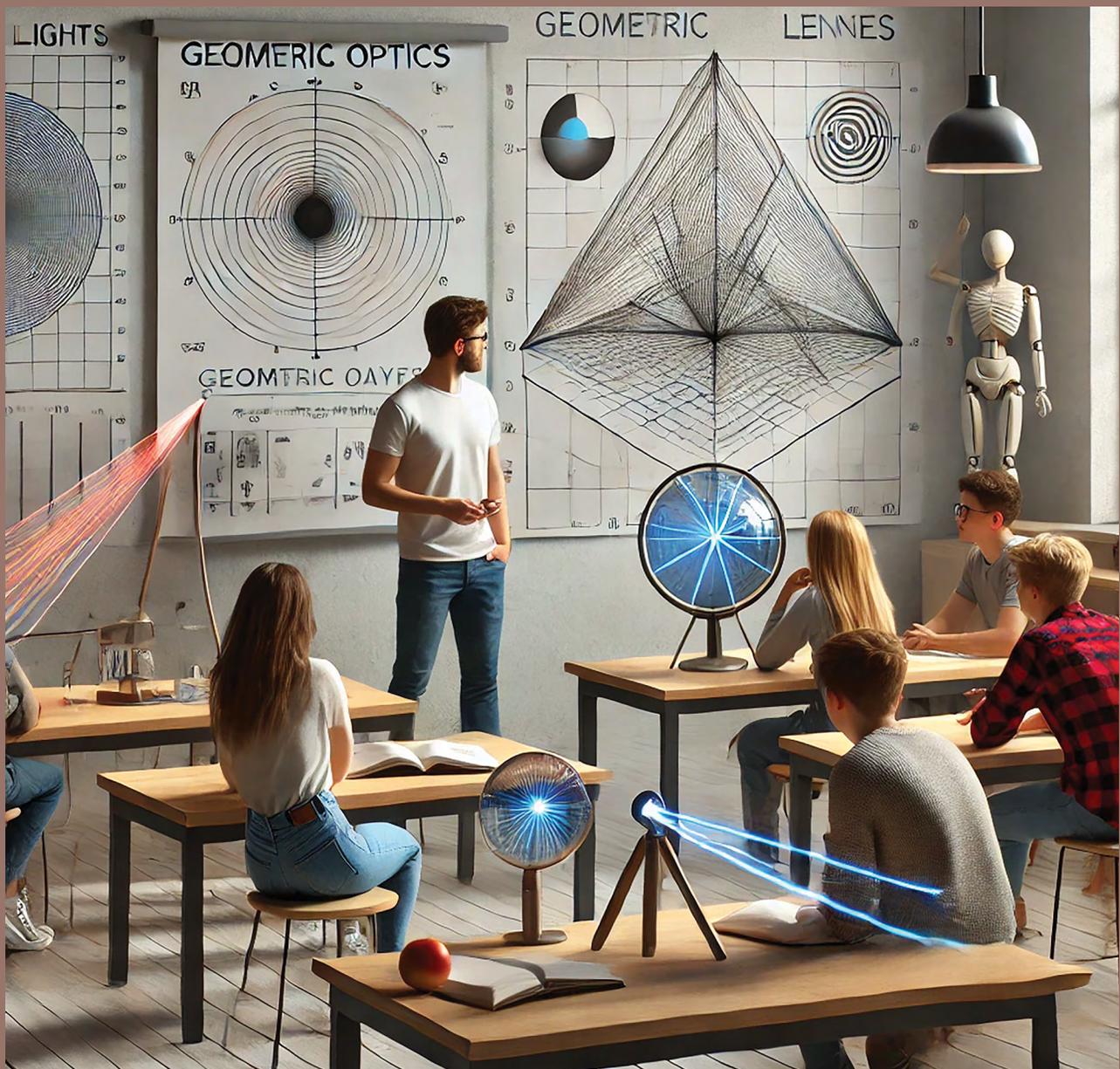


CULCYT

CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA • ISSN 2007-0411



VOLUMEN 21 | NÚMERO 3

SEPTIEMBRE - DICIEMBRE 2024

Dr. Daniel Constandse Cortez
 RECTOR

C. D. Salvador David Nava Martínez
 SECRETARIO GENERAL

Mtra. Guadalupe Gaytán Aguirre
 SECRETARIA ACADÉMICA

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

Mtra. Mayola Renova
 COORDINADORA GENERAL EDITORIAL Y DE PUBLICACIONES

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

Comité Editorial

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

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

Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Dra. Klavdia Oleschko Lutkova
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Abdiel Ramírez Reyes
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dra. Santos Adriana Martel Estrada
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Cortés Sáenz
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Ortega Gaucin
 INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

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



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
 DE CIUDAD JUÁREZ

CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Vol. 21, núm. 3, septiembre-diciembre 2024, es una publicación académica, editada de manera cuatrimestral por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología.

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

Editora responsable: Dra. Nelly Gordillo Castillo.

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

ISSN (electrónico): 2007-0411.

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

DOI: [10.20983/culcyt.2024.3](https://doi.org/10.20983/culcyt.2024.3)

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

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

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

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

o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ

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



UACJ |  Repositorio Institucional

Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

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

Información para autores:

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

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



latindex

 Dialnet

Contenido
 CONTENTS

Artículos de investigación / Research articles

Herramientas estadísticas Seis Sigma aplicadas a procesos en la industria de los adhesivos	<u>5</u>
Six Sigma statistical tools applied to processes in the adhesives industry Miguel Angel Langle Flores, Jaime Gerardo Malacara Navejar, María de Lourdes Castillo Carrillo	
Dynamical behavior and control strategy of a dengue epidemic model	<u>24</u>
Comportamiento dinámico y estrategia de control de un modelo de epidemia de dengue Laura Valentina Bocanegra-Villegas, Cuauhtémoc Sánchez-Ramírez, Sandra Usaquén-Perilla	
Módulo autobloqueante para el cambio automático de herramientas	<u>31</u>
Self-locking module for automatic tool change Carlos Sánchez López, Andrea Yoselin Castillo Rojo, Alejandra Ibeth García Castañón, Juan Gabriel Reyes Ramírez, José de Jesús Martínez Prieto	
Diseño de un controlador en tiempo discreto para sistemas no lineales	<u>39</u>
Design of a discrete-time controller for nonlinear systems Miguel Hernández González	
Análisis de conductas de seguridad en diferentes contextos laborales de Ciudad Juárez	<u>46</u>
Analysis of Safety Behaviors in Different Work Contexts in Ciudad Juarez Dra. Karla Gabriela Gómez Bull, Dra. Aurora Irma Máynez Guaderrama, Dra. María Marisela Vargas Salgado, Dr. Jesús Andrés Hernández Gómez	
Optimización de la configuración de materiales compuestos laminados mediante redes neuronales y templado simulado	<u>53</u>
Optimization of laminated composite materials configuration using neural networks and simulated annealing Julio César Galvis Chacón, Alejandro E. Rodríguez-Sánchez, Elías Rigoberto Ledesma Orozco	
Aplicación de gestores web para la clasificación de documentos en un área de gestión académica	<u>66</u>
Application of web managers for document classification in an academic office Ricardo de Jesús Télles Peña, Heriberto Niccolas Morales, César Alfonso Arroyo Barranco	
Implementación de un método para el control de inventario en una microempresa familiar	<u>80</u>
Implementation of a method for inventory control in a family microenterprise Luis Enrique Galaviz Magallanes, Manuel Alonso Rodríguez Morachis, Mónica Gabriela Gutiérrez-Hernández	
Procedimiento iterativo de integración por partes y la evaluación de su eficacia en el aula	<u>90</u>
Iterative integration-by-parts procedure and its efficacy assessment in the classroom Jorge Eduardo Macías Díaz, Miguel Ángel Abreu Terán, Alejandro Román Loera	
Análisis del Sistema de Salud Colombiano. Caso de estudio: Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS) en Cali	<u>100</u>
Analysis of the Colombian Healthcare System. Case Study: Healthcare Service Providers (IPS) in Cali Katherine Castillo Rojas, Elena Valentina Gutiérrez Gutiérrez, Diego Fernando Manotas Duque	
Evaluación de funcionalidad de ajuste y propiedades mecánicas de una prótesis transradial para impresión 3D	<u>115</u>
Evaluation of adjustable functionality and mechanical properties of a transradial mechanical prosthesis for 3D printing Paola Lizeth Orquiz Avila, Erika Guadalupe Meraz Tena, José Ricardo Oropeza Casillas	

Edición especial “Aprendizaje Integral de la Física a lo Largo de la Vida” / Special Edition “Comprehensive Lifelong Learning in Physics”

Presentación

Presentation

E1

Enseñanza de la óptica geométrica con la metodología STEAM en nivel medio superior

Teaching geometric optics with the STEAM methodology at the high school

Angel Farit Pereyra Arguelles, Carina Berenice López González, Hiram Escobar Cornelio

E2

El espacio-tiempo en la enseñanza de la física

Space-time in the teaching of physics

Erick Rodolfo Ortiz Ibáñez, Rosa Nidia Tuay Sigua

E8

Estrategias de enseñanza de la física en el bachillerato basadas en la didáctica del razonamiento proporcional

Physics Teaching Strategies Supported on the Didactics of Proportional Reasoning

Ulises Solís Hernández, Beatriz Oropeza Villalobos

E20

Gestión docente para el desarrollo de habilidades de resolución de problemas numéricos en física

Teaching management for the development of numerical problem-solving skills in physics

Dra. Beatriz Oropeza Villalobos

E31

Microcredencial for Physics Majors

Microcredencial para estudiantes de física

Jorge A. López, Jorge A. Muñoz

E40

Implementación de indagación guiada con simulaciones PhET sobre flotación en el nivel medio superior

Implementation of Guided Inquiry with PhET Simulations on flotation at the high school level

Pedro Oliver Cabanillas-García, José Alberto Alvarado-Lemus, Levy Noé Inzunza-Camacho

E49

Comunidades interactivas presenciales para la divulgación de la física

In-person interactive communities for the dissemination of physics

Juan Crisóstomo Tapia Mercado, Alma Rocío Cabazos Marín, Jesús Ramón Lerma Aragón, José Manuel López Rodríguez

E62

Inclusión de la mujer en el aula de física de primer año de ingeniería

Inclusion of women in physics classrooms in first-year engineering programs

Luisa Fernanda Chaparro Sierra, Manuela Ortiz Díaz, Claudia Bautista Flores, Carolina Berenice Rodríguez Garza, Santa Esmeralda Tejada Torres

E71

Aprendizaje basado en proyectos en STEAM: implementación interdisciplinaria aplicada al oscilador armónico simple

Project-based learning in STEAM: interdisciplinary implementation applied to the simple harmonic oscillator

Jesús López Hernández, Elizabeth Galindo Linares

E79

Herramientas estadísticas Seis Sigma aplicadas a procesos en la industria de los adhesivos

Six Sigma statistical tools applied to processes in the adhesives industry

Miguel Angel Langle Flores¹ , Jaime Gerardo Malacara Navejar¹, María de Lourdes Castillo Carrillo¹ 

¹Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Rodhe, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Reynosa, Tamaulipas, México

RESUMEN

En la industria manufacturera o intensiva en transformación de materia prima se utiliza la métrica sigma, en donde, a la distribución estadística de un producto en cuya parte central le corresponda una distancia de seis sigmas o seis desviaciones estándar se le considera eficiente en términos de calidad. A manera de caso de estudio, se aplicó la metodología Seis Sigma con el objetivo de reducir las variaciones en distintas propiedades fisicoquímicas (densidad, viscosidad y porcentaje de sólidos) pertenecientes a cuatro distintos adhesivos para calzado elaborados por una industria química mexicana. Los indicadores iniciales mostraron un desempeño superior a 2 sigmas, mismos que fueron ajustados mediante un procedimiento tipo DMAIC constituyente de la manufactura delgada. Si bien en la mayoría de los casos se corrigieron las alteraciones (métrica sigma superior a 3), la variabilidad fuera de los parámetros Seis Sigma persistió en determinadas ocasiones al evidenciarse la presencia de perturbaciones de mayor profundidad. Dado lo anterior, en la industria química correspondiente a los adhesivos y los acabados para el cuero, la elección de la propiedad sujeta a los parámetros de calidad es fundamental para cumplir la métrica sigma y determinar los errores aleatorios y sistemáticos.

PALABRAS CLAVE: Seis Sigma; Manufactura Delgada; industria química; México.

ABSTRACT

In the manufacturing industry or industry intensive in raw material transformation, the sigma metric is used, where the statistical distribution of a product in whose central part corresponds a distance of six sigmas or six standard deviations is considered efficient in terms of quality. As a case study, the Six Sigma methodology was applied with the objective of reducing the variations in different physicochemical properties (density, viscosity and percentage of solids) belonging to four different adhesives for footwear manufactured by a Mexican chemical industry. The initial indicators showed a performance greater than 2 sigmas, which were adjusted by a DMAIC type procedure, which is a constituent of lean manufacturing. Although in most cases the alterations were corrected (sigma metric greater than 3), the variability outside the Six Sigma parameters persisted on certain occasions when the presence of deeper disturbances became evident. Given the above, in the chemical industry corresponding to adhesives and leather finishes, the choice of the property subject to quality parameters is essential to meet the sigma metric and determine random and systematic errors.

KEYWORDS: Six Sigma; Lean Manufacturing; chemical industry; Mexico.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Miguel Angel Langle Flores
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Tamaulipas / Unidad Multidisciplinaria Reynosa-Rodhe
DIRECCIÓN: Carretera Reynosa-San Fernando, cruce con canal Rodhe, col. Arcoiris, C. P. 88779, Reynosa, Tamaulipas, México
CORREO ELECTRÓNICO: miguel.langle@uat.edu.mx

Fecha de recepción: 8 de marzo de 2024. **Fecha de aceptación:** 30 de agosto de 2024. **Fecha de publicación:** 12 de septiembre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las empresas se encuentran sujetas a procesos de libre comercio y deslocalización de los factores de producción, y ante ello se ha vuelto primordial la necesidad de incrementar de manera constante su productividad y eficiencia ^[1].

La industria manufacturera se caracteriza por una serie de procesos sucesivos y repetitivos para ensamblar productos intermedios o finales ^[2]. En dichos procesos, el control de la variación es un factor central en materia de calidad. Ejemplo de ello son las propiedades físicas y químicas de los insumos, mismas que añaden incertidumbre durante los sucesivos procesos de transformación. En consecuencia, el ignorar la existencia de estas alteraciones deriva en una asignación ineficiente e ineficaz de la producción final conforme varía la calidad de los bienes y servicios ofertados.

Dado lo anterior, las herramientas para mejorar la calidad de los procesos contribuyen a abatir las actuales problemáticas empresariales en materia de competitividad ^[3]. Ante ello, surge la necesidad de utilizar metodologías de mejoramiento continuo, como Seis Sigma (SS), Manufactura Delgada o Lean Manufacturing (LM) y Lean Seis Sigma (LSS).

En el primer caso, esta herramienta, desarrollada en la compañía Motorola en la década de los ochenta, reduce los desperdicios hasta un nivel de 3.4 partes por millón de oportunidades o eventos, esto es, el 0.00034 % de la producción, métrica que se sostiene mediante la optimización continua de la producción. Por su parte, LM tiene como objetivo la disminución de los tiempos de espera a través de la eliminación de los residuos, mientras que LSS combina ambos de los planteamientos anteriores para mejorar tanto la calidad como los costos del proceso de manera simultánea ^[4].

Así, el ciclo de mejora continua característico de Seis Sigma, que es Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (DMAIC, por sus siglas en inglés), involucra, secuencialmente, diversas herramientas de la filosofía Lean enfocadas en la eliminación de los desperdicios y la optimización de la producción ^[5].¹

¹ De acuerdo con ^[6], existen ocho tipos de desechos: exceso de inventario, transporte innecesario, tiempo de espera, exceso de procesamiento, producción excesiva, productos no conformes, talento no utilizado y falta de estandarización.

