2920-0152>

RICHARD CHÁVEZ ABAD

<https://orcid.org/0009-0005-9214-227X>

Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, Universidad Técnica de Machala,  
Machala, Ecuador

Recibido: 29 de junio del 2024 / Aceptado: 10 de julio del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7211>

**RESUMEN.** El objetivo de la investigación fue ablandar la cáscara de arroz mediante pretratamientos hidrotérmicos y alcalinos. Se aplicó temperatura a 121 °C por tres lapsos de tiempo (15, 30 y 45 minutos) y con NaOH en tres concentraciones (0,5, 1 y 1,5 %); se agitó a 120 rpm por una hora; para ajustar a pH 4,8 se adicionó HCl al 20 %, y se añadió 30 FPU de la enzima  $\beta$ -glucosidasa; se agitó a 120 rpm a 50 °C durante 144 horas.

---

Este estudio fue financiado por la Universidad Técnica de Machala.

\* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [jayala@utmachala.edu.ec](mailto:jayala@utmachala.edu.ec); [gromero8@utmachala.edu.ec](mailto:gromero8@utmachala.edu.ec); [bmadrid@utmachala.edu.ec](mailto:bmadrid@utmachala.edu.ec); [rquezada@utmachala.edu.ec](mailto:rquezada@utmachala.edu.ec); [etinoco@utmachala.edu.ec](mailto:etinoco@utmachala.edu.ec); [rchavez@utmachala.edu.ec](mailto:rchavez@utmachala.edu.ec)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

La aplicación de 121 °C durante 45 minutos logró un  $34,62 \pm 0,79$  % de hidrólisis parcial de celulosa a celobiosa y  $18,14 \pm 0,09$  % de hidrólisis total de celulosa a glucosa; y en los hidrolizados donde se pretrató con hidróxido de sodio al 1,5 %, se alcanzó  $8,39 \pm 0,79$  % de celobiosa y  $46,64 \pm 0,30$  % de glucosa. La aplicación de pretratamiento hidrotérmico favorece la hidrólisis parcial de la celulosa a celobiosa.

PALABRAS CLAVE: disacáridos / cáscara de arroz / tratamiento hidrotérmico del arroz / glucosidasas / celulosa / hidrólisis / enzima

## PRODUCTION OF CELLOBIOSE FROM THE PARTIAL ENZYMATIC HYDROLYSIS OF RICE HUSK CELLULOSE

ABSTRACT. The aim of the research was to soften rice husk by hydrothermal and alkaline pretreatments. Temperature was applied at 121 °C for three time periods (15, 30 and 45 minutes) and with NaOH in three concentrations (0,5, 1 and 1,5 %), it was stirred at 120 rpm for one hour, to adjust to pH 4,8; 20 % HCl was added, and 30 FPU of the enzyme  $\beta$ -glucosidase was added and stirred at 120 rpm at 50 °C for 144 hours. The application of 121 °C for 45 minutes achieved a  $34,62 \pm 0,79$  % partial hydrolysis of cellulose to cellobiose and  $18,14 \pm 0,09$  % total hydrolysis of cellulose to glucose and in the hydrolysates where it was pretreated with sodium hydroxide at 1,5 %,  $8,39 \pm 0,79$  % cellobiose and  $46,64 \pm 0,30$  % glucose were reached. The application of hydrothermal pretreatment favors the partial hydrolysis of cellulose to cellobiose.

KEYWORDS: disaccharides / rice hulls / parboiled rice / glucosidasas / cellulose / hydrolysis / enzymes

## INTRODUCCIÓN

El sector arrocero genera diversos subproductos y residuos lignocelulósicos renovables de bajo costo y abundante disponibilidad, compuestos por celulosa, hemicelulosa y lignina. Los dos primeros polímeros representan aproximadamente el 75 % del peso del material en base seca, mientras que los principales monómeros son pentosas y hexosas que forman cadenas lineales de (1-4)- $\beta$ -D-glucopiranos (Kumar et al., 2015). La cáscara de arroz, residuo abundante con alto contenido en oligosacáridos, subproducto resultante del descascarado de esta gramínea, cuyo peso representa alrededor del 20 % del cereal, está compuesta por celulosa (30-50 %), hemicelulosa (15-30 %), lignina (10-15 %) y cenizas (15-20 %) (Naqvi et al., 2014).

La celulosa es un homopolisacárido formado por monómeros de D-glucosa unidos por enlaces éter, difíciles de romper en glucosa libre debido a su estructura cristalina altamente organizada. Mediante la aplicación de celulasas, se suele hidrolizar primero a celobiosa y luego a glucosa (Parisutham et al., 2017). Las moléculas de glucosa están unidas como  $\beta$ -celobiosa; por lo tanto, la anhidro- $\beta$ -celobiosa es la unidad repetitiva de la cadena polimérica. El número de unidades repetidas unidas para formar el polímero de celulosa se denomina *grado de polimerización* (Adler et al., 2022).

La hidrólisis enzimática de biomasa lignocelulósica a celobiosa está ganando adeptos debido a las múltiples aplicaciones prebióticas emergentes como endulzante funcional bajo en calorías (Chen et al., 2021). Este azúcar funcional, cero calorías y un aditivo potencial para alimentos y piensos saludables, está formado por dos moléculas de glucosa unidas por un enlace glicosídico  $\beta$  - (1,4'); se diferencia de la maltosa por su configuración en el enlace glicosídico que puede ser  $\alpha$  o  $\beta$  (Parisutham et al., 2017).

Los celo-oligosacáridos (COS) son polímeros con un grado de polimerización (GP) entre 3 y 10 monosacáridos, y constan de unidades de glicosilo enlazadas por uniones  $\beta$  - (1-4)-glicosídicos. La celobiosa y el COS cuentan con un GP de 3 a 6 monosacáridos hidrosolubles, pero no pueden ser digeridos por la microbiota intestinal de los humanos (Ávila et al., 2021). Los métodos para la obtención enzimática de celobiosa a partir de residuos lignocelulósicos requieren de pretratamientos alcalinos (NaOH) para despolimerizar la lignina, y ablandar e hinchar la molécula de celulosa y hemicelulosa; posteriormente, se ajusta el pH a 4,8 para la adición de las enzimas celulasas; la temperatura se mantiene a 50 °C agitando a 200 rpm y, de esta manera, ocurre la hidrólisis parcial de la celulosa a celobiosa (Siccama et al., 2022). Las exoglucanasas rompen los extremos de la cadena reductora o no reductora de la celulosa para producir celobiosa (Méndez-Líter et al., 2017).

El objetivo de esta investigación fue evaluar la producción de celobiosa a partir de la hidrólisis enzimática de la celulosa presente en la cáscara de arroz, utilizando  $\beta$ -glucosidasa producida por *Trichoderma reesei* ATCC 26921.

## METODOLOGÍA

### Materiales

Las cáscaras de arroz se recolectaron del sector arrocerero de la parroquia La Cuca, cantón Arenillas, provincia de El Oro, Ecuador. Fueron seleccionadas, lavadas, secadas y trituradas hasta un tamaño de partícula  $\leq 250 \mu\text{m}$ . Para la hidrólisis enzimática, se utilizó la enzima comercial de marca Celluclast® 1,5 l con una actividad enzimática de 188 unidades de papel filtro (UPF) de Sigma-Aldrich (Alemania), NaOH de Sigma-Aldrich (San Luis, Misuri, Estados Unidos), estándares de glucosa (Sigma-Aldrich Alemania) y celobiosa (Dr. Ehrenstorfer GmbH, Augsburg, Alemania).

### Métodos

#### *Composición química de la cáscara de arroz*

La cuantificación de carbohidratos estructurales (celulosa y hemicelulosa) y lignina de la cáscara de arroz se realizó aplicando la metodología del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés) (Sluiter et al., 2012); las cenizas, por termogravimetría (Eliche-Quesada et al., 2017); y la composición de las cenizas, utilizando el espectrómetro Bruker-AXS modelo S4 Pioneer.

#### *Cristalinidad de la cáscara de arroz*

La cristalinidad relativa de la cáscara cruda y molida ( $\leq 250 \mu\text{m}$ ) se analizó mediante difracción de rayos. El análisis se realizó en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF) Bruker AXS, modelo S4 Pioneer. Se midió la intensidad de difracción de la radiación Cu K  $\alpha$  (longitud de onda 0,154 nm, en condiciones de 40 kV y 40 mA), con un rango de escaneo entre 5° y 50° (2  $\theta$ ) (Li et al., 2012).

La cristalinidad relativa se calcula utilizando la siguiente ecuación (Rabek, 1980):

$$\text{CR (\%)} = \frac{A_c}{A_c - A_a} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $A_c$  es el área cristalina y  $A_a$  es el área amorfa en el área de los difractogramas de rayos X.

### Pretratamiento de cáscara de arroz

Para incrementar la superficie de contacto del sustrato con la enzima, reducir la cristalinidad relativa y disminuir la hidrorrepelencia de la cáscara de arroz, se redujo el tamaño de partícula a  $\leq 250 \mu\text{m}$  mediante trituración mecánica. Luego, para reducir el contenido

y suavizar la estructura de la lignina, se prepararon tres soluciones de cáscara de arroz molida al 4 % (m/v) y se adicionó NaOH en tres concentraciones (0,5, 1 y 1,5 %); se agitó a 200 rpm durante una hora (Huang et al., 2018).

También se aplicó un pretratamiento hidrotermal con el objetivo de despolimerizar los componentes estructurales de la cáscara de arroz ( $\leq 250 \mu\text{m}$ ). Este consistió en preparar soluciones de residuos al 5 % (m/v) y se calentó a 121 °C en una autoclave marca Taisite modelo YX-24HDD durante tres periodos diferentes de tiempo (15, 30 y 45 minutos).

### **Espectroscopía IR (FTIR)**

Los espectros infrarrojos por transformación de Fourier (FTIR) de las diferentes muestras de cáscara de arroz ( $\leq 250 \mu\text{m}$ ) sometidas a pretratamiento hidrotermal y alcalino se analizaron en un espectrofotómetro 380 FTIR (marca Thermo Scientific, Estados Unidos). Las muestras se prepararon en gránulos de bromuro de potasio (KBr) presionando una mezcla de 2 mg de muestra con 400 mg de KBr en una prensa de laboratorio JT-11. Para eliminar la interferencia de la presencia de humedad, las muestras y el KBr se deshidrataron por separado a 105 °C hasta peso constante antes de comprimirlos. Los espectros se realizaron en un rango de frecuencia de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$  con una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$  y 32 barridos. La línea de base se corrigió y normalizó en transmitancia (New et al., 2019).

### **Cuantificación de azúcar**

Para cuantificar la celobiosa y glucosa resultante de la hidrólisis enzimática de cáscaras de arroz previamente pretratadas con NaOH (0,5, 1 y 1,5 %) y 121 °C (15, 30 y 45 minutos), se tomaron muestras en un tubo Eppendorf de 1,5 ml y se centrifugó a 10 000 rpm durante 5 minutos en una minicentrífuga marca ELMI-Sky Line; posteriormente, se filtró usando un filtro de jeringa de 0,22  $\mu\text{m}$  y se almacenó en viales de 1,5 ml hasta su análisis por HPLC. Luego, los estándares de calibración y las muestras se analizaron con un HPLC (Agilent 1100, Alemania) equipado con un detector de índice de refracción (G-1362A XR RI). Se utilizó una columna SUPELCOGEL C-610H. La temperatura de la columna se fijó en 50 °C, mientras que para la fase móvil se empleó  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a una concentración de 5 mm a un caudal de 0,6 ml/min y un tiempo de ejecución de 35 minutos (Sluiter et al., 2012).

### **Hidrólisis enzimática de celulosa**

Para realizar los pretratamientos hidrotérmico-alcalino, se preparó una solución al 4 % (p/v) de CA, se ajustó el pH (4,8) agregando HCl al 20 % (v/v); posteriormente, se agregó la enzima Celluclast 1,5 l ( $\beta$ -glucosidasa) a una concentración de 30 FPU/g de carbohidratos; y se colocó en un agitador orbital marca Taisite modelo OS-2000 a 50 °C y 200 rpm durante 144 horas (Kim et al., 2019). Se muestreó cada 24 horas, se centrifugaron durante 5 minutos a 10 000 rpm en la centrífuga antes mencionada y se filtraron a

través de un filtro de jeringa de 0,22 μm (Millipore, Bedford, Massachusetts). La producción de azúcares (celobiosa, glucosa y xilosa) se cuantificó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

Para el cálculo del rendimiento porcentual de celobiosa y glucosa, se utilizó la fórmula que a continuación se detalla (Resch et al., 2015):

$$\% \text{ de conversión} = \frac{\left(\frac{\text{mg azúcar}}{\text{ml}}\right) \times 1,4 \text{ ml} \times H}{\left(\frac{\text{mg polisacáridos}}{\text{g biomasa}}\right) \times 0,014 \text{ g biomasa}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- H = factor de hidrólisis específico para cada combinación de polisacárido/azúcar
- mg/ml de azúcar proviene del análisis HPLC
- g de polisacárido/g de biomasa procede del análisis de composición

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Composición proximal

Determinar la composición química de la cáscara de arroz es un requisito imprescindible para conocer la cantidad de celulosa disponible que puede ser hidrolizada a celobiosa y glucosa. La Tabla 1 muestra la composición proximal de este residuo.

**Tabla 1**

*Análisis composicional y detallado de la cáscara de arroz*

Componentes	%	±
Sólidos totales	92,05	0,12
Celulosa	46,03	0,31
Hemicelulosa	20,4	0,43
Lignina	8,21	0,308
Cenizas	17,41	0,46
Humedad	8,01	0,161

La celulosa (celobiosa y glucosa) de la cáscara de arroz es el principal componente hidrolizable, de la cual se obtuvo un 46,03 ± 0,31% para celobiosa y glucosa. Investigaciones similares sobre la caracterización de la cáscara de arroz reportaron concentraciones de 51 % de celulosa y 21 % de hemicelulosa en base seca (De Oliveira et al., 2017). Soltani

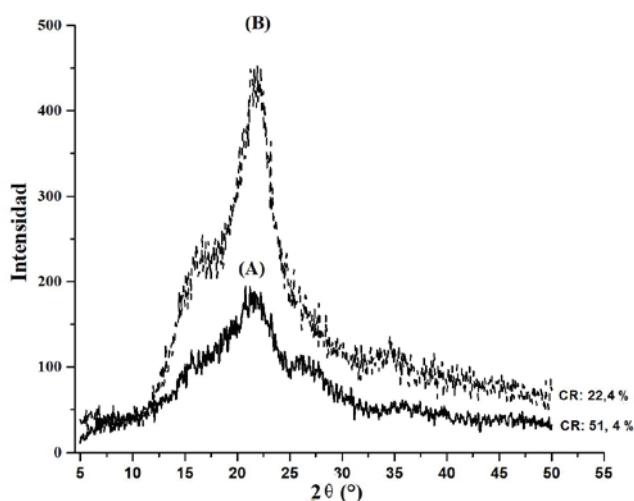
et al. (2015) obtuvieron menores concentraciones de holocelulosa (71 %) en cáscara de arroz cultivada en México.

### Cristalinidad relativa de la cáscara de arroz

La fracción cristalina de la celulosa es la mayor resistencia que tiene este compuesto frente a la hidrólisis enzimática. En la Figura 1 se presentan los difractogramas de rayos X de altura máxima realizados en cáscaras de arroz crudas y molidas ( $\leq 250 \mu\text{m}$ ). Las cáscaras de arroz crudas mostraron picos en  $2\theta = 21,2^\circ$  y  $10,7^\circ$ , mientras que las cáscaras molidas tuvieron picos en  $2\theta = 21,9^\circ$  y  $10,7^\circ$ , ángulos de difracción característicos de este tipo de biomasa. La cáscara de arroz cruda alcanzó un 27 % más de cristalinidad relativa que la cáscara molida ( $\leq 250 \mu\text{m}$ ). De acuerdo con la literatura, sabemos que, con tamaños de partículas  $\leq 250 \mu\text{m}$ , la cristalinidad de la biomasa se reduce alrededor del 50 % y la liberación de glucosa aumenta entre un 24 y un 36 % (Silva et al., 2012).

### Figura 1

Porcentaje de cristalinidad relativa: (A) cáscara de arroz cruda y (B) molida ( $\leq 250 \mu\text{m}$ )



La cristalinidad relativa de la cáscara molida ( $\leq 250 \mu\text{m}$ ) disminuyó con respecto a la cáscara cruda en un 27 % y se eliminó la hidrorrepelencia del residuo que existía en tamaños de partículas  $> 250 \mu\text{m}$ . Investigaciones realizadas con este residuo indican que, al reducir el tamaño de partícula ( $< 400 \mu\text{m}$ ), disminuye la cristalinidad de la celulosa y aumentan los porcentajes de celobiosa y glucosa obtenidos (Kumar et al., 2009; Silva et al., 2012).

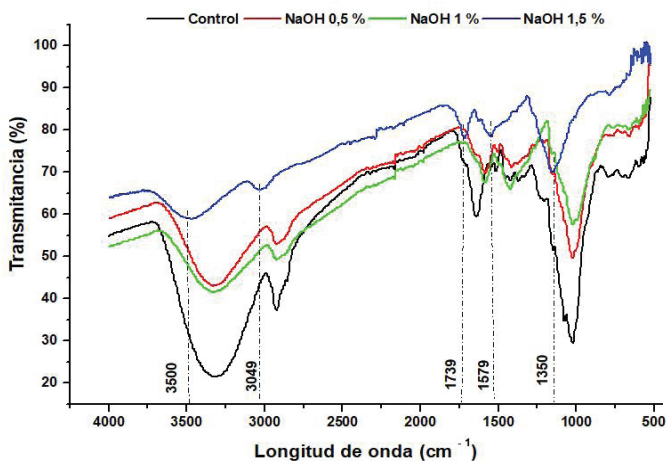
## Análisis de la composición estructural

La modificación estructural de la cáscara del arroz mediante pretratamiento hidrotermal-alcalino fue fundamental para cambiar la estructura de la lignina y la holocelulosa, y así tener una mayor superficie y disponibilidad para el ataque enzimático.

En la Figura 2 se muestran algunos cambios estructurales importantes en la cáscara de arroz después del pretratamiento alcalino. Para explicar algunos picos bien definidos, se los etiquetó y asignó a grupos funcionales de la siguiente manera:  $1350\text{ cm}^{-1}$  fue C – O, C = C, estiramiento de C – C – O en celulosa, hemicelulosa y lignina;  $1739\text{--}1350\text{ cm}^{-1}$  para el estiramiento de C – H en celulosa y hemicelulosa;  $1579\text{--}1739\text{ cm}^{-1}$  fue para OH absorbido y conjugado del estiramiento de C = O y  $3049\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$  fue para la vibración del enlace OH.

Figura 2

*Espectros FTIR de las muestras tratadas con NaOH*



En la Figura 2 se observan los cambios evidentes en el espectro FTIR de la muestra tratada con NaOH al 1,5 %. Se puede ver una señal fuerte que aparece en  $1350\text{ cm}^{-1}$ , que se atribuye al estiramiento de los grupos C – O, C = C, C – C – O, de la celulosa, hemicelulosa y lignina. El pico para la banda de  $1579\text{ cm}^{-1}$  está directamente relacionado con la degradación de la lignina. Yu et al. (2013) indican que valores de banda cercanos a  $1510\text{ cm}^{-1}$  están asociados con el ablandamiento de la lignina. Esta señal es más fuerte en la cáscara no tratada y difiere en  $330\text{ cm}^{-1}$  con respecto a la tratada con NaOH al 1,5 %. Investigaciones similares informan que la reducción de la intensidad máxima significa la reducción del contenido de lignina, lo que está directamente relacionado con la reducción del poder calorífico (Iftikhar et al., 2019).

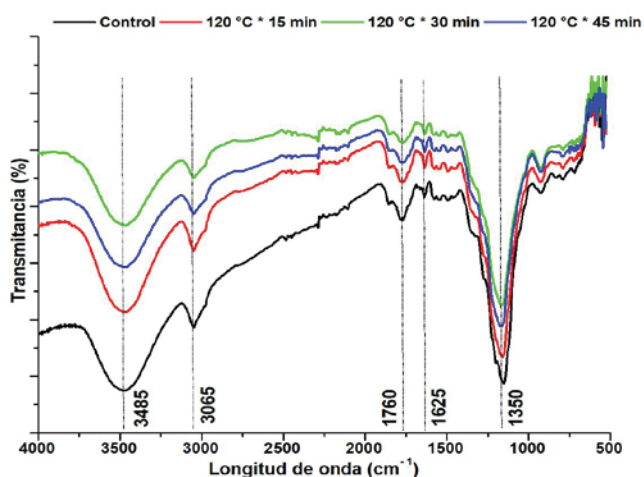


Además, una banda débil y más ancha, que se muestra entre 3049 y 3500  $\text{cm}^{-1}$ , está asociada con la vibración del enlace OH. La presencia del grupo OH probablemente se deba a la presencia de enlaces alcohólicos, hidroxilo y fenólicos en el contenido de carbohidratos y lignina de la biomasa (Wu et al., 2019).

Como se muestra en la Figura 3, algunos picos bien definidos se etiquetaron y asignaron a grupos funcionales de la siguiente manera: 1350  $\text{cm}^{-1}$  es C – O, C = C, estiramiento de C – C – O en celulosa, hemicelulosa y lignina; 1625-1350  $\text{cm}^{-1}$  para la deformación de CH en celulosa y hemicelulosa; 1625-1760  $\text{cm}^{-1}$  es para OH absorbido y conjugado del estiramiento de C = O y 3065-3485  $\text{cm}^{-1}$  fue para vibración del enlace OH.

**Figura 3**

*Espectros FTIR de las muestras con tratamiento térmico*



Los cambios fueron evidentes en el espectro FTIR de la muestra con tratamiento hidrotérmico a 121 °C durante 45 minutos. Se puede ver una fuerte señal a 1350  $\text{cm}^{-1}$  que se atribuye al estiramiento de los grupos C – O, C = C, C – C – O, de la celulosa, hemicelulosa y lignina. La tensión de la banda observada en la región de 1760  $\text{cm}^{-1}$  indica la vibración de estiramiento de C = O; sin embargo, la intensidad máxima se reduce al mínimo en el tratamiento a 120 °C durante 45 minutos. Investigaciones similares informan que la reducción de la intensidad máxima señala la reducción del contenido de lignina, lo que está directamente relacionado con la reducción del poder calorífico (Iftikhar et al., 2019).

Además, una banda débil y más ancha, que se muestra entre 3485 y 3065  $\text{cm}^{-1}$ , está asociada con la reducción del número de hidroxilo. Estudios similares explican que la presencia del grupo OH probablemente se deba a la presencia de enlaces alcohólicos,

hidroxilo y fenólicos (Yaddanapudi et al., 2017).

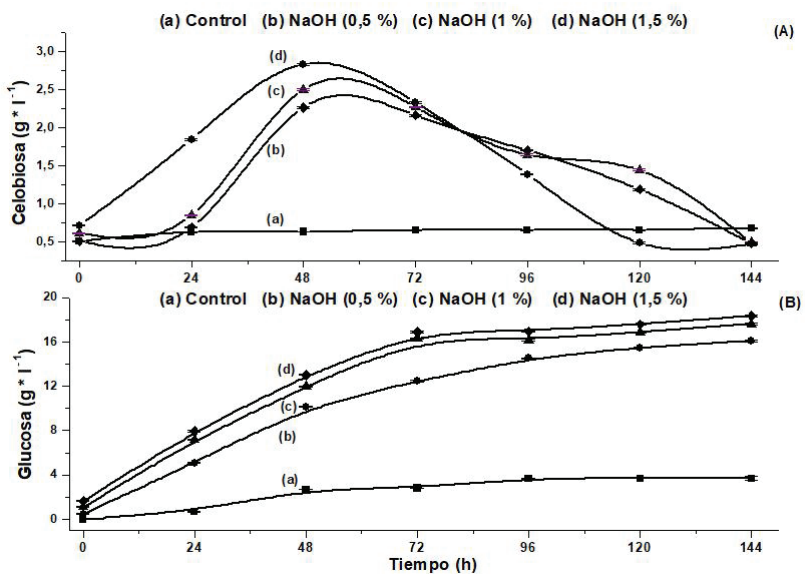
### Hidrólisis enzimática de celulosa de cáscaras de arroz

#### Hidrólisis parcial de celulosa

La hidrólisis completa de la celulosa es uno de los principales obstáculos en la tecnología de la biomasa; cuando este homopolisacárido forma parte de matrices complejas, gran parte del mismo se hidroliza a celodextrinas (celobiosa). La celobiosa es un disacárido que se obtiene de la hidrólisis parcial de la celulosa utilizando  $\beta$ -glucosidasas. A continuación, la Figura 4 muestra las concentraciones de celobiosa y glucosa obtenidas de la hidrólisis de la cascarilla de arroz molida ( $\leq 250 \mu\text{m}$ ).

**Figura 4**

Formación de celobiosa y glucosa durante la hidrólisis enzimática



La aplicación de NaOH (1,5 %) como pretratamiento suavizante de celulosa produjo una mayor concentración de celobiosa y una menor cantidad de glucosa después de 48 horas de hidrólisis enzimática; y una mayor concentración de NaOH (0,5 %), una menor cantidad de celobiosa y mayor concentración de glucosa, lo que indica que el pretratamiento alcalino favorece la hidrólisis enzimática de la celulosa a glucosa. El 10,14 % de la celulosa fue parcialmente hidrolizada a celobiosa y el 46,63 % a glucosa, obteniéndose el 56,77 % de la hidrólisis total de la celulosa presente en la cáscara de arroz.

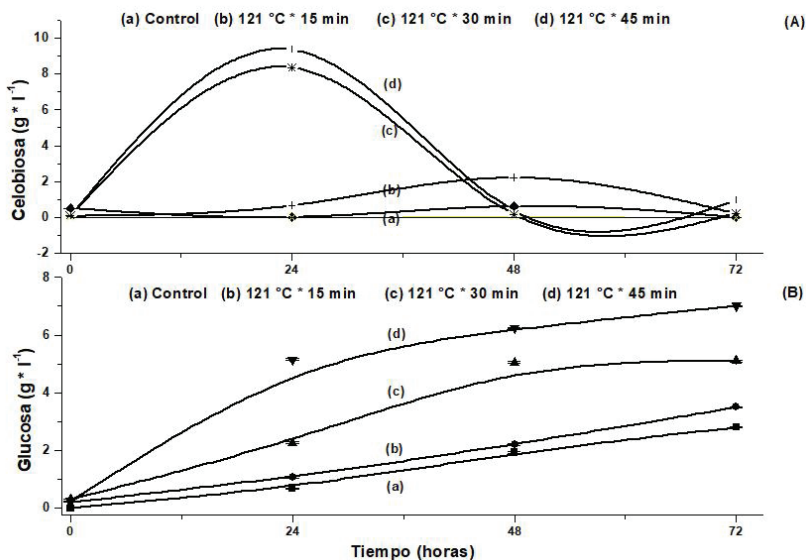
Los estudios de hidrólisis enzimática de celulosa pura (Avicel PH101, 102 y 105)

reportan una conversión del 38,5 % de celulosa en glucosa usando  $\beta$ -glucosidasa producida por *Neurospora crassa* (Lebaz et al., 2016; Wu et al., 2013), y 78,9 % de hidrólisis de celulosa a celobiosa y glucosa utilizando Celluclast 1,5 l producido por *Trichoderma reesei* (Ouyang et al., 2010).

En los experimentos donde se aplicó el pretratamiento hidrotérmico se logró obtener mayores concentraciones de celobiosa, lo que indica que solo fue posible hinchar la celulosa, pero no hidrolizarla. A continuación, la Figura 5 muestra las concentraciones de celobiosa y glucosa obtenidas.

**Figura 5**

Formación de celobiosa y glucosa durante la hidrólisis enzimática de muestras pretratadas hidrotérmicamente



El pretratamiento hidrotérmico (121 °C × 45 min) como pretratamiento de ablandamiento de celulosa produjo una mayor concentración de celobiosa y una menor cantidad de glucosa después de 24 horas de hidrólisis enzimática; mientras que un tiempo de pretratamiento hidrotérmico más corto (121 °C × 15 min), menor concentración de celobiosa y glucosa, lo que indica que el pretratamiento hidrotérmico incrementa la hidrólisis enzimática parcial de celulosa a celobiosa. El 34,62 % de la celulosa fue parcialmente hidrolizada a celobiosa y el 18,42 % a glucosa, obteniéndose el 51,89 % de la hidrólisis total de la celulosa presente en el arroz. En estudios sobre hidrólisis enzimática de biomasa celulósica utilizando  $\beta$ -glucosidasa, fue posible conseguir porcentajes importantes de hidrólisis parcial (Lebaz et al., 2016; Parisutham

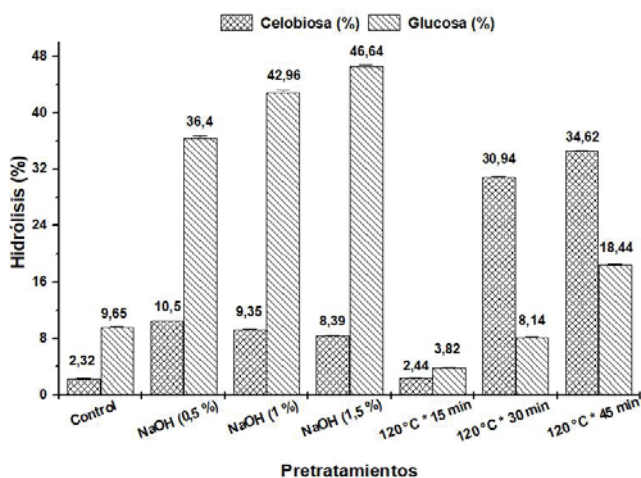
et al., 2017).

### Porcentajes de hidrólisis del algodón a celobiosa y glucosa

La hidrólisis total de la celulosa ha sido una característica clave de la despolimerización de la biomasa celulósica, debido a la recalcitrancia y cristalinidad de la celulosa, lo que limita el uso de enzimas hidrolíticas (celodextrinasa, celobiohidrolasa y  $\beta$ -glucosidasa). A continuación, en la Figura 6 se muestran los porcentajes de hidrólisis parcial de celulosa para obtener celobiosa y glucosa a partir de cáscara de arroz molida ( $\leq 250 \mu\text{m}$ ).

**Figura 6**

*Porcentajes de bioconversiones de celulosa a celobiosa y glucosa*



La bioconversión de celulosa a celobiosa en los pretratamientos hidrotermales ( $121 \text{ }^\circ\text{C} \times 45 \text{ min}$ ) fue del 34,62 % en 24 horas de hidrólisis enzimática y la conversión de celulosa a glucosa fue del 18,64 %; mientras que en las muestras pretratadas con hidróxido de sodio al 0,5 %, la concentración de celobiosa fue del 10,5 % en 48 horas de hidrólisis enzimática, lo que indica que a mayor concentración de álcali, mayor será la hidrólisis total de la celulosa. Estudios de hidrólisis enzimática de algodón blanco molido aplicando Celluclast y Cellic® CTec2 han logrado convertir el 32 % de la celulosa en celobiosa después de 48 horas de hidrólisis enzimática (Austad, 2018).

### CONCLUSIÓN

El análisis FTIR demostró que la aplicación de pretratamientos alcalinos con NaOH para

despolimerizar la lignina presente en la cáscara de arroz molida ( $\leq 250 \mu\text{m}$ ) provocan un mayor ablandamiento y degradación selectiva de la lignina y, por lo tanto, también afectan la cristalinidad de la celulosa; esto se observa por un mayor porcentaje de hidrólisis completa de celulosa a glucosa.

La aplicación del pretratamiento hidrotermal a la cáscara de arroz molida genera la hidrólisis parcial de la celulosa a celobiosa, lo que se evidencia por la mayor producción de celobiosa y menor concentración de glucosa. La producción de celobiosa es 1,89 veces mayor que la de glucosa en el pretratamiento hidrotermal y en el pretratamiento alcalino la producción de glucosa es 13,75 veces mayor que la de celobiosa.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores pertenecientes al grupo BIOENGIN agradecen a la Universidad Técnica de Machala por su apoyo académico y económico.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

**Humberto Ayala Armijos:** conceptualización, adquisición de fondos. **Nicole Romero Calle:** *data curation*, recursos. **Braulio Madrid Celi:** investigación, redacción: revisión y edición. **Ramiro Quezada Sarmiento:** visualización, *software*. **Edgar Tinoco Gálvez:** administración de proyecto. **Richard Chávez Abad:** supervisión.

## REFERENCIAS

- Adler, A., Kumaniaev, I., Karacic, A., Baddigam, K., Hanes, R., Subbotina, E., Bartling, A., Huertas-Alonso, A., Moreno, A., Håkansson, H., Mathew, A., Beckham, G., & Samec, J. (2022). Lignin-first biorefining of Nordic poplar to produce cellulose fibers could displace cotton production on agricultural lands. *Joule*, 6(8), 1845-1858. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.021>
- Austad, A. (2018). *Enzymatic conversion of cotton textiles* [Tesis de posgrado no publicada]. Norwegian University of Life Sciences. <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2567315/Austad2018.pdf>
- Ávila, P., Silva, M., Martins, M., & Goldbeck, R. (2021). Cello-oligosaccharides production from lignocellulosic biomass and their emerging prebiotic applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37, 73 <https://doi.org/10.1007/>

s11274-021-03041-2

- Chen, P., Shrotri, A., & Fukuoka, A. (2021). Synthesis of cello-oligosaccharides by depolymerization of cellulose: A review. *Applied Catalysis A: General*, 621. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2021.118177>
- De Oliveira, J., Bruni, G., Oliveira, K., Mello, S., Silveira, G., Guerra, A., & Da Rosa, E. (2017). Cellulose fibers extracted from rice and oat husks and their application in hydrogel. *Food Chemistry*, 221, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.048>
- Eliche-Quesada, D., Felipe-Sesé, M., López-Pérez, J., & Infantes-Molina, A. (2017). Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. *Ceramics International*, 43(1), 463-475. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.181>
- Huang, G., Peng, W., Yang, S., & Yang, C. (2018). Delignification kinetic modeling of NH<sub>4</sub>OH-KOH-AQ pulping for bagasse. *Industrial Crops and Products*, 123, 740-745. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.040>
- Iftikhar, M., Asghar, A., Ramzan, N., Sajjadi, B., & Chen, W. (2019). Biomass densification: Effect of cow dung on the physicochemical properties of wheat straw and rice husk based biomass pellets. *Biomass and Bioenergy*, 122, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.005>
- Kim, D., Park, H., Jung, Y., Sukyai, P., & Kim, H. (2019). Pretreatment and enzymatic saccharification of oak at high solids loadings to obtain high titers and high yields of sugars. *Bioresource Technology*, 284, 391-397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.134>
- Kumar, J., Saini, R., & Tewari, L. (2015). Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: Concepts and recent developments. *3 Biotech*, 5, 337-353. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>
- Kumar, P., Barrett, D., Delwiche, M., & Stroeve, P. (2009). Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713-3729. <https://doi.org/10.1021/ie801542g>
- Lebaz, N., Cockx, A., Spérandio, M., Liné, A., & Morchain, J. (2016). Application of the Direct Quadrature Method of Moments for the modelling of the enzymatic hydrolysis of cellulose: II. Case of insoluble substrate. *Chemical Engineering Science*, 149, 322-333. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.04.029>
- Li, J., Li, S., Fan, C., & Yan, Z. (2012). The mechanism of poly (ethylene glycol) 4000 effect

- on enzymatic hydrolysis of lignocellulose. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 89, 203-210. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2011.09.019>
- Méndez-Líter, J., Gil-Muñoz, J., Nieto-Domínguez, M., Barriuso, J., De Eugenio, L., & Martínez, M. (2017). A novel, highly efficient  $\beta$ -glucosidase with a cellulose-binding domain: Characterization and properties of native and recombinant proteins. *Biotechnology for Biofuels*, 10, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0946-2>
- Naqvi, S., Uemura, Y., & Yusup, S. (2014). Catalytic pyrolysis of paddy husk in a drop type pyrolyzer for bio-oil production: The role of temperature and catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 106, 57-62. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.12.009>
- New, E., Wu, T.Y., Tien, C., Poon, Z., Loow, Y., Wei, L., Procentese, A., Siow, L., Teoh, W., Nik Daud, N., Jahim, J., & Mohammad, A. (2019). Potential use of pure and diluted choline chloride-based deep eutectic solvent in delignification of oil palm fronds. *Process Safety and Environmental Protection*, 123, 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.11.015>
- Ouyang, J., Dong, Z., Song, X., Lee, X., Chen, M., & Yong, Q. (2010). Improved enzymatic hydrolysis of microcrystalline cellulose (Avicel PH101) by polyethylene glycol addition. *Bioresource Technology*, 101(17), 6685-6691. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.085>
- Parisutham, V., Chandran, S., Mukhopadhyay, A., Lee, S., & Keasling, J. (2017). Intracellular cellobiose metabolism and its applications in lignocellulose-based biorefineries. *Bioresource Technology*, 239, 496-506. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.001>
- Rabek, J. (1980). *Experimental methods in polymer chemistry: Physical principles and applications*. John Wiley & Sons Ltd.
- Resch, M., Baker, J., & Decker, S. (2015). *Low solids enzymatic saccharification of lignocellulosic biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP)*. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63351.pdf>
- Siccama, J., Oudejans, R., Zhang, L., Kabel, M., & Schutyser, M. (2022). Steering the formation of cellobiose and oligosaccharides during enzymatic hydrolysis of asparagus fibre. *LWT*, 160, artículo 113273 <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113273>
- Silva, G., Couturier, M., Berrin, J.-G., Buléon, A., & Rouau, X. (2012). Effects of grinding processes on enzymatic degradation of wheat straw. *Bioresource Technology*, 103(1), 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.073>
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2012).

*Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP).* National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/gen/fy13/42618.pdf>

- Soltani, N., Bahrami, A., Pech-Canul, M., & González, L. (2015). Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials. *Chemical Engineering Journal*, 264, 899-935. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.056>
- Wu, J., Wu, Y., Yang, F., Tang, C., Huang, Q., & Zhang, J. (2019). Impact of delignification on morphological, optical and mechanical properties of transparent wood. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 117, 324-331. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.12.004>
- Wu, W., Hildebrand, A., Kasuga, T., Xiong, X., & Fan, Z. (2013). Direct cellobiose production from cellulose using sextuple beta-glucosidase gene deletion *Neurospora crassa* mutants. *Enzyme and Microbial Technology*, 52(3), 184-189. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2012.12.010>
- Yaddanapudi, H., Hickerson, N., Saini, S., & Tiwari, A. (2017). Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications. *Vacuum*, 146, 649-654. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.016>
- Yu, Y., Zeng, Y., Zuo, J., Ma, F., Yang, X., Zhang, X., & Wang, Y. (2013). Improving the conversion of biomass in catalytic fast pyrolysis via white-rot fungal pretreatment. *Bioresource Technology*, 134, 198-203. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.167>



# ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO DE LA COMPETENCIA INVESTIGATIVA EN ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL: ESTUDIO DE CASO DE LA UNIVERSIDAD INSTITUTO IRAPUATO

MIGUEL ÁNGEL GUERRA OLIVARES\*

<https://orcid.org/0000-0002-8667-4537>

Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Instituto Irapuato, Irapuato,  
Guanajuato, México

JOSÉ NÉSTOR PERAZA BALDERRAMA

<https://orcid.org/0000-0003-2115-8571>

Instituto Tecnológico de Sonora, Universidad Instituto Irapuato, Irapuato,  
Guanajuato, México

Recibido: 28 de mayo del 2024 / Aceptado: 8 de agosto del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7223>

**RESUMEN.** La investigación se centra en diseñar una estrategia para el desarrollo de la competencia investigativa en estudiantes universitarios de la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Instituto Irapuato (UII). La metodología de enfoque cuantitativo es experimental, con grupo natural intacto y grupo con intervención. La intervención será llevar a la práctica el taller “Cómo hacer investigación en la ingeniería” y, posteriormente, aplicar una rúbrica evaluativa; los datos se analizan en Minitab Statistical Software utilizando procedimientos de prueba de hipótesis e intervalos de confianza para comparar las medias de las intervenciones. Los resultados del experimento de  $p$ -valor 0,013 evidencian un cambio significativo en la variable dependiente: competencia investigativa, logrando el diseño de la estrategia para el desarrollo de la competencia investigativa en estudiantes de la carrera de Ingeniería Industrial de la UII.

**PALABRAS CLAVE:** investigación / aptitudes / estudiantes universitarios / ingeniería industrial

---

Este estudio fue financiado por Fomento Educativo Cultural A. C. y por la Universidad Instituto Irapuato.

\*Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [miguel\\_guerra@correo.uui.edu.mx](mailto:miguel_guerra@correo.uui.edu.mx); [jnestor.peraza@gmail.com](mailto:jnestor.peraza@gmail.com)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## STRATEGY FOR THE DEVELOPMENT OF RESEARCH COMPETENCE IN UNIVERSITY STUDENTS: IRAPUATO INSTITUTE UNIVERSITY CASE STUDY

**SUMMARY.** The research focuses on designing a strategy for the development of research competence in university students of the Industrial Engineering degree at the UII. The quantitative approach methodology is experimental with an intact natural group and a group with intervention, where the intervention will be to put into practice the workshop “How to do Research in Engineering” to later apply an evaluative rubric, analyzing the data in Minitab Statistical Software using procedures hypothesis testing and confidence intervals to compare the means of the interventions. The results of the experiment with a p-value of 0,013 show a significant change in the dependent variable: research competence, achieving the design of the strategy for the development of research competence in students of the Industrial Engineering degree at the UII.

**KEYWORDS:** research / ability / college students / industrial engineering

## INTRODUCCIÓN

La educación superior del siglo XXI experimenta una profunda transformación, trascendiendo su función tradicional de formación (Rodríguez-Mantilla, 2022). En este nuevo contexto, la universidad emerge como un motor de innovación y cambio social. Ante esta exigencia, las instituciones académicas han tenido que reorientar sus prácticas pedagógicas y curriculares, centrándose en la resolución de problemas reales, el desarrollo de competencias tanto en estudiantes como en docentes, y la promoción de la investigación formativa (Rodríguez-Mantilla, 2022). Dada esta evolución, la sociedad demanda de las universidades profesionales altamente capacitados y con habilidades diversas.

Según Rodríguez-Mantilla (2022), la formación integral de un estudiante trasciende la mera adquisición de la lengua. Es indispensable que desarrolle un conjunto de competencias que le permitan desenvolverse en un mundo cada vez más complejo. Entre estas destaca la competencia comunicativa, que implica el uso eficaz de diversos códigos y medios en distintos contextos; la competencia tecnológica, relacionada con la habilidad para utilizar herramientas digitales de manera eficiente; y la competencia investigadora, que se refiere a la capacidad de buscar, seleccionar y procesar información para resolver problemas.

Espinoza et al. (2016) plantean que la formación de competencias investigativas en estudiantes universitarios debe abordarse desde una perspectiva pedagógica integral. Los autores proponen un enfoque que vincula los procesos de enseñanza-aprendizaje con el desarrollo de habilidades investigativas, con el objetivo de responder a las demandas de la sociedad actual. De esta manera, se busca fomentar una cultura investigativa sólida a través de acciones educativas formales, no formales e informales.

Por otra parte, Rodríguez-Mantilla (2022) señala que la sociedad exige a la universidad que forme a sus estudiantes en competencias de diversa índole: comunicativas, tecnológicas e investigativas. Sin embargo, se evidencia una carencia generalizada en los estudiantes universitarios respecto al conocimiento profundo de la metodología de investigación y la estructuración de proyectos. Identificar y analizar estas deficiencias, así como los aspectos positivos, resulta fundamental para optimizar la formación investigativa de estos jóvenes.

El currículo trasciende la simple estructuración disciplinar de planes y programas. Es el resultado de un proceso meticuloso que busca identificar los conocimientos fundamentales, las habilidades clave y los valores esenciales que deben adquirir las nuevas generaciones para desenvolverse en la sociedad deseada (Amadio et al., 2014).

Considerando el análisis de los estudios expuestos y la experiencia docente, es posible comenzar a desarrollar la competencia investigativa en los estudiantes universitarios en el proceso de enseñanza-aprendizaje de forma didáctica, periódica y

medible, que genere no solo el interés, sino la motivación por la investigación en los niveles educativos subsecuentes.

Este estudio aportará como experimento el diseño e implementación de una estrategia para el desarrollo de la competencia investigativa en estudiantes universitarios de la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Instituto Irapuato (UII). La novedad de este procedimiento consiste no solo en afianzar las competencias que exige el Estado mexicano, sino en situar la investigación como competencia, de manera que los estudiantes universitarios de cualquier semestre puedan hacer proyectos de investigación con orientación al desarrollo tecnológico, y sobre todo enfocados en las líneas de investigación de la carrera, sin que sea necesario esperar las materias de investigación hasta séptimo semestre (metodología de la investigación) y octavo semestre (seminario de titulación) para encontrarse con la posibilidad del descubrimiento, de generar ideas investigativas y de explorar con ayudas sistemáticas.

## METODOLOGÍA

### Descripción general del estudio

La metodología de enfoque cuantitativo es experimental, con grupo natural intacto y grupo con intervención. La intervención consiste en llevar a la práctica el taller “Cómo hacer investigación en la ingeniería”, tomando como base la metodología de investigación tecnológica adaptada a las carreras de ingeniería de De la Cruz (2016)<sup>1</sup>; para posteriormente aplicar una rúbrica evaluativa. Los datos se analizan en Minitab Statistical Software V19 utilizando procedimientos de prueba de hipótesis e intervalos de confianza para comparar las medias de las intervenciones. El término *experimento* se refiere a realizar una acción y después observar las consecuencias. Hernández et al. (2006) afirman:

Un experimento es un estudio de investigación en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas) para analizar las consecuencias de esa manipulación sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos), dentro de una situación de control para el investigador. (p. 129)

La estrategia formulada para el desarrollo de las competencias investigativas en estudiantes universitarios consiste en las siguientes etapas:

- a. *Participantes*. Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó la técnica de muestreo probabilístico estratificado, en donde se dividió a toda la población objetivo en diferentes subgrupos o estratos (semestres), y luego se seleccionó aleatoriamente a los sujetos finales de los diferentes estratos de forma

---

<sup>1</sup> Cabe señalar que este taller no forma parte en el plan de estudios de la carrera en cuestión.

proporcional de primer, segundo, tercer, quinto, sexto y séptimo semestre, asegurando contar con cantidades adecuadas de estudiantes de cada grado en la muestra final. La población corresponde a 159 estudiantes universitarios matriculados en la barrera de Ingeniería Industrial de la UII en el 2023 en las modalidades escolarizada (59), sabatina (86) y nocturna (14), en edades comprendidas entre los 18 y 39 años, de los cuales 108 son hombres y 51 mujeres.

**Tabla 1***Cálculo del muestreo estratificado*

Semestre	Número de alumnos										Subpoblación (muestreo estratificado)
	Escolarizada	H	M	Sabatina	H	M	Nocturna	H	M	Total	
1	15	8	7	27	17	10	6	4	2	48	34
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	16	13	3	21	14	7	8	6	2	45	32
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	13	6	7	23	13	10	0	0	0	36	26
6	0	0	0	7	5	2	0	0	0	7	5
7	15	9	6	8	3	5	0	0	0	23	16
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totales	59			86			14			159	113
Población	159										
Muestra	113										
Coficiente	0,71069182										

Una vez definida la muestra con un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 %, se realizó la invitación a formar parte del estudio con la finalidad de hacer una selección aleatoria y formar dos grupos (grupo natural intacto y grupo con intervención). En total aceptaron formar parte del estudio 27 alumnos; se estableció 14 alumnos para el primer grupo y 13 para el segundo, sin darles a conocer a qué grupo pertenecen.

- b. *Diagnóstico del nivel de la competencia investigativa.* Se diseñó un instrumento ex profeso (cuestionario) compuesto por una escala de Likert que consta de 23 ítems, con la finalidad de detectar fortalezas y debilidades, para medir la variable “diagnóstico del proceso de enseñanza-aprendizaje y la competencia investigativa en los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Industrial de la UII”. A fin de evaluar la confiabilidad o consistencia interna del instrumento, se utilizó la técnica alfa de Cronbach (escala), donde este “es el promedio de las correlaciones entre los ítems que forman parte de un instrumento” (Streiner,

2003, p. 217). Se obtuvo un alfa de Cronbach de 0,8009, que según Hernández et al. (2010) muestra excelente confiabilidad. Respecto a la validez del instrumento, se utilizó una validación de contenido a partir del juicio de expertos, que para Escobar-Pérez y Cuervo-Martínez (2008) es “una opinión informada de personas con trayectoria en el tema, que son reconocidas por otros como expertos cualificados en este, y que pueden dar información, evidencia, juicios y valoraciones” (p. 29). La información recopilada servirá de base para encauzar el diseño de la intervención en el estudio.

- c. *Diseño e implementación del curso de investigación.* El curso teórico “Cómo llevar a cabo una investigación científica”, con una duración de 12 horas, se desarrolló tomando como referencia el modelo simplificado que define unas categorías según el método científico: presentación, pregunta-problema, delimitación, objetivos, metodología e informe, de Tamayo (2005), y se realizó un trabajo de investigación sobre una temática general de la ingeniería. Fue impartido por un especialista en investigación al total de estudiantes que aceptaron participar en el estudio.
- d. *Acción de tratamiento para la realización del experimento.* El taller práctico “Cómo hacer investigación en la ingeniería”, con una duración de 12 horas, tomó como base la metodología de investigación tecnológica adaptada a las carreras de ingeniería de De la Cruz (2016). Fue impartido por un especialista en investigación enfocado en el desarrollo tecnológico únicamente para los estudiantes pertenecientes al grupo con intervención, en el cual desarrollaron un trabajo de investigación científica, pero con la asignación de un tema específico de desarrollo tecnológico del área de la ingeniería industrial, mientras que el grupo natural siguió su curso regular académico.
- e. *Evaluación de la estrategia formulada.* Finalmente, se aplicaron dos rúbricas evaluativas: una para el grupo natural intacto elaborada por Oquendo (2019), con base en el modelo simplificado de investigación para jóvenes de Tamayo (2005); y otra para el grupo con intervención de elaboración propia con base en la metodología de investigación tecnológica adaptada a las carreras de ingeniería de De la Cruz (2016).
- f. *Medición del efecto de la estrategia.* Taller práctico “Cómo hacer investigación en la ingeniería” con enfoque en el desarrollo tecnológico.

Con la finalidad de realizar una prueba comparativa y evidenciar si existe o no un cambio significativo en la variable dependiente “competencia investigativa”, se analizaron los datos utilizando procedimientos de prueba de hipótesis e intervalos de confianza para comparar las medias de las intervenciones.

Figura 1

Esquema del proceso de estrategia para el desarrollo de la competencia investigativa



Nota: El proceso de la estrategia para el desarrollo de la competencia investigativa se llevó a cabo durante el periodo de agosto del 2023 a marzo del 2024.

## RESULTADOS

### De la aplicación del cuestionario (diagnóstico del nivel de la competencia investigativa)

Con la intención de agrupar los elementos del instrumento, el cuestionario se dividió en cuatro partes a las que se denominó *entornos*: (1) entorno académico, (2) entorno educativo, (3) entorno escolar y (4) entorno a la investigación.

Los resultados obtenidos indican que los estudiantes de Ingeniería Industrial de la UII aún se encuentran en las primeras etapas de desarrollo de sus competencias investigativas. Esto sugiere que es necesario fortalecer los elementos que promueven la realización de proyectos de investigación a nivel universitario a fin de mejorar su desempeño académico.

Se encontraron las siguientes fortalezas y debilidades en el diagnóstico. En primer lugar, se identificaron estas fortalezas:

1. Los estudiantes cuentan con conocimientos previos y capacidad de interrelacionar contenidos.
2. La utilización del trabajo en equipo por parte de los docentes durante el desarrollo y el cierre de clase indica que existe trabajo colaborativo entre los estudiantes.
3. El alumno muestra respeto por las opiniones de sus compañeros y es objetivo cuando expresa las suyas.
4. La mayoría de las materias y su contenido son de interés y facilitan el proceso de aprendizaje.
5. El alumno está de acuerdo en que la investigación científica proporciona a los estudiantes una oportunidad única de poner en práctica los conocimientos adquiridos en el aula.
6. El alumno considera que la investigación científica universitaria es la fuente para encontrar soluciones a las problemáticas en general dentro de la ingeniería.

En segundo lugar, tenemos estas debilidades:

1. Poca cualificación docente relativa al nivel de estudios realizado y a la formación en ingeniería.
2. Se presenta una tendencia más hacia el “saber conocer” que al “saber hacer”, y poca afinidad entre los contenidos y los ritmos de aprendizaje.
3. Falta conocimiento en relación con la funcionalidad y uso de los recursos de la contextualización de la clase; problemas en organización y coherencia metodológica en el inicio, desarrollo y cierre de la clase.



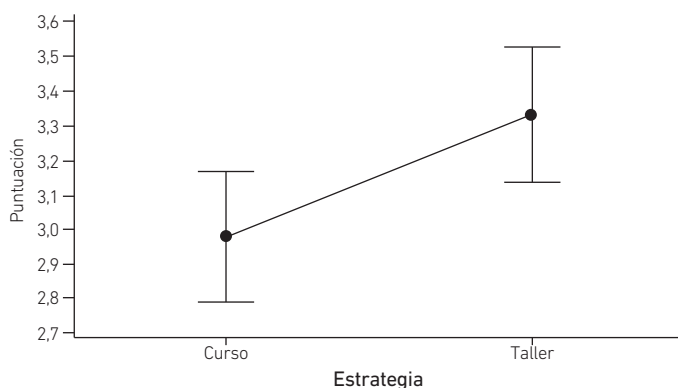
4. Falta inclusión del contexto en el aula y la participación del entorno; la metodología está orientada a procesos de análisis, con falencias en los procesos de indagación e investigación, y de aprendizaje por descubrimiento.
5. Se piensa que las competencias más importantes son la ciudadana y la comunicativa, y en menor medida las competencias en matemáticas, ciencia y tecnología, y digital; es notable la poca importancia que se le da en la universidad a la adquisición de las competencias investigativas para el desarrollo tecnológico.
6. Se considera que, para la mayoría de los docentes y alumnos, la investigación científica no es un tema relevante, pues desconocen el método científico, y falta mejorar procesos de experimentación.

### De la aplicación de la estrategia para el desarrollo de la competencia investigativa en los estudiantes universitarios

El proceso de la estrategia para el desarrollo de la competencia investigativa se llevó a cabo durante el periodo de agosto del 2023 a marzo del 2024, y los datos obtenidos de las rúbricas evaluativas se almacenaron en Minitab Statistical Software. Su análisis, para responder a la pregunta de investigación, se realizó con la prueba estadística ANOVA o análisis de la varianza, con un análisis gráfico por medio de una gráfica de intervalos (puntuación vs. estrategia), cuyo nivel de confianza es del 95 %. Se observó que la puntuación promedio obtenida entre el curso “Cómo llevar a cabo una investigación científica” (que se desarrolló con toda la muestra) y el taller “Cómo hacer investigación en la ingeniería” (impartido únicamente a los estudiantes pertenecientes al grupo con intervención) difiere y va en aumento. Por lo anterior, se tiene la firme sospecha de que existe una diferencia significativa entre dichas estrategias.

**Figura 2**

*Gráfica de intervalos de puntuación vs. estrategia*



*Nota.* Las puntuaciones de evaluación se realizaron durante el periodo académico de invierno del 2024.

Respecto a la cuantificación y evaluación de la importancia de las fuentes de variación, esta se obtuvo a través del análisis de varianza (ANOVA), que permitió analizar los datos provenientes del experimento aleatorio comparativo. El planteamiento quedó como se aprecia en las Tablas 2 y 3.

**Tabla 2**

*Planteamiento de hipótesis para el experimento*

Método			
Hipótesis nula	Hipótesis alterna	Nivel de significancia	Regla de decisión
Todas las medias son iguales.	No todas las medias son iguales.	$\alpha = 0,05$	$p \leq \alpha$ , se rechaza $H_0$

*Nota.* Se propuso igualdad de varianzas para el análisis.

**Tabla 3**

*Información del factor*

Factor	Niveles	Valores
Estrategia	2	Curso, taller

La Tabla 4 muestra el resultado del análisis de varianza, comparando el valor  $p$  de la prueba con el nivel de significancia. El valor de  $p$  obtenido (0,013) refleja la probabilidad de rechazar la  $H_0$  planteada; como el valor  $p$  es menor o igual que el criterio  $\alpha$  de significancia (0,05), entonces, se rechaza la hipótesis nula, aceptando la hipótesis alterna.

**Tabla 4**

*Análisis de la varianza*

Fuente	GL	SC ajustado	MC ajustado	Valor $F$	Valor $p$
Estrategia	1	0,8598	0,8598	7,18	0,013
Error	25	2,9921	0,1197		
Total	26	3,8519			

**Tabla 5**

*Resultados estadísticos de la prueba (ANOVA)*

$p$ -valor	Decisión	Conclusión
0,013	Se rechaza $H_0$ Se acepta $H_1$	Con un nivel de significancia del 5 %, se observa que existe una diferencia significativa entre las estrategias.

Se puede concluir que la probabilidad calculada es menor de 0,05 al contrastar los resultados del curso "Cómo llevar a cabo una investigación científica" tomando como referencia el modelo simplificado de Tamayo (2005), con los del taller "Cómo hacer investigación en la ingeniería", tomando como base la metodología de investigación tecnológica adaptada a las carreras de ingeniería de De la Cruz (2016) en el experimento. Se puede afirmar con un 95 % de confianza que existen diferencias significativas entre el curso y el taller, lo que muestra una respuesta significativa en los alumnos al usar el procedimiento de "Cómo hacer investigación en ingeniería", que permite el desarrollo de la competencia investigativa.

## DISCUSIÓN

Los resultados de nuestra investigación revelan un cambio notable en las competencias investigativas de los estudiantes. Gracias a la implementación de la estrategia, los estudiantes han logrado desarrollar habilidades iniciales en investigación y han establecido una conexión significativa entre sus conocimientos previos y el contexto en el que se encuentran. Estos hallazgos corroboran los estudios de Cuevas et al. (2016), quienes, citando a Holstermann et al. (2010), destacan que los aprendizajes basados en la experiencia y el interés de los estudiantes son más significativos.

A pesar del interés generalizado por fomentar la investigación en el ámbito educativo, como lo señalan Cuevas et al. (2016), las evidencias de su implementación efectiva son escasas. Del Valle y Mejía (2016) corroboran esta idea al afirmar que es necesario transformar las prácticas docentes para promover una educación centrada en el desarrollo de competencias científicas, incluyendo la investigación.

Los resultados de nuestra investigación corroboran la importancia del currículo en el desarrollo de competencias investigativas, tal como lo señalan diversos estudios, entre ellos el de Artaza (2013). Coincidimos en que es fundamental diseñar mallas curriculares que integren la investigación como eje transversal. Asimismo, siguiendo las propuestas de Silva et al. (2017), consideramos que es necesario realizar evaluaciones internas periódicas del currículo para garantizar su pertinencia y coherencia. Al analizar las mallas curriculares de cuatro universidades mexicanas, tanto públicas como privadas, se encontró una notable disparidad en el número de asignaturas ofertadas, que oscilan entre 56 y 69. Esta heterogeneidad curricular se refleja en los resultados de nuestra investigación, donde no se observó una relación directa entre el número de materias y el desempeño estudiantil. Sin embargo, coincidimos con Ruiz et al. (2014) en el bajo rendimiento académico de los estudiantes de ingeniería en México, en comparación con otros países. Estudios previos, como el de Malagón-Plata (2009), han explorado las dinámicas de construcción curricular y su vinculación con el entorno. Estos trabajos han identificado diversas categorías de análisis, como la pedagógica, la investigación y la vinculación con el contexto. Por su parte, Acevedo-Gutiérrez et al. (2019) subrayan

la importancia de realizar una investigación exhaustiva antes de diseñar una malla curricular, considerando no solo las mejores prácticas nacionales e internacionales, sino también las necesidades específicas del entorno, las empresas y el mercado laboral.

Rangel (2015) sostiene que el currículo no es solo un documento teórico, sino que debe reflejarse en las prácticas de enseñanza y aprendizaje. Según este autor, un currículo bien diseñado debe contar con la participación de diversos actores y ser objeto de mejora continua. En un proceso de creación o mejoramiento de una malla curricular, uno de los actores más importantes es el docente, y de ahí surge otra de las recomendaciones: la selección de docentes con una doble misión de formar e investigar (docente-investigador) para las carreras ingenieriles. El trabajo del profesor comienza cada vez más a diversificarse y la investigación pasa de ser una actividad exclusiva de “académicos privilegiados” a convertirse en un instrumento de apoyo para el mejor desarrollo de la función pedagógica (Rodríguez et al., 1996), ya que la mayor parte del cuerpo colegiado de docentes no presentan inserción en el campo laboral de su profesión y, por ende, no cuentan con experiencia para poder llevar a cabo investigación enfocada en el desarrollo tecnológico.

En la universidad es necesario fortalecer el desempeño de los docentes investigadores mediante la generación de espacios para la reflexión y la formación investigativa, en aras de una educación de calidad.

## CONCLUSIONES

Tomando como base los resultados, se puede deducir que existen dificultades para el desarrollo de la competencia investigativa en estudiantes universitarios de la carrera de Ingeniería Industrial de la UII para mejorar el desempeño en las áreas del conocimiento.

Los resultados de la investigación corroboran la definición de competencia investigativa propuesta en la revisión de la literatura. Al participar en los talleres y actividades diseñadas, los estudiantes establecieron una conexión significativa con la ciencia. Además, gracias a la adaptación de la metodología de investigación tecnológica, los estudiantes de ingeniería demostraron su capacidad para generar conocimiento original a partir de sus propias experiencias e intereses en el ámbito tecnológico.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

**Miguel Ángel Guerra Olivares:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, *software*, visualización,

escritura: borrador original, redacción: revisión y edición, supervisión. **José Néstor Peraza Balderrama**: validación, visualización, redacción: revisión y edición.