Ante ello, Lean Seis Sigma ha tomado una relevancia significativa en las últimas dos décadas por la eficiencia y magnitud de sus resultados ^[7], ^[8], ^[9], ^[10]. Los esfuerzos de Seis Sigma se concentran en tres áreas principales: 1) mejorar la satisfacción del cliente, 2) reducir el tiempo del ciclo y 3) disminuir los defectos. Las mejoras en estos rubros significan, principalmente, la reducción de costos, el aumento de la cartera de clientes y el mejoramiento de la imagen de la empresa ^[11].²

Bajo dicho escenario, el presente trabajo aplica la metodología Seis Sigma con la finalidad de reducir la variación de un conjunto de propiedades fisicoquímicas correspondientes a cuatro distintos adhesivos para calzado elaborados por una pequeña empresa química mexicana, especializada en acabados para la piel (pigmentos y resinas), como es el caso de la densidad, la viscosidad y el porcentaje de sólidos.³ Además de reducir la variabilidad identificada a parámetros cercanos a los estándares de Seis Sigma, se implementan un conjunto de herramientas pertenecientes a la manufactura delgada para aplicar la mejora continua de procesos productivos al interior de la planta a través del cumplimiento y seguimiento constante de un plan de acción específico.

ANCLAJE EMPÍRICO Y TEÓRICO

Empíricamente, la metodología Seis Sigma se desarrolla alrededor de tres grandes categorías: 1) reducción de merma manufacturera, 2) optimización de la atención a clientes ^[13], ^[14], ^[15], ^[5], ^[16], ^[17], ^[18], ^[19], ^[20], ^[21], ^[22] y 3) mejoramiento de la precisión en análisis clínicos. En ^[23] se señala que las herramientas de la manufactura delgada resultan idóneas para mejorar en más de dos terceras partes la eficiencia, mientras que en ^[24] se aplicó la metodología Seis Sigma en la atención farmacéutica a pacientes y los errores de selección de turno disminuyeron en 41,9 % y el 51.3 % de los pacientes que expresaron una mejoría en el tiempo de espera. En contraste, en ^[25] se planteó, para la etapa preanalítica de un laboratorio de análisis clínicos, una meta mínima de 4 sigmas, y se

² Existen organismos capacitadores certificados que otorgan constancias o cinturones, por ejemplo: blanco (capacitación teórica básica), amarillo (comprensión de las metodologías fundamentales), verde (realización de pruebas estadísticas mediante softwares), negro (empleo del diseño de experimentos), negro maestro (lidera el proceso general y capacita al personal), y campeón (actividades de dirección y alta gerencia) ^[12].

³ Por razones de confidencialidad inherentes a los intereses de la empresa, el nombre específico de la firma se mantiene anónimo en el presente artículo.

considera la elección del requisito de calidad como el factor más importante para satisfacer la métrica sigma.

Al interior de la industria manufacturera, en [26] se examinaron los defectos de una línea de ensamble de arneses automotrices mediante herramientas tipo Lean y se registró una mejora cercana al 20 % sobre el total de piezas producidas semanalmente. Por otra parte en [27] se abordó el tema del impulso a la productividad de la industria textil de Tehuacán, Puebla, sin embargo, los autores denotan la falta de precisión en los objetivos empresariales como el obstáculo principal para el plan de acción.

Por otra parte, en [11] se aplicó la metodología DMAIC a la fabricación de paneles modulares de poliestireno para la construcción y se reportó un incremento de la confiabilidad del proceso de 81 % a 98 %, además de una reducción del 66 % en los DPMO (Defectos Por Millón de Oportunidades). En contraparte, en [3] se analizó el proceso de confección de camisas y se logró reducir los tiempos de operación a través de Lean Six Sigma Logistics. Análogamente, en [28] se empleó la metodología DMAIC y la herramienta Seis Sigma en la elaboración de reguladores automotrices y se destaca una reducción del 77.5 % en la incidencia de fallas.

En [29] se implementó la metodología DMAIC en el ensamble de tablillas electrónicas y se redujo significativamente la merma al identificar los parámetros críticos. A su vez, en [30] se aplicó Seis Sigma en los procesos de pintura y se logró incrementar el nivel sigma del proceso de 2.4 a 3.6. Individualmente, en [31] se empleó Seis Sigma en la identificación de defectos en las tarjetas electrónicas de telecomunicaciones, mismos que se redujeron en más de dos terceras partes.

En contraste, en [32] se optimizó la continuidad y la automatización de una línea de envasado tipo PET (por sus siglas en inglés) en más de tres cuartas partes con la metodología DMAIC-Seis Sigma. Por su lado, en [33] se empleó Seis Sigma en la confección y distribución de material de intendencia y se redujo en 26 % los costos derivados de las fallas en la calidad. En la misma línea, en [34] se analizó los desperdicios generados en la producción de losas alveolares mediante Lean Seis Sigma y se recomienda que la métrica sigma de 3.5 debe mejorarse a 4.5 para sostener la optimización en el tiempo.

Análogamente, en [35] se implementó DMAIC-Lean Seis Sigma en la fabricación de tapas y botellas, construyen-

do su métrica sigma (2.6 equivalente a 138.042 DPMO) para disminuir los desperdicios. En este sentido, en [36] se analizó la productividad de la industria maquiladora de sombreros de Tehuacán, Puebla, y se focalizó la variación de la puntada como el factor clave para mejorar la calidad. Mientras que en [1] se minimizó los residuos existentes en el proceso de recuperación de envases de aluminio, al optimizar el nivel sigma de 2 a 3 (7 % de defectos).

En contraparte, en [37] se implementó Seis Sigma para optimizar el servicio técnico de una manufacturera. Sus resultados denotan un incremento en la eficiencia cercano al 10 %. Contemporáneamente, en [38] se combinaron herramientas de Lean Seis Sigma con la simulación discreta en una empresa colombiana de artes gráficas, lo cual representa contracciones en los tiempos de cambio en más de dos quintas partes. A su vez, en [39] se elaboró un manual para la elaboración de proyectos de tarjetas electrónicas a partir de encuestas especializadas y la metodología Seis Sigma y sus resultados demuestran un incremento de 50 % en el nivel de aceptación de proyectos. En tanto, en [40] se redujeron los productos defectuosos de una empresa textil con la implementación de Seis Sigma y se incrementó la eficiencia en 10 %. Bajo este enfoque, en [41] se logró mejorar los procesos de producción de cerveza artesanal al aumentar la productividad en un 25 %. Finalmente, en [42] se perfeccionó la gestión de las mediciones en el proceso de refinación de diésel, se llevaron a cabo estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad (R & R) y con los ajustes realizados se contrajo la variabilidad en dos terceras partes.

Teóricamente, en [43] se identificó la dirección, la estrategia institucional, la selección del personal y la comunicación como los factores críticos para la aplicación exitosa de Seis Sigma. No obstante, en [44] se señala la inexistencia de una guía para el uso secuencial de las herramientas Seis Sigma ante situaciones específicas. Por su parte, en [7] se evidencia tanto las principales limitaciones como las sugerencias centrales para la implementación exitosa de Seis Sigma en la industria mexicana. En el primer estudio sobresalen la falta de compromiso, la carencia de personal capacitado, el escaso apoyo de la alta dirección, la débil relación costo-beneficio y la falta de trabajo en equipo, mientras que en el caso ulterior destacan un sistema previo de gestión de calidad, el seguimiento de la alta dirección, la formación de coordinadores de proyectos, la capacitación sobre trabajo en equipo y uso de software y el sistema de información.

De acuerdo con [7, p. 67], implantar Seis Sigma, que incluye al menos veinte herramientas, puede tardar varios años aunque se usen buenos recursos computacionales, sin embargo, ese tiempo puede ser menor si la dirección tiene un compromiso real de impulsarla y darle seguimiento y si se capacita al personal en forma apropiada.

Por otro lado, en [45] se presenta una revisión literaria sobre la implementación de mejoras Seis Sigma en MIPYME (Micro, Pequeñas y Medianas Empresas). Si bien la innovación tecnológica y la experiencia en el ramo resaltan como factores centrales, los autores de este artículo abogan por la necesidad de comprometer a los empresarios mediante sus efectos en la reducción de los costos.

En el caso de las MIPYME manufactureras de corte químico, Seis Sigma reduce la variabilidad del producto final, especialmente en los procesos discontinuos o de tipo lote (*batch*, por su anglicismo), en donde los productos que no cumplen los requisitos del cliente se consideran defectuosos. Además, interviene en la regulación del proceso en pro de su diseño y optimización [46].

II. METODOLOGÍA

LEAN MANUFACTURING

El método de producción Lean Manufacturing o manufactura delgada tiene sus orígenes en la compañía Toyota durante la década de los sesenta y consiste en una colección de estrategias y prácticas de negocio enfocadas tanto a la eliminación de los desechos como a la mejora continua al interior de la organización. El método se conforma por diversos principios: 1) *visibilidad y organización de los desperdicios*: además de identificar las fuentes de desperdicios, es necesario identificar las actividades por su valor añadido; 2) *estrategia y flexibilidad*: implica el compromiso de la dirección para formar equipos, definir líderes y objetivos, así como la disposición al cambio y la orientación de la producción hacia la demanda (sistema Pull); 3) *simplicidad*: los problemas complejos se descomponen en problemas simples para tratar de encontrar sus soluciones más sencillas y, en consecuencia, mejores; y 4) *mejora continua*: al hacer uso de la filosofía Kaizen de mejora continua, la implementación de constantes optimizaciones se traduce en resultados estables y de largo plazo. Lo anterior implica sujetarse a las premisas siguientes: desechar las ideas fijas, reflexionar en lugar de negar, aplicar inmediata-

mente las propuestas de mejoras, conformarse con la obtención de ganancias superiores a dos terceras partes, corregir los errores en el momento, fomentar la innovación ante la dificultad, identificar la causa real, priorizar las ideas grupales, probar y validar, y la mejora es permanente [47, pp. 13-14].

SEIS SIGMA

De acuerdo con [7], Seis Sigma es una metodología que reduce la variabilidad de los procesos. En una distribución normal, la capacidad del proceso es el número de veces que el valor de la desviación estándar cabe en la distancia comprendida por entre la media y el límite de especificaciones (inferior [LIE] o superior [LSE]) más cercano a esta (Tabla 1). Por ejemplo, un proceso con capacidad de 3 sigma tiene 3 sigmas de distancia entre cada límite de especificación (para cierta característica) y su media, por tanto, puede originar 0.27 % de defectos sobre esa característica [7, p. 61].

En un nivel elevado de sigma, los defectos tienen menor probabilidad de ocurrir, no obstante, si la producción en el corto plazo (un día o un turno) tiene una capacidad de 6 sigma, en el largo plazo (un mes o más) la media del proceso se moverá máximo 1.5 sigma por distintas circunstancias de variación normal en los procesos y la capacidad a largo plazo quedará en solo 4.5 sigma [7, p. 62]. Dicho ajuste brinda una idea más adecuada de la capacidad real del proceso conforme continúan los subsecuentes ciclos repetitivos de manufactura [48].

TABLA 1 [49, p. 25]

EQUIVALENCIA ENTRE NIVEL SIGMA, DPMO, RENDIMIENTO Y LA REPRESENTATIVIDAD DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL

NIVEL EN SIGMA	DEFECTOS POR MILLÓN DE OPORTUNIDADES	RENDIMIENTO (%)	DISTRIBUCIÓN NORMAL (%)
6	3.4	99.9997	99.999999
5	233	99.977	99.9999
4	6210	99.379	99.99
3	66 807	93.32	99.73
2	308 537	69.27	95.45
1	690 000	31	68.27

En síntesis, en [50] se resumen las características centrales del modelo Lean Seis Sigma como sigue: 1) priorizar las necesidades de los clientes, 2) introducir fluidez en

los procesos, 3) añadir valor a través de reducir desechos, 4) eliminar la variabilidad, 5) participación integral, 6) mejora continua de la toma de decisiones y la sistematización y 7) control estadístico de los procesos. El modelo LSS sigue las fases del ciclo DMAIC descrito en los siguientes párrafos.

Fase 1. Definir

En [49, p. 43], la primera etapa de la fase de definición consiste en determinar las variables críticas para la calidad del proceso a través de la retroalimentación, esto es, los atributos o características relacionados con la calidad de un producto o servicio que son importantes para el cliente. Para determinar dichos elementos se tiene que conocer la Voz del Cliente (VOC, por sus siglas en inglés) interna o externa acerca del producto o servicio proporcionado con la finalidad de identificar su grado de satisfacción.

Posteriormente, se selecciona el problema a resolver, el cual debe considerar criterios como la seguridad, la calidad, el costo, la entrega y el servicio.⁴ Es decir, además de explicitar los antecedentes, la importancia y la prioridad del problema, se anuncia, contrafactualmente, cómo impactaría la mejora del proceso sobre los intereses del negocio. Si bien la realización de los proyectos se direcciona a través del líder (Green Belt), el cual verifica el cumplimiento de la metodología y se asesora por un experto certificado (Black Belt), es necesario conformar un equipo de trabajo, seleccionando a las personas clave tanto por su nivel de conocimiento y experiencia como por su ubicación en el proceso [12].

De acuerdo con [47], las herramientas utilizadas en esta etapa son las siguientes: 1) los árboles de Requisitos Críticos para la Calidad (CTQ, por sus siglas en inglés) para encontrar los requisitos de los clientes; 2) el mapeo de procesos mediante diagramas de Proveedores, Entradas, Procesos, Salidas y Clientes (SIPOC, por sus siglas en inglés) o diagramas de flujo (Tabla 2); 3) el cuadro de proyecto conformado por un resumen ejecutivo de los procedimientos a seguir y 4) la estadística descriptiva del proceso productivo en vías de optimización (Tabla 5).

⁴ Aunque, por razones de espacio, el mapeo del proceso y los diagrama de Ishikawa y Pareto, así como los gráficos de dispersión e histogramas de frecuencias no se muestran en el presente artículo, dichos elementos pueden ser solicitados a los autores.

TABLA 2 [47, p. 58]
EJEMPLO DE DIAGRAMA SIPOC: MANUFACTURA, REPARACIÓN DE MOTOR

PROVEEDORES	ENTRADAS	PROCESO	SALIDAS	CLIENTES
¿Quién suministra lo que se necesita del proceso?	¿Cuáles son los insumos requeridos?	¿Qué hace el proceso?	¿Cuál es el resultado del proceso?	¿Qué clientes necesitan la salida del proceso?
Bodeguero	Herramientas	Retiro de materiales de bodega	Motor reparado	Jefe de área
Jefe de área	Repuestos	Selección de herramientas	Informe de trabajo	
Planificador	Materiales	Solicitud de permisos de trabajo	Permiso de trabajo realizado	
Previsionista de riesgos	Motor en mal estado	Evaluación de riesgos		
	Orden de trabajo	Reparación de motor		
	Permiso de trabajo	Generación de informe		

Fase 2. Medir

En esta fase se toman datos para validar el problema y con esta información crítica se refina el desarrollo del plan de mejora, al facilitar la identificación de las causas raíz. Los objetivos de esta fase son identificar las herramientas de medición, determinar las mediciones relevantes, determinar las causas de la variabilidad, recolectar y adecuar la información, realizar un Análisis del Sistema de Medición (ASM) y cuantificar la incidencia de los defectos. Entre las citadas herramientas destacan los diagramas de causas y efectos (diagramas de Ishikawa y de Pareto), los estudios R & R y el análisis de la capacidad del proceso.

De acuerdo con [49, p. 113], la *capacidad del proceso* (CP) es la capacidad para producir productos dentro de los límites de especificaciones de calidad y para calcularla se utiliza la fórmula siguiente:

$$CP = \frac{LSE-LIE}{6\sigma} \tag{1}$$

Además, la Capacidad Real del Proceso (CPk) se estima como el valor mínimo absoluto, ya sea de Zs o Zi entre 3, donde $Zs = \frac{LSE-media}{\sigma}$ y $Zi = \frac{LIE-media}{\sigma}$. Ambas capacidades deben ser superiores a 1 para que el proceso cumpla con las especificaciones [49, p. 114].

En el caso del diagrama de Ishikawa (Figura 1), además de plantear los principales factores involucrados en la columna vertebral del proceso productivo o de las etapas de elaboración del producto, así como sus principales elementos secundarios, deben determinarse aquellos elementos que inciden en el problema o en la producción defectuosa categorizando tanto las causas del inconveniente (color rojo) como los puntos a favor (color verde) y el resto de los elementos (color negro) [51].