## REFERENCIAS

- Acevedo-Gutiérrez, L., Cartagena-Rendón, C., Palacios-Moya, L., & Gallegos-Ruiz, A. (2019). Análisis comparativo de mallas curriculares de programas tecnológicos de mercadeo. *Revista CEA*, 5(9), 97-112. <https://doi.org/10.22430/24223182.1254>
- Amadio, M., Opertti, R., & Tedesco, J. (2014). *Un currículo para el siglo XXI: desafíos, tensiones y cuestiones abiertas*. Unesco. <https://hdl.handle.net/20.500.12799/3126>
- Artaza, C. H. (2013). Análisis comparado de los diseños curriculares de las licenciaturas en bibliotecología y documentación de la Argentina. *Investigación Bibliotecológica*, 27(59), 93-120. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-358X2013000100005&script=sci\\_abstract](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-358X2013000100005&script=sci_abstract)
- Cuevas, A., Hernández, R., Leal, B., & Mendoza, C. (2016). Enseñanza-aprendizaje de ciencia e investigación en educación básica en México. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 18(3), 187-200. <http://redie.uabc.mx/redie/article/view/1116>
- De la Cruz, C. (2016). Metodología de la investigación tecnológica en ingeniería. *Revista Ingenium*, 1(1), 43-46. <http://journals.continental.edu.pe/index.php/ingenium/article/view/392>
- Del Valle, L., & Mejía, L. (2016). Desarrollo de competencias científicas en la primera infancia. Un estudio de caso con los niños y las niñas del nivel de educación preescolar, grado transición, de la Institución Educativa Villa Flora, de la ciudad de Medellín. *Íkala, Revista de Lenguaje y Cultura*, 21(2), 217-226. <https://doi.org/10.17533/udea.ikala.v21n02a06>
- Escobar-Pérez, J., & Cuervo-Martínez, Á. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. *Avances en Medición*, 6, 27-36. [https://www.humanas.unal.edu.co/lab\\_psicometria/application/files/9416/0463/3548/Vol\\_6\\_Articulo3\\_Juicio\\_de\\_expertos\\_27-36.pdf](https://www.humanas.unal.edu.co/lab_psicometria/application/files/9416/0463/3548/Vol_6_Articulo3_Juicio_de_expertos_27-36.pdf)
- Espinoza, E., Rivera, A., & Tinoco, N. (2016). Formación de competencias investigativas en los estudiantes universitarios. *Atenas*, 1(33). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=478049736004>
- Hernández, C. A. (2005, 11 de octubre). *¿Qué son las "competencias científicas"?* Foro Educativo Nacional. [http://www.acofacien.org/images/files/ENCUENTROS/DIRECTORES\\_DE\\_CARRERA/I\\_REUNION\\_DE\\_DIRECTORES\\_DE\\_CARRERA/](http://www.acofacien.org/images/files/ENCUENTROS/DIRECTORES_DE_CARRERA/I_REUNION_DE_DIRECTORES_DE_CARRERA/)

ba37e1\_QUE%20SON%20LAS%20COMPETENCIAS%20CIENTIFICAS%20-%20C.A.%20Hernandez.PDF

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2006). *Metodología de la investigación* (4.ª ed.). McGraw Hill.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5.ª ed.). McGraw Hill.
- Holstermann, N., Grube, D., & Bögeholz, S. (2010). Hands-on activities and their influence on students' interest. *Research in Science Education*, 40, 743-757. <https://doi.org/10.1007/s11165-009-9142-0>
- Malagón-Plata, L. (2009). La pertinencia curricular: un estudio en tres programas universitarios. *Educación y Educadores*, 12(1), 11-27. <https://educacionyeducadores.unisabana.edu.co/index.php/eye/article/view/746>
- Oquendo, S. (2019). Estrategia para el desarrollo de la competencia investigativa en estudiantes de básica primaria. *Encuentros*, 17(2), 95-107. <https://www.redalyc.org/journal/4766/476661510009/html/>
- Rangel, H. (2015). Una mirada internacional de la construcción curricular. Por un currículo vivo, democrático y deliberativo. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 17(1), 1-16. <http://redie.uabc.mx/vol17no1/contenido-rangel.html>
- Rodríguez, G., Gil, J., & García, E. (1996). *Metodología de la investigación cualitativa*. Aljibe.
- Rodríguez-Mantilla, J. (2022, 13 de mayo). La competencia investigadora en los estudiantes universitarios. *Aula Magna 2.0*. <https://cuedespyd.hypotheses.org/10645>
- Ruiz, M., Meneses, A., & Montenegro, M. (2014). Coherencia curricular y oportunidades para aprender Ciencias. *Ciência & Educação (Bauru)*, 20(4), 955-970. <https://doi.org/10.1590/1516-73132014000400012>
- Silva, L., Aquino, O., & Angeles, S. (2017, 20-24 de noviembre). *La importancia de la evaluación curricular en las reformas curriculares de los planes de estudios de la Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca* [Presentación de escrito]. XIV Congreso Nacional de Investigación Educativa COMIE, San Luis Potosí, México. <https://www.comie.org.mx/congreso/memoriaelectronica/v14/doc/2726.pdf>
- Streiner, D. L. (2003). Being inconsistent about consistency: When coefficient alpha does and doesn't matter. *Journal of Personality Assessment*, 80(3), 217-222. [https://doi.org/10.1207/S15327752JPA8003\\_01](https://doi.org/10.1207/S15327752JPA8003_01)
- Tamayo, M. (2005). *Investigación para niños y jóvenes*. Limusa.

**INGENIERÍA  
DE NEGOCIOS**  

---

**Business Engineering**





# MEJORA DE LOS INDICADORES NPS Y FCR EN UNA EMPRESA DEL SECTOR *CALL CENTER*

ALONSO FERNANDINO GARCÍA GALLO\*

<https://orcid.org/0009-0007-6437-1803>

Universidad de Lima, Facultad de Ingeniería, Lima, Perú

Recibido: 16 de mayo del 2024 / Aceptado: 2 de julio del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7118>

**RESUMEN.** El objetivo de esta investigación es mostrar un plan de trabajo realizado para la mejora de los indicadores NPS (*net promoter score*) y FCR (*first call resolution*) en una empresa del sector *call center*, utilizando herramientas para la continua optimización del proceso. La investigación parte de la identificación del problema a partir de datos históricos de los indicadores NPS y FCR, así como de la contextualización y entendimiento del mismo. Se halla una pérdida total de S/ 666 750 soles en el primer semestre del 2022 por no haber cumplido con el objetivo. Se analizan las causas y se plantea la implementación de mejoras en los procesos de mayor impacto y que sean aplicables transversalmente a toda la organización a nivel global. Los resultados evalúan los datos obtenidos de su aplicación en el segundo semestre del 2022 y la proyección de beneficios de cara al año 2023.

**PALABRAS CLAVE:** centros de atención telefónica / proceso de mejora continua / servicio al cliente / satisfacción del cliente / control de calidad

## IMPROVEMENT OF THE NPS AND FCR INDICATOR IN A COMPANY IN THE CALL CENTER SECTOR

**ABSTRACT.** The objective of this research is to show a work plan for the improvement of the NPS (*net promoter score*) and FCR (*first call resolution*) indicators in a company of the Call Center sector, using continuous improvement tools for the optimization of

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\*Autor corresponsal

Correo electrónico: [alonsogarcia1408@gmail.com](mailto:alonsogarcia1408@gmail.com)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

the process. The research begins with the identification of the problem detailing historical data of the NPS and FCR indicators, contextualization and understanding of the problem, justification of the problem showing a total loss of S/666 750 soles in the first half of 2022 for not meeting the objective, analysis of the causes, implementation of improvements in the processes of greater impact and that is applicable transversely to the entire organization globally, results of the improvements implemented with data obtained in the second half of 2022 of S/ 540 000 and projection of benefits for the year 2023 of S/ 794 000.

KEYWORDS: call centers / continuous improvement process / customer services / consumer satisfaction / quality control

## INTRODUCCIÓN

Los *call centers* surgieron debido a la necesidad de ofrecer un servicio inmediato al cliente por medio del teléfono. Al principio, solo eran un medio informativo, pero se han ido fortaleciendo: por la gran competencia, pasaron de ser un servicio de lujo a un medio necesario de contacto con el cliente. Ahora son un medio por el cual se pueden hacer consultas, quejas, reclamos, comprar y contratar servicios, y según el servicio que se preste, el cliente seguirá o no siendo fiel (Martínez Muñoz, 2012).

Los *call center* son parte integral de muchas empresas y su papel económico es significativo y está en aumento. También son sistemas sociotécnicos fascinantes en los que el comportamiento de los clientes y los empleados está estrechamente entrelazado con las medidas de rendimiento físico. En estos entornos, los modelos operativos tradicionales son de gran valor (y, al mismo tiempo, fundamentalmente limitados) en su capacidad para caracterizar el rendimiento del sistema (Gans et al., 2003).

Los factores que determinan el éxito de los *call centers* son los bajos costos; el hecho de definir y aplicar niveles de servicio; buen entrenamiento para los agentes o encargados de ventas; tiempo y calidad de las respuestas; establecer metas por objetivos para los agentes; tiempo promedio de respuesta; plantear logros y metas que puedan ser evaluados por los clientes; evaluar la satisfacción del cliente; saber cuántas llamadas pueden ser solucionadas directamente, sin necesidad de pasar al próximo nivel (hacia un experto que representa mayor costo); evaluar la satisfacción por parte de los agentes que atienden las llamadas (Nicholls Vélez, 2012).

Actualmente, en el mercado existen empresas que tercerizan su canal de atención al cliente a empresas *call center* dedicadas exclusivamente a este tipo de servicios. Estos, a su vez, se dividen en dos bloques: *inbound* y *outbound*. El primero se refiere a las llamadas entrantes al *call center*, mientras que el segundo son las llamadas salientes.

El *inbound* es un proceso de contacto que se origina en clientes externos a una empresa mediante llamadas entrantes al *call center*. Este tipo de operación, debido a los altos costos laborales que implica, suele subcontratarse fuera de Estados Unidos mediante planes de externalización (Llanos Reynoso, 2016). En cambio, *outbound* son los procesos de contacto que se establecen dentro de las empresas. Los centros de contacto que ofrecen este tipo de servicios se conocen como centros de *telemarketing*, los cuales suelen gestionar campañas de promoción de productos o servicios dirigidas a mercados (Llanos Reynoso, 2016). Así, por ejemplo, es un proceso *inbound* cuando usted como cliente de un banco llama a su número de atención al cliente. La empresa de *call center* recibe su llamada como cliente del banco. Por el contrario, es *outbound* cuando usted como usuario recibe una llamada en la que le ofrecen una tarjeta de crédito o algún préstamo. Esas llamadas de posible venta salen de la empresa *call center*.

Muchos son los indicadores que se gestionan en el ámbito del *call center*. Entre ellos, el NPS (*Net Promoter Score*) y el FCR (*First Call Resolution*) son los que influyen directamente en la experiencia de atención al cliente. El NPS es una métrica de fidelización de clientes desarrollada por Frederick R. Reichheld, de Bain & Company, y Satmetrix. Consiste en encuestar a los clientes y preguntarles, en una escala de once puntos (de 0 a 10), la probabilidad de que recomienden la empresa o marca a un amigo o colega (Kumar, 2018). En la atención al cliente se realiza una pregunta que puede variar de cierta forma de un lugar a otro, pero todas tienen el mismo objetivo como, por ejemplo, ¿qué tan satisfecho se sintió con nuestra atención?, ¿recomendaría nuestro producto o servicio? Las respuestas se agrupan en tres tipos de categorías:

- *Detractores*. Son aquellos clientes que han calificado la atención o recomendación del producto o servicio con una puntuación del 0 al 6; es decir, están descontentos con ello.
- *Neutros*. Son aquellos clientes que han calificado la atención o recomendación del producto o servicio con una puntuación de 7 u 8; es decir, están en una incertidumbre entre satisfacción o no.
- *Promotores*. Son aquellos clientes que han calificado la atención o recomendación del producto o servicio con una puntuación de 9 o 10; es decir, están contentos y satisfechos.

Actualmente, la experiencia de consumo del cliente-usuario se analiza mediante encuestas de satisfacción, que cumplen un papel importante en la creación y/o mantenimiento del valor económico de una organización, además de servir como medida del riesgo reputacional. Derivado de ello, surge el interés creciente por la medición del grado de satisfacción y lealtad (Trejo García et al., 2023).

El FCR, por su parte, es el porcentaje de personas que llaman y que no requieren más contactos o devoluciones de llamadas para solucionar el motivo anterior de su llamada (Abdullateef et al., 2011). Este indicador se calcula con una división simple del número total de llamadas resueltas en el primer contacto entre el número total de llamadas recibidas en un periodo de tiempo. También se puede medir ingresando una pregunta posterior a la atención telefónica sobre si su problema o inquietud fue resuelto en la llamada. Por ejemplo:

Casos resueltos al primer contacto o llamada en un periodo de 7 días: 850

Número de llamadas recibidas en un periodo de 7 días: 1000

FCR:  $850/1000 = 85\%$

Este indicador quiere decir que el 85 % de las llamadas recibidas son resueltas al primer contacto, lo que es un buen índice para la compañía.

La presente investigación inicia a mediados del 2022 en una empresa de *call center* donde el *delivery manager* de un servicio *inbound* del sector financiero identifica que no cumplieron con los indicadores NPS y FCR objetivos, 95 % y 85 % mensual, respectivamente, a pesar de que su equipo de trabajo establece reuniones semanales de seguimiento y mejoras. Actualmente, en la empresa de *call center* se desconocen cuáles son los procesos que están impactando negativamente en los indicadores mencionados para la empresa del sector bancario.

## METODOLOGÍA

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo y cualitativo propio de un proyecto de mejora de proceso, realizado a una empresa de *call center* con operaciones en el Perú por más de veinticinco años. Su alcance es la implementación específica para el servicio más importante de facturación en la empresa perteneciente al sector financiero.

El proceso metodológico consiste en cuatro fases consecutivas: justificación del problema; análisis de posibles causas mediante las herramientas de mejora continua (como diagrama Ishikawa, Pareto); implementación de mejoras y proyección; y, por último, evaluación del impacto económico de estas.

Como primer punto y reforzando los conceptos iniciales mostrados, se detalla la metodología matemática de los indicadores NPS y FCR a continuación:

Ecuación 1

$$NPS = \frac{\text{Clientes promotores} - \text{clientes detractores}}{\text{Número total de respuestas recibidas}} \times 100$$

Donde:

Promotores: número de clientes que respondieron entre 9 y 10 a la encuesta realizada y que están satisfechos con el servicio o productos y que los recomendarían.

Detractores: número de clientes que respondieron entre 0 y 6 a la encuesta realizada y que no se encuentran satisfechos con el servicio.

Un resultado positivo en este indicador NPS parece predecir el crecimiento de las ventas futuras: si los clientes difunden el boca a boca positivo entre sus amigos, algunos de sus amigos probarán la marca y se convertirán en clientes, lo que en última instancia aumentará las ventas de la marca (Baehre et al., 2022). Adicionalmente, de acuerdo con investigaciones realizadas, se confirmó que la calidad en el servicio se asocia positivamente con las variables de satisfacción del cliente y lealtad del cliente. Por su nivel de importancia, se clasifican en orden de mayor a menor en responsabilidad-confiabilidad, confianza-empatía, lealtad-satisfacción, empatía-satisfacción y tangibles (Silva-Treviño, 2021).

Sin embargo, la encuesta realizada es un tipo de categoría entre las posibles encuestas que se pueden aplicar en una empresa. Las categorías existentes según Bustamante Lazcano (2021) son las siguientes:

- La encuesta al público en general. Tiene la finalidad de ubicar clientes potenciales.
- La encuesta postservicio. Se lleva a cabo con la persona que acaba de consumir el producto o servicio y a la que se trata de conservar como cliente.
- La encuesta larga. Se aplica a clientes recurrentes que han consumido un producto o servicio en más de una ocasión, durante un periodo de tiempo considerable o que tienen una relación afectiva con nuestro producto o servicio.

En la presente investigación, se toma la encuesta postservicio, que es la categoría definida por el cliente para medir el nivel de satisfacción de sus usuarios.

Ecuación 2

$$FCR = \frac{\text{Número de casos resueltos en el primer contacto}}{\text{Número total de contactos}} \times 100$$

Donde:

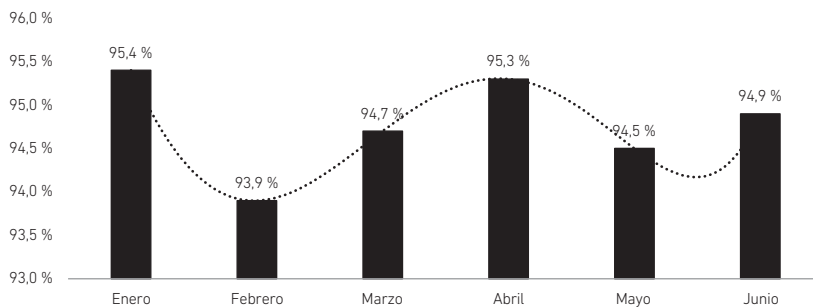
Número de casos resueltos en el primer contacto: cantidad de casos resueltos en el primer contacto del cliente durante un periodo de seguimiento definido.

Número total de contactos: cantidad de contactos recibidos de clientes durante un periodo de seguimiento definido.

Para la presente investigación, se tuvo en cuenta un alcance muestral con un tamaño de 500 000 clientes con un periodo de análisis mensual para el cálculo y análisis de los indicadores NPS y FCR para un cliente del servicio *inbound* del sector financiero. En la Figura 1, se observan los resultados reales obtenidos durante el periodo enero a junio del 2022 respecto a indicadores NPS y FCR.

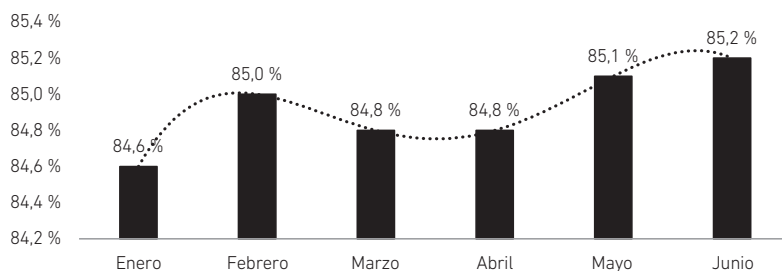
**Figura 1**

*Datos NPS de enero a junio del 2022*



**Figura 2**

Datos FCR de enero a junio del 2022



## RESULTADOS

En la primera fase de justificación del problema, se presenta ante el directorio la situación actual de la campaña, la cual cuenta con una pérdida acumulada de S/666 750 por no cumplimiento de objetivo de NPS y FCR en los primeros seis meses del año 2022, lo que genera un impacto directo en el presupuesto de ese año. En detalle, las pérdidas acumuladas son las siguientes: por el cumplimiento del objetivo NPS se tiene un pago de S/4,90 por llamada, mientras que por el cumplimiento de objetivo FCR se tiene un pago de S/2,10 por llamada; el total, si se cumplen ambos objetivos, el pago es de S/7,00. La Tabla 1 resume los datos reales en cuanto a pagos realizados por el cliente por cumplimiento de los objetivos NPS y FCR definidos en un contrato cliente-empresa.

**Tabla 1**

Costo por llamada NPS, FCR y total (en soles)

Costo/llamada	NPS	FCR
7,00	4,90	2,10

Dentro de los parámetros por evaluar en el objetivo NPS se tiene que, si se consigue un 95 % de este indicador, se paga S/4,90 por llamada; sin embargo, ante ciertos rangos de NPS obtenidos, se pueden otorgar bonus o aplicar una penalidad sobre el precio base, como se aprecia en las Tablas 2 y 3.

**Tabla 2**

NPS objetivo y costo por llamada

NPS objetivo	Costo/llamada (en soles)	Llamadas/mes
95 %	4,90	150 000

**Tabla 3**

*Costo por llamada con bonus y penalidad NPS*

Indicador	Rango NPS (%)	Bonus/penalidad	Costo/llamada (en soles)
NPS	[96-97]	Bonus + 15 %	5,64
NPS	[95-96]	Bonus + 10 %	5,39
NPS	[94-95]	Penalidad -20 %	3,92
NPS	[93-94]	Penalidad -25 %	3,68

De acuerdo con los datos de NPS de enero a junio, las pérdidas reales totales que se ha obtenido por no cumplimiento del objetivo indicador se detallan en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Pérdidas y ganancias mes a mes de acuerdo con el NPS real*

Mes	Detalle	NPS real (%)	Rango NPS (%)	Llamadas/mes	Costo/llamada (en soles)	Total/mes (en soles)	Pérdida o ganancia (en soles)
			95 %	150 000	4,90	735 000	
Enero	Bonus	95,4	[95-96]	150 000	5,39	808 500	73 500
Febrero	Penalidad	93,9	[93-94]	150 000	3,68	551 250	-183 750
Marzo	Penalidad	94,7	[94-95]	150 000	3,92	588 000	-147 000
Abril	Bonus	95,3	[95-96]	150 000	5,39	808 500	73 500
Mayo	Penalidad	94,5	[94-95]	150 000	3,92	588 000	-147 000
Junio	Penalidad	94,9	[94-95]	150 000	3,92	588 000	-147 000
						Total	-477 750

Dentro de los parámetros por evaluar en el objetivo FCR, se tiene que, si se consigue un 85 % de este indicador, se paga S/2,10 soles por llamada; sin embargo, ante ciertos rangos de FCR obtenido, se pueden otorgar bonus o aplicar una penalidad sobre el precio base, como se indica en las tablas 5 y 6.

**Tabla 5**

*FCR objetivo y costo por llamada*

FCR objetivo	Costo/llamada (en soles)	Llamadas/mes
85 %	2,10	50 000



**Tabla 6***Costo por llamada con bonus y penalidad FCR*

Indicador	Rango NPS (%)	Bonus/penalidad	Costo/llamada (en soles)
FCR	[86-87]	Bonus + 15 %	2,42
FCR	[85-86]	Bonus + 10 %	2,31
FCR	[84-85]	Penalidad -20 %	1,68
FCR	[83-84]	Penalidad -25 %	1,58

De acuerdo con los datos de FCR de enero a junio, se calculan las pérdidas totales por no cumplimiento del objetivo indicador en la Tabla 7.

**Tabla 7***Pérdidas y ganancias mes a mes de acuerdo con el FCR real*

Mes	Detalle	FCR real (%)	Rango FCR (%)	Llamadas/mes	Costo/llamada (en soles)	Total/mes (en soles)	Pérdida o ganancia (en soles)
			85 %	150 000	2,10	315 000	
Enero	Penalidad	84,5	[84-85]	150 000	1,68	252 000	-63 000
Febrero	Penalidad	84,7	[84-85]	150 000	1,68	252 000	-63 000
Marzo	Penalidad	84,8	[84-85]	150 000	1,68	252 000	-63 000
Abril	Penalidad	84,8	[84-85]	150 000	1,68	252 000	-63 000
Mayo	Bonus	85,1	[85-86]	150 000	2,31	346 500	31 500
Junio	Bonus	85,2	[85-86]	150 000	2,31	346 500	31 500
						Total	-189 000

Como segunda fase, el análisis de posibles causas, se realizó un diagnóstico por medio del diagrama de Ishikawa, donde se identificaron las causas raíz para el no cumplimiento del 95 % de NPS y el 85 % de FCR mediante un *brainstorming* para analizar las 6 M (Burgasí Delgado et al., 2021). Dicha metodología fue aplicada mediante grupos focales divididos por puestos dentro de la compañía: un grupo de coordinadores de los tres turnos del servicio (5 coordinadores), un grupo de supervisores de los tres turnos del servicio (25 supervisores), un grupo de agentes (200 agentes), un grupo de capacitadores y auditores de calidad (7 colaboradores), durante un periodo de tres semanas de recolección de data.

### Las 6 M

Para comenzar, se hará una introducción de las 6 M y el porqué de lo analizado en cada uno de ellos con una breve explicación:

- *Mano de obra*. El recurso humano que interviene en la entrega del producto/servicio.
- *Maquinaria*. Sistema, equipo o herramienta utilizado para la entrega del producto/servicio.
- *Métodos*. Procedimiento para llevar a cabo la entrega del producto/servicio.
- *Materia*. Todo aquel componente necesario para la entrega final del producto/servicio.
- *Medioambiente*. Todo aquel factor del entorno que afecte en la entrega del producto/servicio.
- *Medición*. Comprobación, evaluación y/o calibración como parte de entrega del producto/servicio.

A continuación, se presenta lo diagnosticado en cada una de las 6 M.

#### *Mano de obra*

- Falta de teleoperadores para la atención en la banca telefónica de acuerdo con el volumen de llamadas recibidas.
- Ausentismo entre el personal, lo que hace que no se cumpla con el nivel de servicio de atención requerido.
- Salario base, lo que provoca descontento y renunciaciones por parte de los teleoperadores.
- *Employee experience*: necesidad de estructurar todo el *journey map* del asesor al momento de ingresar a la compañía, ya que dentro del *feedback* recibido el nuevo empleado no se encuentra muy seguro sobre qué va a realizar en su primer día, quién será su responsable, como serán los horarios, pagos y demás inquietudes que tenga. Todos estos puntos mencionados hacen que el nuevo empleado no esté enfocado completamente en la gestión y atención al cliente, lo que deriva en una baja nota NPS y FCR.

#### *Maquinaria*

- Disponibilidad de aplicativos, que surge debido a que el teleoperador tiene múltiples aplicativos abiertos y necesarios para la atención al cliente. Esto, en algunas ocasiones, genera confusión al momento de entregar información al cliente.
- Desconocimiento de aplicativo, pues no recibió una buena capacitación para la correcta gestión de la herramienta.

- Infraestructura insuficiente, lo que genera que, cuando el teleoperador desea realizar consultas a sus superiores, este no se encuentre lo más cercano posible a su ubicación por falta de espacios, por lo que debe hacer largos recorridos y perder tiempo.
- PC muy lentas, lo que provoca una atención no óptima al cliente por el tiempo de espera para resolver sus consultas, lo que conduce a la insatisfacción y baja nota NPS y FCR.

#### *Métodos*

- Procedimientos de atención al cliente desactualizados, lo que genera que el cliente se vaya insatisfecho de la llamada.

#### *Medioambiente*

- Ruido en plataforma, lo que causa muchas veces que el teleoperador pida al cliente que repita la información, lo que provoca un malestar en el cliente durante la llamada.

#### *Medición*

- Los asesores conocen su indicador NPS y FCR al día siguiente; actualmente, no se tiene una retroalimentación en línea de los indicadores, lo que les permitiría tener un plan de acción inmediato.

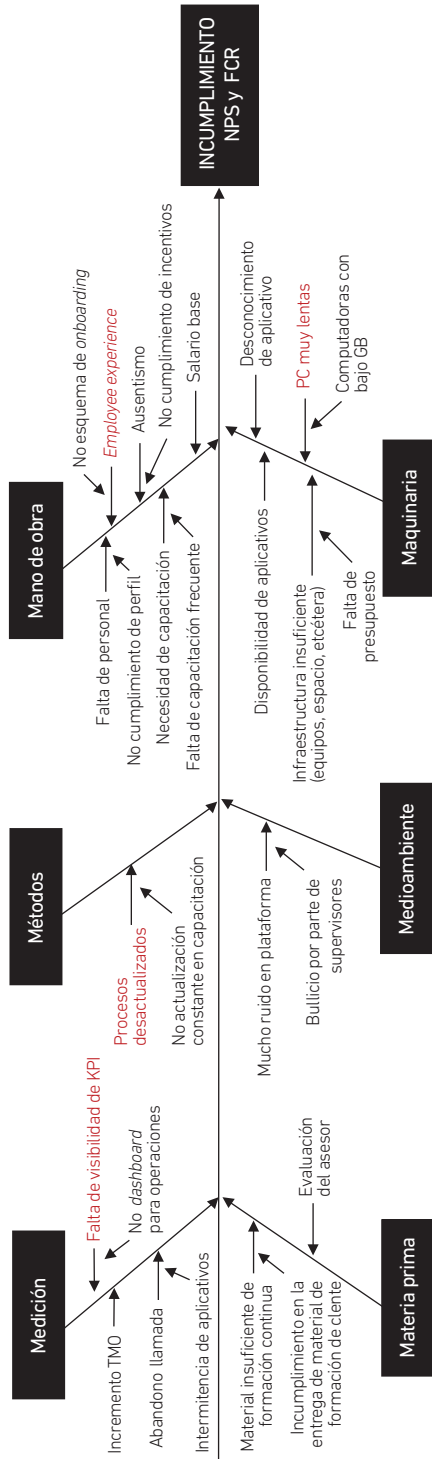
#### *Materia*

- Material insuficiente de formación continua, lo que genera que el asesor no tenga la información completa y correcta para poder brindarle al cliente una satisfacción durante la llamada.

### **Causa raíz del problema**

A continuación, se detalla la causa raíz para el no cumplimiento del 95 % de NPS y 85 % de FCR en el servicio en el diagrama de Ishikawa en la Figura 3.

**Figura 3**  
Diagrama de Ishikawa



Como fase final en esta etapa, después de identificar la causa raíz posible de un bajo resultado en los indicadores NPS y FCR, se procedió a presentar dicha información al gerente general, al *delivery manager* del servicio, al gerente de Recursos Humanos y al gerente de Finanzas. Se definió en conjunto que se iniciará la implementación de mejora en aquellos aspectos de mayor impacto económico dentro de la organización y que son transversales en su implementación a nivel global en la compañía.

En esta etapa de identificación de causa raíz del problema, una de las limitaciones encontradas fue la disponibilidad en tiempo para ejecutar dichos grupos focales, debido a que reunir a tal cantidad de coordinadores, supervisores, agentes, capacitadores y auditores de calidad en el tiempo de servicio es sumamente difícil, considerando que el cliente paga por hora de servicio ejecutado y desconectarse de ello iba a impactar en la facturación del servicio.

Se define como grupo focal a un espacio de opinión para captar el sentir, pensar y vivir de los individuos, provocando autoexplicaciones para obtener datos cualitativos. La técnica es particularmente útil para explorar los conocimientos y experiencias de las personas en un ambiente de interacción, que permite examinar lo que la persona piensa, cómo piensa y por qué piensa de esa manera (Hamui-Sutton & Varela-Ruiz, 2013).

## Mejoras por implementar

### *Implementación de employee experience*

Se ha establecido dentro del *journey map*, técnica popular que se utiliza para aumentar la comprensión de una empresa sobre sus clientes. En su forma más simple, muestra los principales recorridos que pasa un cliente y las emociones en cada una de las fases (González Urbán, 2022). Se enfocará en la etapa inicial del asesor generando el *engagement*, que se define como concepto psicológico importante que impacta en el comportamiento y las elecciones humanas en el ámbito de empleo, educación, ocio, etcétera, mediante experiencias satisfactorias (De Vreede et al., 2019).