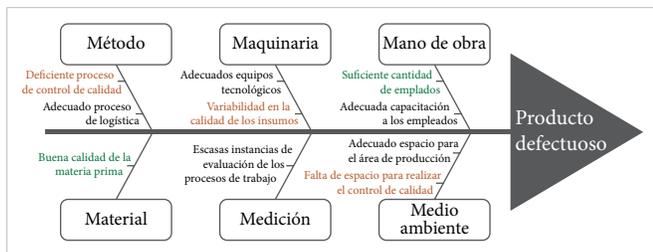


Figura 1. Ejemplo de diagrama de Ishikawa: manufactura [51].

En contraste, el diagrama de Pareto (Figura 2) identifica las probables causas de los defectos para centrarse en las más importantes para el proceso. A partir del principio de Pareto, en donde la mayor parte del beneficio (cerca del 80 %) se debe a un número limitado de acciones (alrededor del 20 %), así se determinan las principales causas generadoras de los defectos [47].

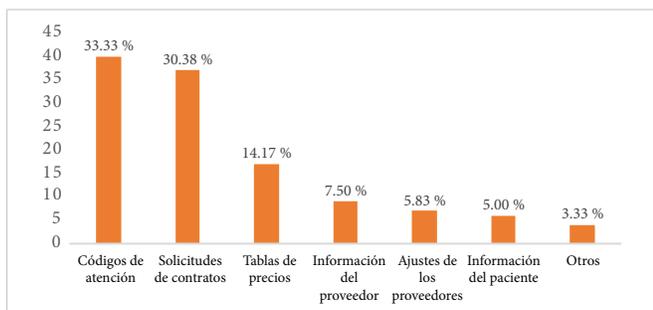


Figura 2. Diagrama de Pareto: servicios y seguros de gastos médicos [52].

Fase 3. Analizar

En esta fase se analizan los datos obtenidos en la etapa de medición para conocer las relaciones de causalidad o causas raíz del problema. La información de este análisis proporciona evidencias de las fuentes de variación, a través de las pruebas de hipótesis y el análisis de regresión (Tabla 7).⁵

⁵ En resumen, la regresión lineal cumple con los siguientes supuestos: linealidad en los parámetros, aunque no necesariamente en las variables; los regresores son independientes del término de error; y no existe autocorrelación entre las perturbaciones, las cuales tienen media cero e idéntica varianza [53].

También puede recurrirse al análisis correlacional con gráficos de dispersión (Figura 3) y al Análisis de Modos de Fallas y Efectos (AMEF) para componentes de diseño de equipos y procesos de manufactura o ensamble.

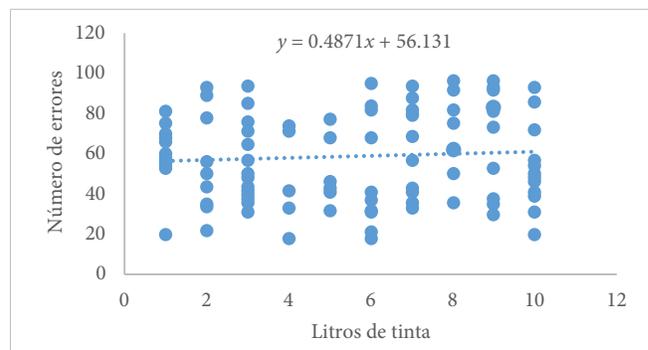


Figura 3. Ejemplo de gráfico de dispersión: servicios e impresión.

Fase 4. Mejorar

Después de seleccionar las características de desempeño del producto para alcanzar la meta de mejora, en esta fase se utiliza el Diseño de Experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) a partir del árbol CTQ con el objeto de profundizar sobre el comportamiento del proceso e incidir en su optimización. Entre las herramientas centrales empleadas en esta fase destaca la caracterización estadística y gráfica del conjunto de variables tanto endógenas como explicativas, así como el análisis contrafactual de las mejoras implementadas al proceso a través del Método de Superficie de Respuesta (MSR), el análisis de varianza (Tabla 9) y la estimación del rendimiento (Ecuación (2)) (Tabla 10).

$$\text{porcentaje de eficiencia} = \left[\frac{\text{datos incorrectos (fuera de rango o sobre el límite)}}{\text{tamaño de la muestra}} - 1 \right] (100) \quad (2)$$

Fase 5. Controlar

La última fase consiste en aplicar los controles pertinentes para asegurar el mantenimiento de los logros, mediante herramientas como la capacitación, los recursos Poka Yoke, las 5S, las técnicas de comunicación y el plan de control. Por tanto, los objetivos de la fase de control se centran tanto en la optimización como en la lógica tipo Kaizen.

Por ejemplo, las 5S emplean el sentido común enfocado al orden con disciplina para organizar las actividades de trabajo (Tabla 3). Además de eliminar la tendencia a

conservar elementos no necesarios, busca clasificar las cosas de acuerdo con su grado de necesidad al ordenar lo necesario y mantener limpio el entorno de trabajo, así como estandarizar y sostener de manera rutinaria y sistemática los procedimientos anteriores [47].

TABLA 3 [47, p. 147]
EJEMPLO DE 5S: MANUFACTURA

SUPRIMIR (SEIRI)	Suprimir lo no necesario, al clasificar las cosas conforme a su necesidad y quedarnos con las necesarias siempre o frecuentemente.
ORDENAR (SEITON)	Ordenar lo necesario y evitar errores, fallos o retrasos al realizar las tareas. Sistematizar la colocación de objetos y señalar.
LIMPIAR (SEISO)	Establecer rutinas de limpieza / revisión para contribuir al orden y descubrir desajustes, faltas o roturas que pueden originar defectos.
ESTANDARIZAR (SEIKETSU)	Estandarizar la aplicación sistemática y rutinaria de las técnicas anteriores.
MANTENER (SHITSUKE)	Mantener y supervisar diariamente para asegurar que los estándares se están aplicando según lo previsto.

En contraste, en el plan de control es necesario especificar tanto las características del proceso optimizado como los requerimientos para garantizar el control su desempeño bajo los nuevos estándares ajustados de mejora (Figura 4). Además, se indica la frecuencia y el modo de muestreo, así como las formas de detección de anomalías y las medidas a tomar sujetas a dichas alteraciones [47].

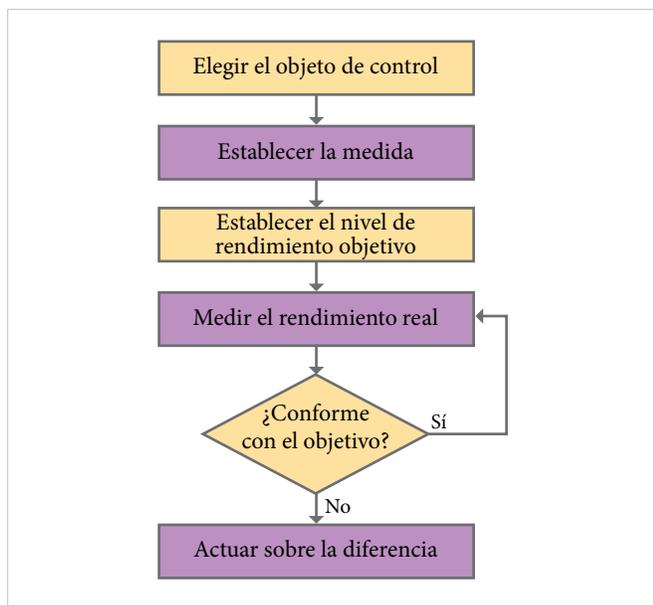


Figura 4. Ejemplo de la dinámica del plan de control de un proceso: manufactura [47, p. 157].

Una vez aplicadas las mejoras, se vuelven a estimar las métricas sigma del proceso, en donde, de tener lugar un proceso o etapa del proceso sin control y/o sin cumplir los requerimientos, se regresa a la fase correspondiente del método DMAIC con la intención de repetir y cerrar el ciclo. En caso contrario, se reportan los logros y el equipo se diluye [49, p. 204]. En este caso, la Tabla 4 esquematiza las veinte herramientas estadísticas utilizadas en cada una de las distintas cinco fases, con la intención de crear un ambiente de manufactura de alto desempeño y reducir el desperdicio en la citada firma.

TABLA 4
HERRAMIENTAS UTILIZADAS DE LEAN SEIS SIGMA - DMAIC

DEFINIR	MEDIR	ANALIZAR	MEJORAR	CONTROLAR
Mapeo del proceso	Diagrama de Pareto	ASM	DOE	Plan de control
Estadística descriptiva	Diagrama de Ishikawa	Regresión lineal	Análisis de varianza	Gráficos de control
Sistema de calidad	Muestreo y recolección	Pruebas de hipótesis	MSR	Kaizen
VOC	Histogramas de frecuencias	Gráficos de dispersión	Capacidad y rendimiento	5S

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

FASES 1 Y 2: DEFINIR Y ANALIZAR

Ante la necesidad explícita de la empresa por reducir la variabilidad en los parámetros de calidad de sus productos y con ello disminuir la proporción de productos considerados no adecuados por los propios clientes, se identificaron las áreas de oportunidad del proceso de elaboración de adhesivos para calzado.⁶ Tal es el caso del producto arrojado por los tanques de mezclado una vez integrados los insumos intermedios al proceso de producción. Dicho producto cuasi final debe verificarse alrededor del cumplimiento de varias propiedades físico-químicas antes de su subsecuente proceso de envasado y etiquetamiento, entre ellas el porcentaje de sólidos, viscosidad y la densidad.

Dado lo anterior, se recurrió a la recopilación periódica (mensual) de la información disponible sobre los cuatro pegamentos elaborados (PVC2000, PM370, PM1001 y

⁶ Los datos de la presente sección son producto de estimaciones propias a partir de la información arrojada por el proceso y el uso del software Minitab (versión 18).

PM7080) por la empresa en el transcurso de seis meses, a través del personal del área correspondiente; constituido por tres operarios de producción (Ecuación (3)).

$$n = \frac{(Z^2)(P)(N)}{e(N-1)+Z^2*P} \quad (3)$$

Al aplicar la Ecuación (3) [54] para un intervalo de confianza del 95 % (P ; $e = 0.05$; $Z = 1.96$) y una población (N) de 60 lotes semestrales (2.5 semanales) para cada uno de los cuatro pegamentos, se obtuvo un tamaño mínimo de muestra por pegamento de 34, mismo que se cuatriplicó en la estimación final debido a la toma unitaria de muestra semanal de cada uno de los tres operarios sobre el mismo lote por cada tipo de adhesivo, para un total semestral de 180 muestras por pegamento.

En síntesis, para producir un lote de 40 latas (18 litros cada una) de los pegamentos de contacto (PM1001, PM7080, PM370 y PVC2000) para el montado del zapato, se cargó el mezclador con 240 litros de hexano (400 litros de acetona en el caso del PVC2000), 300 litros de tolueno, 7 kilogramos de resina específica, 75 kilogramos de neopreno (poliuretano en el caso del PVC2000) y 100 gramos de dióxido de silicio en polvo (5 kilogramos en el caso del PVC2000). Finalmente, después de 6 (primeros tres casos) y 2 horas (último caso), se tomó una muestra para analizar en el viscosímetro con la aguja 4 a 20 revoluciones por minuto. El rango adecuado para tener un adhesivo de calidad a 25 °C es de 4310 a 4290 centipoise y si la temperatura del producto no es la adecuada hay que enfriar o evaporar. En el caso de la densidad, se verificó mediante la fórmula: $densidad = masa/volumen$, mientras que el $porcentaje\ de\ sólidos = (masa\ de\ sólidos / masa\ de\ muestra) (100)$.

En la [Tabla 5](#) se presenta un análisis estadístico descriptivo respecto al porcentaje de sólidos, viscosidad y densidad para los cuatro tipos de adhesivos analizados en el presente estudio, con base en las 34 mediciones individuales correspondientes realizadas por cada uno de los tres operarios. Se observa las disparidades al interior de las tres propiedades analizadas para los cuatro adhesivos bajo estudio, respecto a los valores de la desviación estándar individual y agregada.

FASE 3: MEDIR

Las tres propiedades bajo estudio (porcentaje de sólidos, viscosidad y densidad) en los cuatro tipos de adhesivos,

muestran una disparidad en las mediciones reportadas por los tres operarios disponibles en el único turno laboral de la firma (diurno), en términos tanto de su media aritmética como de los límites de la distribución (desviaciones estándar). Lo anterior sugiere un escenario en línea con la hipótesis alternativa implícita, es decir, la existencia de variabilidad en los procedimientos de medición. En otras palabras, al examinar la situación actual de las tres propiedades de los pegamentos producidos por la firma, se aprecia cómo la mayoría de los datos se encuentra fuera de los rangos establecidos para obtener las condiciones 6 sigma.

Además, se realizó el Análisis del Sistema de Medición mediante la obtención de los valores de repetibilidad y reproducibilidad ([Tabla 6](#)). Los resultados muestran que el porcentaje de variación del sistema de medición total se encuentra en 93.91 y, a su vez, la contribución al error se sitúa en 81.14 %. De acuerdo con [49, p. 95], ambos parámetros se consideran no aceptables, al superar los márgenes de 30 y 10 %, respectivamente.

A su vez, los Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) con ANOVA (Análisis de Varianza Factorial [intra e intergrup]) permiten verificar la estabilidad de los parámetros de los cuatro adhesivos al tener valores muy similares en sus tres propiedades ([Tabla 7](#)).

En consecuencia, se muestra la relación entre las propiedades de los productos, al emplear el adhesivo PVC2000 como variable dependiente y el resto (PM370, PM1001, PM708) como independientes. No obstante, las estimaciones solo muestran significancia estadística al 5 % en los casos del adhesivo PM370, en las tres propiedades, y en la viscosidad del pegamento PM1001.

FASE 4: MEJORAR

Una vez analizadas las principales variables del proceso y haber capacitado intensivamente al personal acerca de los procedimientos adecuados para la toma de muestra, especialmente, en materia de eliminación de residuos sólidos y exceso de solvente, tiempo de lectura y temperatura de la muestra, se inició el procedimiento de mejora al replicar el ASM ([Tabla 8](#)). Los resultados indican que el porcentaje de variabilidad del sistema de medición total transita de 93.91 a 17.64 % y, de igual forma, la contribución al error se reduce hasta 1.44 %, lo cual significa que la mayor parte de la variación se debe a la diferencia entre las partes.

Por tanto, las adecuaciones realizadas sobre el sistema de medición contribuyeron a reducir la variabilidad de este, al mejorar (de forma significativa) la repetitividad y reproducibilidad de los análisis e incrementar la confiabilidad y la consistencia de mecanismos. Entre dichas mejoras o adecuaciones sobresale la supervisión del procedimiento de medición, la calibración de los instrumentos, la estandarización de los mecanismos, la incorporación de instrumentos idóneos y la capacitación y selección del personal.

Colateralmente, con el DOE se profundizó en los impactos de los cambios en las variables sobre el proceso productivo. Así, se seleccionó el DOE de superficie de respuesta como el mecanismo adecuado. Dicho método se constituye por el análisis de la varianza, utiliza los niveles mínimos y máximos de las variables del proceso y permite determinar si las modificaciones realizadas inciden en la variabilidad del proceso productivo.