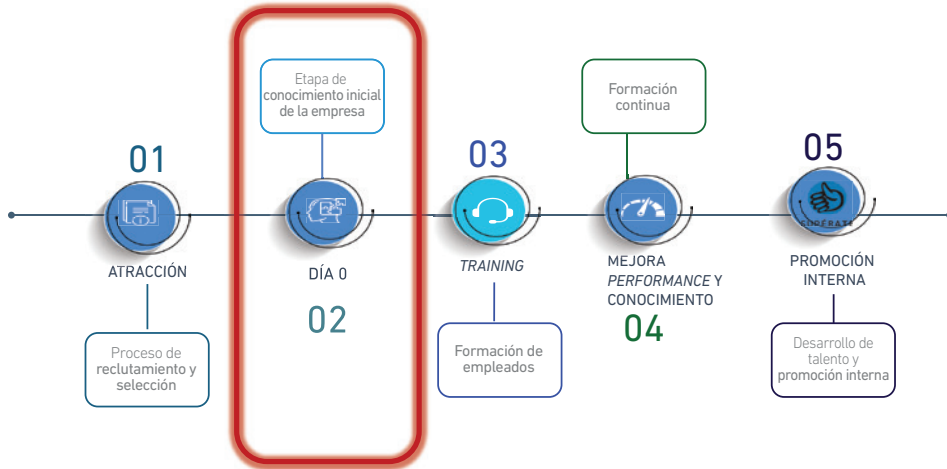
La etapa para mejorar son las actividades que va a realizar el día 0 del colaborador, ya que se busca tener el primer gran impacto en él. La Figura 4 presenta el nuevo modelo *employee experience* que se define como el viaje que un empleado realiza con su organización. Incluye todas las interacciones que un empleado tiene con su organización antes, durante y después de su permanencia en ella. Mohanty y Kulkarni (2023) lo han realizado en la empresa donde se busca tener la estructura del proceso de *onboarding* del colaborador y generar un impacto inicial positivo en esta etapa.

*Onboarding* es, ante todo, un modelo que busca generar vínculos organizacionales para prevenir la deserción laboral, por un lado, y la de afianzar que los nuevos

colaboradores aumenten su inserción laboral con los valores y normas organizacionales (Rodríguez, 2021).

**Figura 4**

*Nuevo modelo employee experience*



En esta etapa de conocimiento inicial, se establecieron los siguientes pasos:

- *Paso 1. Recepción de candidatos.* Reclutamiento recibirá a los teleoperadores nuevos para conducirlos a la sala de capacitación en conjunto con el responsable asignado para la ejecución de actividades dispuestas.
- *Paso 2. Llenado de documentación.* Una vez contabilizado el grupo, reclutamiento recabará los documentos requeridos para el ingreso a la compañía del personal faltante.
- *Paso 3. Bienvenida.* Una vez finalizada la entrega de documentos, el *business partner* comenzará con la bienvenida al personal. Se mostrará el video de bienvenida por parte del gerente general y explicará nuestra cultura, valores, políticas de seguridad informática, política de redes sociales, código de vestimenta, canal de denuncias, cuidados contra el COVID-19, beneficios en la empresa, desarrollo profesional, entre otros.
- *Paso 4. Historia de éxito.* Se proyectará un video de éxito donde se muestra la línea de carrera de un colaborador, que inicia su etapa laboral desde teleoperador hasta gerente. Posterior a ello, se presentará al equipo de operaciones (coordinador y supervisor) que estará a cargo del siguiente proceso.
- *Paso 5. Motivación.* Finalizada la presentación de historias de éxito, el motivador de la empresa explicará el esquema de *employee experience*, donde se visualizarán

las actividades que se van a realizar en los primeros días y se llevará a cabo una dinámica con los teleoperadores con entrega de *merchandising*.

- *Paso 6. Prestaciones.* Retomará la participación el área de reclutamiento explicando las fechas y corte de nómina, efectuando un ejercicio real a partir de la fecha de contratación del grupo. Se explicarán los diferentes aplicativos internos de recursos humanos, así como el tema de diversidad e inclusión, y otras consultas adicionales.

#### *Mejoras de PC (máquinas muy lentas)*

En el *feedback* recibido, se pudo identificar que las computadoras eran muy lentas debido a todos los aplicativos que el teleoperador debía usar para la atención al cliente; además, había mucho histórico en cuanto a usuarios que generaba lentitud en la atención y una espera alta para el cliente al momento de gestionar sus dudas y consultas durante la llamada. A continuación, se detallará algunas métricas relacionadas con las computadoras lentas.

Datos iniciales:

- 354 máquinas con memoria 4 GB
- Tiempo de atención promedio por llamada: 312 segundos
- NPS de mayo: 94,5 %
- NPS de junio: 94,9 %
- FCR de mayo: 85,1 %
- FCR de junio: 85,2 %

Con estos datos como base, se realizó una prueba piloto para el aumento de memorias RAM en computadoras:

- Se determinó un piloto de 118 máquinas (un tercio de las máquinas totales) a las que debía hacerse un incremento de memoria 4 GB a 8 GB.
- El incremento en memorias para la prueba piloto significó una inversión inicial de S/9440.
- Tras una semana de la compra e implementación de memorias en computadoras, se procedió con la ejecución del proyecto el 18 de julio del 2022.

Nuevos datos:

- 118 máquinas con memoria 8 GB (quedan pendientes 226 máquinas de 4 GB)
- Tiempo de atención promedio por llamada: 287 segundos

- NPS del 18 al 31 de julio: 95,4 %
- NPS de agosto: 95,3 %
- FCR del 18 al 31 de julio: 85,5 %
- FCR de agosto: 85,4 %

Como resultado de la prueba piloto de incremento de memorias RAM, hubo un aumento de 0,8 PP para el indicador NPS y de 0,3 PP para el indicador FCR desde mayo a agosto. Después de conocer estos resultados de la prueba piloto, se estableció la siguiente actividad: para el 12 de septiembre se decidió realizar la compra de memorias para las computadoras restantes a fin de tener al 100 % la operación con dicha propuesta de mejora, lo que requirió una inversión de S/18 880.

*Procesos desactualizados y visibilidad de KPI*

- *Paso 1.* Se identificó cuáles eran los motivos principales de llamada que tenían los clientes insatisfechos de acuerdo con el histórico de enero a junio del 2022. Se obtuvo los resultados consolidados en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Principales motivos de llamadas de clientes insatisfechos en NPS y FCR*

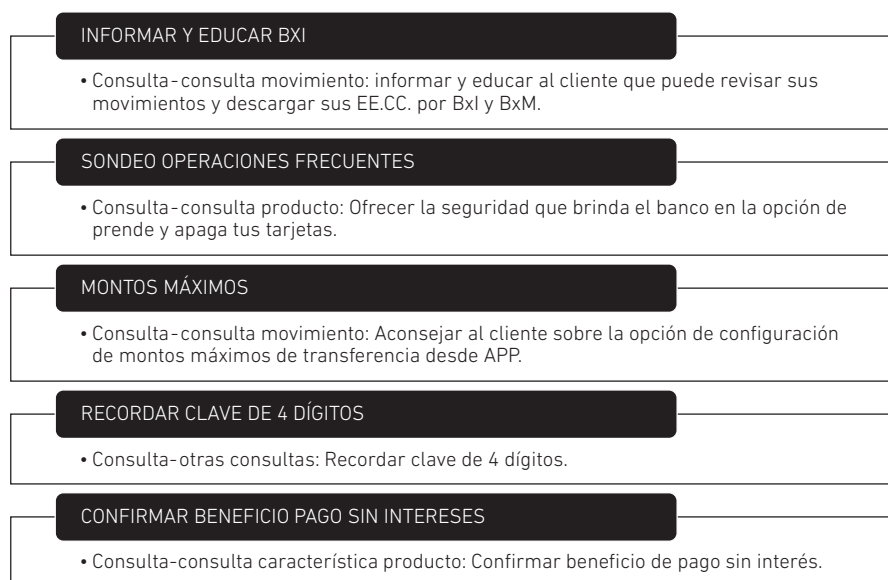
Tipologías nivel 3	Porcentaje de participación en temático	Porcentaje de NPS	Porcentaje de FCR
Consulta movimientos	42	94,6	84,8
Consulta producto	53	94,4	84,3
Consulta navegación y uso	63	94,9	84,6
Consulta deuda tarjeta	71	94,1	84,6
Explicación estados de cuenta	79	93,9	84,4
Derivaciones oficinas	84	94,0	84,1
Consulta distribución y entrega TC	88	94,2	84,5
Cancelación TC, transacción efectiva o consulta	91	93,7	84,3
Transferencias otro <i>pool</i>	93	94,1	84,7
Consulta de puntos/millas acumuladas	95	94,5	84,9

- *Paso 2.* Junto con el área de formación, calidad, operaciones y teleoperadores, se propusieron acciones que durante llamada mitigarían la insatisfacción del cliente, de acuerdo con el conocimiento de los motivos. Las acciones nuevas se resumen en la Figura 5.



**Figura 5**

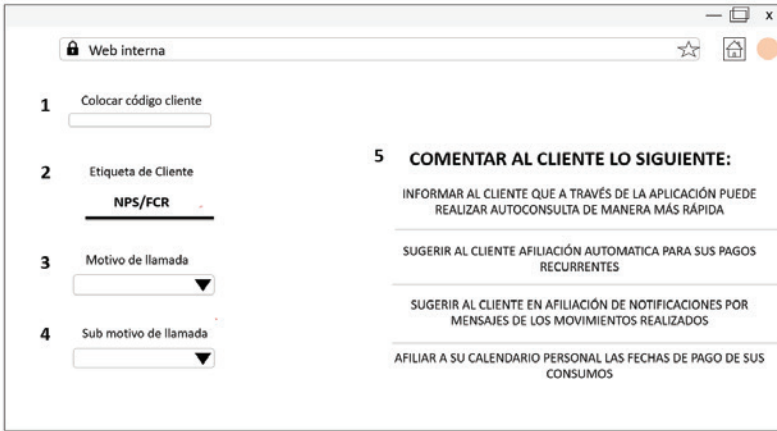
*Acciones que mejoran el NPS y el FCR*



- **Paso 3.** Junto con el área de análisis de datos (*reporting*), se pudo etiquetar a aquellos clientes que anteriormente habían sido detractores o rellamadores. Esta identificación nos va a permitir conocer al cliente y saber cómo atenderlo con acciones de valor en la llamada con base en la información histórica que se va recogiendo.
  - Etiqueta FCR: clientes que han llamado al menos dos veces en un periodo de siete días.
  - Etiqueta NPS: clientes que tienen reclamos ingresados, así como detractores y neutros de las encuestas realizadas.
- **Paso 4.** Se creó junto con el área de *reporting* una aplicación web que permite en la gestión de llamada identificar, mediante con un código cliente, si el cliente ha sido detractor o rellamador anteriormente y cuál es el motivo anterior por el que ha llamado. Una vez identificado el cliente y su motivo de llamada, podemos brindarle algunas recomendaciones que ayuden a mitigar esa insatisfacción previa que se detalló en el paso 2. La Figura 6 presenta un bosquejo de la aplicación web desarrollada internamente.

**Figura 6**

Aplicación web para la gestión de llamadas

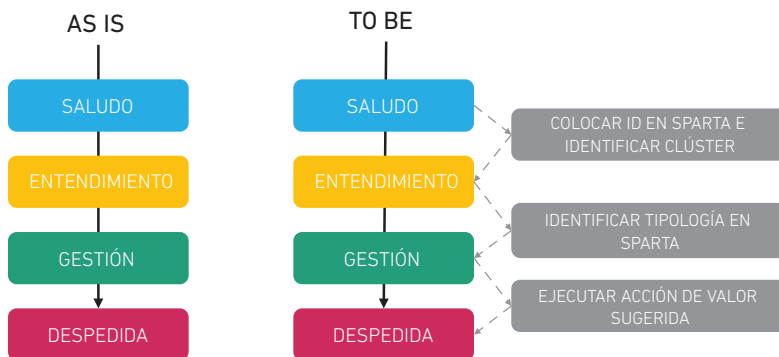


- Paso 5. Se busca que el teleoperador tenga una visibilidad en línea de las encuestas que se han realizado y pueda identificar su NPS y FCR real como resultado. A partir de ahí, puede realizar mejoras en la operación al respecto.

Para este punto se detalla el proceso AS IS vs. el proceso TO BE aplicando esta metodología en línea y su impacto en la operativa. Un proceso AS IS define la situación actual, ya sea de la organización, un departamento o un subproceso; el diagrama AS IS retrata el estado presente del proceso, tal cual se hace hoy en día (Pierce, 2022). En cambio, un proceso TO BE define la situación futura, ya sea de la organización, un departamento o un subproceso; el diagrama TO BE retrata el estado mejorado del proceso, a donde se quiere llegar (Pierce, 2022). La Figura 7 presenta un flujograma que muestra los cambios de mejora realizados.

**Figura 7**

Proceso AS IS vs. proceso TO BE



Por último, en la Figura 8 se muestra el diagrama de Gantt de trabajo para los tres frentes de mejora detallados anteriormente como parte del proceso de implementación.

**Figura 8**

*Diagrama de Gantt de trabajo*

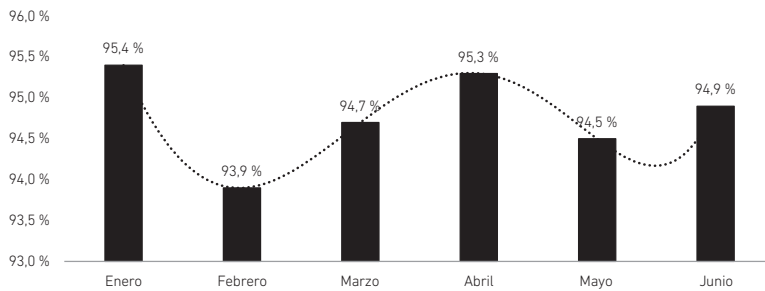
Tareas	Inicio - fin	JUL	AGO	SEPT	OCT
Proyecto 1	19jul - 31oct	100%			
Análisis procesos AS IS	18jul - 30 jul	100%			
Identificación principales causas - raiz	18jul - 30 jul	100%			
Proyecto RR.HH.	01ago- 31ago		100%		
Proyecto IT	01ago- 12sep		100%		
Proyecto de operación	01 ago- 31oct	100%			

**Proyección de los indicadores**

Como fase final se detalla el impacto económico por implementación de mejoras en el comportamiento mes a mes de los indicadores NPS y FCR. En la Figura 9 se observan los detallados de enero a junio del 2022, que son aquellos indicadores con los que se recibió el proyecto; de julio del 2022 a enero del 2023, que son aquellos indicadores reales obtenidos durante y después de la implementación de mejoras; y de febrero a diciembre del 2023, que presentan la proyección de los mismos para esos meses.

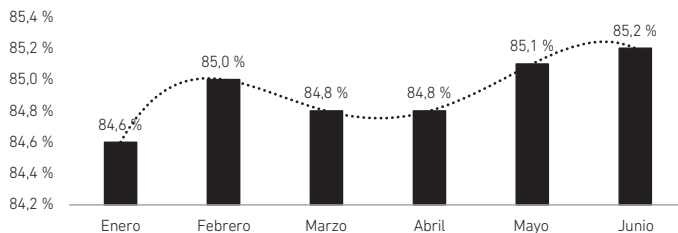
**Figura 9**

*Comportamiento del NPS 2022-2023*



**Figura 10**

*Comportamiento del FCR 2022-2023*



Sobre la base de los indicadores obtenidos de NPS y FCR desde julio del 2022 a enero del 2023 y la proyección para cada uno ellos, se calcula en las Tablas 9 y 10 las ganancias por cumplimiento de objetivos, así como los gastos asociados en *business case* del proyecto.

**Tabla 9**

*Bonus por cumplimiento de objetivo NPS con mejoras implementadas*

Mes	Detalle	NPS real (%)	Rango NPS (%)	Llamadas/mes	Costo/llamada (en soles)	Total/mes (en soles)	Pérdida o ganancia (en soles)
			95	150 000	4,90	735 000	
Julio	Bonus	95,3	[95-96]	150 000	5,39	808 500	73 500
Agosto	Bonus	95,3	[95-96]	150 000	5,39	808 500	73 500
Septiembre	Bonus	95,5	[95-96]	150 000	5,39	808 500	73 500
Octubre	Bonus	95,6	[95-96]	150 000	5,39	808 500	73 500
Noviembre	Bonus	95,9	[95-96]	150 000	5,39	808 500	73 500
Diciembre	Bonus	96,0	[96-97]	150 000	5,64	845 250	110 250
Enero	Bonus	96,3	[96-97]	150 000	5,64	845 250	110 250
Febrero	Bonus	96,4	[96-97]	150 000	5,64	845 250	110 250
Marzo	Bonus	96,5	[96-97]	150 000	5,64	845 250	110 250
Abril	Bonus	96,6	[96-97]	150 000	5,64	845 250	110 250
Mayo	Bonus	96,8	[96-97]	150 000	5,64	845 250	110 250
Junio	Bonus	97,0	[96-97]	150 000	5,64	845 250	110 250
						Total	1 139 250

**Tabla 10**

*Bonus por cumplimiento de objetivo FCR con mejoras implementadas*

Mes	Detalle	NPS real (%)	Rango NPS (%)	Llamadas/mes	Costo/llamada (en soles)	Total/mes (en soles)	Pérdida o ganancia (en soles)
			85	150 000	2,10	315 000	
Julio	Bonus	85,4	[85-86]	150 000	2,31	346 500	31 500
Agosto	Bonus	85,4	[85-86]	150 000	2,31	346 500	31 500
Septiembre	Bonus	85,1	[85-86]	150 000	2,31	346 500	31 500
Octubre	Bonus	85,8	[85-86]	150 000	2,31	346 500	31 500
Noviembre	Bonus	86,1	[86-87]	150 000	2,42	362 250	47 250
Diciembre	Bonus	85,7	[85-86]	150 000	2,31	346 500	31 500
Enero	Bonus	85,9	[85-86]	150 000	2,31	346 500	31 500

(continúa)

(continuación)

Mes	Detalle	NPS real (%)	Rango NPS (%)	Llamadas/mes	Costo/llamada (en soles)	Total/mes (en soles)	Pérdida o ganancia (en soles)
Febrero	Bonus	86,1	[86-87]	150 000	2,42	362 250	47 250
Marzo	Bonus	86,2	[86-87]	150 000	2,42	362 250	47 250
Abril	Bonus	86,4	[86-87]	150 000	2,42	362 250	47 250
Mayo	Bonus	86,5	[86-87]	150 000	2,42	362 250	47 250
Junio	Bonus	86,8	[86-87]	150 000	2,42	362 250	47 250
						Total	472 500

Es importante señalar que, más allá de los bonus obtenidos a raíz de las mejoras implementadas que derivan del cumplimiento del NPS y el FCR, también existen costos asociados a ello. Estos son el total de horas consumidas en la herramienta creada para visibilidad de los indicadores, el volumen de horas de llamadas para obtener la temática de motivos actualizada mes a mes, la contratación de personal para mantenimiento y ejecución de la herramienta creada, así como el costo de compra de las memorias RAM. Después de estos costos, se obtuvo un beneficio total por implementación de mejoras equivalente a un monto de S/1 331 000 soles, como se aprecia en la Tabla 11.

**Tabla 11**  
Cuadro de beneficios por implementación

En miles de soles		1000												
PROYECTO NPS & FCR		Jul-22	Ago-22	Sept-22	Oct-22	Nov-22	Dic-22	Ene-23	Feb-23	Mar-23	Abr-23	May-23	Jun-23	Total
P&L		Mes1	Mes2	Mes3	Mes	Mes5	Mes6	Mes7	Mes8	Mes9	Mes10	Mes11	Mes12	Total
Ingresos														
Bonus NPS		74	74	74	74	74	110	110	110	110	110	110	110	1 139
Bonus FCR		32	32	32	32	47	32	32	47	47	47	47	47	473
Gastos														
Consumo total de horas en la herramienta			(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(103)
Volumen de horas de extracción de llamadas			(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(56)
Personal para el mantenimiento de la herramienta			(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(94)
Aumento de memoria	(28)													(28)
Beneficios		77	82	82	82	98	119	119	135	135	135	135	135	1 331

## DISCUSIÓN

A continuación, se realizará un análisis de los resultados obtenidos teniendo como base indicadores reales del sector, recomendaciones de *target* y otras investigaciones. También se detallarán los cuellos de botella encontrados durante el proceso de implementación de mejora y recomendaciones para futuros proyectos.

Cabe señalar que tales cuellos de botella representan, con todo, una ventana de oportunidad para generar estrategias de mercadotecnia, técnicas, financieras o de reestructuración administrativa, cuya implementación supone costos, gastos y/o desembolsos de capital o contratación de nuevos pasivos para invertir en activos. Estos, al mismo tiempo que representan una solución para eliminar o mitigar los problemas presentados por los cuellos de botella, también dan lugar a los flujos de efectivo que permitirán la formulación y evaluación de nuevos proyectos asociados con la eliminación o mitigación de los problemas derivados de los cuellos de botella (Gallardo Cervantes, 2020).

En la Figura 9 se puede visualizar el indicador NPS hasta antes del inicio de análisis y posterior implementación de mejora. Así, hasta junio del 2022 se tenía un valor de 95,3 % de NPS. En diciembre del 2022, se cerró el indicador con un valor de 96,3 %, teniendo una variación de 1 PP. En junio del 2023, se cerró con un valor de 97 %, con una variación respecto a junio del 2022 de 1,7 PP.

En la Figura 10, se puede observar el indicador FCR hasta antes del inicio del análisis y posterior implementación de mejora. Así, hasta junio del 2022 se tenía un valor de 85,2 % de FCR. En diciembre del 2022, se cerró el indicador con un valor de 85,9 %, teniendo una variación de 0,7 PP. En junio del 2023, se cerró con un valor de 86,8 %, con una variación respecto a junio del 2022 de 1,6 PP.

La mejora de ambos indicadores responde directamente a las fases implementadas: conocer la situación actual de los indicadores, analizar las posibles causas mediante las herramientas de mejora continua (como el diagrama de Ishikawa y el *focus group*), efectuar la implementación de mejoras (como un nuevo modelo *employee experience*, aumento de memoria RAM de las PC para una correcta gestión de llamadas, optimización de procesos desactualizados y visibilidad en tiempo real de indicadores mediante *dashboard* hacia la operación).

Según un artículo que recopila diversas investigaciones, el NPS de una empresa puede ayudar a incrementar los ingresos, la vida de la empresa y la relación cliente-empresa. Además, se mencionan los siguientes puntos (Keiningham et al., 2007):

- Un NPS alto se correlaciona con mayores ingresos. Los líderes en NPS pueden esperar que el 24 % de sus ingresos provengan de la expansión, en contraste con solo el 9 % de las empresas con peor desempeño.

- Los clientes promotores tienen 4,2 veces más probabilidades de realizar otra compra, 5,6 veces más probabilidades de perdonarlo después de un error y 7,2 veces más probabilidades de probar un nuevo producto/servicio.

Los cuellos de botella más importantes para la implementación de las mejoras fueron los siguientes:

- En la primera etapa, se encontró el siguiente cuello de botella: tiempo para realizar el grupo focal de identificación de causa raíz, debido a que era necesario que las personas se desconecten del servicio para proceder con las sesiones, sobre todo si se considera que el cliente del sector financiero paga por hora/posición.
- Otro cuello de botella se encontró durante implementación: cambiar el *mindset* actual de la compañía, que no estaba acostumbrada al tipo de análisis estructurado, cambio de procesos y flujos de trabajo, lo que en algunas etapas retrasó la implementación. Se tuvo el apoyo de recursos humanos para lograr que los *stakeholders* del proyecto estén alineados con el objetivo y nuevo *mindset* del proyecto.
- Otro cuello de botella encontrado durante implementación fue la aprobación de presupuesto relacionado con costos asociados al proyecto, como horas a pagar por uso de herramienta nueva, *headcount* necesario y compras para incremento de memoria en las PC. Se tuvo que esperar un aproximado de dos meses para dicha aprobación, previa sustentación de los beneficios que se iba a obtener.

Se sugiere continuar con proyectos bajo la estructura realizada, ya que se puede implementar transversalmente en los otros *sites* de la compañía, así como el soporte de las altas gerencias hacia el *project manager*. Hay que tomar en cuenta que la compañía está en crecimiento constante, por lo que es necesario fomentar la creación de un grupo selecto de *projects manager* relacionados con este tipo de mejoras en los diferentes servicios/clientes de la compañía, donde se puede realizar este tipo de análisis e implantación de mejoras.

## CONCLUSIÓN

Con apoyo de las herramientas implementadas, se pudo realizar el análisis de la causa raíz del porqué no se cumplía con los objetivos NPS y FCR, lo que derivaba a un no cumplimiento de la facturación prevista. Con los beneficios obtenidos en cuanto a implementación de herramientas nuevas y optimización de procesos, la compañía puede replicar dichas mejoras en otros indicadores que se presentan los bloques *inbound* y *outbound*.



Con los beneficios económicos obtenidos, es importante que la compañía puede generar un área especialista para este tipo de proyectos, y que se puedan replicar transversalmente en las áreas a nivel local y global donde la empresa está presente.

Es fundamental que la mejora implementada relacionada con recursos humanos tenga un *owner process* que pueda identificar quizá las desviaciones que se presentan durante el *journey map* del colaborador. De esta manera, se pueden realizar los ajustes necesarios e inclusive una actualización constante de la metodología que permita como fin tener un compromiso y tranquilidad para el teleoperador y que este solo se enfoque en la gestión de su trabajo asignado.

Se debe tener en cuenta que en la fase de *brainstorming* se consideren todas las ideas generadas para la identificación de un problema. Así, en este proyecto, surgió la mención de que la lentitud de las computadoras afectaba la experiencia del cliente durante la llamada. Esta idea inicial fue tomando fuerza conforme avanzaba el proyecto y se obtenían más datos. Por eso, es muy importante tomar las ideas de todos los participantes en la fase de *brainstorming*.

Después de la implantación de las mejoras, se pudo identificar que el aplicativo web desarrollado, que inicialmente fue configurado para el servicio *inbound*, también puede ser replicable para otro contexto dentro del sector como, por ejemplo, para los servicios *outbound*, debido a sus características y porque aportaría a la consecución de objetivos que tiene ese tipo de servicios. Por ejemplo, con la colocación del ID del cliente y las características que tiene, el asesor podría visualizar si el cliente alguna vez consultó por algún producto y que podría estar más propenso a una posible compra a futuro a través de este aplicativo web desarrollado.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

El autor declara no tener conflictos de interés.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

**Alonso Fernandino García Gallo:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, *software*, supervisión, validación, visualización, escritura: borrador original, redacción: revisión y edición.

## REFERENCIAS

Abdullateef, A., Mokhtar, S. & Yusoff, R. (2011). The mediating effects of first call resolution on call centers' performance. *Journal of Database Marketing & Customer Strategy Management*, 18, 16-30. <https://doi.org/10.1057/dbm.2011.4>

- Baehre, S., O'Dwyer, M., O'Malley, L., & Lee, N. (2022). The use of net promoter score (NPS) to predict sales growth: Insights from an empirical investigation. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 50, 67-84. <https://doi.org/10.1007/s11747-021-00790-2>
- Burgasí Delgado, D., Cobo Panchi, D., Pérez Salazar, K., Pilacuan Pinos, R., & Rocha Guano, M. (2021). El diagrama de Ishikawa como herramienta de calidad en la educación: una revisión de los últimos 7 años. *Tambara*, 14(84), 1212-1230. [https://tambara.org/wp-content/uploads/2021/04/DIAGRAMA-ISHIKAWA\\_FINAL-PDF.pdf](https://tambara.org/wp-content/uploads/2021/04/DIAGRAMA-ISHIKAWA_FINAL-PDF.pdf)
- Bustamante Lazcano, J. A. (2021). Métodos de recolección de información para el análisis de la satisfacción del cliente. *Ixmati*, 8, 27-34. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4818463>
- De Vreede, T., Andel, S., De Vreede, G. J., Spector, P., Singh, V., & Padmanabhan, B. (2019). What is engagement and how do we measure it? Toward a domain independent definition and scale. En *Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 749-758). <http://hdl.handle.net/10125/59515>
- Gallardo Cervantes, J. (2020). Identificación de cuellos de botella en las organizaciones. Una ventana de oportunidad para formular y evaluar nuevos proyectos de inversión. *Ciencia Económica*, 8(14), 55-57. <https://doi.org/10.22201/fe.24484962e.2019.8.14.4>
- Gans, N., Koole, G., & Mandelbaum, A. (2003). Telephone call centers: Tutorial, review, and research prospects. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(2), 79-141. <https://doi.org/10.1287/msom.5.2.79.16071>
- González Urbán, M. G. (2022). Reconociendo el *customer journey mapping* como clave para generar estrategias de mercadotecnia precisas, innovadoras y centradas en el cliente en México. *The Anáhuac Journal*, 22(1), 98-117. <https://doi.org/10.36105/theanahuacjour.2022v22n1.04>
- Hamui-Sutton, A., & Varela-Ruiz, M. (2013). La técnica de grupos focales. *Investigación en Educación Médica*, 2(5), 55-60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=349733230009>
- Keiningham, T., Cooil, B., Andreassen, T., & Aksoy, L. (2007). A longitudinal examination of net promoter and firm revenue growth. *Journal of Marketing*, 71(3), 39-51. <https://doi.org/10.1509/jmkg.71.3.039>
- Kumar, S. (2018). Net Promoter Score. A metrics must for marketers. *International Journal of Management, Technology and Engineering*, 8(12), 78-83. <https://www.ijamtes.org/gallery/10%20dec%20-%202018.2.pdf>

- Llanos Reynoso, L. F. (2016). A study on call/contact centers' inbound and outbound management process in Mexico. *South Asian Journal of Management Sciences*, 10(2), 1-10. <https://doi.org/10.21621/sajms2016102.01>
- Martínez Muñoz, J. C. (2012). *Plan de mejoramiento para algunos procesos del Banco de Santander S. A.* [Pasantía Institucional para optar el título de Administrador de Empresas, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Occidente. <http://hdl.handle.net/10614/2993>
- Mohanty, V., & Kulkarni, M. (2023). Employee experience - disruptive approach to employee engagement. *International Journal of Management Concepts and Philosophy*, 16(3), 195-210. <https://doi.org/10.1504/IJMCP.2023.131753>
- Nicholls Vélez, M. (2012). *Factores de éxito para la implementación de Inbound Call Centers en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad Tecnológico de Monterrey]. Repositorio Institucional de la Universidad Tecnológico de Monterrey. <http://hdl.handle.net/11285/571024>
- Pierce, A. (2022, 28 de junio). Mejora de procesos utilizando AS IS & TO BE. *ICX*. <https://blog.icx.co/es/proceso-de-negocio/proceso-de-negocio/mejora-de-procesos-utilizando-as-is-to-be>
- Rodríguez, M. (2021). *El onboarding: dinámicas y procesos dentro de los planes de incorporación organizacional* [Trabajo de grado, Programa de Psicología, Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium]. Repositorio Institucional de la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium. <http://hdl.handle.net/20.500.12237/2204>
- Silva-Treviño, J. G., Macías-Hernández, B. A., Tello-Leal, E., & Delgado-Rivas, J. G. (2021). La relación entre la calidad en el servicio, satisfacción del cliente y lealtad del cliente: un estudio de caso de una empresa comercial en México. *CienciaUAT*, 15(2), 85-101. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v15i2.1369>
- Trejo García, J., Soto Rosales, M., & Olivares Aguayo, H. (2023). Optimización del *Net Promoter Score* (NPS) con factores de expansión, una medición de experiencia de clientes en riesgo reputacional. *Contaduría y Administración*, 68(3), 134-159. <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2023.4626>



**CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  

---

**SCIENCE AND TECHNOLOGY**



# SIMULADOR DE LUZ ARTIFICIAL PARA PANELES SOLARES: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN EN EL PERÚ

WILLIAM FERNANDO FERNÁNDEZ GOICOCHEA\*

<https://orcid.org/0000-0002-0946-4229>

Universidad de Lima, Facultad de Ingeniería Industrial, Lima, Perú

MARIO DAYVID CARBAJAL CCOYLLO

<https://orcid.org/0009-0004-7374-8914>

Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, Departamento de Ingeniería  
Química, Materiales y Procesos Ambientales, Río de Janeiro, Brasil

Recibido: 14 de mayo del 2024 / Aceptado: 1 de agosto del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7174>

**RESUMEN.** El objetivo de esta investigación fue diseñar y construir una máquina de luz artificial que simule las iluminaciones solares de la costa, sierra y selva del Perú, evaluando su impacto en los paneles solares. La metodología comprendió la construcción de la máquina en la Universidad de Lima y pruebas con un módulo compuesto por una fuente de luz artificial, un panel solar, un módulo de medición y una pinza amperimétrica. Se realizaron ensayos variando la iluminación para simular las condiciones de las distintas regiones del Perú. Los resultados obtenidos fueron 4,8, 7,2 y 4,0 kWh/m<sup>2</sup> para las simulaciones de costa, sierra y selva, respectivamente. La investigación concluyó que es factible desarrollar una fuente de iluminación solar que mejore la eficiencia de los paneles solares y permita trabajar en condiciones estacionarias. Sin embargo, es necesario aumentar los ensayos y mejorar su precisión para una evaluación más objetiva de su utilidad práctica.

**PALABRAS CLAVE:** recursos energéticos renovables / fuente de luz / simulación / paneles solares / iluminación

---

Este estudio fue financiado por el Laboratorio de Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Lima.

\*Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: [wfernand@ulima.edu.pe](mailto:wfernand@ulima.edu.pe); [mario.carbajal@unmsn.edu.pe](mailto:mario.carbajal@unmsn.edu.pe)

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## ARTIFICIAL LIGHT SIMULATOR FOR SOLAR PANELS: DESIGN AND CONSTRUCTION IN PERU

**ABSTRACT.** The objective of this research was to design and construct an artificial light machine that simulates the solar illuminations of the coast, highlands, and jungle of Peru, evaluating its impact on solar panels. The methodology included the construction of the machine at the University of Lima and tests with a module composed of an artificial light source, a solar panel, a measurement module, and an ammeter clamp. Tests were conducted varying the illumination to simulate the conditions of the different regions of Peru. The results obtained were 4,8; 7,2 and 4,0 kWh/m<sup>2</sup> for the simulations of the coast, highlands, and jungle, respectively. The research concluded that it is feasible to develop a solar lighting source that improves the efficiency of solar panels and allows working under stationary conditions. However, it is necessary to increase the number of tests and improve their precision for a more objective evaluation of their practical utility.

**KEYWORDS:** renewable energy sources / light sources / simulation / solar panels / lighting



## INTRODUCCIÓN

En el panorama actual de preocupación por el cambio climático y la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles, las energías renovables han emergido como una solución vital para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales adversos asociados con la generación de energía (Mengata et al., 2022). Entre estas fuentes renovables, la energía solar ocupa un lugar destacado debido a su abundancia y disponibilidad en diversas regiones del mundo, incluyendo el Perú, donde la incidencia solar es particularmente alta y constante (Arias et al., 2022).

Los paneles solares fotovoltaicos se han convertido en una tecnología fundamental en la captación de energía solar para su conversión en electricidad (Sado et al., 2021). Sin embargo, su eficiencia y rendimiento están intrínsecamente ligados a las condiciones de iluminación solar a las que están expuestos (Swain et al., 2023). Por lo tanto, la capacidad de simular estas condiciones de manera precisa y controlada es esencial para la investigación y el desarrollo en el campo de la energía solar.

Lee et al. (2020) desarrollaron un modelo de simulación para analizar el cambio de la radiación solar resultante de la instalación de compartición solar. Se simuló la intensidad mensual de la iluminación solar y el cambio de intensidad de la iluminación de acuerdo con las diversas condiciones de instalación de paneles solares. Los resultados del análisis mensual de iluminación difirieron según la altitud del sol, que se relacionó con la estación. Además, se analizó que la iluminación mensual disminuyó hasta en un 42 % debido al uso compartido de energía solar. En consecuencia, se recomienda instalar el uso compartido de energía solar como una forma de maximizar la eficiencia del sistema solar fotovoltaico y minimizar la disminución de la radiación solar que llega a los cultivos.

En este contexto, el diseño y construcción de una máquina de luz artificial aplicada a paneles solares adquiere una importancia crítica (Al-Dousari et al., 2019). Esta máquina tiene como objetivo principal simular la iluminación solar de diversas regiones del Perú, permitiendo así la evaluación del rendimiento de los paneles solares en condiciones representativas de la realidad. Este proyecto se enmarca en el ámbito académico e investigativo, con el propósito de contribuir al avance del conocimiento en el campo de las energías renovables y la sostenibilidad ambiental.

Una característica clave del proyecto es el reúso de materiales empleados en la construcción de la máquina de luz artificial. Este enfoque refleja un compromiso con la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de recursos, lo que es fundamental en la transición hacia una economía más circular y respetuosa con el ambiente (Ponnada et al., 2022). Además, se utilizarán lámparas halógenas como fuente de luz artificial, debido a su capacidad para proporcionar una iluminación variable que pueda ajustarse para simular diferentes condiciones lumínicas, de manera que haga posible una evaluación más

precisa y detallada del rendimiento de los paneles solares bajo diversas condiciones de iluminación (Craciun et al., 2009).

Antecedentes previos en el campo de la simulación de iluminación solar y la evaluación de paneles solares han sentado las bases para este proyecto. Estos antecedentes se reseñarán a continuación.

Según Marcu et al. (2015), la producción de energía del Sol es bastante constante, pero la irradiación solar varía significativamente de un lugar a otro y cambia a lo largo del año. La luz solar solo llega a las partes de la Tierra que están frente al Sol en un momento dado, y la irradiación más intensa la experimentan aquellas partes que no están en ángulo con el Sol cuando pasa por encima. El modelado y la simulación de la irradiación solar para un área determinada es útil para planificar futuras inversiones en colectores fotovoltaicos y térmicos.

Asimismo, Trapani y Magatti (2019) propusieron un sistema de iluminación artificial que comprende una pluralidad de dispositivos que imitan el sol (o el sol-cielo), cada uno de los cuales se configura como un dispositivo de iluminación artificial para generar luz que comprende un componente de luz dirigida. El sistema de iluminación artificial cuenta, además, con un grupo de biseles que tiene al menos una sección de bisel seleccionada de un grupo de secciones de bisel, que posee una sección de bisel que bloquea la luz, una sección de bisel transmisora de luz o una sección de bisel configurado como un dispositivo que imita el cielo.

De igual manera, Hudisteanu et al. (2022) presentan el diseño y ejecución de un dispositivo de simulación de radiación solar, que asegura el adecuado funcionamiento de paneles térmicos y fotovoltaicos mediante el uso de fuentes de luz que tienen un espectro cercano al producido por el Sol con un mínimo costo de inversión. El equipo se utiliza para el seguimiento experimental del comportamiento de paneles fotovoltaicos y paneles solares térmicos tanto para intervalos de tiempo cortos como largos. El dispositivo de simulación de radiación solar ha sido desarrollado para proporcionar la radiación necesaria para la evaluación de la eficiencia y el calentamiento de los paneles solares expuestos al Sol. Se ha adoptado un sistema compuesto por seis lámparas de alta presión OSRAM Ultravitalux de 300 W, que ofrece una solución optimizada tanto cualitativa como económicamente. Los principales logros alcanzados fueron diseño, redimensionamiento, verificación, dimensionamiento final, ejecución y pruebas. Llegaron a la conclusión de que el dispositivo propuesto puede proporcionar los parámetros cuantitativos y cualitativos requeridos para la simulación de radiación solar en caso de pruebas de laboratorio.

Por último, Carvalho Neto (2023) propone el uso de un dispositivo para la realización de ensayos experimentales en interiores con luz artificial basado en diodos emisores de

luz (LED) RGB de potencia, para analizar el rendimiento de células fotovoltaicas utilizando tecnología de silicio amorfo (a-Si), silicio policristalino (p-Si) y silicio monocristalino (m-Si) en espectros de luz específica. Este análisis se lleva a cabo mediante la obtención de la curva característica de la corriente y el voltaje de las celdas ensayadas y sus parámetros eléctricos extraídos.

## METODOLOGÍA

El diseño de esta investigación fue de carácter experimental, con el objetivo de evaluar el impacto de una máquina de luz artificial en paneles solares bajo diferentes condiciones de iluminación. La investigación tuvo un alcance centrado en la simulación de las iluminaciones solares de la costa, sierra y selva del Perú, y la medición de su efecto en la eficiencia de los paneles solares. Este estudio fue cuantitativo y aplicado, dirigido a obtener datos precisos sobre el rendimiento de los paneles solares.

Las variables independientes de este estudio fueron la intensidad de la iluminación generada por la máquina de luz artificial y las diferentes condiciones de iluminación (costa, sierra, selva), así como también el voltaje producido por cada una de estas condiciones. La variable dependiente principal fue la medida de iluminancia en términos de la cantidad de energía solar simulada obtenida en cada condición ( $\text{kWh/m}^2$ ).

Este trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica y de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Lima. La investigación se llevó a cabo al aplicar la siguiente estructura:

1. Planificación y diseño
2. Adquisición de materiales
3. Construcción de la estructura de soporte
4. Instalación del sistema eléctrico
5. Montaje de la fuente luz
6. Configuración del sistema de regulación de iluminancia
7. Programación
8. Pruebas y ajuste

### Planificación y diseño

El proyecto se enfoca en la creación de una fuente de luz artificial altamente versátil y adaptable, compuesta por un conjunto de 16 lámparas halógenas de 500 W cada una. Esta instalación no solo proporcionará iluminación, sino que también será capaz de regular su intensidad lumínica, lo que permitirá simular con precisión una amplia

gama de condiciones lumínicas encontradas en el diverso territorio peruano. El principal objetivo de este proyecto será aprovechar esta fuente de luz artificial para abastecer de energía a un módulo de celdas fotovoltaicas, proporcionando así una solución innovadora y sostenible para la generación de energía (Marcu et al., 2015).

### Adquisición de materiales

La adquisición de los materiales para fines académicos fue obtenida de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Lima. En este sentido, se compró una variedad de elementos, entre ellos aparatos eléctricos como medidores de voltaje y resistencias, además de accesorios eléctricos como enchufes e interruptores, y también controladores de iluminación, todos destinados a enriquecer la experiencia de aprendizaje y experimentación de los estudiantes. Asimismo, se ha dado un paso adelante hacia la sostenibilidad al utilizar material reciclado en la fabricación de la estructura metálica necesaria para la fuente de luz artificial, lo que refleja el compromiso con el cuidado del ambiente y la responsabilidad social. Estos materiales, obtenidos con rigurosidad y en concordancia con las políticas institucionales, han sido utilizados exclusivamente para actividades académicas y proyectos de investigación, promoviendo así la innovación y el desarrollo sostenible en el campo de la ingeniería civil.

### Construcción de la estructura de soporte

La estructura fue fabricada utilizando tubo cuadrado de acero con propiedades y dimensiones mecánicas detalladas en la Tabla 1. Este tubo fue cortado en piezas de diferentes tamaños y unido mediante soldadura MIG (soldadura por gas inerte de metal), como se muestra en el plano estructural de la Figura 1. La finalidad de esta estructura es sostener las lámparas halógenas, el tablero de control eléctrico y los soportes laterales de planchas de acero inoxidable troqueladas. Una vez completado el soporte estructural, se aplicó un acabado con pintura anticorrosiva y una capa final de pintura con brillo.

**Tabla 1**

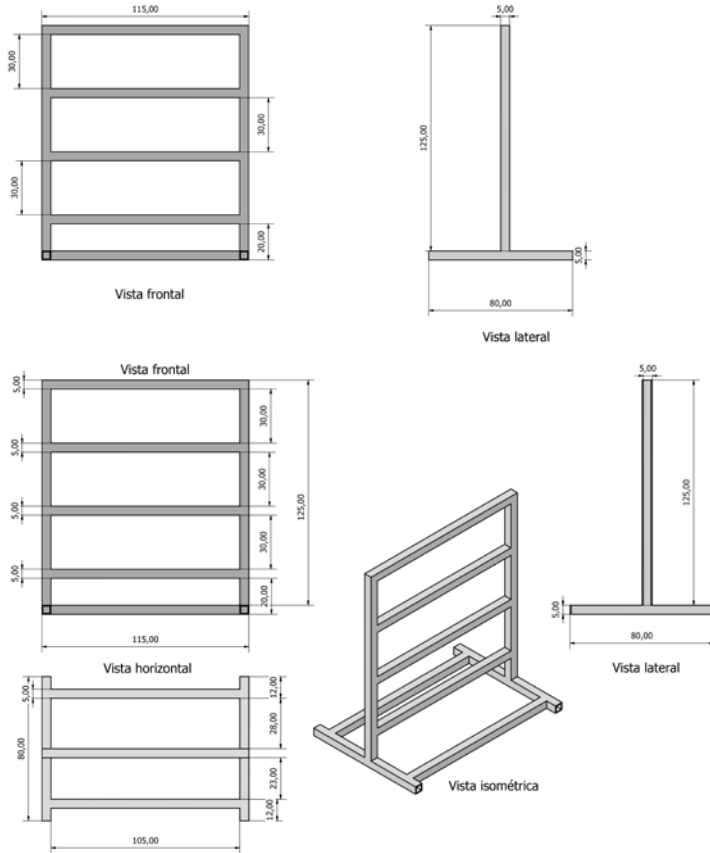
*Propiedades mecánicas del tubo cuadrado ASTM A500*

Propiedades mecánicas		
Límite de fluencia (MPa) mínimo		269
Resistencia a la tracción (MPa) mínima		310
Elongación probeta 8"		25 % mínimo
Dimensiones (largo × altura × ancho) m	6 × 0,5 × 0,02	6 × 0,5 × 0,02

*Nota.* Adaptado de *Tubo cuadrado de acero ASTM A500*, por Fiorella Representaciones S. A. C., s. f. (<https://www.fiorellarepre.com.pe/FichaTecnica/803012.pdf>).

**Figura 1**

*Estructura metálica de la máquina de luz artificial*



### Instalación del sistema eléctrico

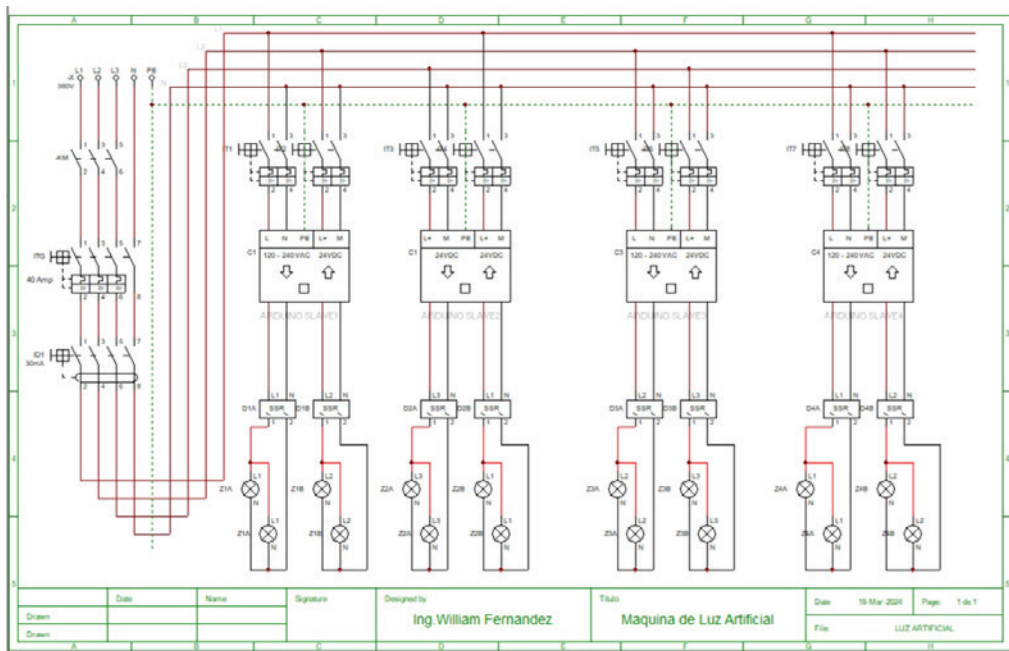
El equipo está diseñado para operar con un sistema trifásico a 380 V y 60 Hz de frecuencia, con una potencia eléctrica de 8 kW. Este sistema cuenta con un control de encendido compuesto por dos pulsadores para iniciar y detener el funcionamiento, gestionado por un contactor KM (ubicación 2A), como se muestra en el esquema de la Figura 2. Además, se incluye un interruptor termomagnético de 40 A y un interruptor diferencial de 40 A con una sensibilidad de corriente por defecto de 30 mA. La alimentación al equipo se configura de la siguiente manera:

- 380 V, 50 Hz, 3 fases + neutro
- 380 V, 60 Hz, 3 fases + neutro
- 220 V, 60 Hz, 3 fases

Cada zona de trabajo, tal como se muestra en la Figura 3, está equipada con cuatro lámparas halógenas de 500 W cada una. Estas zonas están controladas por un Arduino Uno, que gestiona dos *drivers* para regular el ángulo de disparo de la onda alterna que alimenta las lámparas; para cada zona se instalan dos interruptores monofásicos. Esta configuración se implementó tomando como referencia a Summerfield (2009) y Zelle (2010).

**Figura 2**

*Plano eléctrico de la máquina de iluminación diseñado con el software Cade Simu versión 4.2*



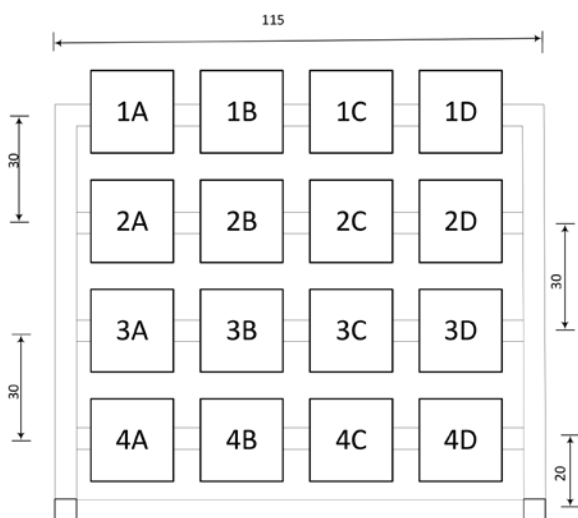
### Montaje de la fuente de luz

La fuente de luz incluye 16 lámparas halógenas que están dispuestas en cuatro filas, como se muestra en la Figura 3. El ángulo de inclinación de las lámparas halógenas individuales se puede ajustar para adaptar la irradiación al ensayo respectivo. Se puede variar la distancia de la fuente de luz con respecto al módulo fotovoltaico, afectando a la intensidad de iluminación; se ha distribuido de la siguiente manera:

- Zona 1A, Zona 1B... 4 lámparas parte superior
- Zona 2A, Zona 2B... 4 lámparas parte intermedia
- Zona 3A, Zona 3B... 4 lámparas parte media
- Zona 4A, Zona 4B... 4 lámparas parte inferior

**Figura 3**

*Distribución de las zonas de iluminación*



### Configuración del sistema de regulación de iluminación

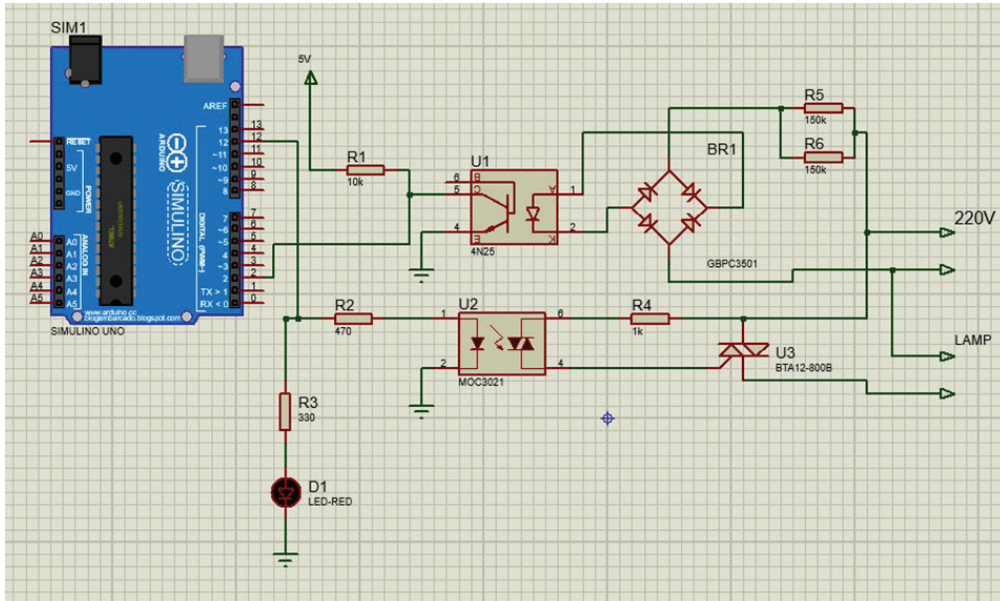
El sistema de regulación de cada zona de trabajo estará gobernado por un controlador Arduino Uno, que es un microcontrolador con el procesador ATmega328P de manera esclava; es decir, su trabajo de control será exclusivo para regular el ángulo de disparo de la onda alterna que alimentará las lámparas de cada zona. El *driver* de regulación de la onda alterna está compuesto por una tarjeta que tiene un puente de diodos de onda completa de alta corriente GBPC3501. Dicho puente genera una onda continua pulsante (solo onda positiva) ingresando a los pines 1 y 2 del optoacoplador U1-4N25, la cual permite detectar el cruce por cero de la onda rectificadora; cuando detecta el cero (punto de cruce) genera un pulso de 5 V que sale del optoacoplador pin 5 e ingresa a la entrada del controlador (pin 2), tal como se muestra en la Figura 4.

El valor de detección del cruce por cero permite inicializar el pulso que sale del pin 12 del controlador, cuya duración estará determinada por el valor del potenciómetro virtual de la aplicación del celular, regulado al rango de 97 % a 18 % de porcentaje de la onda alterna que alimenta las lámparas halógenas. La salida del pin 12 del controlador, que está conectado a la entrada del opto-Triac (pin 1) U2-MOC3021, permite el disparo del Triac U3 BTA12-800B según la duración de la salida del pin 12 del controlador.

Para la función de aplicación del *dimmer*, que es la regulación continua del ángulo de disparo para esta secuencia de pasos de programación, se tomó como referencia a Reyes y Cid (2014), y Tojeiro (2014). Permite o corta la conducción de la onda alterna según la regulación del potenciómetro virtual de la aplicación del celular.

Figura 4

Tarjeta de regulación del ángulo de disparo de la onda alterna



### Programación del controlador Arduino y la aplicación

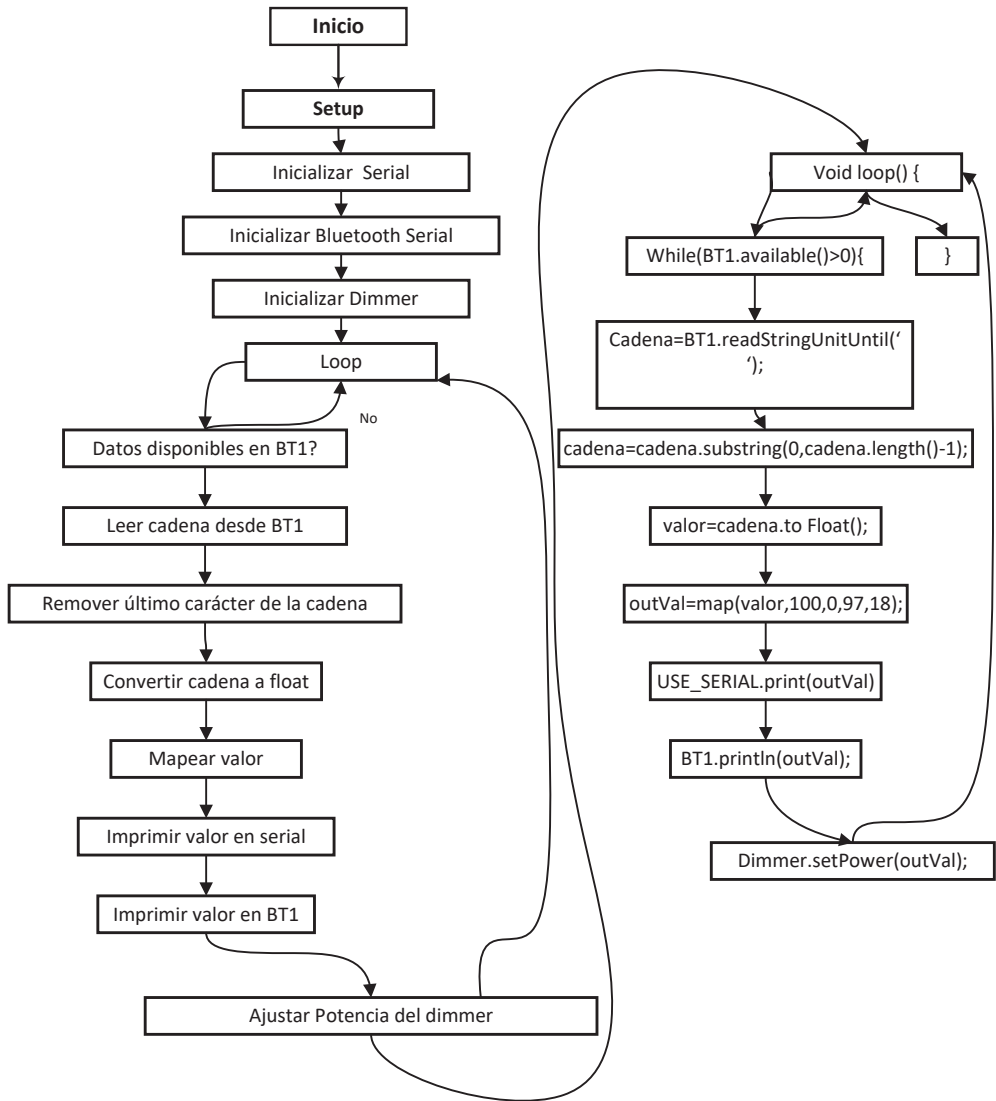
El Arduino esclavo controlará dos tarjetas de regulación del ángulo de disparo de la onda alterna; es decir, cada zona estará conformada por cuatro lámparas de cada fila. Se ha empleado el programa IDE de Arduino, el cual inicialmente se carga la librería RBDdimmer para Arduino Uno, definiendo como salida digital el pin 12 y como entrada digital el pin 2, denominado cruce por cero en el programa.

Se utiliza la comunicación serial para el *bluetooth*, para la cual se configuran los pines 11 y 10 del Arduino. Se inicializa el *dimmer* usando como salida el pin 12, y la variable cadena como un *string*. También se configura la variable valor como una variable *long*, de tamaño extendido para almacenamiento de números de 32 bits. Se emplea comunicación de 9600 para el *bluetooth* y el controlador. Para una mejor comprensión de la programación se presenta el diagrama de flujo en la Figura 5.



Figura 5

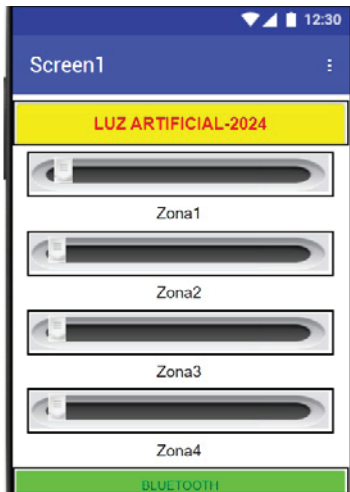
Diagrama de flujo del programa de control en Arduino



La aplicación se ha desarrollado en MIT App Inventor para el control de la luminosidad regulando el ángulo de disparo de la onda alterna. La imagen de la pantalla consta de un título, potenciómetros de regulación para cada zona del equipo y, al final del tapiz, el botón de conexión *bluetooth*, como se muestra en la Figura 6.

**Figura 6**

*Aplicación del sistema de control de lámparas halógenas desarrollado en MIT App Inventor*



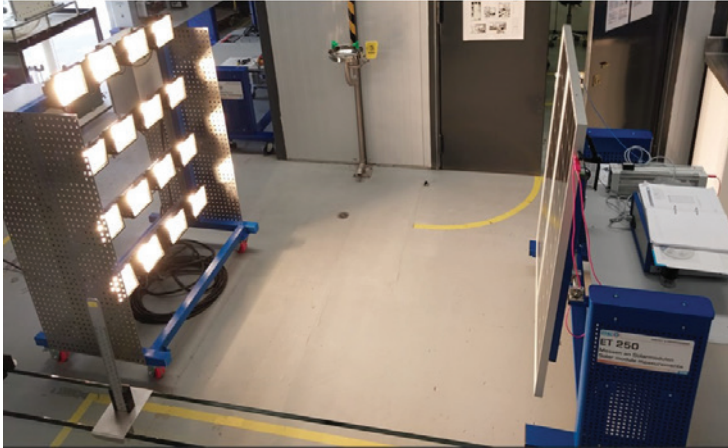
### Pruebas y ajustes

Las pruebas se llevaron a cabo mediante la recolección de datos utilizando la fuente de luz artificial y la unidad de medición, como se observa en la Figura 7. Durante este proceso, se registraron los valores de iluminancia simulados (500, 600, 900 W/m<sup>2</sup>), los cuales representan las diversas regiones del Perú (costa, sierra, selva), respectivamente. Estos valores fueron medidos mediante un sensor de intensidad de iluminación, montado y orientado en el mismo plano que el panel solar. El sensor está conectado a una unidad de medición marca Hunt Hamburg, modelo ET250, que registra los valores de intensidad de iluminación en unidades de kW/m<sup>2</sup>, como se muestra en las Figuras 8a y 8b, respectivamente.