TABLA 5
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA INICIAL: PORCENTAJE DE SÓLIDOS, VISCOSIDAD, DENSIDAD

PORCENTAJE DE SÓLIDOS							
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Producto	<i>n</i>	Media	Sigma
Factor	3	3.853	1.284	PVC2000	180	35.170	0.744
Error	176	168.869	0.474	PM370	180	34.943	0.677
Total	179	172.721	F: 2.71	PM1001	180	34.906	0.649
R2 = 2.23 %	R2 ajustada = 1.41 %	Desviación estándar agrupada = 0.689	PM7080	180	34.954	0.681	
VISCOSIDAD							
Factor	3	918	306	PVC2000	180	4301.2	2.5
Error	176	40442	114	PM370	180	4303.6	8.8
Total	179	41360	F: 2.69	PM1001	180	4301.0	11
R2 = 2.22 %	R2 ajustada = 1.40 %	Desviación estándar agrupada = 4.73	PM7080	180	4299.1	10	
DENSIDAD							
Factor	3	0.00028	0.00009	PVC2000	180	0.8509	0.0065
Error	176	0.01491	0.00004	PM370	180	0.8493	0.0063
Total	179	0.01519	F: 2.25	PM1001	180	0.8485	0.0064
R2 = 1.86 %	R2 ajustada = 1.04 %	Desviación estándar agrupada = 0.00647	PM7080	180	0.8492	0.0065	
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95 %							

TABLA 6
ESTUDIO R & R DEL SISTEMA DE MEDICIÓN. MÉTODO XBARRA/R

% CONTRIBUCIÓN			DESVIACIÓN ESTÁNDAR		
Fuente	Variación de componente	% variación de componente	DE (Desviación estándar)	6*DE	% variación de estudio
R & R del sistema de medición total	3.12398	81.14	1.86749	8.34187	93.91
Repetibilidad	3.00808	78.13	1.84381	8.2341	92.22
Reproducibilidad	0.1159	3.01	0.02413	0.10776	17.22
Parte a parte	0.72591	18.86	0.67279	3.0047	35.74
Variación total	3.84989	100	2.54028	11.3449	100
Número de categorías distintas = 3					

TABLA 7
MCO: PORCENTAJE DE SÓLIDOS, VISCOSIDAD, DENSIDAD

PORCENTAJE DE SÓLIDOS							
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Producto	Coefficiente	Sesgo estadístico	Estadístico T
Factor	3	6.6018	2.2006	Constante	57.003	6.97	9.05
Error	176	42.6222	0.4956	PM370	-0.3673	0.1130	-3.25
Total	179	49.2240	F: 4.44	PM1001	-0.2255	0.1405	-1.60
R2 = 13.4 %	R2 ajustada = 10.4 %	S = 0.703994	PM7080	-0.0323	0.1317	-0.25	
VISCOSIDAD							
Factor	3	2308.2	769.4	Constante	1301.5	916.7	1.42
Error	176	11595.4	134.8	PM370	0.4348	0.1494	2.91
Total	179	13903.7	F: 5.71	PM1001	0.2219	0.1233	1.80
R2 = 16.6 %	R2 ajustada = 13.7 %	S = 11.6117	PM7080	0.0405	0.1299	0.31	
DENSIDAD							
Factor	3	0.00047121	0.00015707	Constante	0.4488	0.1277	3.51
Error	176	0.00336439	0.00003912	PM370	0.3093	0.1070	2.89
Total	179	0.00383560	F: 4.01	PM1001	0.0774	0.1073	0.72
R2 = 12.3 %	R2 ajustada = 9.2 %	S = 0.00625467	PM7080	0.0869	0.1073	0.81	
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95 %							

TABLA 8
ESTUDIO R & R DEL SISTEMA DE MEDICIÓN. MÉTODO XBARRA/R

% CONTRIBUCIÓN			DESVIACIÓN ESTÁNDAR		
Fuente	Variación de componente	% variación de componente	DE (Desviación Estándar)	6*DE	% variación de estudio
R & R del sistema de medición total	0.06428	1.44	0.25454	1.5220	17.64
Repetibilidad	0.03628	1.38	0.24004	1.49030	17.42
Reproducibilidad	0.00157	0.06	0.05189	0.26030	3.58
Parte a parte	2.59178	98.56	1.61168	10.61006	97.77
Variación total	2.62965	100	1.63162	10.72871	100
Número de categorías distintas = 3					

TABLA 9
ANÁLISIS DE VARIANZA FINAL: PORCENTAJE DE SÓLIDOS, VISCOSIDAD Y DENSIDAD

PORCENTAJE DE SÓLIDOS							
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Producto	Tamaño de muestra	Media	Desviación estándar
Factor	3	1.051	0.350	PVC2000	180	35.108	0.400
Error	176	56.825	0.160	PM370	180	34.967	0.423
Total	179	57.876	F: 2.19	PM1001	180	34.996	0.405
R2 = 1.82 %	R2 ajustada = 0.99 %	Desviación estándar agrupada = 0.400	PM7080	180	34.993	0.368	

TABLA 9 (CONT.)
ANÁLISIS DE VARIANZA FINAL: PORCENTAJE DE SÓLIDOS, VISCOSIDAD Y DENSIDAD

PORCENTAJE DE SÓLIDOS							
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Producto	Tamaño de muestra	Media	Desviación estándar
VISCOSIDAD							
Factor	3	271.5	90.5	PVC2000	180	4303.05	3.79
Error	176	7970.4	22.4	PM370	180	4303.05	4.57
Total	179	8241.9	F: 4.04	PM1001	180	4301.02	5.19
R2 = 2.22 %	R2 ajustada = 1.40 %	Desviación estándar agrupada = 4.73	PM7080	180	4301.79	5.23	
DENSIDAD							
Factor	3	0.0000158	0.0000053	PVC2000	180	0.84917	0.00355
Error	176	0.0044373	0.0000125	PM370	180	0.84941	0.00346
Total	179	0.0044531	F: 0.42	PM1001	180	0.84882	0.00351
R2 = 1.86 %	R2 ajustada = 1.04 %	Desviación estándar agrupada = 0.0035	PM7080	180	0.84916	0.00360	
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95 %							

TABLA 10
CAPACIDAD Y RENDIMIENTO (% EFICIENCIA) DEL PROCESO ANTES Y DESPUÉS DE SEIS SIGMA

CAPACIDAD									
ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS									
PORCENTAJE DE SÓLIDOS									
Producto	LIE	LSE	Media	Desviación estándar (sigma)	6 sigma	CP	Zi	Zs	PCK
PVC2000	34.50	35.84	35.17	0.74	4.46	0.30	-0.90	0.90	No aceptable
PM370	34.35	35.54	34.94	0.68	4.06	0.29	-0.88	0.88	No aceptable
PM1001	34.31	35.50	34.91	0.65	3.89	0.31	-0.92	0.92	No aceptable
PM7080	34.36	35.55	34.95	0.68	4.09	0.29	-0.87	0.87	No aceptable
VISCOSIDAD									
PVC2000	4288.95	4313.45	4301.20	12.50	75.00	0.33	-0.98	0.98	No aceptable
PM370	4295.06	4312.14	4303.60	8.80	52.80	0.32	-0.97	0.97	No aceptable
PM1001	4290.11	4311.89	4301.00	11.00	66.00	0.33	-0.99	0.99	No aceptable
PM7080	4289.60	4308.60	4299.10	10.00	60.00	0.32	-0.95	0.95	No aceptable
DENSIDAD									
PVC2000	0.84	0.86	0.85	0.01	0.04	0.31	-0.94	0.94	No aceptable
PM370	0.84	0.85	0.85	0.01	0.04	0.28	-0.85	0.85	No aceptable
PM1001	0.84	0.85	0.85	0.01	0.04	0.28	-0.84	0.84	No aceptable
PM7080	0.84	0.86	0.85	0.01	0.04	0.32	-0.95	0.95	No aceptable
DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS									
PORCENTAJE DE SÓLIDOS									
PVC2000	34.55	35.67	35.11	0.40	2.40	0.47	-1.40	1.40	Aceptable
PM370	34.37	35.56	34.97	0.42	2.54	0.47	-1.40	1.40	Aceptable
PM1001	34.45	35.55	35.00	0.41	2.43	0.45	-1.36	1.36	Aceptable
PM7080	34.49	35.50	34.99	0.37	2.21	0.46	-1.38	1.38	Aceptable

TABLA 10 (CONT.)
CAPACIDAD Y RENDIMIENTO (% EFICIENCIA) DEL PROCESO ANTES Y DESPUÉS DE SEIS SIGMA

DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS									
VISCOSIDAD									
PVC2000	4297.55	4308.55	4303.05	3.79	22.74	0.48	1.45	1.45	Acceptable
PM370	4296.24	4309.86	4303.05	4.57	27.42	0.50	-1.49	1.49	Acceptable
PM1001	4294.01	4308.03	4301.02	5.19	31.14	0.45	-1.35	1.35	Acceptable
PM7080	4294.21	4309.37	4301.79	5.23	31.38	0.48	-1.45	1.45	Acceptable
DENSIDAD									
PVC2000	0.84	0.85	0.85	0.00	0.02	0.44	-1.33	1.33	Acceptable
PM370	0.84	0.85	0.85	0.00	0.02	0.44	-1.31	1.31	Acceptable
PM1001	0.84	0.85	0.85	0.00	0.02	0.49	-1.46	1.46	Acceptable
PM7080	0.84	0.85	0.85	0.00	0.02	0.49	-1.47	1.47	Acceptable
RENDIMIENTO									
ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS									
PROPIEDAD	PORCENTAJE DE SÓLIDOS		VISCOSIDAD		DENSIDAD				
Producto	Datos incorrectos	Eficiencia (%)	Datos incorrectos	Eficiencia (%)	Datos incorrectos	Eficiencia (%)			
PVC2000	112	62.10	122	67.62	117	64.86			
PM370	109	60.72	120	66.93	106	58.65			
PM1001	114	63.48	123	68.31	104	57.96			
PM7080	108	60.03	118	65.55	118	65.55			
Promedio	111	61.58	121	67.10	111	61.76			
DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS									
PROPIEDAD	PORCENTAJE DE SÓLIDOS		VISCOSIDAD		DENSIDAD				
Producto	Datos incorrectos	Eficiencia (%)	Datos incorrectos	Eficiencia (%)	Datos incorrectos	Eficiencia (%)			
PVC2000	167	92.89	162	90.21	149	82.74			
PM370	157	87.10	167	92.70	147	81.50			
PM1001	152	84.61	151	83.99	163	90.83			
PM7080	155	85.85	162	90.21	165	91.45			
Promedio	158	87.61	161	89.28	156	86.63			

Los resultados de la [Tabla 9](#) confirman la reducción significativa en la desviación estándar de las tres propiedades analizadas. Por lo tanto, las nuevas distribuciones ajustadas del proceso productivo permiten hacer inferencias estadísticamente representativas para un nivel de significancia del 95 %. En consecuencia, las funciones de densidad de probabilidad de las tres propiedades correspondientes denotan un nuevo ajuste lineal con mayor robusticidad, sujeto a los citados parámetros, para los cuatro tipos de adhesivos de calzado bajo estudio.

FASE 5: CONTROLAR

En resumen, después de definir el problema y las variables críticas, medir las capacidades del proceso, analizar

la información e identificar la causa raíz y mejorar de forma significativa el desempeño mostrado, fue necesario controlar y sostener la nueva proporción de defectos en el mediano y largo plazo, con el objeto de asegurar su nuevo comportamiento. Ante ello, la implementación tanto de las 5S y la filosofía Kaizen como del plan de control (alrededor de la toma correcta de muestra) posibilitaron la mejora continua mediante la elaboración de las gráficas de control (histogramas y gráficas de dispersión), al delimitar un esquema de seguimiento de mejoras sobre el grado de variabilidad en las propiedades analizadas.

De mantenerse los citados valores se tendría certidumbre sobre las contribuciones específicas realizadas al

proceso, pero en caso contrario, habría que reiniciar el método DMAIC de acuerdo con la lógica de mejora continua tipo Kaizen para regresar el proceso productivo a los citados parámetros adecuados (identificados y estimados de manera previa) y, posteriormente, verificar su cumplimiento de forma continua, constante e indefinida. Además, al repetir el ciclo anterior, se contribuye a enriquecer el control estadístico del proceso.

Así las cosas, en la [Tabla 10](#) se observa que, de forma general, en los tres casos el proceso transita de niveles inferiores a 2 sigmas a métricas cercanas a las 3 sigmas, especialmente en lo referente a la viscosidad y la densidad, cuyas respectivas desviaciones estándar se contraen en promedio alrededor de 50 % para los cuatro adhesivos bajo estudio. A su vez, en la citada tabla se evidencia cómo la gran mayoría de las estimaciones para las citadas tres propiedades presentes en los adhesivos del calzado examinados se encuentran dentro de los parámetros de control, lo cual implica una nueva métrica sigma cercana a 3 en promedio para, prácticamente, todos los casos analizados.

Así, al eliminar la variabilidad se especifican los nuevos límites de control para cada parte del proceso, el cual mejoró en las recuperaciones aun cuando se trabajó en los valores medios. En promedio, su eficiencia general transita del rango de 57 a 68 % hasta los márgenes de 81 a 92 % para los cuatro adhesivos analizados y, en consecuencia, la capacidad real del proceso se traduce en cifras superiores a uno en todos los casos ([Tabla 10](#) y Ecuación (2)). Finalmente, el cabal seguimiento de las mejoras implementadas a través del control estadístico de la operación permite cumplir con el plan de calidad tipo Kaizen.

En este escenario, los resultados se encuentran en línea con lo obtenido en ^{[11], [42]}, donde se exponen estudios de repetibilidad y reproducibilidad en el sector manufacturero, de acuerdo con el diseño experimental correspondiente, además del uso de la metodología DMAIC, y se logró reducir la variabilidad promedio en más de una cuarta y dos terceras partes, respectivamente.

A su vez, los resultados también se sitúan en la línea de ^{[32], [33]}, donde se mejoró la eficiencia en la capacidad de sus respectivas líneas manufactureras de producción al aplicar la metodología DMAIC – Seis Sigma, y se efficientizó el proceso en más de tres y dos cuartas partes, respectivamente. Ambos enfoques inciden sobre la

satisfacción de la demanda y la utilización eficiente de los recursos disponibles, ya que los índices de capacidad del proceso mejoran de forma general al reducirse significativamente los errores cometidos por el personal.

En la misma línea, los resultados en ^[41] respecto a las mejoras en la productividad del sistema manufacturero coinciden con los reportados por el presente trabajo, mismos que se sitúan alrededor de 25 % de mejoría en cuanto a la eficiencia general del proceso se refiere. Si bien en aplicaciones manufactureras, en ^[35] se han señalado métricas sigmas cercanas a 3 como aceptables, lo cual se repite en el presente estudio, otros trabajos ^{[34], [25]} señalan la necesidad de mejorar dicha métrica como mínimo a 4.5 para sostener dichos beneficios en el tiempo, así como no dejar de lado la vulnerabilidad de la propiedad elegida para medir la calidad.

RELEVANCIA DE SEIS SIGMA EN LA INDUSTRIA QUÍMICA

Si bien la manufactura ligera y pesada ^[55] (debido al grado de intensidad de los sucesivos procesos productivos de transformación de materia prima involucrados) se encuentra relacionada con la industria química en mayor o menor grado como ofertante o demandante de insumos y/o productos intermedios o finales. En términos estrictos, el núcleo de la industria química se sitúa al interior del subsector denominado fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón, industria química, industria del plástico y del hule, de acuerdo con el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) ^[55].⁷

En dicha industria, ante los reducidos márgenes de utilidad debido a la creciente competencia, la rentabilidad de los productos de química fina ^[56] (industria farmacéutica y cosmética, fabricación de pigmentos, colorantes, llantas, plásticos térmicos, resinas y adhesivos, entre otras) ha provocado un interés constante en los procesos discontinuos como resultado de los volúmenes de producción comparativamente reducidos y la maximización de la rentabilidad de las inversiones a través de la elaboración consecutiva o simultánea de diversos pro-

⁷ Dicho subsector se integra por diez ramas de actividad económica: 1) fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón; 2) productos químicos básicos; 3) resinas y hules sintéticos, y fibras químicas; 4) fertilizantes, pesticidas y otros agroquímicos; 5) productos farmacéuticos; 6) pinturas, recubrimientos y adhesivos; 7) jabones, limpiadores y preparaciones de tocador; 8) otros productos químicos; 9) productos de plástico; y 10) productos de hule ^[55].

ductos, al flexibilizar las líneas de producción y reducir el ciclo de vida del diseño de los productos ^[46].

Así, al introducir etapas discontinuas durante los procesos de reacción, mezcla y separación, entre otros, e intercalarlas entre etapas continuas de fácil control (movimiento de materiales, calentamientos o enfriamientos, etc.), se incrementa la versatilidad de las plantas multiproducto, herramienta de gran relevancia tanto en situaciones económicas de incertidumbre sobre la demanda como para eficientizar la atención al cliente sin descuidar la calidad del producto ^[46].

En virtud de lo anterior, las plantas discontinuas pertenecientes a la industria de química fina, como es el caso de la fabricación de adhesivos y acabados para la piel (pigmentos y resinas), se encuentran en línea con la generación de productos con alto valor añadido y uso intensivo del factor tecnológico, baja demanda, procesos de síntesis complicados y/o líneas de producción flexibles, que son condiciones presentes dentro (industria farmacéutica y petroquímica) y fuera (industria alimentaria y de las bebidas e industria textil y de la madera) del ámbito de la industria química en general ^[46].

Bajo dicho escenario, el conjunto de herramientas estadísticas empleadas en la Manufactura Delgada y Seis Sigma se concibe como un instrumento funcional para la optimización de los procesos de producción en términos de su simplicidad, versatilidad y rendimiento, especialmente, en el caso de las plantas multiproducto con procesos discontinuos correspondientes a la industria de química fina. De acuerdo con ^[56], al involucrar etapas de extracción, síntesis y purificación, además de utilizar subproductos no deseados de otras actividades económicas y permitir la integración vertical de su producción dado el bajo coeficiente de importaciones de su materia prima, dichas industrias se consolidan como demandantes de insumos intermedios de origen local, lo cual refuerza sus encadenamientos productivos hacia atrás al interior del tejido productivo y, consecuentemente, estimula el desarrollo de proveedurías locales que determinan el tamaño tanto de los establecimientos como de la industria de química fina con estándares de calidad.

En estas circunstancias, el potencial de los márgenes de utilidad presentes en estas actividades se incrementa al reducir sus costos de producción e incrementar sus rendimientos mediante la implementación de las

citadas herramientas estadísticas pertenecientes a la Manufactura Delgada. Si bien cada proceso químico de carácter industrial tiene sus particularidades, principalmente en función de las características de la materia prima, la tipología, magnitud y seriación de los procesos fisicoquímicos empleados y las especificaciones de los productos finales, existe una oferta de insumos locales escasamente procesados para ser industrializados, especialmente en países abundantes en recursos minerales, así como una derrama de conocimiento acumulado (de libre acceso) respecto a la producción y demanda del producto, componentes necesarios para impulsar su gestión productiva y comercial ^[56].

En el caso de México, las actividades económicas correspondientes a la fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón, industrias química, del plástico y del hule, representan el 3.19 % de la economía nacional (Producto Interno Bruto), mismas que han vuelto a incrementar su presencia en el territorio durante el último lustro de manera constante (a partir de un valor de 2.94 % en 2018), y han sostenido una tasa media de crecimiento promedio de la producción de 5.04 % durante los últimos tres años de información oficial (2020-2022), lo cual sitúa al sector en una dinámica de recuperación económica pospandemia superior a la de la economía nacional (3.08 %) ^[57].

En el caso de las MIPYME manufactureras de corte químico, en países con dichas características, en donde, como se mencionó de forma previa, Seis Sigma reduce la variabilidad del producto final, especialmente en los procesos discontinuos de la industria química fina, cabe reiterar lo reportado en ^[35] para Colombia, donde se mejoró el rendimiento y la calidad en la fabricación de garrafas en la empresa Colfoplas mediante la implementación de estrategias Lean Seis Sigma, entre ellas el seguimiento de métricas mediante cartas de control y un tablero de indicadores (*dashboard*, por su anglicismo) y se impulsó la estandarización del proceso y su métrica operacional. Particularmente, además de generar diagramas de SIPOC, Pareto e Ishikawa y aplicar el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP, por sus siglas en inglés) a través de la metodología 5S y la creación de formatos para la recopilación de frecuencias de anomalías, estimaron indicadores acerca del grado de calidad de los productos elaborados y la disponibilidad y el rendimiento de los equipos con el objeto de estimar la Efectividad General del Equipo (OEE, por sus siglas en inglés), factor clave junto con el error humano de muestreo y ma-

nejo de los insumos de producción que incide sobre la capacidad estadística de los procesos.

Por ejemplo, en Cuba ^[42] se aplicó la metodología Seis Sigma durante la hidrogenación discontinua de diésel en la industria petroquímica, con la finalidad de examinar los estudios de R & R de la medida (porcentaje de azufre) a partir del diseño experimental. Además, de determinó el coeficiente de variación presente en los ensayos y el número de categorías o frecuencias de anomalías distintas, distinguidas de manera confiable por el sistema de medición. Una vez implementados los ajustes correspondientes por la empresa reportados en la primera corrida, se realizó un segundo ciclo cuya variabilidad fue menor en más de dos terceras partes.

En Ecuador, en ^[58] se presentaron los resultados de mejora en la productividad de la fabricación del alga espirulina, a partir del empleo de Seis Sigma en los procesos productivos con biorreactores. Además de identificar variables físicas y químicas que influyen directamente en la productividad y probar y escalar distintos medios de cultivo para su producción industrial, se controló la incorporación de carbono a través de la regulación del potencial de hidrógeno (pH) y se lograron mejoras en la productividad cercanas al 66 % sin comprometer los márgenes de calidad del producto final.

Finalmente, en ^[11] se menciona que, si bien existen diferentes herramientas para la optimización de la calidad en los sistemas de producción, Lean Seis Sigma ha centrado la atención en los últimos años por la eficiencia y la magnitud de sus resultados y, en este sentido, la industria química mexicana no es la excepción. Así, se orientó el enfoque hacia la fabricación de paneles modulares para la construcción con el propósito de reducir los desperdicios y se identificaron tanto las variables críticas como las mejores herramientas para optimizar y controlar el proceso, incrementando la confiabilidad de este (de 81 a 98 %) con los estudios de R&R y las mejoras aplicadas y estableciendo nuevos parámetros para las principales frecuencias de anomalías a través del uso de programas de simulación en el diseño de experimentos, los cuales reducen en dos terceras partes la incidencia de defectos medida en DPMO.

IV. CONCLUSIONES

Ante la creciente escalada de economías abiertas y libre mercado, las corporaciones deben continuar el im-

pulso constante de sus estándares de calidad debido al aumento de la competencia a consecuencia de la deslocalización de los factores de producción. La estrategia Seis Sigma incluye el uso de herramientas estadísticas dentro de una metodología estructurada incrementando el conocimiento necesario para lograr de una mejor manera, más rápido y al más bajo costo, productos y servicios más competitivos. La metodología Seis Sigma involucra una medida, para determinar el grado en que los diferentes procesos alcanzan sus metas, además de ofrecer una gran variedad de estrategias para realizar las mejoras correspondientes.

Aunque cada empresa tiene sus necesidades particulares, la metodología Seis Sigma se puede adaptar a cualquier tipo de organización y en este trabajo se aborda su aplicación general en una industria manufacturera mexicana, como es el caso de la manufactura de adhesivos y calzados para la piel, con la finalidad de impactar en la calidad de los productos elaborados, mismo que resalta además por su carácter pionero en este tipo específico de actividad económica, de acuerdo con la amplia revisión de la literatura. Además de mostrar con claridad y detalle la secuencia de pasos específicos a seguir para la implementación de este tipo de herramientas de calidad sobre los procesos productivos, el número de pruebas y análisis realizados mediante el seguimiento de las distintas fases de la metodología Seis Sigma permite el control estadístico de los citados procesos bajo estudio y su optimización, así como el incremento simultáneo de la eficiencia y la calidad de los productos manufacturados por la empresa. En consecuencia, se otorga un mejor servicio al cliente mismo que se traduce en beneficios económicos para la firma.

Entre las principales ventajas que tiene esta metodología se encuentran las siguientes: contiene una serie de pasos generales para llevar a cabo la implementación en cualquier tipo de empresa, las herramientas que la conforman pueden ser utilizadas por usuarios de diferentes disciplinas y niveles dentro de la organización y representa un desafío para las empresas que lo llevan a cabo, ya que la meta es alcanzar un nivel de variación mínimo.

Si bien la metodología Seis Sigma contribuye a mejorar la variabilidad en las tres propiedades fisicoquímicas analizadas (porcentaje de sólidos, viscosidad y densidad), los resultados demuestran la certera identificación de la causa raíz del problema, ya que el proceso transita de niveles inferiores a 1.5 sigma a parámetros cercanos a los 3 sig-

ma. En otras palabras, el núcleo del proceso productivo muestra a grandes rasgos un rendimiento adecuado con un porcentaje de defectos aceptable para todos los casos.

No obstante, es necesario realizar un análisis con mayor profundidad tanto en aquellos productos en donde sus propiedades analizadas no alcanzan el nivel de 3 sigma, como en las demás causas raíz del proceso que impiden su acercamiento aun mayor al nivel de 3.4 defectos por millón o Seis Sigma. De acuerdo con la revisión de literatura, en este escenario se vislumbra el uso de herramientas pertenecientes a la simulación de procesos, así como el empleo de técnicas multicriterio, para optimizar aún más, de manera respectiva, el rendimiento del proceso y la toma de decisiones sobre el control estadístico del mismo en el largo plazo, con la finalidad de efficientizar los recursos disponibles y su impacto sobre la calidad de los productos finales elaborados por la firma.

REFERENCIAS

- [1] M. Dubé-Santana, F. Hevia-Lanier, E. Michelena-Fernández, D. Suárez-Ordaz y O. Puerto-Díaz, "Procedimiento de mejora de la cadena inversa utilizando metodología seis sigma", *Ing. Ind.*, vol. 38, n.º 3, pp. 247-256, 2017.
- [2] M. A. Langle, "El Aparato Productivo de Tamaulipas y sus Regiones: Especialización y Encadenamientos", en *Desarrollo Regional y Capital Humano: Estudios de Caso*, M. A. Langle, coord., 1.ª ed., Ciudad de México: Analéctica, 2022, cap. 1, sec. 1, pp. 1-35.
- [3] D. Díaz-Sanchidrian, V. Figueroa-Fernández, J. A. Jiménez-García y S. Hernández-González, "Lean Six Sigma Logistics en una Línea de Producción Tradicional", *Pistas Educativas*, vol. 44, pp. 331-342, 2023.
- [4] O. Celis-Gracia, J. García-Alcaraz y F. Estrada-Orantes, "Metodología basada en Lean Six Sigma para incrementar el nivel sigma de procesos de manufactura", *Mem. Cientif. y Tecnol.*, vol. 2, n.º 1, 2023, pp. 37-39.
- [5] R. C. Garza-Ríos, C. N. González-Sánchez, E. L. Rodríguez-González y C. M. Hernández-Asco, "Aplicación de la metodología DMAIC de Seis Sigma con simulación discreta y técnicas multicriterio", *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 22, pp. 19-35, 2016.
- [6] E. Guilherme-Satolo, L. de Souza-Hiraga, G. Antiqueira-Goes y W. Luiz-Lourenzani, "Lean production in agribusiness organizations: multiple case studies in a developing country", *Int. J. Lean Six Sigma*, vol. 8, n.º 3, pp. 1-30, 2017, doi: [10.1108/IJLSS-03-2016-0012](https://doi.org/10.1108/IJLSS-03-2016-0012).
- [7] P. Reyes-Aguilar, "Manufactura Delgada (Lean) y Seis Sigma en empresas mexicanas: experiencias y reflexiones", *Contaduría y Administración*, n.º 205, pp. 51-69, 2002.
- [8] R. A. Gómez, P. D. Medina y A. A. Correa, "El Seis Sigma en La Cadena de Suministro", *Entre Ciencia e Ingeniería*, año 6, n.º 12, pp. 36-42, 2012.
- [9] F. Bribiescas-Silva, J. A. Hernández-Gómez, E. R. Poblano-Ojinaga, A. Valles-Chávez y S. A. Noriega-Morales, "Factores Críticos del Éxito de Proyectos Seis Sigma y de Manufactura Esbelta", *RIDE*, vol. 13, n.º 26, pp. 1-31, 2023, doi: [10.23913/ride.v13i26.1497](https://doi.org/10.23913/ride.v13i26.1497).
- [10] J. Gamboa-Cruzado, E. Huaraz-Saldaña, C. Gallegos-Herrera, Á. Hernando-Gómez, A. Hidalgo-Sánchez y M. Aquino-Cruz, "Mejora de procesos y su impacto en la entrega de productos en empresas manufactureras: una exhaustiva revisión sistemática", *Apunt. Univ.*, vol. 13, n.º 2, pp. 1-26, 2023, doi: [10.17162/au.v13i2.1418](https://doi.org/10.17162/au.v13i2.1418).
- [11] A. V. Marín-Calderón, M. Valenzuela-Galván, G. Cuamea-Cruz y A. Brau-Ávila, "Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para disminuir desperdicios en una unidad de fabricación de paneles modulares de poliuretano", *Ing. Invest. y Tecnol.*, vol. 34, n.º 1, pp. 1-12, 2023, doi: [10.22201/ii.25940732e.2023.24.1.007](https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2023.24.1.007).
- [12] Asociación Española para la Calidad. "Seis Sigma Black Belt". AEC.es. Accedido: dic. 15, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.aec.es/formacion/catalogo-cursos/seis-sigma-black-belt/>
- [13] A. K. Soto-Aviles, M. F. Piña-Quintero, M. R. Ortiz-Posadas, "Innovación del Proceso de Dispensación de un Servicio de Farmacia Aplicando la Metodología Seis Sigma", en *Memorias del 44º Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica*, 2022, pp. 275-278.
- [14] E. J. Delahoz-Domínguez, T. J. Fontalvo y O. M. Fontalvo, "Evaluación de la calidad del servicio por medio de seis sigma en un centro de atención documental en una universidad", *Formación Universitaria*, vol. 13, n.º 2, pp. 93-102, 2020, doi: [10.4067/S0718-50062020000200093](https://doi.org/10.4067/S0718-50062020000200093).

- [15] A. Mexicano-Santoyo, M. E. Hernández-Hinojosa, J. C. Carmona Frausto, S. Cervantes-Álvarez y P. N. Montes-Dorantes, “Mejora de procesos de laboratorio de mecánica de suelos aplicando herramientas de manufactura esbelta”, *RIDE. Rev. Iberoam. Investig. Desarro. Educ.*, vol. 14, n.º 27, pp. 1-33, 2023, doi: [10.23913/ride.v14i27.1641](https://doi.org/10.23913/ride.v14i27.1641).
- [16] M. Vergel-Ortega y J. J. Martínez-Lozano, “Filosofía gerencial seis sigma en la gestión universitaria”, *FACE*, vol. 15, n.º 2, pp. 99-106, 2015.
- [17] L. Martínez-Hernández, M. C. Martínez-Orencia, R. Rosales-Barrales, V. U. Velasco-Pérez, P. de Aquino-López y V. Jiménez-Franco, “Aplicación de seis sigma en una empresa de mantenimiento industrial para reducir el número de licitaciones incorrectas”, *S. F. J. of Dev.*, vol. 3, n.º 2, pp. 2826-2837, 2022, doi: [10.46932/sfjdv3n2-097](https://doi.org/10.46932/sfjdv3n2-097).
- [18] Z. Enciso-Acuña, “Mejora del cumplimiento de fechas programadas en servicios de calibración aplicando Seis Sigma”, *Industrial Data*, vol. 23, n.º 1, pp. 143-164, 2020, doi: [10.15381/idata.v23i1.16666](https://doi.org/10.15381/idata.v23i1.16666).
- [19] E. Delahoz-Domínguez, R. Zuluaga-Ortiz, A. Periñan-Luna y S. Mendoza-Brand, “Un enfoque de Seis Sigma para evaluar la calidad de la educación superior en Colombia”, *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 33, pp. 386-407, 2022, doi: [10.46661/revmetodoscuanteconempresa.5313](https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.5313).
- [20] L. E. Vargas-Ortiz, M. S. Carrillo-Landazabal, M. I. Narváez-Escorcia, J. C. Vitola-Cabarcas y C. A. Severiche-Sierra, “Reducción de cancelaciones de cirugías programadas en IPS a través de la metodología DMAIC de Lean Six Sigma”, *Ingenierías USBMed*, vol. 14, n.º 2, pp. 23-32, 2023, doi: [10.21500/20275846.5819](https://doi.org/10.21500/20275846.5819).
- [21] Y. S. Ochoa-Corona, I. Ruiz-Arroyo, U. Martínez-Rodríguez y O. F. Ramos-Ochoa, “Disminución del tiempo de respuesta vía telefónica a clientes y distribuidores de empresa desarrolladora de software para equipos de medición aplicando la metodología Seis Sigma”, *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo*, vol. 1, n.º 9, pp. 91-96, 2023.
- [22] R. Pérez-Campdesuñer, G. García-Vidal, A. Sánchez-Rodríguez y I. E. Campdesuñer-Almaguer, “La satisfacción de clientes en el sector turístico: metodología seis sigma”, *Ciencias Holguín*, vol. 24, n.º 1, pp. 1-14, 2018.
- [23] W. A. Lino-Villacreses, L. A. Lino-Villacreses y J. H. Guaman-Guanca, “Lean Seis-Sigma y su importancia en la mejora continua de la calidad en el laboratorio clínico”, *Multidisciplinary Health Educ. J.*, vol. 5, n.º 3, pp. 571-581, 2023.
- [24] M. Moro-Agud, M. A. González-Fernández, F. Moreno-Ramos, I. Jiménez-Nácher, M. de Sebastián-Rueda y A. Herrero-Ambrosio, “Aplicación de Lean Seis Sigma en la mejora de la calidad del proceso de atención farmacéutica a pacientes externos”, *Revista de la OFIL*, vol. 26, n.º 2, pp. 87-93, 2016.
- [25] S. M. Carchio, A. C. Cappella, C. Goedelmann, M. Pandolfo y D. Bustos, “Aplicación de Seis Sigma en el Laboratorio Clínico”, *Acta Bioquím Clín Latinoam*, vol. 53, n.º 4, pp. 525-537, 2019.
- [26] B. A. Esparza, F. Ricárdez e I. E. Garduño, “Reducción de defectos en una de línea de montaje de arneses eléctricos automotrices aplicando manufactura esbelta”, *AvaCient*, vol. 2, n.º 2, pp. 24-39, 2023.
- [27] R. G. González, S. J. León, C. G. Ortega y D. B. Parra, “Método de mejora para incrementar la productividad en la industria maquiladora del vestido en base a la herramienta PHVA, DMAIC, Lean y Six sigma”, *LATAM*, vol. 4, n.º 1, pp. 2181-2202, 2023, doi: [10.56712/latam.v4i1.407](https://doi.org/10.56712/latam.v4i1.407).
- [28] J. Varela-Pérez, A. G. López-Ortega, A. Franco-Camargo y B. Y. García-Morales, “Aplicación de la metodología DMAIC para mejorar el proceso de fabricación de reguladores en la industria automotriz”, *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, n.º 1, pp. 3885-3902, 2023, doi: [10.37811/cl_rcm.v7i1.4699](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4699).
- [29] G. Vázquez-Silva, L. A. Rodríguez-Picón y R. Romero-López, “Implementación de metodología Seis Sigma para la solución de bolas de soldadura en tablillas electrónicas”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 19, n.º 3, pp. 41-54, 2022, doi: [10.20983/culcyt.2022.3.2.4](https://doi.org/10.20983/culcyt.2022.3.2.4).
- [30] J. Tolamatl-Michcol, D. Gallardo-García, J. A. Varela-Loyola y E. Flores-Ávila, “Aplicación de Seis Sigma en una Microempresa del Ramo Automotriz”, *Conciencia Tecnológica*, n.º 42, pp. 11-18, 2011.
- [31] S. Ramos-Lara, “Optimización del Análisis de Falla de Tarjetas Electrónicas con Seis Sigma”, *Conciencia Tecnológica*, n.º 57, pp. 1-24, 2019.