Estos niveles de iluminación se compararon con los datos proporcionados por el *Atlas de energía solar del Perú* (2003). Según esta fuente, el Perú posee una elevada radiación solar anual, que varía según la región geográfica. En la sierra, la radiación solar diaria es de aproximadamente 5,5 a 6,5 kWh/m<sup>2</sup>; en la costa, de 5,0 a 6,0 kWh/m<sup>2</sup>; y en la selva, de aproximadamente 4,5 a 5,0 kWh/m<sup>2</sup> (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2003). El módulo de luz artificial utilizado en las pruebas fue diseñado para replicar estos valores específicos de radiación solar en cada región.

**Figura 7**

*Equipo de iluminación artificial en las pruebas de puesta en marcha*



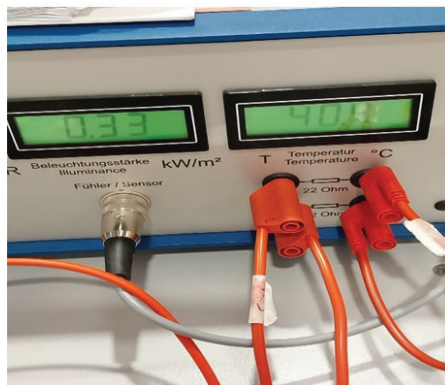
**Figura 8**

*a. Sensor de iluminación. b. Unidad de medición*

a)



b)



## RESULTADOS

El presente estudio ha posibilitado la creación de una máquina generadora de luz artificial cuyas intensidades de iluminación simulada se asemejan notablemente a las condiciones lumínicas de las regiones peruanas de costa, sierra y selva, según se detalla en la Tabla 2. Se logró simular una intensidad lumínica por encima de la radiación diaria para el caso de la sierra, una intensidad muy similar a la de la costa y otra también muy cercana a la de la selva. Estos resultados indican que la fuente de luz artificial opera de manera adecuada.

**Tabla 2**

*Valores obtenidos por el módulo ET 250 empleando la máquina de luz artificial*

Región	Energía solar diaria (kWh/m <sup>2</sup> )	Fuente de luz artificial-experimental (kWh/m <sup>2</sup> )
Costa	5,0-6,0	4,8
Sierra	5,5-6,5	7,2
Selva	4,5-5,0	4,0

*Nota.* Los datos de energía solar diaria son del *Atlas de energía solar del Perú* (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2003).

## DISCUSIÓN

Los valores de radiación se podrán regular inicialmente empleando una aplicación por celular, para ir desde el 6 % hasta el 85 % variando el ángulo de disparo de la onda alterna que alimenta a las lámparas halógenas. La regulación trabaja en cuatro zonas distintas. Esto permitirá la regulación de la iluminancia para simular distintas ubicaciones de latitud y altitud de diferentes poblaciones de nuestro país. Similares resultados fueron obtenidos por Mamun et al. (2022).

En cuanto a la eficiencia de la fuente de luz artificial, se observa en la Tabla 2 que los valores de energía simulada por la fuente de luz artificial son bastante cercanos a los valores de energía solar diaria en todas las regiones; estos valores simulados también son similares a los reportados por Tress et al. (2019). Sin embargo, en la región de la sierra, la fuente de luz artificial produce una cantidad significativamente mayor de energía simulada en comparación con la energía solar diaria esperada. Esta discrepancia podría indicar una posible sobreestimación de la fuente de luz artificial o una influencia inesperada de otros factores en el proceso de simulación.

Los resultados del impacto en la eficiencia de los paneles solares muestran que la fuente de luz artificial logra simular una cantidad significativa de energía en todas las regiones, lo que sugiere su capacidad para proporcionar condiciones de iluminación representativas. Esta precisión en la simulación es crucial para evaluar el rendimiento de los paneles solares en condiciones controladas y para diseñar sistemas de energía solar más eficientes que puedan adaptarse a diferentes entornos geográficos.

Asimismo, la discrepancia entre los valores de energía solar diaria y los valores simulados por la fuente de luz artificial en la región de la sierra indica la necesidad de una revisión y ajuste en el proceso de simulación para esta área específica. Esto podría implicar modificaciones en los parámetros de la fuente de luz artificial o consideraciones adicionales para tener en cuenta las condiciones únicas de iluminación en la sierra.

## CONCLUSIONES

La capacidad de la máquina generadora de luz artificial para simular intensidades lumínicas cercanas a las condiciones naturales de diferentes regiones geográficas evidencia su eficaz funcionamiento y su potencial utilidad en aplicaciones relacionadas con la energía solar y la investigación científica. Los resultados obtenidos sugieren que el desarrollo de esta fuente de luz artificial representa un avance significativo en la capacidad de replicar y controlar condiciones lumínicas específicas, lo que puede contribuir no solo al mejoramiento de la eficiencia de los paneles solares, sino también a la comprensión más profunda de los efectos ambientales y energéticos en diferentes contextos geográficos.

La implementación de un sistema de regulación y control basado en Arduino para la gestión de la intensidad luminosa por zonas representa una solución avanzada y adaptable a diversas aplicaciones industriales. Esta configuración ofrece una mayor precisión y eficiencia en el manejo de la iluminación, lo que ayuda a mejorar las condiciones de trabajo y la productividad en entornos laborales específicos.

Investigaciones anteriores han demostrado la importancia de replicar con precisión las condiciones de iluminación solar para obtener resultados confiables en la evaluación del rendimiento de los paneles solares. Además, estudios sobre el reúso de materiales en proyectos de ingeniería han destacado los beneficios económicos y ambientales de esta práctica, enfatizando la necesidad de adoptar enfoques más sostenibles en el diseño y construcción de dispositivos tecnológicos.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

**William Fernando Fernández Goicochea:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, *software*, supervisión, validación. **Mario Dayvid Carbajal Ccoyllo:** *data curation*, investigación, metodología, supervisión, validación, visualización, recursos, escritura: borrador original, redacción: revisión y edición.

## REFERENCIAS

Al-Dousari, A., Al-Nassar, W., Al-Hemoud, A., Alsaleh, A., Ramadan, A., Al-Dousari, N., & Ahmed, M. (2019). Solar and wind energy: Challenges and solutions in desert regions. *Energy*, 176, 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.180>

- Arias, R., Rodas, N., & Valverde, L. (2022, 11-13 de agosto). *Evaluation of on-grid renewable energysystem in a Peruvian small industry*[Presentación de escrito]. 2022 IEEE XXIX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Lima, Perú. <https://doi.org/10.1109/INTERCON55795.2022.9870149>
- Carvalho Neto, J. (2023). Performance analysis of silicon technologies photovoltaic cells using artificial light source in different spectra. *IEEE Sensors Journal*, 23(9), 9972-9980. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3263139>
- Craciun, O., Radu, D., & Bacha, S. (2009, 28 de junio - 2 de julio). *Halogen lamp modeling for low voltage power systems transient analyses* [Sesión de conferencia]. 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucarest, Rumania. <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5282028>
- Fiorella Representaciones S. A. C. (s. f.). *Tubo cuadrado de acero ASTM A500*. Recuperado el 5 de abril de 2024 de <https://www.fiorellarepre.com.pe/FichaTecnica/803012.pdf>
- Hudisteanu, S., Chereches, C., Turcanu, F., Taranu, N., Verdes, M., Ancas, A., Hudisteanu, I., Ungureanu, D., & Polcovnicu, R. (2022). Solar radiation simulation device for investigation of thermal and photovoltaic panels. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 14(3), 76-85. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2022.14.3.76>
- Lee, S., Choi, J., Sung, S., Lee, J., & Choi, W. (2020). Simulation and analysis of solar radiation change resulted from solar-sharing for agricultural solar photovoltaic system. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 62(5), 63-72. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2020.62.5.063>
- Mamun, M., Islam, M., Hasanuzzaman, M., & Selvaraj, J. (2022). Effect of tilt angle on the performance and electrical parameters of a PV module: Comparative indoor and outdoor experimental investigation. *Energy and Built Environment*, 3(3), 278-290. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.02.001>
- Marcu, M., Popescu, F., Pana, L., & Slusariuc, I. (2015). Modeling and simulation of solar radiation. *Applied Mechanics and Materials*, 710, 113-118. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.710.113>
- Mengata, G., Perabi, S., Ndi, F., & Wiysahnyuy, Y. (2022). Characterization of solar photovoltaic modules powered by artificial light for use as a source for smart sensors. *Energy Reports*, 8, 12105-12116. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.056>
- Ponnada, S., Kumari, I., Chinnam, S., Sadat, M., Kumar, A., Chandra, R., Babu, D., Nowduri, A., & Sharma, R. (2022). Renewable energy. En P. Devi (Ed.), *Green energy*

- harvesting: Materials for hydrogen generation and carbon dioxide reduction* (pp. 1-22). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119776086.ch1>
- Reyes, F., & Cid, J. (2014). *Arduino. Aplicaciones en robótica y mecatrónica* (1.ª ed.). Alfaomega Grupo Editor.
- Sado, K., Hassan, L., & Sado, S. (2021). Photovoltaic panels tilt angle optimization. *E3S Web of Conferences*, 239, Artículo 19. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123900019>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2003). *Atlas de energía solar del Perú*. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/343>
- Summerfield, M. (2009). *Programación en Python 3*. Anaya Multimedia.
- Swain, S., Swain, S., & Mark, D. (2023, 28 de enero - 3 de febrero). *Increasing efficiency of solar panels using curved solar cells and innovative optics* [Presentación de escrito]. Proceedings Volume 12416, Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices XII, San Francisco, California, Estados Unidos. <https://doi.org/10.1117/12.2647457>
- Tojeiro, G. (2014). *Taller de Arduino* (1.ª ed.). Alfaomega Grupo Editor.
- Trapani, P., & Magatti, D. (2019). *Artificial lighting system for simulating a natural lighting*. <https://patentimages.storage.googleapis.com/24/5f/b6/14bdc8dcd09e07/US20140133125A1.pdf>
- Tress, W., Domanski, K., Carlsen, B., Agarwalla, A., Alharbi, E., Graetzel, M., & Hagfeldt, A. (2019). Performance of perovskite solar cells under simulated temperature-illumination real-world operating conditions. *Nature Energy*, 4, 568-574. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0400-8>
- Zelle, J. (2010). *Python programming: An introduction to computer science* (2.ª ed.). Franklin, Beedle & Associates.





# LA MANUFACTURA ADITIVA COMO ELEMENTO IMPRESCINDIBLE DE LA INDUSTRIA 4.0 EN BENEFICIO DE LA INGENIERÍA: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

MARCO ANTONIO DÍAZ-MARTÍNEZ

<https://orcid.org/0000-0003-1054-7088>

Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas A. C., Campus DESAD,  
Tampico, Tamaulipas, México

REINA VERÓNICA ROMÁN-SALINAS\*

<https://orcid.org/0000-0001-9287-4298>

Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas A. C., Campus DESAD,  
Tampico, Tamaulipas, México

SANTOS RUÍZ-HERNÁNDEZ

<https://orcid.org/0000-0002-4300-8526>

Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas A. C., Campus DESAD,  
Tampico, Tamaulipas, México

NICOLÁS ALBERTO HERNÁNDEZ-CORTÉS

<https://orcid.org/0009-0008-3688-3059>

Universidad Veracruzana, Campus Veracruz, Veracruz, México

VANIA IRAÍS GONZÁLEZ-RUBÍN

<https://orcid.org/0009-0005-3983-9625>

Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas A. C., Campus DESAD,  
Tampico, Tamaulipas, México

Recibido: 28 de mayo del 2024 / Aceptado: 15 de julio del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7153>

---

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

\* Autora corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: marco\_diaz.ed@icest.mx; reina\_roman.ed@icest.mx; santos\_ruiz.ed@icest.mx; nialheco@hotmail.com; direccion.desad@icest.edu.mx

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

**RESUMEN.** La manufactura aditiva, fundamental en la industria 4.0, transforma la producción creando objetos tridimensionales mediante capas sucesivas. Esta tecnología ofrece flexibilidad de diseño y eficiencia en el uso de materiales, pero enfrenta retos en la optimización de procesos para asegurar calidad y precisión. Su integración con la industria 4.0 plantea desafíos como la interoperabilidad de sistemas CAD, la gestión de datos y la ciberseguridad. A pesar de estos desafíos, permite crear geometrías complejas, reducir el consumo de materias primas y mejorar las propiedades de los productos finales. La investigación en materiales y procesos acelera su adopción, promoviendo modelos de negocio personalizados, sostenibles y descentralizados. Este enfoque está revolucionando la producción industrial y doméstica, y remodelará los modelos de negocio y diseño de productos. En la investigación, se revisaron 257 documentos, excluyéndose 172, y se examinaron 85 textos con el *software* MAXQDA v.2020 para el análisis bibliométrico.

**PALABRAS CLAVE:** manufactura aditiva / industria 4.0 / ingeniería industrial / procesos de manufactura / bibliometría

## **ADDITIVE MANUFACTURING AS AN ESSENTIAL ELEMENT OF INDUSTRY 4.0 FOR THE BENEFIT OF ENGINEERING: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS**

**ABSTRACT.** Additive manufacturing, fundamental in industry 4.0, transforms production by creating three-dimensional objects through successive layers. This technology offers design flexibility and material efficiency but faces challenges in optimizing processes to ensure quality and precision. Its integration with industry 4.0 presents issues such as CAD system interoperability, data management, and cybersecurity. Despite these challenges, it enables the creation of complex geometries, reduces raw material consumption, and improves the final product properties. Research into materials and processes is accelerating its adoption, fostering personalized, sustainable, and decentralized business models. This approach is revolutionizing industrial and domestic production and will reshape business models and product design. In the research, 257 documents were reviewed, 172 were excluded, and 85 texts were analyzed using MAXQDA v.2020 for bibliometric analysis.

**KEYWORDS:** additive manufacturing / industry 4.0 / industrial engineering / manufacturing processes / bibliometrics

## INTRODUCCIÓN

En el contexto de la evolución hacia la industria 4.0, la manufactura aditiva ha emergido como una tecnología disruptiva con el potencial de transformar los procesos de producción industrial. A pesar de sus ventajas evidentes en términos de flexibilidad de diseño y eficiencia de material, existen desafíos significativos que limitan su adopción plena y efectiva en entornos industriales. La optimización de los procesos de impresión 3D sigue siendo uno de los principales problemas identificados para asegurar la calidad y la precisión de los productos manufacturados.

La integración efectiva de la manufactura aditiva en el panorama más amplio de la industria 4.0 plantea interrogantes sobre la interoperabilidad de los sistemas CAD, la gestión de datos y la ciberseguridad en los entornos de producción avanzados. Por lo tanto, es crucial abordar estos desafíos para maximizar el potencial de la manufactura aditiva en la creación de valor añadido y la competitividad industrial en la era digital. Por ello, este trabajo de investigación bibliométrica describe el impacto de la manufactura aditiva en los procesos relacionados con la ingeniería industrial, así como su relación con las nuevas tecnologías aditivas y la industria 4.0.

Si bien los sistemas de producción actuales siguen basándose en la creación de piezas mediante operaciones de remoción de material, cuyo proceso se inicia con la introducción de materia prima y continúa con operaciones como el arranque de viruta, perforación, modelado, troquelado y doblado de materiales; estos métodos requieren la intervención de herramientas y mano de obra (Elhazmiri et al., 2022). En contraste, la nueva Revolución Industrial 4.0 responde a la necesidad de adoptar tecnologías innovadoras para mantener la competitividad en el mercado industrial global (Öberg & Shams, 2019; Savolainen & Collan, 2020).

La manufactura aditiva (MA) se presenta como una alternativa significativa, pues permite la construcción de geometrías complejas que son difíciles de lograr con máquinas y herramientas tradicionales como el torno, la fresadora y la rectificadora. Esta tecnología no solo reduce el consumo de materias primas, sino que también mejora las propiedades del producto final, tales como su peso y funcionalidad (Ford & Despeisse, 2016).

Para Gao et al. (2015) y Matsumoto et al. (2016), la manufactura aditiva no presenta problemas en términos de costos, mecanizado, fundición de materiales, moldeado o herramientas asociadas a los procesos convencionales. Esto se debe a que posee características muy específicas en cuanto a la selección de materiales, precisión en el proceso de impresión, control de velocidad y acabados.

Los cambios impulsados por la industria 4.0, como el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en el internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), la generación de minería de datos utilizando *big data* y la intervención de tecnologías de manufactura aditiva (MA),

han contribuido positivamente a la planificación de los sistemas de producción y modelado (Majstorovic et al., 2018). Las tecnologías MA ofrecen nuevas oportunidades de mejora en la producción de formas geométricas con múltiples niveles de complejidad, reduciendo los residuos de producción y favoreciendo la disminución de los costos de producción (Bikas et al., 2016; Patalas-Maliszewska et al., 2020).

En la manufactura aditiva, un elemento se modela utilizando un *software* de diseño asistido por computadora (CAD). El modelo desarrollado debe contener una cantidad específica de vectores representados como una superficie cerrada. Se lo guarda en un formato con extensión STL, el cual tiene la capacidad de almacenar y proporcionar las propiedades geométricas del modelo en términos triangulares, que una impresora 3D puede interpretar para su posterior impresión. Durante la impresión, el modelo se corta en diferentes secciones transversales, solidificando los materiales y generando como resultado un objeto tridimensional. Es importante destacar que el formato STL representa el modelo que se va a imprimir mediante triángulos. Sin embargo, no es el único formato aceptado por los *softwares* de impresión, ya que existen impresoras que aceptan otros formatos de archivo (Kumar et al., 2015; Nayak et al., 2019).

La disponibilidad de tecnología innovadora que permite convertir modelos complejos desarrollados en sistemas CAD, junto con la tecnología aditiva capaz de transformarlos en objetos reales en muy poco tiempo con alta exactitud y resistencia del material, ofrece ventajas significativas. Estas ventajas ayudan a las organizaciones a optimizar sus procesos y sistemas de producción, reduciendo costos y errores.

La adopción de tecnologías de manufactura aditiva está impulsando investigaciones avanzadas en materiales y procesos de impresión. Estas implicaciones científicas incluyen el desarrollo de nuevos materiales compuestos y métodos de impresión que mejoran las propiedades mecánicas y funcionales de los productos fabricados. Además, la optimización de los procesos de diseño asistido por computadora (CAD) para la manufactura aditiva está siendo investigada para mejorar la precisión y eficiencia del diseño de productos complejos. Por otro lado, en el ámbito social, la manufactura aditiva está impactando la manera en que se diseñan, producen y consumen productos. Esto podría tener efectos significativos en la economía global al alterar cadenas de suministro tradicionales y fomentar modelos de negocio más personalizados y sostenibles. Además, la adopción de estas tecnologías podría promover la descentralización de la producción industrial, permitiendo que más comunidades y regiones participen en la fabricación localizada y personalizada (Kumar et al., 2023).

## REVISIÓN DE LA LITERATURA

### La manufactura aditiva en las organizaciones

En el contexto de la industria 4.0, existen muchas tecnologías relacionadas con la transformación, tales como la computación, internet, tecnología en la nube, automatización, digitalización, robótica, manufactura y organizaciones inteligentes. Sin embargo, una de las más destacadas en la operación de fabricación es la manufactura aditiva (MA), que permite la creación de objetos tridimensionales mediante un proceso de adición capa por capa (Butt, 2020).

Muchas organizaciones están implementando actualmente la industria 4.0, creando un nuevo camino tecnológico en beneficio de la ingeniería y su relación con la manufactura. Los tipos de manufactura aditiva (MA) han aumentado significativamente, utilizando materiales metálicos, cerámicos, termoplásticos y vidrio (Bar-Cohen, 2018). A pesar de la disposición de las organizaciones para adoptar esta tecnología, se han encontrado con barreras significativas al implementarlas, como la falta de experiencia y la necesidad de capacitación especializada constante (Stavropoulos et al., 2023).

Como parte de los procesos industriales y la integración de la manufactura aditiva, las organizaciones están generando procesos de producción sin herramientas y con bajos requisitos de infraestructura, de manera que logran una producción distribuida y una reducción de la huella ecológica (Schmidt et al., 2023). Las industrias se están adaptando gradualmente a los nuevos desafíos que implica la manufactura aditiva, avanzando hacia una fabricación continua y óptima (Sundarkumar et al., 2022).

### Fusión por lecho de polvo

La fusión por lecho de polvo es una técnica de fabricación aditiva que utiliza polvo y fusión selectiva de capas sucesivas para crear objetos tridimensionales. Es conocida por su versatilidad en términos de materiales, alta precisión y aplicabilidad en una variedad de industrias. Este proceso necesita un precalentamiento donde el lecho está sujeto a un proceso de envejecimiento, lo que disminuye la reutilización del polvo.

Para abordar el problema del envejecimiento del polvo y su reciclaje, se han desarrollado mecanismos que minimizan los efectos secundarios mediante la intervención de resina epóxica (A. Guo et al., 2023). El monitoreo del proceso de fusión por lecho de polvo puede lograrse eficazmente mediante el uso de la emisión acústica, un método prometedor que exhibe una factibilidad adecuada. Este método permite un filtrado de paso alto con una frecuencia de corte de 22,4 Hz, lo que resulta en la eliminación de la mayoría de las oscilaciones de presión acústica (Chen et al., 2023).

Se han llevado a cabo diversos estudios sobre microestructuras y propiedades mecánicas con el fin de realizar tratamientos térmicos posteriores al procesamiento de componentes en muestras de aleación de aluminio, como la fusión de lecho de polvo por láser (LPBF, por sus siglas en inglés). Este tipo de procesamiento presenta características tales como baja densidad, alta resistencia, resistencia a la corrosión, reciclabilidad, soldabilidad y una alta relación entre resistencia y peso (Medrano et al., 2023).

Otro proceso de fusión utilizado en la fabricación de piezas en acero inoxidable es la fusión de lecho de polvo de haz de electrones (E-PBF), la cual se lleva a cabo mediante microscopía electrónica de barrido. Los resultados de este proceso, que involucra pruebas de tracción y análisis de difracción de rayos X, muestran una alta resistencia y resistencia a la corrosión (Roos et al., 2023).

La fusión por lecho de polvo de haz de electrones se utiliza en la fabricación de andamios graduados mediante pruebas de fatiga por compresión, determinando la resistencia a la fatiga con estados gradientes vertical (VG) y en paralelo (PG). A través de estas pruebas, se ha observado que el componente PG exhibe la mejor resistencia, con una tensión de daño por fatiga muy baja. Este proceso permite retardar la propagación de grietas por fatiga al redistribuir adecuadamente las tensiones en la estructura del material y ofrecer una alta resistencia a la fatiga por compresión (Y. Guo et al., 2023).

Se han desarrollado compuestos de partículas de cerámica mediante el proceso de fusión de lecho de polvo láser, optimizando la microestructura con una distribución uniforme. Estos materiales se utilizan para fabricar elementos resistentes a la compresión, como componentes electrónicos, herramientas de corte metalmecánicas e implantes biomédicos (Azami et al., 2023). Sin embargo, algunos materiales forjados por LPBF pueden ser propensos a presentar grietas, por lo que es necesario agregar refinadores de grano para disminuir este tipo de desgaste y mejorar la resistencia al fortalecimiento de la dispersión del material (Yang et al., 2023).

En el estudio realizado por Gokcekaya et al. (2023), desarrollaron una aleación de alta entropía (HEA) mediante el método de fusión de lecho de polvo láser en un supersólido no equiatómico. Lograron una notable supresión de la segregación elemental y una textura cristalina, activando un crecimiento epitaxial capa a capa, lo que resultó en un endurecimiento efectivo y una buena biocompatibilidad. Es importante tener precaución al llevar a cabo el proceso de LPBF, ya que la aplicación de parámetros inapropiados puede ocasionar defectos en los materiales (Zhang et al., 2023).

Si bien la fusión de lecho por láser es un proceso popular para la fabricación de componentes de última generación, aún persisten desafíos al tratar de fabricar aleaciones de cobre debido a sus propiedades térmicas y su capacidad de reflexión de los rayos láser. Para mejorar su rendimiento, es necesario aplicar un tratamiento

térmico posterior a las aleaciones, como el uso de rayo láser verde y láser infrarrojo convencional (Xie et al., 2023).

Además, la influencia del pulido láser y el granallado asistido por chorro de agua se manifiesta en la calidad superficial del material, su microestructura y sus propiedades electroquímicas. Esto puede conducir a una reducción del potencial de picaduras y a la formación de capas pasivas, aunque pueda incluir más defectos cristalinos (Behjat et al., 2023).

La implementación de la tecnología PBF en el desarrollo tecnológico para la producción de productos de alto valor es viable en comparación con los procesos tradicionales, lo que genera oportunidades comerciales significativas y optimiza los procesos para las aleaciones de ingeniería reconocidas (Leary, 2020).

### **Manufactura aditiva: inyección de aglutinante (BJ, *binder jetting*)**

La inyección de aglutinante se emplea en aplicaciones que requieren la impresión de objetos utilizando una variedad de materiales, tales como polímeros, cerámica o metales. Este proceso resulta especialmente útil cuando se trabaja con materiales que no se pueden fundir fácilmente, como algunas cerámicas, o cuando se necesita alcanzar una alta resolución en la impresión.

Asimismo, es una técnica versátil que se aplica en diversas industrias, como la automotriz, la aeroespacial, la médica y la de bienes de consumo. El propósito de este proceso es unir material en polvo mediante la adición de aglutinante líquido en forma de gotas con diámetros inferiores a 100  $\mu\text{m}$ , las cuales son depositadas sobre el lecho de polvo. Luego, la superficie del lecho de polvo se expone al calor de manera estática, lo que genera una resistencia mecánica al aplicar calor. El resultado es un aumento de la resistencia al cizallamiento y a la gravedad (Godoi et al., 2016; Mirzababaei & Pasebani, 2019).

Una aplicación destacada de la inyección por aglutinante es el desarrollo de tintas de grado alimenticio. Esta técnica utiliza impresoras como la Fujifilm Dimatix, que permiten la reducción de costos de materia prima y el aumento en la velocidad de producción. Sin embargo, el costo inicial de la maquinaria es elevado y los acabados superficiales finales pueden generar rugosidades (Holland et al., 2018; Sun et al., 2015). El proceso de inyección consiste en la aplicación selectiva de un aglutinante sobre el lecho de polvo, uniéndolo capa por capa para formar una parte verde (Wang & Zhao, 2017; Chen & Zhao, 2016). Esta técnica presenta objetivos prometedores al reducir los costos de fabricación y acelerar los tiempos de entrega, especialmente para diseños complejos, en comparación con la fabricación convencional (DebRoy et al., 2018).

Por otro lado, la fabricación de piezas de cerámica estructural mediante la inyección de aglutinante tiene aplicaciones potenciales en diversos campos de la ingeniería, como el diseño mecánico, la producción por moldeo y la educación innovadora (Lv et al., 2019).

Además, se utiliza para la fabricación de filtros cerámicos porosos, los cuales ofrecen una eficiencia mucho mayor que los filtros convencionales en la eliminación de partículas de gas de chimeneas y plantas de energía (Rambo et al., 2005).

La combinación de la tecnología de lecho de polvo por fusión láser con la inyección por aglutinante ha demostrado una buena consistencia en materiales como el acero inoxidable. Los resultados, tanto en el módulo de compresión como en el límite elástico, son muy prometedores y sugieren futuras aplicaciones en el diseño de estructuras de celosía con altas propiedades mecánicas gracias a la intervención de ambos procesos (Xu et al., 2023; Mao et al., 2023).

Es relevante mencionar que, aunque la manufactura aditiva y el proceso de inyección de aglutinante colaboran estrechamente, existen materiales como el magnesio (Mg) que presentan desafíos para la fabricación aditiva. En estos casos, es necesario recurrir al proceso de inyección sin aglutinante, especialmente con técnicas basadas en fusión, para determinar el nivel de saturación de materiales como la aleación de magnesio AZ91. Trabajar con esta aleación sin aglutinante implica ampliar los límites de sinterización para lograr una mayor densificación y potencialización de los componentes de Mg impresos (Salehi et al., 2023).

La impresión por capas es otra técnica que se asocia con la inyección de aglutinante para contener el polvo suelto dentro de un núcleo. Al analizar la microestructura y densidad de las muestras impresas, se observa una variación en el empaquetamiento del polvo entre la capa externa y el núcleo. Además, el tamaño de las partículas y el grosor afectan el empaquetamiento de la cubierta y el núcleo de manera diferente. Controlando adecuadamente el grosor de la capa y el tamaño de las partículas de polvo, la impresión final de la cubierta se convierte en un método idóneo para adaptar la densidad y reducir la anisotropía (elasticidad, velocidad de propagación, temperatura, conductividad, etcétera) (Miao et al., 2023).

La inyección de aglutinante es un proceso de fabricación aditiva en el cual los materiales en polvo se unen selectivamente mediante un aglutinante. Se trata de un método reconocido de impresión 3D que se destaca por su flexibilidad en términos de materiales, su capacidad para producir piezas de gran tamaño, y sus ventajas en cuanto a bajo costo de equipo y alta velocidad de fabricación. Además, este proceso tiene perspectivas prometedoras en áreas como el desarrollo de materiales, el diseño de aglutinantes y la tecnología de postratamiento, que incluye la reducción de emisiones nocivas en motores de combustión interna (Chen et al., 2022; Mostafaei et al., 2021; Zhao et al., 2023).

### **Manufactura aditiva: extrusión**

La técnica de extrusión es un método utilizado para la creación de modelos 3D, mediante el cual se toma un perfil bidimensional y se transforma en una pieza tridimensional. Este



proceso implica la deposición de capas de material sólido a una temperatura controlada por un sistema computarizado (Cesar-Juárez et al., 2018). En el proceso de extrusión, inicialmente se emplea un tornillo helicoidal como transportador, que lleva el material desde la tolva a través de cámaras de calentamiento hasta la salida de descarga. Posteriormente, el polímero emerge de la matriz en un estado blando o ligero. Para dar forma al material final según lo deseado, se utilizan diferentes boquillas que se adaptan a la matriz, y luego se corta a la medida requerida.

El proceso de fabricación aditiva por extrusión ha tenido amplias aplicaciones en la ingeniería industrial, especialmente en el campo de los procesos de manufactura del acero inoxidable. Los resultados obtenidos muestran un buen control sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del acero, que se logra mediante un tratamiento térmico que minimiza la generación de defectos entre capas (Cho et al., 2023). La extrusión de materiales ha emergido como una tecnología altamente deseable para la creación de estructuras basadas en silicona, en particular en ámbitos como la robótica blanda y la biomedicina, debido a su facilidad de fabricación. Este proceso, cuando se combina con modelos numéricos y semianalíticos, puede predecir con precisión la fuerza de extrusión y calcular la fuerza de compresión de la silicona depositada en el sustrato (Pricci et al., 2023).

Sin embargo, se presentan efectos no deseados durante la impresión por extrusión de materiales, como la dinámica de extrusión indeseable, que resulta en esquinas irregulares en las piezas debido a altas aceleraciones y desaceleraciones del cabezal de la impresora. La aplicación de algoritmos avanzados, centrados en el control dinámico y el uso de redes neuronales para el aprendizaje automatizado, puede facilitar la compensación dinámica de la extrusión, mejorando la precisión y velocidad de la impresión. Esto, a su vez, contribuye a aumentar la economía y la competitividad entre las empresas dedicadas al diseño 3D (Zimenko et al., 2022).