- [32] E. Pérez-López y M. García-Cerdas, “Implementación de la metodología DMAIC-Seis Sigma en el envasado de licores en Fanal”, *TM*, vol. 27, n.º 3, pp. 88-106, 2014.
- [33] N. Caicedo-Solano, “Aplicación de un programa seis sigma para la mejora de calidad en una empresa de confecciones”, *Prospect*, vol. 9, n.º 2, pp. 65-74, 2011.
- [34] R. M. Carrera, “Mejoramiento del proceso de producción de losas alveolares bajo metodología Lean Six Sigma en la empresa pública cementera EPCE”, *Novasinerгия*, vol. 2, n.º 2, pp. 94-103, 2019, doi: [10.37135/unach.ns.001.04.10](https://doi.org/10.37135/unach.ns.001.04.10).
- [35] A. J. Chinomey A. D. Torres, “Propuesta para la reducción de desperdicios en el proceso de garrafas en la empresa Colfoplas S.A. utilizando la metodología Lean Seis Sigma”, tesis de licenciatura, Fac. de Ing., Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, 2020.
- [36] R. García-González, J. A. Paredes-Castañeda y E. Bayona-Ibáñez, “DMAIC como herramienta para implementar un sistema de mejora para incrementar la productividad en la industria del sombrero”, *Rev. Ingenio*, vol. 20, n.º 1, pp. 8-15, 2023, doi: [10.22463/2011642X.3371](https://doi.org/10.22463/2011642X.3371).
- [37] J. R. Martínez, E. García y C. E. Carlos, “Efecto de Seis Sigma en el Almacén de una Empresa Manufacturera”, *Conciencia Tecnológica*, n.º 58, pp. 1-19, 2019.
- [38] I. G. Pérez-Vergara y J. A. Rojas-López, “Lean, Seis Sigma y Herramientas Cuantitativas: Una Experiencia Real en el Mejoramiento Productivo de Procesos de la Industria Gráfica en Colombia”, *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 27, pp. 259-284, 2019, doi: [10.46661/revmetodoscuanteconomia.3218](https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconomia.3218).
- [39] I. Estrada, “Gestión de proyectos distribuidos de introducción de tarjetas electrónicas a la manufactura a través de un sistema de comunicación”, tesis de maestría, Fac. de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, 2016.
- [40] R. E. Roque-Saavedra, “Reducción del producto no conforme en el proceso de manufactura aplicando el ciclo de Deming en una planta textil ubicada en Puente Piedra”, tesis de licenciatura, Fac. de Ing. Ind., Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2023.
- [41] M. J. Rodríguez, “Propuesta de mejora en los procesos de producción de cerveza artesanal”, tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2023.
- [42] A. Barrera-García, A. Cambra-Díaz y J. A. González-González, “Implementación de la metodología seis sigma en la gestión de las mediciones”, *Universidad y Sociedad*, vol. 9, n.º 2, pp. 8-17, 2017.
- [43] A. S. Albayatey, “Critical Success Factors for Applying Six Sigma in Transformative Industries in Iraq”, *Int. J. Prof. Bus. Rev.*, vol. 8, n.º 6, pp. 1-15, 2023, doi: [10.26668/businessreview/2023.v8i6.1917](https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i6.1917).
- [44] D. Montiel, G. E. Anaya y S. B. Ramírez, “Proceso para la toma de decisiones en la fase de definición de la metodología seis sigma”, *Ciencia Latina*, vol. 7, n.º 1, pp. 9121-9136, 2023, doi: [10.37811/cl_rcm.v7i1.5040](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5040).
- [45] R. García, P. Parroquin, R. Romero, R. Molina, I. Canales y A. Garza, “Reducción de costos en pequeñas y medianas empresas con un enfoque Seis Sigma: Revisión de Literatura”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 12, n.º 57, pp. 352-361, 2015.
- [46] A. Espuña, “Contribución al estudio de plantas químicas multiproducto de proceso discontinuo”, tesis de doctorado, Depto. de Ing. Quím., Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 1994.
- [47] M. A. Martínez y J. Morales, *Lean Seis Sigma para la mejora de procesos*, Alicante, España: Universitas Miguel Hernández, 2022.
- [48] J. Irurita, “Sistemas de gestión de la calidad”, tesis de licenciatura, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España, 2012.
- [49] M. Bahena y P. Reyes, *Curso de Seis Sigma*, Ciudad de México: Universidad Iberoamericana, 2006.
- [50] J. Turner, *Lean Six Sigma: the Ultimate Beginner's Guide to Learn Lean Six Sigma Step by Step*, Los Ángeles, EUA: Publishing Factory LLC, 2019.
- [51] Editorial Etecé. “Diagrama de Ishikawa”. concepto. de. Accedido: dic. 10, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/diagrama-de-ishikawa/>

- [52] “Ejemplos del diagrama de Pareto - Ejercicios resueltos del análisis de Pareto”. *plandemejora.com*. Accedido: ag. 11, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.plandemejora.com/ejemplos-del-diagrama-de-pareto/>
- [53] J. M. Wooldridge, *Introducción a la Econometría: un Enfoque Moderno*, 4.ª ed. Ciudad de México: Cengage Learning Editores, 2010.
- [54] J. F. Hair Jr., R. P. Bush y D. J. Ortinau, *Marketing Research: In a Digital Information Environment*, Washington, D. C., EUA: McGraw Hill, 2000.
- [55] INEGI, *Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte, México 2018, SCIAN México 2018 - Clasificación Industrial Internacional Uniforme Rev. 4*, Aguascalientes, México: INEGI, 2019.
- [56] J. Hernández, *La química fina: las empresas y sus principales características*, Montevideo, Uruguay: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 1991.
- [57] INEGI, “Producto Interno Bruto por Entidad Federativa”, *INEGI.org.mx*. Accedido: ag. 10, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/pibent/2018/>.
- [58] D. Freire, O. Flor y G. Álvarez, “Metodología Seis Sigma en el Incremento de Producción de Spirulina”, *Revista Minerva de Investigación Científica*, vol. 1, n.º 1, pp. 24-31, 2020, doi: [10.47460/minerva.V1i1.3](https://doi.org/10.47460/minerva.V1i1.3).

Dynamical behavior and control strategy of a dengue epidemic model

Comportamiento dinámico y estrategia de control de un modelo de epidemia de dengue

Laura Valentina Bocanegra-Villegas¹  , Cuauhtémoc Sánchez-Ramírez¹ , Sandra Usaquén-Perilla² 

¹Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México

²Universidad del Valle, Cali, Colombia; Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia

RESUMEN

Aedes mosquitoes, specifically the *Aedes aegypti* or *albopictus* species, has the potential of transmitting illness such as Zika, Dengue, Chikungunya, and Yellow Fever. The movement of people and increasing population density have led to the emergence of diseases such as dengue, which have become a major global health problem in recent years. Developers of vector control campaigns and medical professionals are currently investigating methods to anticipate the dengue outbreak's apex and to identify the factors that influence the climate to the expansion of mosquito populations. The primary variables that have been identified are weather, precipitation, temperature, and epidemiological week. The initial phase of an investigation is the model that is designed to create an instrument that can simulate dengue outbreaks using system dynamics methodology. This instrument will function as a foundation for the forecasting of dengue transmission.

KEYWORDS: System Dynamics (SD); conceptual model; dengue virus; mosquito control.

ABSTRACT

Los mosquitos *Aedes*, específicamente la especie *Aedes aegypti* o *albopictus*, tienen el potencial de transmitir enfermedades como el Zika, el dengue, el Chikungunya y la fiebre amarilla. El movimiento de personas y el aumento de la densidad de población han llevado al surgimiento de enfermedades como el dengue, que se han convertido en un problema de salud mundial importante en los últimos años. Los desarrolladores de campañas de control de vectores y los profesionales médicos están investigando métodos para anticipar el apogeo del brote de dengue e identificar los factores que influyen en el clima para la expansión de las poblaciones de mosquitos. Las variables primarias que se han identificado son el tiempo, la precipitación, la temperatura y la semana epidemiológica. La fase inicial de una investigación es el modelo que está diseñado para crear un instrumento que puede simular brotes de dengue utilizando la metodología de dinámica del sistema. Este instrumento servirá de base para la predicción de la transmisión del dengue.

PALABRAS CLAVE: Dinámica de Sistemas (DS); modelo conceptual; virus del dengue; control de mosquitos.

Corresponding author:

NAME: Laura Valentina Bocanegra-Villegas

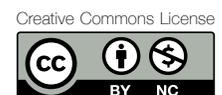
INSTITUTION: Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Orizaba

ADDRESS: Avenida Oriente 9 núm. 852, col. Emiliano Zapata, C. P. 94320, Orizaba, Veracruz, México

E-MAIL: lauva129@gmail.com

Received: 28 March 2024. Accepted: 5 September 2024.

Published: 13 September 2024.



I. INTRODUCTION

The *Aedes aegypti* mosquito goes through four stages throughout its life cycle, which are as follows: egg, larval, chrysalis, and adult [1]. These organisms are capable of inhabiting metropolitan regions at altitudes lower than approximately 1.367 miles above sea level. They deposit their eggs cells in sanitary water reservoirs such as swimming pools, vases, aquatic plants, tires, and outdoor containers that can hold water [2], [3].

Research on the flight range of most females suggests that most insects choose to remain throughout their lives in or near the houses where they were born. On average, they usually fly approximately 400 meters [4], [5].

Dengue is prevalent in areas where more than fifty percent of the world's human population resides, resulting in its rapid spread. The disease has a mortality rate of over 2% per year and is present in more than one hundred nations [2], [6].

In humans, the illness is caused by the bite of a female vector infected with the virus, the most common species being *Aedes aegypti*. Following an incubation period of 4 to 10 days, a mosquito infected with the virus can transmit it throughout its life. Mosquitoes typically acquire the illness by feasting on the blood of infected individuals, whether they show symptoms. Humans are the exclusive source of the virus for unaffected mosquitoes [7].

In the years before 1970, severe dengue epidemics were limited to only nine nations. Today, however, dengue is prevalent in more than 100 countries in the World Health Organization (WHO) regions. These nations account for nearly 70% of the total global burden of disease caused by dengue. Every year, an estimated 390 million dengue infections occur, with 96 million of them presenting clinically, approximately 70% of the global disease burden is localized in Asia, while America, Southeast Asia, and Western Pacific regions are the most severely afflicted [8].

There is a 122% increase in the Americas between 2021 and 2022, and a 23% increase between 2022 and 2023, the year in which the highest number of dengue cases was recorded. There were 4.5 million cases in the WHO Americas region, of which 2,300 of them were fatal. A significant number of cases were registered in Asia, spe-

cifically in Bangladesh (321 000), Malaysia (111 400), Thailand (150 000), and Vietnam (369 000). Figure 1 illustrates the chronological evolution of dengue cases and fatalities (a), the incidence of dengue by country in Latin America until 2022 (b), and the incidence of dengue deaths in Latin America until 2022 (c) [9]. The data is entered into the Health Information Platform for the Americas (PLISA, PAHO/WHO). The utilization of tools that simplify the processing of patient estimates simplifies the development of public policies for vector control, allows the evaluation of economic impact, assists in the formulation of health policies within the Health Institution and prepares for the provision of technology, availability of laboratory tests and human resources for the population. Figure 1b illustrates the progression of the disease in Latin America.

The annual costs for outpatient and fatal cases of dengue amounted to US\$ 54 million and US\$ 8 million, respectively, while the expenditure related to hospitalized patients was US\$ 25 million. The economic burden of dengue is substantial and impacts health systems and economies worldwide. Furthermore, the expenses associated with monitoring and controlling vectors contribute to 48.9 of the whole economic burden that dengue has by country, which amounts to US\$ 83 million yearly [10]. The projected average annual expenditure on pesticide products per family was US\$ 31 million [11]. Nevertheless, vector management only achieves partial success in decreasing the impact of dengue sickness, which emphasizes the need of preventive [6]. In 2015, the expense of dengue in eighteen nations resulted in US\$ 3.3 billion in Purchasing Power Parity. This confirms that the economic burden of dengue is significant in countries with shared socioeconomic characteristics and health systems [11].

The results of a technology surveillance that was carried out using the keywords “dengue” and “simulation” in the databases ScienceDirect, Scopus, Web of Science, and IEEE, which were published between the years 1993-2023, are displayed in Figure 2. The study identified a total of 1.360 articles; 132 were excluded because they were duplicates, 190 items were excluded because they did not meet the inclusion criteria by referring to aspects of patient care and treatment or mosquito ecology.

A total of 48 full-text articles were evaluated; 11 of them were found to use system dynamics, the same technique that was suggested because it allows the underlying

causes of the system to be analyzed and understood, examining various scenarios without affecting the actual system. However, this research used only seven of the 48 articles evaluated as references, since they allowed the identification of the critical variables necessary for the creation of a causal diagram.