La tecnología de polímeros por extrusión de materiales está atrayendo mucha atención en la actualidad debido a su disponibilidad de materia prima y a los bajos costos de equipos de producción (Olaiya et al., 2022; Raja & Rajan, 2023). En el ámbito del transporte de carga, se están utilizando materiales con estructura reticular para la absorción de impactos y el rendimiento mecánico, aplicando el diseño de experimentos para optimizar las propiedades mecánicas de las estructuras resultantes (Almesmari et al., 2023).

Por otro lado, se fabrican filtros de polvo metálico de diversas formas mediante manufactura aditiva de extrusión. Estos filtros se utilizan para crear estructuras tridimensionales a partir de un filamento que consiste en polvo de metal y aglutinante. Sirven para determinar la porosidad de flujo capilar del material y para reducir la densidad a medida que aumenta la temperatura de sinterización (Yi et al., 2022). Algunos materiales como el polietileno presentan desafíos particulares en su procesamiento mediante manufactura aditiva por extrusión, como la escasa adherencia y la contracción

durante el proceso de fabricación, lo que resulta en una mayor anisotropía mecánica y defectos en la forma final del producto (Montoya-Ospina et al., 2023).

A pesar de que la fabricación aditiva por extrusión es una técnica relativamente económica para el desarrollo de piezas 3D, las piezas producidas a menudo presentan detalles en cuanto a la calidad superficial. Sin embargo, diversas investigaciones están dirigidas a mejorar esta variable de calidad mediante la optimización de los parámetros de impresión (Golab et al., 2022). Los filamentos incrustados con una alta densidad de gránulos metálicos o cerámicos se están utilizando cada vez más, lo que resulta en piezas casi completamente densas. La sinterización mediante calentamiento por inducción indirecta de un filamento puede ser una ruta eficaz para densificar las piezas fabricadas con filamento fundido (FFF). Los resultados muestran que se pueden alcanzar densidades del 99,8 % con tiempos de remojo muy cortos, lo que representa una mejora significativa (Ortega et al., 2023).

En la ingeniería industrial, la manufactura aditiva se aplica en los procesos de fabricación de componentes de materiales creados para obtener estructuras ligeras. Sin embargo, la implementación de moldes de fundición puede resultar costosa, especialmente cuando se fabrican cantidades limitadas de piezas. La tecnología híbrida, que combina la fabricación aditiva con maquinaria convencional, ofrece beneficios como la eficiencia en la producción de moldes, en particular para la industria de materiales compuestos cuando se requieren piezas grandes (Liverani et al., 2023). La manufactura aditiva por extrusión, un proceso de impresión 3D en el que se construyen objetos capa por capa mediante la extrusión de material fundido o semilíquido, es conocida por su versatilidad en términos de materiales, accesibilidad y aplicabilidad en una variedad de industrias y aplicaciones, desde la creación de prototipos hasta la fabricación personalizada.

### **Manufactura aditiva: estereolitografía (SLA)**

La estereolitografía (SLA) es un método que utiliza resina líquida como materia prima, la cual se solidifica bajo la influencia de la luz ultravioleta. La excelente calidad de sus superficies, los acabados impecables y la amplia gama de materiales disponibles hacen que la SLA sea una opción ideal para la fabricación de prototipos, visualización y aplicaciones donde se requiere alta calidad estética. Además, es perfectamente adecuada para técnicas como el moldeo a cera perdida y la fundición al vacío (Paśnikowska-Łukaszuk et al., 2022; Wang et al., 2016).

La fabricación aditiva ha ganado gran atención en la producción de componentes de carburo de silicio (SiC) con formas complejas mediante estereolitografía. Al emplear una suspensión cerámica adecuada y un método de oxidación a alta temperatura, es posible obtener piezas complejas con un comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento y

un alto contenido de sólidos. Esto puede aprovecharse para producir cuerpos verdes con excelentes propiedades, y puede ser extendido para fabricar otros tipos de cerámicas como el nitruro de silicio (Ye et al., 2023).

En la vanguardia de la manufactura aditiva se encuentra la integración de elementos multifuncionales incrustados en piezas impresas en 3D. Esto fortalece aún más las aplicaciones industriales y permite desarrollar métodos a bajo costo. Estas técnicas pueden combinarse con la estereolitografía y la metalización selectiva sin electricidad para fabricar piezas con formas muy complejas y propiedades multifuncionales, incluyendo propiedades magnéticas, conductoras y mecánicas (Credi et al., 2023).

Los materiales cerámicos refractarios, como la mullita, son ampliamente utilizados debido a sus propiedades de resistencia y estabilidad a altas temperaturas. La mullita se emplea comúnmente en forma de ladrillos y bloques refractarios. A partir de este material cerámico, es posible fabricar andamios mediante estereolitografía. Para lograrlo, se requiere la combinación de sílice comercial con nanopartículas, y un proceso dual que implica la infiltración de piezas de sílice porosa impresas con un sol de alúmina coloidal, así como la impresión de sílice/alúmina a través del desarrollo de resina fotocurable mezclada con sílice (Rosado & Moreno, 2023).

Es crucial mantener la uniformidad y estabilidad adecuadas en la suspensión cerámica durante todo el ciclo de impresión para garantizar el rendimiento óptimo de las piezas (Wang et al., 2023). El desarrollo de piezas mediante estereolitografía, junto con la transición activa de la generación de prototipos y diversas pruebas de fabricación de productos funcionales, como el método de diagnóstico por láser-ultrasonido, contribuye a mejorar la calidad de la fabricación al reducir el número de defectos y garantizar la calidad de los productos terminados (Karabutov & Novikov, 2023).

La implementación de métodos de análisis computacionales en la fabricación de piezas con alta calidad superficial puede reducir el número de pasos experimentales y alcanzar la optimización de los materiales. Para lograrlo, es esencial mantener la estabilidad en la rugosidad y la adaptación superficial de las resinas impresas en 3D mediante estereolitografía procesadas con luz digital para conservar un acabado final aceptable (Spirrett et al., 2022; Wadhvani et al., 2022; W. Li et al., 2023).

La impresión 3D de actuadores neumáticos con múltiples materiales es una forma ideal para fabricar actuadores personalizados. La estereolitografía basada en cubetas es un método de impresión 3D de alta resolución que presenta ventajas en términos de capacidad de control de la deformación y facilidad de montaje (Song et al., 2023).

Según la empresa Dassault Systèmes (DS), la estereolitografía es un método muy preciso que tiene la capacidad de producir superficies lisas, lo que resulta en una fabricación altamente precisa. Aunque es un proceso eficaz, es importante tener en

cuenta que las piezas pueden deteriorarse con la exposición a la luz solar debido a la naturaleza fotosensible de las resinas. A medida que la impresión 3D SLA se vuelva más accesible para los usuarios en diferentes campos de la ingeniería, surgirán nuevas innovaciones con capacidades para exhibir geometrías complejas de mejor calidad de manera rápida y precisa (Basile et al., 2020).

### **Manufactura aditiva: deposición de energía dirigida (DED)**

El proceso de deposición de energía funciona al guiar la energía, que actúa como un haz de electrones, para enfocarla en un área específica donde los polvos metálicos se calientan y luego se depositan después del proceso de fusión (Saboori et al., 2019; Tan et al., 2022).

Este tipo de tecnología ha sido ampliamente utilizada en la fabricación (Keist & Palmer, 2017; Kumara et al., 2019). Los objetivos principales de esta tecnología de ingeniería son la creación de piezas graduadas y uniones bimetálicas para asegurar la calidad de los productos terminados. Las estructuras de ingeniería pueden lograr la máxima eficiencia al combinar partes de varios materiales químicamente distintos, aprovechando completamente las ventajas económicas y de rendimiento de cada uno. Las parejas de componentes bimetálicos, como acero-cobre, acero-aluminio y acero-níquel, se fabrican uniendo metales diferentes que poseen propiedades mecánicas, físicas y químicas complementarias, de manera que adquieran resistencia mecánica, resistencia al desgaste, conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la corrosión, entre otras (Şimşir et al., 2009).

Algunas de las parejas de metales más conocidas son acero-cobre, acero-aluminio, acero-níquel y acero-titanio, que funcionan de manera estable con la disposición de energía dirigida (Al-Jamal et al., 2008). Otro proceso con potencial para revolucionar la producción de componentes es la disposición de energía dirigida por arco de alambre, que ofrece una velocidad de deposición más rápida a un costo menor. Este proceso se adapta al trabajo con materiales modernos, como los aceros de alto rendimiento que poseen propiedades de resistencia a la corrosión, al desgaste y al calor (K. Li et al., 2023; Cunningham et al., 2018).

Uno de los nuevos materiales que ha ayudado a superar las limitaciones de las propiedades mecánicas y que puede ser empleado en entornos extremos es la aleación de alta entropía (HEA), compuesta por materiales refractarios como el titanio. Esta aleación presenta gran dureza y resistencia al desgaste (Jeong et al., 2023; Krajňák et al., 2023).

En cuanto a los yacimientos naturales de cobre y sus aleaciones, la deposición de energía dirigida brinda la oportunidad de sustituir componentes complejos de bronce con piezas fabricadas menos críticas y con un nivel bajo de desgaste de material (Raghavendra et al., 2023).

Aunque el proceso DED es ampliamente utilizado en la fabricación, requiere un enfriamiento adecuado entre capas para evitar fallas geométricas causadas por el sobrecalentamiento de la sección media (Hwang et al., 2023). La fabricación aditiva por láser ha transformado varios sectores industriales, especialmente en el proceso de deposición de energía dirigida, con un potencial para controlar la eficiencia y el grosor de la capa, minimizando la rugosidad de la superficie de los materiales (Ehmsen et al., 2023; Ikeda et al., 2023; Notley et al., 2023; Sargent et al., 2023).

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación, se siguió un proceso sistemático y transparente para identificar investigaciones enfocadas en el tema objetivo. También implicó la consulta de información de artículos científicos, repositorios y editoriales especializadas en el campo del aprendizaje automático y sus aplicaciones en ingeniería. Se buscó en una variedad de fuentes, tanto en inglés como en español, que abarcaban editoriales como EBSCO Essentials, MDPI y Taylor & Francis. En la Tabla 1, se presenta un desglose detallado del mecanismo de búsqueda utilizado para recopilar datos.

**Tabla 1**

*Mecanismo de búsqueda para la obtención de la información*

Editorial					
EBSCO Essentials		MDPI		Taylor & Francis	
La manufactura aditiva en las organizaciones	Manufactura aditiva: fusión por lecho de polvo	Manufactura aditiva: inyección de aglutinante (BJ, binder jetting)	Manufactura aditiva: extrusión	Manufactura aditiva: estereolitografía (SLA)	Manufactura aditiva: deposición de energía dirigida (DED)
Temas de investigación					
La manufactura aditiva en las organizaciones	Manufactura aditiva: fusión por lecho de polvo	Manufactura aditiva: inyección de aglutinante (BJ, binder jetting)	Manufactura aditiva: extrusión	Manufactura aditiva: estereolitografía (SLA)	Manufactura aditiva: deposición de energía dirigida (DED)
Lenguajes de investigación de la literatura					
Español			Inglés		
Análisis de la información					
Algoritmos	Nombre del autor	Nombre de la revista		Año de publicación	Palabras clave

### Paso 1. Alcance de la revisión

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la literatura relevante, con el objetivo de explorar la investigación existente sobre el tema en cuestión, específicamente sobre las revisiones de la manufactura aditiva y sus aplicaciones. Este proceso se centró en identificar tanto los desafíos inherentes como las aplicaciones innovadoras que contribuyen al avance continuo de la ingeniería.

Siguiendo las pautas establecidas para la realización de una revisión crítica, el enfoque metodológico fue diseñado para abarcar una selección amplia y representativa de artículos, tal y como recomiendan Paré et al. (2015). Además, dada la naturaleza dinámica y en constante evolución de las tecnologías de impresión 3D, se limitó el alcance de la revisión a las publicaciones que abarcan el periodo comprendido entre el 1 de enero del 2005 y el 2 de diciembre del 2023.

### Paso 2. Procedimientos de búsqueda

Para garantizar una cobertura completa del tema de investigación, se emplearon algoritmos especializados para recuperar los documentos pertinentes de diversas editoriales, como se describe en detalle en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Algoritmos de búsqueda para la extracción de documentos*

Temas de investigación	Operadores lógicos	EBSCO Essentials	MDPI	Taylor & Francis
La manufactura aditiva en las organizaciones	AND additive manufacturing and organizations Title AND additive manufacturing Abstract AND additive manufacturing AllFields AND organizations AllFields	10	30	20
Manufactura aditiva: fusión por lecho de polvo	AND additive manufacturing and organizations Title AND additive manufacturing Abstract AND additive manufacturing AllFields AND organizations AllFields	9	16	18
Manufactura aditiva: inyección de aglutinante (BJ, binder jetting)	AND additive manufacturing and powder bed fusion Title AND additive manufacturing Abstract AND powder bed fusion AllFields AND additive manufacturing AllFields	7	15	17
Manufactura aditiva: extrusión	AND additive manufacturing and Binder jetting Title AND additive manufacturing Abstract AND Binder jetting AllFields AND additive manufacturing AllFields	10	10	15
Manufactura aditiva: estereolitografía (SLA)	AND additive manufacturing Title AND extrusion Abstract AND additive manufacturing AllFields AND extrusion AllFields	8	17	13

*(continúa)*

(continuación)

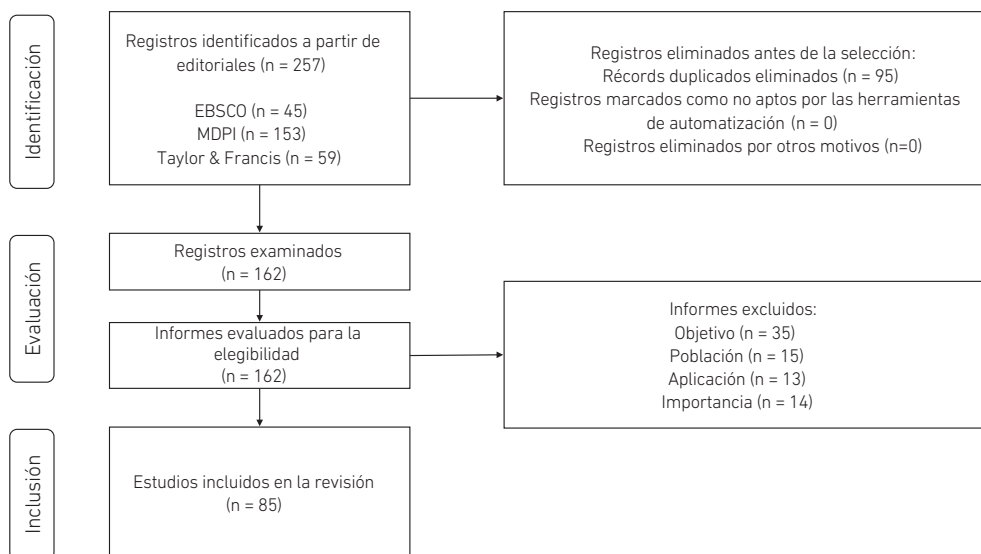
Temas de investigación	Operadores lógicos	EBSCO Essentials	MDPI	Taylor & Francis
Manufactura aditiva: deposición de energía dirigida (DED)	AND additive manufacturing and stereolithography Title AND additive manufacturing Abstract AND additive manufacturing AllFields AND stereolithography AllFields	10	22	10

### Paso 3. Proceso de revisión y selección de artículos

Se optó por utilizar el método PRISMA (Haddaway, 2022) como punto de partida para llevar a cabo el proceso de revisión sistemática de la literatura. Este método utiliza un diagrama de flujo (véase la Figura 1) como modelo para la presentación organizada de la información examinada. Para esta investigación, se realizó una revisión de los 257 documentos iniciales, priorizando su importancia en relación con el tema de investigación. Durante este proceso, se descartaron 95 documentos por duplicidad o similitudes, quedando 162 documentos. De estos, se realizó una revisión exhaustiva por parte de expertos en la materia, teniendo en cuenta criterios como el objetivo de la investigación, la población objetivo, la falta de aplicación significativa y su relevancia; y se excluyeron 35 documentos por no cumplir con los objetivos de la investigación, 15 por no ajustarse a la población objetivo, 13 por carecer de aplicaciones significativas en el área de ingeniería y 14 por no ser relevantes en cuanto a la información proporcionada. En consecuencia, solo 85 textos fueron evaluados para su idoneidad e inclusión en la revisión sistemática.

**Figura 1**

Diagrama de flujo PRISMA para determinar el número de artículos utilizados en la revisión de la literatura



La búsqueda se basó en la recopilación de información de diversas fuentes, como artículos, libros y páginas especializadas en los campos de investigación relacionados con la manufactura aditiva y sus aplicaciones. Se prestó especial atención a las publicaciones de los últimos diez años, priorizando las más recientes.

#### Paso 4. Proceso de análisis bibliométrico y resultados

En el análisis bibliométrico se aplicó el enfoque de creación de nubes de palabras utilizando el *software* MAXQDA en su versión 2020. La búsqueda bibliográfica es una práctica común en la investigación actual, ya que permite a los investigadores explorar los fundamentos teóricos relacionados con las variables de estudio. Del mismo modo, se muestran las palabras que tienen una mayor asociación con el tema de la manufactura aditiva, junto con el número de documentos en los que aparecen, el impacto y el número de palabras destacadas en total.

Para la presentación de los resultados sobre el número de publicaciones por año, se utilizó el *software* estadístico Origen 2022, el cual es un programa con una alta calidad en el diseño de gráficas estadísticas y presentación de resultados.

## RESULTADOS

### Análisis de la información

Para el análisis cualitativo, se empleó el *software* MAXQDA en su versión 2020. Su herramienta de nube de palabras permite estructurar visualmente un conjunto de palabras a partir del texto, organizando jerárquicamente los términos que aparecen con mayor frecuencia. En la Figura 2, se presentan las palabras clave más frecuentes utilizadas en la búsqueda de información de literatura científica aplicada en este trabajo.

#### Figura 2

*Palabras clave utilizadas en la nube de datos*



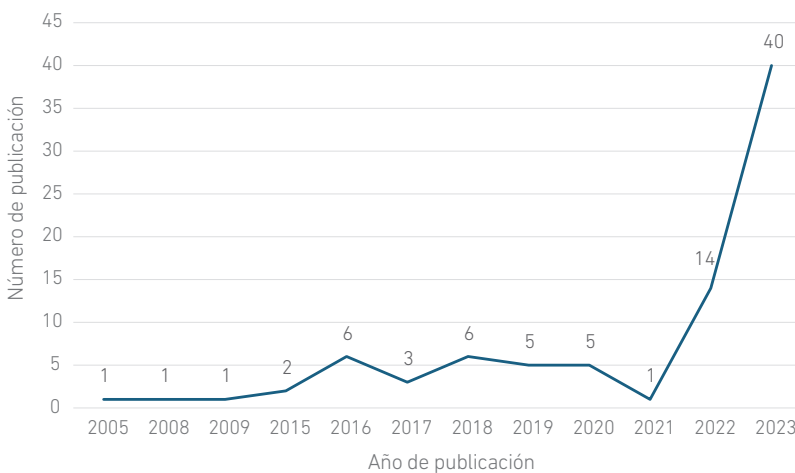
*Nota.* Elaborado con el *software* MAXQDA.



Las publicaciones relacionadas con el tema de la manufactura aditiva, considerada un elemento imprescindible en la ingeniería industrial, han tenido una notable presencia anual. Se identificaron 85 productos relacionados con este tema, como se muestra en la Figura 3. Del total de investigaciones, el 62 % corresponde a los años 2022 y 2023, lo que indica que este tema está siendo reconocido como una innovación significativa en el ámbito de la ingeniería industrial. Además, se está implementando como parte de las tecnologías 4.0 en diversas organizaciones.

**Figura 3**

*Número de publicaciones por año*



A continuación, se presenta la cantidad de artículos y el número de citas correspondientes a cada año en que fueron publicados. Los resultados de las citas se obtuvieron mediante el uso del navegador de citas Google Académico (véase la Tabla 3). Entre los años 2022 y 2023, se observa un total de 53 artículos con 50 citas en total, lo que representa el 62 % de la literatura actualizada en temas de manufactura aditiva. Por otro lado, en el 2015 se registró un número considerable de 2939 citas relacionadas con trabajos sobre procesos de extrusión, CNC y modelado por deposición fundida. En el 2016, se obtuvieron 4542 citas acerca de trabajos sobre impresión 3D, modelos de negocio, manufactura aditiva, diseño de manufactura y administración de operaciones. Además, en el ámbito de la manufactura aditiva y las tecnologías innovadoras, se han publicado investigaciones en el año 2023 que prometen ser citadas en numerosos estudios a nivel mundial, lo que contribuirá con nuevas aportaciones a la ingeniería industrial.

**Tabla 3**

*Número de artículos y citas por año*

Año	Artículos	Número de citas
2005	1	93
2008	1	79
2009	1	92
2015	3	2939
2016	6	4542
2017	3	279
2018	6	5505
2019	5	666
2020	5	116
2021	1	378
2022	14	31
2023	39	19
Total	85	14 739

En la Tabla 4, se presenta el autor principal, año de publicación y el título del artículo de cada uno de los documentos relacionados con los temas asociados al aprendizaje automático. Los datos de citación se obtuvieron a través de Google Scholar. De los 85 artículos, se identificaron los 10 más citados.

**Tabla 4**

*Identificación de las principales citas*

Autor	Año	Artículo
DebRoy et al.	2018	Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties
Gao et al.	2015	The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering
Ford y Despeisse	2016	Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges
Bikas et al.	2016	Additive manufacturing methods and modelling approaches: A critical review
Godoi et al.	2016	3d printing technologies applied for food design: Status and prospect
Cunningham et al.	2018	Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing
Wang et al.	2016	Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms

*(continúa)*

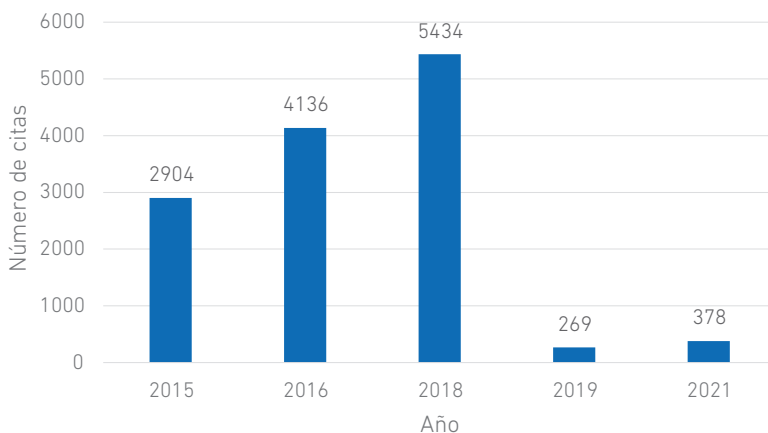
(continuación)

Autor	Año	Artículo
Mostafaei et al.	2021	Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges
Sun et al.	2015	A review on 3D printing for customized food fabrication
Saboori et al.	2019	Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair

En el 2016, hubo 4136 citas relacionadas con la manufactura aditiva en artículos sobre energía de deposición, impresión 3D, *binder jet* 3D y manufactura de los materiales. El año 2018 destacó con 5434 citas, que abordaron temas como el proceso de estereolitografía, materiales refractarios, energía dirigida por deposición, diseño por computadora y procesos de extrusión (véase la Figura 3). Cabe mencionar que actualmente la industria 4.0 y las tecnologías como internet de las cosas (IoT), *machine learning* (ML) y la inteligencia artificial (IA) están trabajando en beneficio de la ingeniería con el objetivo de mejorar los procesos industriales y la toma de decisiones.

**Figura 3**

*Citas relacionadas de los temas por año*



## CONCLUSIONES

De acuerdo con la revisión de literatura, el uso de métodos tradicionales tiene sus limitaciones debido a factores como el tamaño del lote que se va a producir y la complejidad de la geometría de la pieza. En ocasiones, nos vemos forzados a emplear procesos que aumentan los costos finales del producto y no son sostenibles desde la perspectiva ambiental en aspectos como la contaminación y la falta de reciclaje.

La fabricación aditiva ha permitido el crecimiento y mejoramiento del valor agregado; es una nueva tecnología que presenta grandes ventajas competitivas, porque puede adaptarse a la personalización del diseño de producción. Esta es una de las herramientas clave para allegarse a la alta calidad de puestos de trabajo. La digitalización tridimensional se ha convertido en un instrumento valioso como componente del proceso a solicitud de la ingeniería inversa. Tener métodos con tanto potencial en la adquisición de puntos tridimensionales de una pieza abre los horizontes para el desarrollo de modelos, el procesamiento y el análisis de productos.

Dentro del campo de la ingeniería industrial, la fabricación 3D se considera actualmente una de las principales revoluciones industriales. Su aplicabilidad abarca diversos sectores industriales, y posee una notable flexibilidad para adaptarse a las demandas específicas de cada uno. Estas tecnologías representan una verdadera oportunidad para la innovación industrial y se anticipa que, en un futuro cercano, la fabricación 3D será común incluso en entornos domésticos, permitiendo el diseño y la creación de una amplia variedad de objetos. También contará con un modelo de negocio para el manejo y transporte de materias primas, que den respuesta a las necesidades de los clientes en la fabricación de productos solicitados.

En el campo de la manufactura, está sufriendo cambios significativos. Las nuevas investigaciones y aplicaciones de la manufactura aditiva sobre las demandas de los consumidores, producción económica y su distribución están evolucionando hasta un punto donde en cada hogar existirá algún tipo de tecnología aditiva o tecnología 4.0 que pueda administrar algún sistema o modelo de negocio de una manera óptima. Aprovechar las tecnologías aditivas y la industria 4.0 asegura un nuevo panorama de la manufactura en la ingeniería, las organizaciones y las personas.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses financieros, personales o profesionales que puedan influir en los resultados del estudio. Ninguno de los autores ha recibido financiamiento o mantiene relaciones que puedan afectar la objetividad e integridad de esta investigación.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

**Marco Antonio Díaz-Martínez:** conceptualización, *data curation*, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, *software*, validación, visualización, escritura: borrador original, redacción: revisión y edición. **Reina Verónica Román-Salinas:** *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, *software*, supervisión, validación, visualización, escritura: borrador original, redacción:

revisión y edición. **Santos Ruíz-Hernández:** conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, supervisión, visualización. **Nicolás Alberto Hernández-Cortés:** conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, recursos, supervisión, visualización. **Vania Iraís González-Rubín:** investigación, administración de proyecto, supervisión, validación, escritura: borrador original, redacción: revisión y edición.

## REFERENCIAS

- Al-Jamal, O., Hinduja, S., & Li, L. (2008). Characteristics of the bond in Cu-H13 tool steel parts fabricated using SLM. *CIRP Annals*, 57(1), 239-242. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.010>
- Almesmari, A., Sheikh-Ahmad, J., Jarrar, F., & Bojanampati, S. (2023). Optimizing the specific mechanical properties of lattice structures fabricated by material extrusion additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 1821-1838. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.024>
- Azami, M., Siahparani, A., Hadian, A., Kazemi, Z., Rahmatabadi, D., Kashani-Bozorg, S., & Abrinia, K. (2023). Laser powder bed fusion of Alumina/Fe-Ni ceramic matrix particulate composites impregnated with a polymeric resin. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 3133-3144. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.181>
- Bar-Cohen, Y. (Ed.). (2018). *Advances in manufacturing and processing of materials and structures* (1.ª ed.). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b22020>
- Basile, V., Grande, M., Marroco, V., Laneve, D., Petriagnani, S., Prudenzeno, F., & Fassi, I. (2020). Design and manufacturing of super-shaped dielectric resonator antennas for 5G applications using stereolithography. *IEEE Access*, 8, 82929-82937. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991358>
- Behjat, A., Shamanian, M., Taherizadeh, A., Lannunziata, E., Bagherifard, S., Gadalińska, E., Saboori, A., & Iuliano, L. (2023). Microstructure-electrochemical behavior relationship in post processed AISI316L stainless steel parts fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 3294-3311. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.229>
- Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: A critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1), 389-405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>

- Butt, J. (2020). Exploring the interrelationship between additive manufacturing and Industry 4.0. *Designs*, 4(2), 1-33. <https://doi.org/10.3390/designs4020013>
- Cesar-Juárez, Á., Olivos-Meza, A., Landa-Solís, C., Cárdenas-Soria, V., Silva-Bermúdez, P., Suárez, C., Olivos, B., & Ibarra-Ponce, J. (2018). Uso y aplicación de la tecnología de impresión y bioimpresión 3D en medicina. *Revista de la Facultad de Medicina de la UNAM*, 61(6), 43-51. <http://dx.doi.org/10.22201/fm.24484865e.2018.61.6.07>
- Chen, H., & Zhao, Y. (2016). Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process. *Rapid Prototyping Journal*, 22(3), 527-538. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2014-0149>
- Chen, Q., Juste, E., Lasgorceix, M., Petit, F., & Leriche, A. (2022). Binder jetting process with ceramic powders: Influence of powder properties and printing parameters. *Open Ceramics*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100218>
- Chen, Z., Wang, D., & Zhang, Y. (2023). Microphone signal specialities in laser powder bed fusion: single-track scan and multi-track scan. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 1344-1362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.091>
- Cho, Y. H., Park, S. Y., Kim, J. Y., & Lee, K. A. (2023). 17-4PH stainless steel with excellent strength-elongation combination developed via material extrusion additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 3284-3299. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.228>
- Credi, C., Bernasconi, R., Levi, M., & Magagnin, L. (2023). Self-activating metal-polymer composites for the straightforward selective metallization of 3D printed parts by stereolithography. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 1855-1867. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.035>
- Cunningham, C., Flynn, J., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 672-686. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>
- DebRoy, T., Wei, H., Zuback, J., Mukherjee, T., Elmer, J., Milewski, J., Beese, A., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- Ehmsen, S., Glatt, M., & Aurich, J. (2023). Influence of process parameters on the power consumption of high-speed laser directed energy deposition. *Procedia CIRP*, 116, 89-94. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.016>

- Elhazmiri, B., Naveed, N., Naveed, M., & Ul, M. (2022). The role of additive manufacturing in industry 4.0: An exploration of different business models. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 317-329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.07.001>
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C., Wang, C., Shin, Y., Zhang, S., & Zavattieri, P. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>
- Gokcekaya, O., Ishimoto, T., Nishikawa, Y., Kim, Y., Matsugaki, A., Ozasa, R., Weinmann, M., Schnitter, C., & Nakano, T. (2023). Novel single crystalline-like non-equiatomc TiZrHfNbTaMo bio-high entropy alloy (BioHEA) developed by laser powder bed fusion. *Materials Research Letters*, 11(4), 274-280. <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2147406>
- Golab, M., Massey, S., & Moultrie, J. (2022). How generalisable are material extrusion additive manufacturing parameter optimisation studies? A systematic review. *Heliyon*, 8(11), 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11592>
- Guo, A., Wang, J., Tang, R., Kong, H., Kong, D., Qu, P., Wang, S., Wang, H., & Hu, Y. (2023). Insights into the effects of epoxy resin infiltration on powder aging issue induced by powder recycling in powder bed fusion of Nylon12 materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 3151-3165. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.003>
- Guo, Y., Chen, C., He, W., Cao, Y., Xing, H., Fang, H., Wu, C., & Zhou, K. (2023). Compressive fatigue behavior of graded tantalum scaffolds produced by electron beam powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 6451-6462. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.235>
- Haddaway, N., Page, M., Pritchard, C., & McGuinness, L. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 18(2), 1-12. <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>