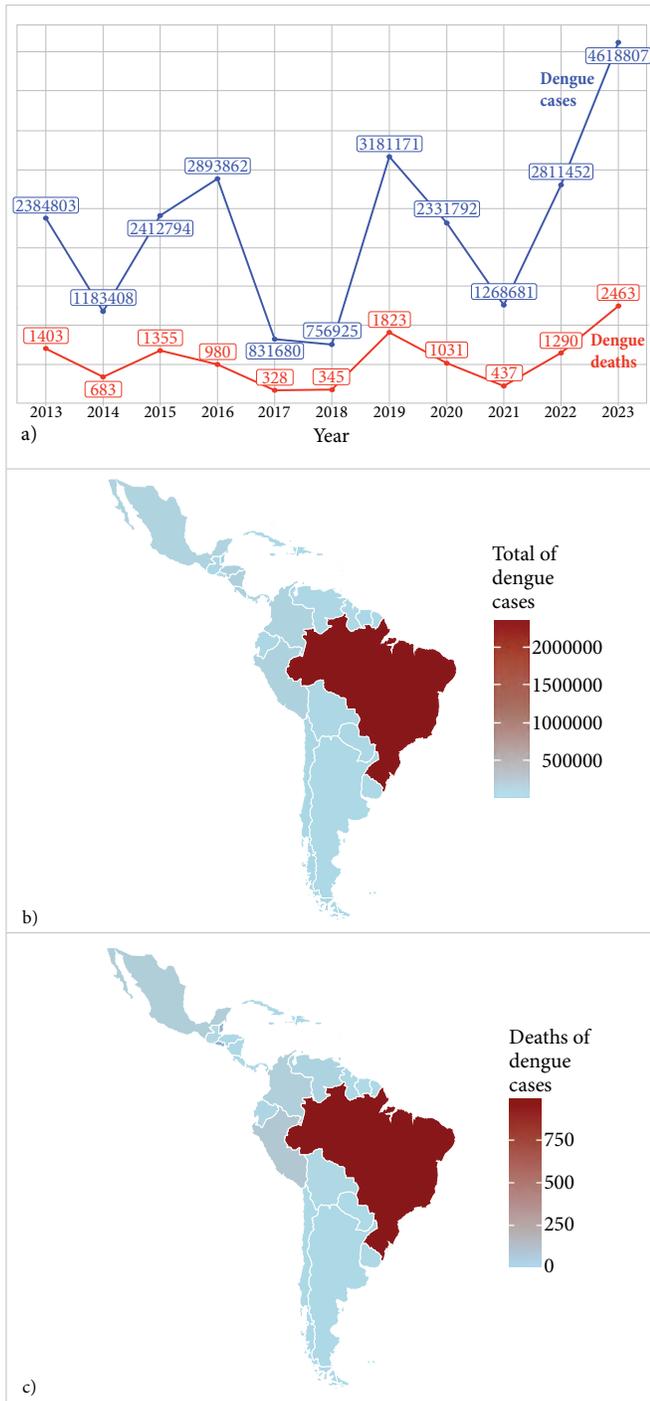


Figure 1. Total cases of dengue in Latin America by 2023: a) dengue cases and lethality over time, b) dengue incidence by country, and c) deaths by country. Source: PAHO/WHO.

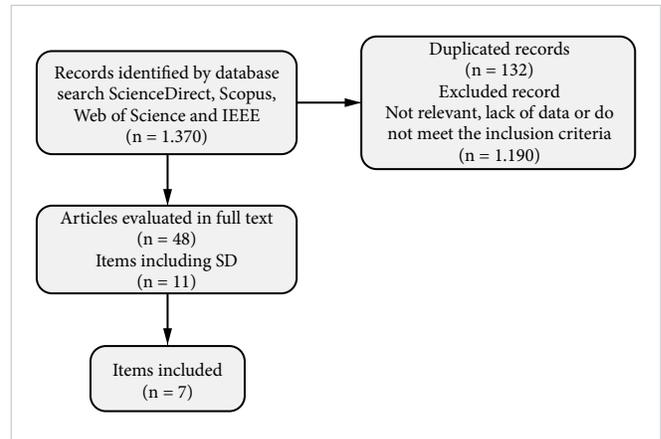


Figure 2. The results of a technology surveillance.

Various models of infectious disease transmission, including *Aedes aegypti* mosquitoes, have been identified. Among them, five papers have been recognized for their notable authors and citation impact. One such publication is an agent-based model that assesses the efficacy of dengue vaccine campaigns in Yucatan, Mexico [12]. *Wolbachia*-based mosquito control approaches offer a promising solution, with lower fitness costs and fewer ethical concerns in comparison to alternative genetic modification techniques [13]. The cost-effectiveness of the dengue vaccination is evaluated using a Markov simulation model that is based on decision analysis [14]. Morin *et al.* [15] analyzes the impact of meteorological factors on the transmission of dengue virus, including the dynamics of transmission, viral replication, and vector mosquito populations.

Figure 3 illustrates the distribution of articles by related to dengue infections by nationality. The main contributors to research are the United States and India. Among the countries of Latin America, Brazil, Colombia, and Mexico have the highest research on the topic and highest prevalence rates (Figure 2).

The model used the seasonality equations from the *Aedes aegypti* mosquito life cycle as a basis [16]. The selection of these equations was based on their ability to examine the influence of temperature and precipitation on eight regions in Mexico, as well as the function of diapause in seasonality growth. Another study [1] was also used to supplement certain parameters that were not fully described in the previous study [16], due to the similarity between the regions being studied and the specificity of the information.

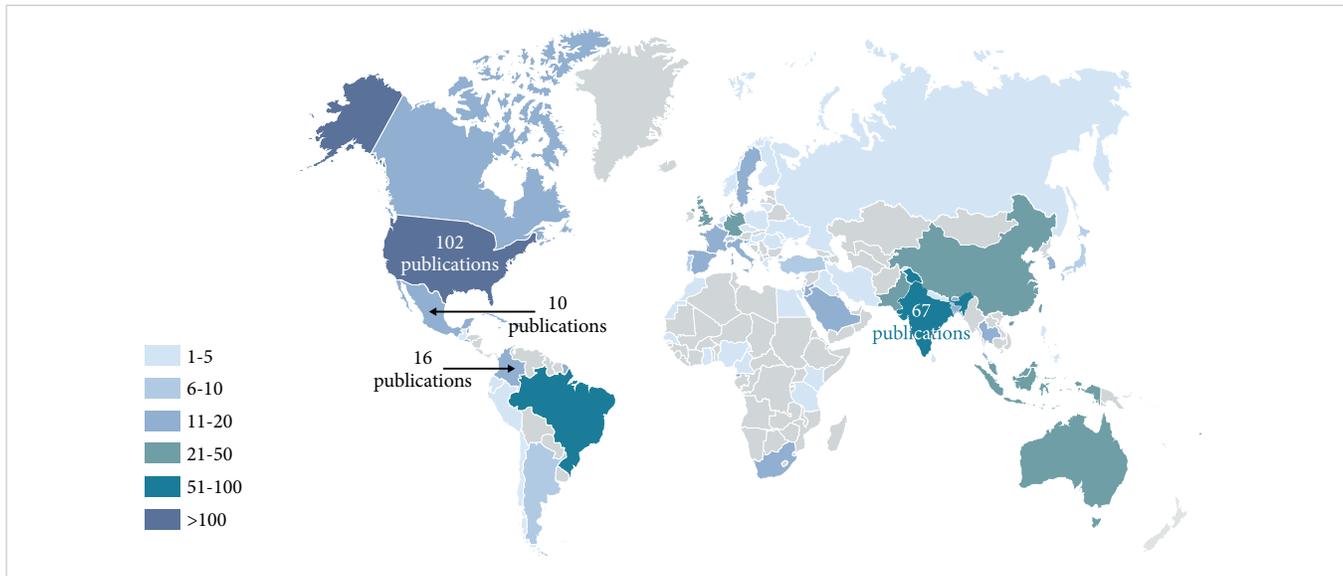


Figure 3. Articles related to dengue prevention or dengue infections by countries since 1993 up to 2023.

II. METHODOLOGY

The progress of studies to model mosquito behavior has been driven by the increasing need to predict and reduce dengue. In this study, the key variables presented in Table 1 that impact the spread of dengue were selected and defined to be included in the causal diagram (Figure 4), following the system dynamics methodology, was used in this study to address the complexity of dengue transmission.

System dynamics (SD) is a model-based approach that enables the understanding and simulation of the behavior of complex systems over time by considering the interactions between various variables and the feedback effects these variables generate. One of its main advantages is its ability to record both the short-term and long-term effects of various interventions [17].

The systemic approach allowed for modeling the complex interactions between factors such as environmental conditions, the number of male and female mosquitoes, larvae, pupae, and eggs, as well as mortality and transition rates at each stage, among others. Using a causal diagram, these relationships were represented to analyze how changes in one variable can influence others over time, allowing for a deeper understanding of epidemic behavior and the formulation of effective intervention strategies.

TABLE 1
 IDENTIFICATION OF VARIABLES FOR CAUSAL DIAGRAM DESIGN

AUTHORS	VARIABLES	DESCRIPTION
[1], [16], [18], [19], [20], [21]	Temperature	The temperature in Orizaba, Veracruz, is measured in Celsius degrees.
	Rainfall	Climate variability influences the seasonal patterns of infectious diseases by impacting the rates at which pathogens are transmitted.
[1], [7], [16], [20], [22]	Predators	Natural mosquito predators' rate.
	Food	Quantity of food that is available.
	Number of eggs	Number of eggs, beginning with one thousand.
	Egg mortality rate	The rate of egg mortality due to natural causes.
	Larvae	Number of larvae starts with zero
	Larvae mortality rate	Death rate of larvae coming from natural sources.
	Pupae	Number of pupae starts with zero.
	Pupae mortality rate	Death rate of pupae coming from natural sources.
[16], [22]	Female mosquitoes	It is estimated that the number of female mosquitoes accounts for 50% of the total population.
	Diapause eggs	Due to the low temperatures, eggs cannot be continuously developing.
	Egg mortality rate in diapause	Egg mortality rate in diapause

III. RESULTS AND DISCUSSION

For the second step, formulation, different mathematical techniques have been found that take into account the seasonality of the life cycle, among which vector modeling, multi-stage regression analysis and analysis stand out [1], [16], [20], [22], [23]. Some authors have used System Dynamics [20], [24] to organize the components and code that are necessary for the Stella® software. For simulating the behavior of temperature and precipitation, accessed information that is open from National Aeronautics and Space Administration (NASA) [25] over the past five years was used, the data were analyzed and with a 95% confidence level the normal distinction is adjusted, normal log, exponential and coordination. The Causal Diagram (Figure 4) was created after the variables were identified, which identifies the primary variables and the feedback circuits that connect them. Although these strategies are not within the scope of the paper, the contextualization of preventive and corrective control methods is highlighted in green color. The stages of the life cycle (egg, larva, pupae and adult) are represented by the red interactions and meteorology (temperature and precipitation).

Here is a description of the loops that are included in the Causal Diagram:

B1: The female mosquito population, the number of eggs, larvae and pupae make up the loop B1. If the number of larvae increases, the female mosquito population will increase, as will all the variables mentioned above. These circumstances are maintained in the absence of temperature fluctuations or control measures.

B2: The B2 loop, reflects the indirect relationship between these variables.

B3: the loop B3 demonstrate how corrective control is affected when vector surveillance and control are reduced.

The analysis of interactions in the causal cycle diagram suggests that temperature and precipitation are significant factors that influence the life cycle, mortality and diapause of mosquitoes. Furthermore, the number of mosquitoes at each stage will have a significant impact, and their future will be in danger if at least one is outside life-friendly values.

The objective of this research is to use system dynamics to simulate the behavior of the mosquito population. To predict the behavior of dengue-transmitting mosquitoes, it is essential to consider the total number of dengue cases per week, temperature, and precipitation. This is an archetype that can be implemented in any country and for any period, if provided with data from the region under study. Thus, the findings of this study have important implications for the public health and economics of dengue-affected communities. By better understanding the dynamics underlying the spread of the disease, public health authorities can design more effective and timely intervention strategies, which could significantly reduce the burden of dengue. In addition, it could have a positive economic impact by reducing the costs associated with medical treatment and lost productivity due to the disease.

In addition, it is important to consider factors such as population mobility and variability in immune response that could influence model projections.

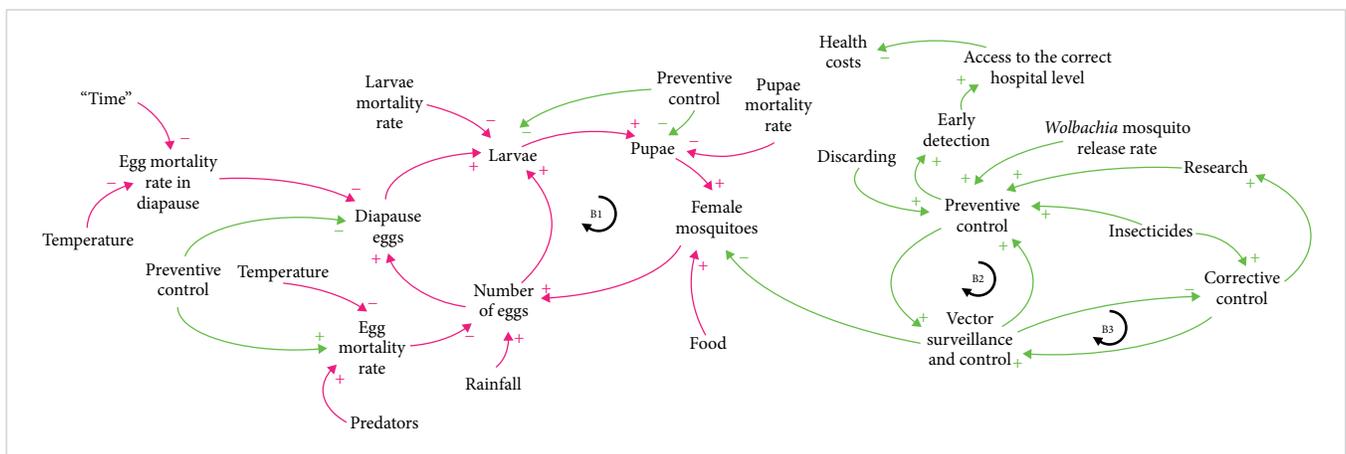


Figure. 4. Causal loop diagram.

IV. CONCLUSIONS

It is very helpful to have a deterministic model when dealing with big populations since it provides a useful tool for understanding the complexities of disease transmission. Deterministic models can help predict future trends and outcomes based on various scenarios, allowing for better decision-making in public health interventions. These models are particularly valuable in guiding resource allocation and response strategies during dengue disease outbreaks.

Through the utilization of a System Dynamics method and a causal loop diagram, this research presents a conceptual model with the objective of dissecting the biological processes that are responsible for mosquito reproduction. Additionally, the mortality rates that are associated with environmental conditions are taken into consideration. To conduct potential evaluations of the dynamics of dengue transmission and the impact of biological, chemical, or mechanical control measures, this model can provide valuable insights into the most effective strategies for controlling mosquito populations and reducing the spread of the disease. By incorporating various factors that impact mosquito reproduction and mortality, decision-makers can make more informed choices when implementing interventions to combat dengue outbreaks.

The life cycle of mosquitoes that transmit dengue is significantly influenced by temperature; at higher temperatures, the complete life cycle is completed more quickly, while at lower temperatures, the cycle is prolonged. The model proposes the identification of a mathematical distribution that explains the behavior of temperature and its influence on dengue transmission.

This model can be further extended to include variables like the stage at which a diagnosis is made, the capacity of the healthcare facility, the length of time that a disease progresses before a patient seeks medical attention, the accessibility of medical supplies, extra diagnostic tools, and vaccine development, to name a few. It is anticipated that this expanded framework will provide a more comprehensive and holistic perspective, as well as provide insights into potential areas for improvement. The importance of this discovery is underscored by ongoing investigations into healthcare procedures and vector control in Latin America. The conceptual model

developed in this study has the potential to elucidate the life cycle of the *Aedes aegypti* mosquito and its correlation with the dengue virus's transmission. It is possible to comprehend the dynamics of dengue transmission and obtain guidance for its control by identifying critical intervention sites, such as the removal of mosquito breeding grounds or the application of insecticides. It also serves as a foundation for additional research on the dynamics of dengue virus transmission and its impact on the economies, healthcare systems, and supply chains of affected countries.

In summary, this conceptual model advances our knowledge of dengue and opens up new avenues for investigating how the disease affects different aspects of society and the environment. This will help with decision-making and lead to the development of more efficient dengue control measures.