- Holland, S., Foster, T., MacNaughtan, W., & Tuck, C. (2018). Design and characterisation of food grade powders and inks for microstructure control using 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.008>
- Hwang, S., Oh, W.-J., Kim, D.-H., Kim, J., Oh, J., Nam, T.-H., Kim C.-S., & Lee, T. (2023). Optimizing interlayer cooling for SUS316L thin wall fabricated by directed energy deposition. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5239-5245. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.145>
- Ikeda, Y., Takeuchi, T., Koike, R., Kakinuma, Y., Kondo, M., Oda, Y., & Mori, T. (2023). Evaluation of fabrication parameters for foam stainless steel in directed energy deposition. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 17(1), 1-11. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2023jamdsm0011>
- Jeong, H.-I., Lee, C.-M., & Kim, D.-H. (2023). Manufacturing of Ti-Nb-Cr-V-Ni high entropy alloy using directed energy deposition and evaluation of materials properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5606-5617. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.168>
- Karabutov, A., & Novikov, M. (2023). Laser-ultrasound diagnostics of plastic products manufactured by laser stereolithography. *The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 48(2), 103-107. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W3-2023-103-2023>
- Keist, J., & Palmer, T. (2017). Development of strength-hardness relationships in additively manufactured titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 693, 214-224. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.102>
- Krajňák, T., Janeček, M., Preisler, D., Stráský, J., Kozlík, J., Škraban, T., Brázda, M. & Džugan, J. (2023). Microstructure evolution in compositionally graded Ti(4-12 wt% Mo) prepared by laser directed energy deposition. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 4527-4537. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.215>
- Kumar, N., Shaikh, S., Jain, P., & Tandon, P. (2015). Effect of fractal curve based toolpath on part strength in fused deposition modelling. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 5(2). <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2015.073576>
- Kumar, S., Gopi, T., Harikeerthana, N., Kumar, M., Gaur, V., Krolczyk, G., & Wu, C. (2023). Machine learning techniques in additive manufacturing: A state of the art review on design, processes and production control. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34, 21-55. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-02029-5>
- Kumara, C., Segerstark, A., Hanning, F., Dixit, N., Joshi, S., Moverare, J., & Nylén, P. (2019). Microstructure modelling of laser metal powder directed energy deposition of alloy 718. *Additive Manufacturing*, 25, 357-364. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.024>



- Leary, M. (2020). Powder bed fusion. En M. Leary (Ed.), *Design for additive manufacturing* (pp. 295-319). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816721-2.00011-7>
- Li, K., Chen, W., Gong, N., Pu, H., Luo, J., Zhang, D., & Murr, L. (2023). A critical review on wire-arc directed energy deposition of high-performance steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 9369-9412. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.163>
- Li, W., Wang, M., Ma, H., Chapa-Villarreal, F., Oliveira, A., & Zhang, Y. (2023). Stereolithography apparatus and digital light processing-based 3D bioprinting for tissue fabrication. *iScience*, 26(2), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106039>
- Liverani, A., Bacciaglia, A., Nisini, E., & Ceruti, A. (2023). Conformal 3D material extrusion additive manufacturing for large moulds. *Applied Sciences*, 13(3), 1-19. <https://doi.org/10.3390/app13031892>
- Lv, X., Ye, F., Cheng, L., Fan, S., & Liu, Y. (2019). Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment. *Ceramics International*, 45(10), 12609-12624. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.012>
- Majstorovic, V., Stojadinovic, S., Jakovljevic, Z., Zivkovic, S., Djurdjanovic, D., Kostic, J., & Gligorijevic, N. (2018). Cyber-Physical Manufacturing Metrology Model (CPM<sup>3</sup>) – Big data analytics issue. *Procedia CIRP*, 72, 503-508. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.091>
- Mao, Y., Cai, C., Zhang, J., Heng, Y., Feng, K., Cai, D., & Wei, Q. (2023). Effect of sintering temperature on binder jetting additively manufactured stainless steel 316L: densification, microstructure evolution and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 2720-2735. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.096>
- Matsumoto, M., Yang, S., Martinsen, K., & Kainuma, Y. (2016). Trends and research challenges in remanufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), 129-142. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0016-4>
- Medrano, V., Arrieta, E., Merino, J., Ruvalcaba, B., Caballero, K., Ramirez, B., Diemann, J., Murr, L., Wicker, R., Godfrey, D., Benedict, M., & Medina, F. (2023). A comprehensive and comparative study of microstructure and mechanical properties for post-process heat treatment of AlSi7Mg alloy components fabricated in different laser powder bed fusion systems. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 6820-6842. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.129>
- Miao, G., Moghadasi, M., Li, M., Pei, Z., & Ma, C. (2023). Binder jetting additive manufacturing: Powder packing in shell printing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(1), 1-15. <https://doi.org/10.3390/jmmp7010004>

- Mirzababaei, S., & Pasebani, S. (2019). A review on binder jet additive manufacturing of 316L stainless steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 1-36. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030082>
- Montoya-Ospina, M., Zeng, J., Tan, X., & Osswald, T. A. (2023). Material extrusion additive manufacturing with polyethylene vitrimers. *Polymers*, 15(6), 1-14. <https://doi.org/10.3390/polym15061332>
- Mostafaei, A., Elliott, A., Barnes, J., Li, F., Tan, W., Cramer, C., Nandwana, P., & Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 1-138. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>
- Nayak, A., Jain, P., & Kankar, P. K. (2019). Progress and issues related to designing and 3D printing of endodontic guide. En U. Chandrasekhar, L. J. Yang & S. Gowthaman (Eds.), *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)* (vol. 2, pp. 331-337). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2718-6\\_30](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2718-6_30)
- Notley, S., Chen, Y., Thacker, N., Lee, P., & Panoutsos, G. (2023). Synchrotron imaging derived relationship between process parameters and build quality for directed energy deposition additively manufactured IN718. *Additive Manufacturing Letters*, 6, artículo 100137. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100137>
- Öberg, C., & Shams, T. (2019). On the verge of disruption: Rethinking position and role – The case of additive manufacturing. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 34(5), 1093-1105. <https://doi.org/10.1108/JBIM-10-2018-0293>
- Olaiya, N., Maraveas, C., Salem, M., Raja, S., Rashedi, A., & Alzahrani, A., El-Bahy, Z., & Olaiya, F. (2022). Viscoelastic and properties of amphiphilic chitin in plasticised polylactic acid/starch biocomposite. *Polymers*, 14(11), 1-24. <https://doi.org/10.3390/polym14112268>
- Ortega, M., Bardenhagen, A., Rohr, T., & Stoll, E. (2023). Indirect induction sintering of metal parts produced through material extrusion additive manufacturing. *Materials*, 16(2), 1-24. <https://doi.org/10.3390/ma16020885>
- Paré, G., Trudel, M.C., Jaana, M., & Kitsiou, S. (2015). Synthesizing information systems knowledge: A typology of literature reviews. *Information & Management*, 52(2), 183-199. <https://doi.org/10.1016/j.im.2014.08.008>
- Paśnikowska-Łukaszuk, M., Korulczyk, K., Kapton, K., Urzędowski, A., & Wlazło-Ćwiklińska, M. (2022). Time distribution analysis of 3D prints with the use of a filament and masked stereolithography resin 3D printer. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(5), 242-249. <https://doi.org/10.12913/22998624/154926>

- Patalas-Maliszewska, J., Topczak, M., & Klos, S. (2020). The level of the additive manufacturing technology use in polish metal and automotive manufacturing enterprises. *Applied Sciences*, *10*(3), 1-20. <https://doi.org/10.3390/app10030735>
- Pricci, A., Al Islam, S., Stano, G., Percoco, G., & Tadesse, Y. (2023). Semi-analytical and numerical models to predict the extrusion force for silicone additive manufacturing, as a function of the process parameters. *Additive Manufacturing Letters*, *6*, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100147>
- Raghavendra, S., Jayashree, P., Rita, D., Piras, G., Scheider, D., Chemello, M., & Benedetti, M. (2023). Wear and material characterization of CuSn10 additively manufactured using directed energy deposition. *Additive Manufacturing Letters*, *6*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100136>
- Raja, S., & Rajan, A. (2023). Challenges and opportunities in additive manufacturing polymer technology: A review based on optimization perspective. *Advances in Polymer Technology*, *2023*(1), 1-18. <https://doi.org/10.1155/2023/8639185>
- Rambo, C., Travitzky, N., Zimmermann, K., & Greil, P. (2005). Synthesis of TiC/Ti-Cu composites by pressureless reactive infiltration of TiCu alloy into carbon preforms fabricated by 3D-printing. *Materials Letters*, *59*(8-9), 1028-1031. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.11.051>
- Roos, S., Botero, C., & Rännar, L. E. (2023). Electron beam powder bed fusion processing of 2507 super duplex stainless steel. as-built phase composition and microstructural properties. *Journal of Materials Research and Technology*, *24*, 6473-6483. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.230>
- Rosado, E., & Moreno, R. (2023). Mullite-silica scaffolds obtained by stereolithography and reaction sintering. *Open Ceramics*, *14*, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100361>
- Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. (2019). Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. *Applied Sciences*, *9*(16), 1-26. <https://doi.org/10.3390/app9163316>
- Salehi, M., Kuah, K., Ho, J. H., Zhang, S., Seet, H., & Nai, M.. (2023). Towards binder jetting and sintering of AZ91 magnesium powder. *Crystals*, *13*(2), 1-17. <https://doi.org/10.3390/cryst13020286>
- Sargent, N., Wang, Y., Li, D., Zhao, Y., Wang, X., & Xiong, W. (2023). Exploring alloy design pathway through directed energy deposition of powder mixtures: A study of Stainless Steel 316L and Inconel 718. *Additive Manufacturing Letters*, *6*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100133>

- Savolainen, J., & Collan, M. (2020). How additive manufacturing technology changes business models? Review of literature. *Additive Manufacturing*, 32, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101070>
- Schmidt, C., Finsterwalder, F., Griesbaum, R., & Sehr, T. (2023). Determination of factory locations for distributed additive manufacturing, considering pollution, resilience and costs. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 43, 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.03.005>
- Şimşir, M., Kumruoğlu, L., & Özer, A. (2009). An investigation into stainless-steel/structural-alloy-steel bimetal produced by shell mould casting. *Materials & Design*, 30(2), 264-270. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.074>
- Song, Q., Chen, Y., Hou, P., Zhu, P., Helmer, D., Kotz-Helmer, F., & Rapp, B. (2023). Fabrication of multi-material pneumatic actuators and microactuators using stereolithography. *Micromachines*, 14(2), 1-10. <https://doi.org/10.3390/mi14020244>
- Spirrett, F., Ito, T., & Kirihara, S. (2022). High-speed alumina stereolithography. *Applied Sciences*, 12(19), 1-11. <https://doi.org/10.3390/app12199760>
- Stavropoulos, P., Foteinopoulos, P., Stavridis, J., & Bikas, H. (2023). Increasing the industrial uptake of additive manufacturing processes: A training framework. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 6, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100110>
- Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., Fuh, J., Hong, G., & Chiu, A. (2015). A review on 3D printing for customized food fabrication. *Procedia Manufacturing*, 1, 308-319. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.057>
- Sundarkumar, V., Nagy, Z., & Reklaitis, G. (2022). Small-scale continuous drug product manufacturing using dropwise additive manufacturing and three phase settling for integration with upstream drug substance production. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 111(8), 2330-2340. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2022.03.009>
- Tan, W., Koo, C., Lau, W., Chong, W., & Tey, J. (2022). Recent advances in 3D printed membranes for water applications. En H.-H. Tseng, W. J. Lau, M. A. Al-Ghouthi & L. An (Eds.), *60 Years of the Loeb-Sourirajan Membrane* (pp. 71-96). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89977-2.00012-9>
- Wadhvani, V., Sivaswamy, V., & Rajaraman, V. (2022). Surface roughness and marginal adaptation of stereolithography versus digital light processing three dimensional printed resins. An *in-vitro* study. *The Journal of Indian Prosthodontic Society*, 22(4), 377-381. [https://doi.org/10.4103/jips.jips\\_8\\_22](https://doi.org/10.4103/jips.jips_8_22)

- Wang, J., Goyanes, A., Gaisford, S., & Basit, A. (2016). Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms. *International Journal of Pharmaceutics*, 503(1-2), 207-212. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.03.016>
- Wang, Y., & Zhao, Y. F. (2017). Investigation of sintering shrinkage in binder jetting additive manufacturing process. *Procedia Manufacturing*, 10, 779-790. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.077>
- Wang, N., Chang, H., Zhang, C., Wu, Y., Yang, R., Zhang, X., & Zhai, Z. (2023). Preparation of high-stability ceramic slurry with gel behavior for stereolithography 3D printing. *Materials*, 16(7), 1-19. <https://doi.org/10.3390/ma16072816>
- Xie, H., Tang, X., Chen, X., Sun, F., Dong, L., Tan, Y., Chu, H., Liu, P., & Fu, S. (2023). The effect of build orientations on mechanical and thermal properties on CuCrZr alloys fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 3322-3336. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.218>
- Xu, M., Guo, H., Wang, Y., Hou, Y., Dong, Z., & Zhang, L. (2023). Mechanical properties and microstructural characteristics of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed fusion and binder jetting. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 4427-4439. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.069>
- Yang, F., Wang, J., Wen, T., Ai, X., Dong, X., Yang, H., & Ji, S. (2023). Microstructure and mechanical properties of pseudo binary eutectic Al-Mg<sub>2</sub>Si alloy processed by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 2187-2199. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.147>
- Ye, G., Jiao, Y., Zhou, P., Sun, J., Zhu, L., Gong, F., Bai, J., Liu, G., Yan, M., & Zhang, R. (2023). Preparation of silicon carbide ceramic slurry for stereolithography based additive manufacturing. *Processing and Application of Ceramics*, 17(1), 47-54. <https://doi.org/10.2298/PAC2301047Y>
- Yi, Y. J., Lee, M. J., Yun, S. J., Park, M., Kim, J. Y., Lee, J., & Yun, J. Y. (2022). Fabrication of metal gas filter by material extrusion additive manufacturing process. *Archives of Metallurgy and Materials*, 67(4), 1517-1520. <https://doi.org/10.24425/amm.2022.141085>
- Zhang, C., Liu, T., Liao, W., Wei, H., & Zhang, L. (2023). Investigation of the laser powder bed fusion process of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36(32), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00863-z>
- Zhao, C., Cai, J., Zhang, B., & Qu, X. (2023). Key technology of binder jet 3D printing. *Journal of Materials Engineering*, 51(5), 14-26. <https://www.sciengine.com/JME/doi/10.11868/j.issn.1001-4381.2021.000581>

Zimenko, K., Afanasiev, M., & Kolesnikov, M. (2022). Pressure control in material extrusion additive manufacturing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 22(5), 929-940. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-5-929-940>

## DATOS DE LOS AUTORES

### **PROPUESTA DE MEJORA PARA EL CONTROL Y MANEJO DE UN ALMACÉN CON PRODUCTOS DE PAPELERÍA**

#### **CITLALI VILLAMIL**

Ingeniera industrial por la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), Oaxaca, México. Actualmente, trabaja como jefa de Operaciones de la empresa FARIVI S. A. de C. V. (sociedad anónima de capital variable), dedicada a la distribución de productos de papelería.

#### **SALVADOR MONTESINOS GONZÁLEZ**

Doctor en Ciencias de la Administración por la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México. Magíster en Ciencias, con especialidad en Sistemas de Producción, por el Instituto Politécnico Nacional, México. Ingeniero industrial por la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), Oaxaca, México. Actualmente, es profesor-investigador en la UTM. Se encuentra adscrito al Instituto de Ingeniería Industrial y Mecánica Automotriz. Cuenta con la distinción de candidato en el Sistema Nacional de Investigadores.

#### **CARLOS VÁZQUEZ CID DE LEÓN**

Doctor en Ciencias de la Administración y maestro en Ingeniería Administrativa por la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México. Ingeniero industrial por la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), Oaxaca, México. Actualmente, labora en la UTM como profesor-investigador. Se encuentra adscrito al Instituto de Ingeniería Industrial y Mecánica Automotriz. Cuenta con la distinción de candidato en el Sistema Nacional de Investigadores.

## **DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DE APOYO PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE AIDC EN PROCESOS LOGÍSTICOS**

**MARÍA ALEJANDRA RÍOS CÓRDOVA**

Ingeniera industrial por la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba, en el 2023. Ha cursado diversos programas de formación que incluyen temáticas de contabilidad, finanzas, habilidades directivas y logística. Sus intereses de investigación comprenden temas como gestión de la cadena de suministros, sistemas logísticos y estándares de identificación internacional. Se desempeñó como especialista comercial en la Empresa de Aplicaciones Informáticas, Desoft, y actualmente ejerce como especialista en Planificación y Gestión del Rendimiento en Cervecería Bucanero S. A.

**IGOR LOPES-MARTÍNEZ**

Doctor en Ciencias Técnicas e ingeniero industrial por la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba. Tiene más de quince años de experiencia en organización empresarial, sistemas logísticos y gestión de la cadena de suministros. Ha liderado más de setenta proyectos en diversos sectores y cuenta con numerosas publicaciones en revistas internacionales de impacto relacionadas con estas temáticas. Es jefe del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” y coordinador del Proyecto Internacional Fortalecimiento de las Competencias de los Ingenieros Industriales en Cuba para la Sostenibilidad y Responsabilidad en las Cadenas de Suministro (SCIEnC(e) 4 SuRe).

**ROXANA ALEMÁN BRAVO**

Graduada de nivel superior en la carrera de Ingeniería Industrial en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba. Obtuvo el Premio al Mérito Científico por las investigaciones científicas realizadas. Actualmente, se desempeña como profesora en las asignaturas Introducción a la Ingeniería e Ingeniería Industrial, las TI y Logística. Ha cursado el diplomado de formación básica para profesores, así como otros cursos sobre temas relacionados con la contabilidad, las finanzas y logística sostenible.

## **EVALUACIÓN DE UNA POLÍTICA DE INVENTARIO DE SUMINISTROS MÉDICOS DE MAYOR ROTACIÓN EN CENTROS DE SALUD DE TERCER NIVEL UBICADOS EN ZONAS DE ACCESO DIFÍCIL**

**DANIEL ANDRÉS GUTIÉRREZ YEPES**

Ingeniero industrial por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Actualmente, trabaja como consultor financiero en la Fundación Clínica Leticia localizada en Colombia.



**LUIS TARAZONA-TORRES**

Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, y estudiante doctoral de Ingeniería en la misma casa de estudios. Ingeniero químico por la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú. Actualmente, labora como asistente doctoral de docencia del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de los Andes.

**GESTIÓN DE INVENTARIOS DE UNA COMPAÑÍA IMPORTADORA DE REPUESTOS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA DE MAQUINARIA PESADA**

**MATEO NÚÑEZ-OVIEDO**

Ingeniero industrial por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Actualmente, se desempeña como gerente y coordinador de Ventas de Suresco LTDA en la capital de Colombia.

**LUIS TARAZONA-TORRES**

Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, y estudiante doctoral de Ingeniería en la misma casa de estudios. Ingeniero químico por la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú. Actualmente, labora como asistente doctoral de docencia del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de los Andes.

**MITIGACIÓN DE RIESGOS DISERGONÓMICOS: MANIPULACIÓN MANUAL DE ESTRUCTURAS METÁLICAS PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ELECTRICIDAD**

**YOBER JENRY ARTEAGA-IRENE**

Magíster por la Universidad de Nottingham, Reino Unido. Ingeniero industrial por la Universidad Señor de Sipán, Lima, Perú. Actualmente, cursa estudios de doctorado en la Atlantic Technological University, Irlanda. Se desempeña como profesor auxiliar en el Departamento de Producción y Gestión Industrial de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

**KATHERINE PRETEL-RUIZ**

Egresada de la Maestría en Prevención de Riesgos Laborales y Ambientales por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Ingeniera de sistemas por la Universidad Nacional de Trujillo, Perú. Tiene amplia experiencia en la gestión de seguridad, salud en el trabajo y medioambiente, especialmente en los sectores eléctrico y de construcción, en los que ha participado en proyectos de gran envergadura. Actualmente, es jefe SSOMA en la empresa Mechanical and Piping Solutions S. A. C., dedicada a realizar instalaciones eléctricas para la ampliación del aeropuerto Jorge Chávez.

#### **ROCÍO SHIRLY CHAUPIS-RAMOS**

Egresada de la Maestría en Prevención de Riesgos Laborales y Ambientales por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Ingeniera industrial por la Universidad Nacional Hermilio Valdizán, Huánuco, Perú. Diplomado en el Sistema Integrado de Gestión ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001. Actualmente, es jefe SSOMA en la empresa Conetec Investigations Ltd., compañía transnacional en el rubro de la geotecnia y minería.

#### **DANNY DANIEL MEDINA-AGUILAR**

Egresado de la Maestría en Prevención de Riesgos Laborales y Ambientales por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Ingeniero industrial por la Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Tiene amplia experiencia en la gestión de seguridad, salud en el trabajo y medioambiente, especialmente en el sector de transporte de carga peligrosa, pues ha participado en proyectos mineros. Actualmente, es jefe SSOMA en la empresa Logistic & Transport Perú S. A. C., dedicada al transporte de concentrado de mineral e hidrocarburos.

#### **OBTENCIÓN DE CELOBIOSA A PARTIR DE LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA PARCIAL DE LA CELULOSA DE CÁSCARA DE ARROZ**

#### **HUMBERTO AYALA ARMIJOS**

Doctor en Biotecnología e ingeniero en Alimentos por la Universidad Técnica de Machala, Ecuador, con una Maestría en Procesamiento de Alimentos por la Universidad Agraria del Ecuador. Actualmente, es docente e investigador en la Universidad Técnica de Machala. Ha publicado artículos en revistas indexadas.

#### **NICOLE ROMERO CALLE**

Estudiante de la Carrera de Ingeniería Química en la Universidad Técnica de Machala, Ecuador, y miembro del grupo de investigación BioEng-UTMACH.

#### **BRAULIO MADRID CELI**

Máster en Ingeniería Industrial con mención en Dirección de Operaciones y Logística, y máster en Dirección y Administración de Empresas por la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Venezuela. Ingeniero petroquímico por la misma casa de estudios. Ha publicado artículos en revistas indexadas.

#### **RAMIRO QUEZADA SARMIENTO**

Doctorando en Ingeniería de Sistemas por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Ingeniero en Sistemas Informáticos y Computación por la Universidad

Técnica Particular de Loja. Máster en Gerencia y Liderazgo Educacional por la misma universidad. Ha publicado en revistas indexadas.

**EDGAR TINOCO GÁLVEZ**

Magíster en Ciencias de los Alimentos por la Universidad Politécnica de Krasnodar, Rusia, e ingeniero en Alimentos por la misma casa de estudios. Además, cuenta con un diplomado en Inteligencia Artificial otorgado por la Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

**RICHARD CHÁVEZ ABAD**

Magíster en Gerencia de Proyectos Educativos y Sociales, e ingeniero comercial por la Universidad Técnica de Machala, Ecuador. Actualmente, se desempeña como docente en la misma institución y posee un diplomado en Inteligencia Artificial otorgado por esta.

**ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO DE LA COMPETENCIA INVESTIGATIVA EN ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL: ESTUDIO DE CASO UNIVERSIDAD INSTITUTO IRAPUATO**

**MIGUEL ÁNGEL GUERRA OLIVARES**

Ingeniero en Procesos Industriales por el Instituto de Estudios Superiores del Centro de Chiapas, México, con más de quince años de experiencia en la industria manufacturera de la región. Actualmente, colabora en Manufacturera Industrial S. A. de C. V., donde se dedica al diseño de procesos. Además, es maestro en Investigación Educativa por la Universidad de Guanajuato, México, lo que le ha permitido combinar su profesión con la enseñanza en varias instituciones de educación superior durante 25 años. Imparte cátedra en la Universidad Instituto Irapuato, y también se dedica a la investigación en el área de ingeniería industrial.

**JOSÉ NÉSTOR PERAZA BALDERRAMA**

Doctor en Sistemas y Ambientes Educativos, y maestro en Investigación Educativa, por el Instituto Tecnológico de Sonora, México. Licenciado en Educación Primaria por la Benemérita y Centenaria Escuela Normal del Estado de Sonora, México. Se dedica a la investigación en el área de la educación, enfocándose en temas como prácticas docentes, violencia escolar y tecnología en educación. Imparte cátedra en la Universidad Pedagógica Nacional, Ciudad de México, y es profesor auxiliar en el Instituto Tecnológico de Sonora. Además, se desempeña como investigador en la Universidad Instituto Irapuato, México.

## **MEJORA DE LOS INDICADORES NPS Y FCR EN UNA EMPRESA DEL SECTOR CALL CENTER**

ALONSO FERNANDINO GARCÍA GALLO

MBA e ingeniero industrial por la Universidad de Lima, Perú; certificación Lean Six Sigma Black Belt en Pacífico Business School, Perú; especialización en Gestión de Procesos y Proyectos de Centrum PUCP Business School, Perú. Actualmente se desempeña como PMO Global Expert en Atento Perú, donde lidera proyectos de transformación global y optimización de procesos. Posee experiencia previa en roles como jefe de Procesos e Innovación en Covisian Group, analista de Mejora Continua en Los Portales y analista de Procesos en Avianca Perú.

## **SIMULADOR DE LUZ ARTIFICIAL PARA PANELES SOLARES: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN EN EL PERÚ**

WILLIAM FERNANDO FERNÁNDEZ GOICOCHEA

Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú. Ingeniero electrónico por la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, especializado en automatización industrial en plantas industriales. Desde el año 2001, se desempeña como docente universitario en la Universidad de Lima, Perú, en la especialidad de Ingeniería Industrial, donde trabaja en los Laboratorios de Ingeniería Eléctrica, de Máquinas e Instrumentos y el Laboratorio CIM.

MARIO DAYVID CARBAJAL CCOYLLLO

Ingeniero químico por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Actualmente, es becario del Programa de Recursos Humanos de la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP-PRH) en Brasil, con especialización en Nanotecnología y Nuevos Materiales por la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro. Posee una amplia experiencia en los sectores minero, textil y energético, además de un sólido historial en laboratorios de ensayo e investigación y desarrollo. Autor de la publicación "AZ31 Mg foams coated with collagen solutions: Corrosion evaluation in a simulated environment of physiological conditions" en la prestigiosa revista *Macromolecular Symposia*.

## **LA MANUFACTURA ADITIVA COMO ELEMENTO IMPRESCINDIBLE DE LA INDUSTRIA 4.0 EN BENEFICIO DE LA INGENIERÍA: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO**

MARCO ANTONIO DÍAZ-MARTÍNEZ

Doctor en proyectos por la Universidad Internacional Iberoamericana, México. Es profesor-investigador en el Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas

A. C., México. Cuenta con experiencia en áreas de consultoría y desarrollo de proyectos. Es certificador avanzado en SolidWorks en el desarrollo de nuevos productos y simulaciones, por la empresa Desarrollo de Manufactura Digital (DMD). Además, es miembro activo del comité de validación de reactivos del EGEL de Ingeniería Industrial en CENEVAL. Ha publicado artículos en revistas de México, España, Chile, Perú, Cuba, Paraguay e Inglaterra. Adicionalmente, es colaborador en el área de posgrado e investigación en el Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, Veracruz, México.

#### REINA VERÓNICA ROMÁN-SALINAS

Doctora en Administración y Máster en Educación con especialidad en Organización y Administración de Instituciones de Educación Superior por el Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas A. C., México, donde también colabora. Además, cuenta con un Máster en Ingeniería Administrativa por el Instituto Tecnológico Superior de Pánuco. Ha sido directora de campus desde nivel medio superior hasta posgrado, y es miembro activo del comité de validación del EGEL de Ingeniería Industrial en CENEVAL; colaboró en el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI). Ha publicado artículos en revistas de México, España, Chile, Perú, Cuba, Paraguay e Inglaterra.

#### SANTOS RUÍZ-HERNÁNDEZ

Doctor en Educación Internacional por la Universidad Autónoma de Tamaulipas, así como doctor en Administración por el Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas, México. Posee maestrías en Ciencias de la Administración por la Universidad Valle de Bravo, México, y en Comunicación Académica en la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Tiene experiencia laboral en el área de ingeniería de comunicaciones en empresas como Grupo Tampico y Grupo Sigma; y experiencia académica en el Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, México, como subdirector académico. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel candidato, reconocimiento entregado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Ha publicado trabajos en Inglaterra, España, Colombia, Chile, Brasil, Estados Unidos y México.

#### NICOLÁS ALBERTO HERNÁNDEZ-CORTÉS

Ingeniero naval por la Facultad de Ingeniería Naval de la Universidad Veracruzana, México. Analista en la Gerencia de Producción en Astilleros Unidos de Veracruz. Es coordinador general de Puertos Industriales SCT, diseñador, administrador e instructor de programas y cursos de capacitación en puertos y transporte marítimo del proyecto internacional TRAINMAR de las Naciones Unidas (UNCTAD). Catedrático en la Universidad Cristóbal Colón y en la Heroica Escuela Naval Militar, Veracruz, México. Actualmente, es maestrando de la Maestría de Ingeniería Aplicada de la Universidad Veracruzana.

**VANIA IRAÍS GONZÁLEZ-RUBÍN**

Doctora en Administración y máster en Educación por el Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas, A. C., México. Es directora de Educación Superior a Distancia del mismo instituto. También es administradora y consultora de pymes, agente capacitador avalado ante la Secretaría de Trabajo y Previsión Social, agente capacitador autorizado ante el CONOCER-SEP, catedrática de nivel universitario y posgrado, y profesora de educación media superior.



### **GESTIÓN DE LA PRODUCCIÓN**

Propuesta de mejora para el control y manejo de un almacén con productos de papelería

Diseño de una herramienta de apoyo para la selección de tecnologías de AIDC en procesos logísticos

Evaluación de una política de inventario de suministros médicos de mayor rotación en centros de salud de tercer nivel ubicados en zonas de acceso difícil

Gestión de inventarios de una compañía importadora de repuestos de transmisión de potencia de maquinaria pesada

Mitigación de riesgos disergonómicos: manipulación manual de estructuras metálicas para líneas de transmisión de electricidad

### **CALIDAD Y MEDIOAMBIENTE**

Obtención de celobiosa a partir de la hidrólisis enzimática parcial de la celulosa de cáscara de arroz

Estrategia para el desarrollo de la competencia investigativa en estudiantes universitarios de la carrera de Ingeniería Industrial: estudio de caso de la Universidad Instituto Irapuato

### **INGENIERÍA DE NEGOCIOS**

Mejora de los indicadores NPS y FCR en una empresa del sector *call center*

### **CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

Simulador de luz artificial para paneles solares: diseño y construcción en el Perú

La manufactura aditiva como elemento imprescindible de la industria 4.0 en beneficio de la ingeniería: un análisis bibliométrico