REFERENCES

- [1] B. Traoré, O. Koutou, and B. Sangaré, "A global mathematical model of malaria transmission dynamics with structured mosquito population and temperature variations," *Nonlinear Anal Real World Appl*, vol. 53, 103081, 2020, doi: [10.1016/j.nonrwa.2019.103081](https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2019.103081).
- [2] H. Yeo, H. Z. Tan, Q. Tang, T. R. H. Tan, N. Puniamoorthy, and F. E. Rheindt, "Dense residential areas promote gene flow in dengue vector mosquito *Aedes albopictus*," *iScience*, vol. 26, n.º 9, 107577, Sep. 2023, doi: [10.1016/j.isci.2023.107577](https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107577).
- [3] K. D. Rosenberger *et al.*, "Early diagnostic indicators of dengue versus other febrile illnesses in Asia and Latin America (IDAMS study): a multicentre, prospective, observational study," *Lancet Glob Health*, vol. 11, n.º 3, pp. e361–e372, Mar. 2023, doi: [10.1016/S2214-109X\(22\)00514-9](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(22)00514-9).
- [4] I. K. Lee *et al.*, "In-hospital mortality predictors among hospitalized adults and those with chronic kidney disease with dengue," *J Microbiol Immunol Infect*, vol. 56, n.º 5, pp. 996–1006, Oct. 2023, doi: [10.1016/j.jmii.2023.08.004](https://doi.org/10.1016/j.jmii.2023.08.004).
- [5] PAHO/WHO, "Dengue." Accessed: Aug. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.paho.org/en/topics/dengue#info>

- [6] L. M. Schwartz, M. E. Halloran, A. P. Durbin, and I. M. Longini, “The dengue vaccine pipeline: Implications for the future of dengue control,” *Vaccine*, vol. 33, n.º 29, pp. 3293–3298, 2015, doi: [10.1016/j.vaccine.2015.05.010](https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2015.05.010).
- [7] J. Páez Chávez, T. Götz, S. Siegmund, and K. P. Wijaya, “An SIR-Dengue transmission model with seasonal effects and impulsive control,” *Math Biosci*, vol. 289, pp. 29–39, 2017, doi: [10.1016/j.mbs.2017.04.005](https://doi.org/10.1016/j.mbs.2017.04.005).
- [8] OMS, “Dengue and severe dengue.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>
- [9] PAHO/WHO, “National Dengue fever cases.” Accessed: Aug. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www3.paho.org/data/index.php/en/mnu-topics/indicadores-dengue-en/dengue-nacional-en/252-dengue-pais-ano-en.html>
- [10] D. S. Shepard, E. A. Undurraga, Y. A. Halasa, and J. D. Stanaway, “The global economic burden of dengue: a systematic analysis,” *Lancet Infect Dis*, vol. 16, n.º 8, pp. 935–941, 2016, doi: [10.1016/S1473-3099\(16\)00146-8](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(16)00146-8).
- [11] L. N. da Silva Oliveira, A. Itria, and E. C. Lima, “Cost of illness and program of dengue: A systematic review,” *PLoS One*, vol. 14, n.º 2, e0211401, Feb. 2019, doi: [10.1371/JOURNAL.PONE.0211401](https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0211401).
- [12] T. J. Hladish *et al.*, “Projected Impact of Dengue Vaccination in Yucatán, Mexico,” *PLoS Negl Trop Dis*, vol. 10, n.º 5, 2016, doi: [10.1371/journal.pntd.0004661](https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0004661).
- [13] K. Liu and Y. Lou, “A periodic delay differential system for mosquito control with *Wolbachia* incompatible insect technique,” *Nonlinear Anal Real World Appl*, vol. 73, 103867, Oct. 2023, doi: [10.1016/J.NONRWA.2023.103867](https://doi.org/10.1016/J.NONRWA.2023.103867).
- [14] B. Y. Lee *et al.*, “Economic Value of Dengue Vaccine in Thailand,” *Am J Trop Med Hyg*, vol. 84, n.º 5, pp. 764–772, May 2011, doi: [10.4269/AJTMH.2011.10-0624](https://doi.org/10.4269/AJTMH.2011.10-0624).
- [15] C. W. Morin, A. J. Monaghan, M. H. Hayden, R. Barrera, and K. Ernst, “Meteorologically Driven Simulations of Dengue Epidemics in San Juan, PR,” *PLoS Negl Trop Dis*, vol. 9, n.º 8, e0004002, 2015, doi: [10.1371/JOURNAL.PNTD.0004002](https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PNTD.0004002).
- [16] C. Hettiarachchige, S. von Cavallar, T. Lynar, R. I. Hickson, and M. Gambhir, “Risk prediction system for dengue transmission based on high resolution weather data,” *PLoS One*, vol. 13, n.º 12, p. e0208203, Dec. 2018, doi: [10.1371/JOURNAL.PONE.0208203](https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0208203).
- [17] H. Qin *et al.*, “Trading safety stock for service response time in inventory positioning,” *Prod Oper Manag*, 2022, doi: [10.1111/poms.13869](https://doi.org/10.1111/poms.13869).
- [18] H. M. Srivastava, R. Jan, A. Jan, W. Deebani, and M. Shutaywi, “Fractional-calculus analysis of the transmission dynamics of the dengue infection,” *Chaos*, vol. 31, n.º 5, May. 2021, doi: [10.1063/5.0050452](https://doi.org/10.1063/5.0050452).
- [19] R. Jain, S. Sontisirikit, S. Iamsirithaworn, and H. Prendinger, “Prediction of dengue outbreaks based on disease surveillance, meteorological and socio-economic data,” *BMC Infect Dis*, vol. 19, n.º 1, pp. 1–16, Mar. 2019, doi: [10.1186/s12879-019-3874-x](https://doi.org/10.1186/s12879-019-3874-x).
- [20] R. Taghikhani and A. B. Gumel, “Mathematics of dengue transmission dynamics: Roles of vector vertical transmission and temperature fluctuations,” *Infect Dis Model*, vol. 3, pp. 266–292, 2018, doi: [10.1016/j.idm.2018.09.003](https://doi.org/10.1016/j.idm.2018.09.003).
- [21] M. Ferraguti *et al.*, “Spatial distribution and temporal dynamics of invasive and native mosquitoes in a large Mediterranean city,” *Sci. Total Environ.*, vol. 896, 165322, Oct. 2023, doi: [10.1016/J.SCITOTENV.2023.165322](https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.165322).
- [22] D. A. Ewing, C. A. Cobbold, B. V. Purse, M. A. Nunn, and S. M. White, “Modelling the effect of temperature on the seasonal population dynamics of temperate mosquitoes,” *J Theor Biol*, vol. 400, pp. 65–79, 2016, doi: [10.1016/j.jtbi.2016.04.008](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2016.04.008).
- [23] J. Chen *et al.*, “Linking mathematical models and trap data to infer the proliferation, abundance, and control of *Aedes aegypti*,” *Acta Trop*, vol. 239, 106837, Mar. 2023, doi: [10.1016/J.ACTATROPICA.2023.106837](https://doi.org/10.1016/J.ACTATROPICA.2023.106837).
- [24] S. Brailsford, R. Berchi, V. Angelis, and M. Mecoli, “System Dynamics models to assess the risk of mosquito-borne diseases and to evaluate control policies,” presented at the International Conference of the System Dynamics Society, vol. 1979, pp. 1–10, 2007.
- [25] NASA, “POWER | Data Access Viewer.” Accessed: Aug. 22, 2024. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Módulo autobloqueante para el cambio automático de herramientas

Self-locking module for automatic tool change

Carlos Sánchez López¹  , Andrea Yoselin Castillo Rojo¹, Alejandra Ibeth García Castañón¹ , Juan Gabriel Reyes Ramírez¹, José de Jesús Martínez Prieto¹

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Metal-Mecánica, Aguascalientes, Ags., México

RESUMEN

Los dispositivos de cambio automático de herramientas (CAH) son componentes esenciales en diversas industrias, particularmente en los procesos de fabricación con manufactura de alta tecnología. La presente investigación tiene como objetivo facilitar el cambio automático de herramientas en máquinas que permitan dos o más procesos de fabricación conocidas como máquinas híbridas. Se analizaron dispositivos de almacenamiento y cambio automático de herramientas en máquinas de control numérico y en impresoras 3D. Se evaluaron los procesos de mecanizado CNC, la impresión 3D, el grabado con láser, el plóter de corte y el plóter de dibujo. Se consideró también la similitud de la cinemática en el cambio de herramientas a través del tipo de los elementos de unión. Tomando como variables de diseño la geometría y las dimensiones generales de cada una de las herramientas de los procesos seleccionados, se logró que los diversos portaherramientas se puedan colocar en un mismo dispositivo de sujeción. Como resultado, se obtuvo la propuesta de un módulo autobloqueante que permite la carga y descarga de herramientas que se utilizan en los procesos previamente citados. El módulo permite prescindir de un actuador para la sujeción y liberación de las herramientas, aunque por el momento está en etapa de prueba para herramientas de bajo peso.

PALABRAS CLAVE: manufactura híbrida; cambio automático de herramientas; Manufactura Sustractiva; Manufactura Aditiva.

ABSTRACT

Automatic tool change (ATC) devices are essential components in various industries, particularly in manufacturing processes with high-tech manufacturing. The present research aims to facilitate automatic tool change in machines that allow two or more manufacturing processes known as hybrid machines. Automatic tool storage and change devices were analyzed in numerical control machines and 3D printers. CNC machining processes, 3D printing, laser engraving, cutting plotter and drawing plotter were evaluated. The similarity of the kinematics in tool change through the type of joining elements was also considered. Taking as design variables the geometry and general dimensions of each of the tools of the selected processes, it was achieved that the various tool holders can be placed in the same clamping device. As a result, the proposal of a self-locking module was obtained that allows the loading and unloading of tools used in the previously mentioned processes. The module makes it possible to dispense with an actuator for clamping and releasing the tools, although it is currently in the testing phase for low-weight tools.

KEYWORDS: hybrid manufacturing; automatic tool change; Subtractive Manufacturing; Additive Manufacturing.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Carlos Sánchez López
INSTITUCIÓN: Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Metal-Mecánica
DIRECCIÓN: Av. Adolfo López Mateos núm. 1801, frac. Bona Gens, C. P. 20256, Aguascalientes, Ags. México
CORREO ELECTRÓNICO: carlos.sl@aguascalientes.tecnm.mx

Fecha de recepción: 21 de mayo de 2024. **Fecha de aceptación:** 17 de septiembre de 2024. **Fecha de publicación:** 27 de septiembre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la tendencia en la manufactura avanzada es aprovechar las ventajas de la manufactura sustractiva (SM, por sus siglas en inglés) o procesos en donde se elimina material a la materia prima, así como las que otorga la manufactura aditiva (AM) o impresión en 3D aportando al surgimiento de la manufactura híbrida (HM) que incluye el uso de dos o más procesos de fabricación en una sola máquina, lo que ha dado como resultado la fabricación de máquinas híbridas. De acuerdo con Zhu ^[1], los procesos de manufactura híbridos se clasifican como sigue: manufactura sustractiva híbrida, transformación híbrida, aditiva híbrida, sustractiva + aditiva, sustractiva + ensamble y aditiva + transformativa.

En el trabajo de Altiparmak *et al.* ^[2] se describe el estado del arte del uso de la AM en la industria aeroespacial, utilizando aleaciones de aluminio de alta resistencia; se señala que en las últimas dos décadas los procesos de AM se han generalizado en la fabricación de componentes geoméricamente complejos, siendo uno de sus principales campos de aplicación la industria aeroespacial; se abordan los inconvenientes y limitaciones de la manufactura convencional SM y AM, y se concluye que, como desarrollo futuro, los procesos de manufactura aditiva híbrida (HAM) podrán utilizarse a gran escala en piezas compuestas de multimateriales en diferentes secciones de componentes aeroespaciales. Estos procesos híbridos también podrán integrarse dentro de la industria 4.0.

En el trabajo de Dilberoglu *et al.* ^[3] se describe que en la fabricación de prototipos rápidos con termoplásticos como Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y el Ácido Poliláctico (PLA) se presentan problemas de apariencia y resistencia que se incrementan debido a distorsiones por contracción térmica, efectos escalera y rebabas en la estructura de los soportes; se indica que aún no se pueden remediar los problemas actuales sin la sinergia de los procesos híbridos y se concluye que la combinación de la MA con otros procesos abre nuevas posibilidades para superar los inconvenientes actuales.

En el estudio de Sebbe *et al.* ^[4] se describe una amplia revisión bibliográfica sobre los métodos de fabricación aditiva, así como de procesos de mecanizado, estudiando la integración aditiva-sustractiva, con el fin de analizar los recientes desarrollos en este campo. En este trabajo se concluye que la fabricación híbrida ha

adquirido gran protagonismo, aportando muchas ventajas a la industria moderna, y que tendrá que existir una mayor integración de conocimientos entre quienes desarrollan los productos y quienes los hacen posibles mediante la programación y el funcionamiento de los equipos híbridos.

En complemento, los dispositivos de cambio automático de herramientas (ATC) son componentes esenciales en diversas industrias, particularmente en los procesos de fabricación. Estos dispositivos desempeñan un papel crucial en la mejora de la eficiencia, la reducción del tiempo de inactividad y el aumento de la productividad general. Las áreas que proporcionan las bases de su importancia y evolución se pueden resumir en los siguientes contextos, sin dejar de lado la posibilidad de incluir otras perspectivas:

- Integración en la automatización avanzada.
- Detección y monitoreo inteligentes de las herramientas.
- Cambios de herramienta rápidos y precisos.
- Sistemas de identificación de herramientas mediante identificación por radiofrecuencia (RFID) o tecnologías similares.
- Interfaces amigables e intuitivas
- Flexibilidad de adaptación a diversos tamaños y cantidades de herramientas.

En el trabajo de Tayal ^[5] se describe el desarrollo de un portaherramienta con un mecanismo de autocentrado que corrige virtualmente cualquier cambio o movimiento que puede afectar la precisión de la sujeción de la herramienta. El mecanismo es modular y permite sujetar cualquier tipo de herramientas, pero necesita que se aplique presión en el eje Z para que funcione correctamente, lo cual se logra mediante un servo que gira hacia arriba para bloquear la sujeción.

En el trabajo de la empresa E3D ^[6] se describe la atención en la impresión 3D con multimateriales, identificando estas tres principales situaciones: a) colocar dos o más boquillas en un solo eje, b) utilizar más de un material en una sola boquilla y c) colocar dos o más boquillas en ejes independientes, reduciendo el volumen de impresión y adicionando actuadores para el funcionamiento independiente de cada eje adicional. También se diseñó e implementó un sistema de cambio automático de 4 fusores (*hotends*) en una impresora 3D.

En el trabajo de Riley ^[7] se describe la configuración de la programación para el cambio de extrusores de manera automática en una impresora 3D Voron Trident con 4 extrusores. El sistema electromecánico para el cambio de las herramientas se realiza mediante un actuador cuyo eje se reduce a una geometría T que embona en una ranura en la placa de sujeción y está basado en el sistema desarrollado en ^[6].

En el trabajo de Kramer ^[8] se describe un sistema para el cambio de extrusores en una impresora 3D como solución a la impresión con multimateriales en impresoras caseras o de oficina, utilizando desarrollos y tecnología de código abierto para acoplar cinemáticamente de manera individual hasta cuatro *hotends*. La dinámica del cambio es similar a las utilizadas en ^[5] y ^[6], así como en la impresora Voron Trident.

En el trabajo de Cockfield ^[9] se describe que Will Hardy desarrolló un sistema de cambio de *hotends* utilizando electromagnetismo, con un mecanismo a prueba de fallas que evita que la herramienta se caiga del cabezal de la impresora en caso de un corte de energía, y que todavía se encuentra en la fase de prototipo y se necesita trabajar en el software para perfeccionar su funcionamiento y hacerlo adecuado para usos más generales.

En el trabajo de Mourtzis *et al.* ^[10] se describe que en la industria 4.0 se ha presentado un gran movimiento de las líneas tradicionales de fabricación al uso de celdas robóticas reprogramables y reconfigurables. Ahí se reconoce la habilidad para que un robot realice diferentes tareas y depende del efector final que pueda utilizar, se consideró crucial que los robots tengan un sistema eficiente para el cambio de las herramientas. También, se propone un novedoso sistema de cambio automático, cuyas especificaciones y diseño se basa en análisis de elemento finito, concepto que se sustenta en las especificaciones del robot colaborativo UR10.

En el trabajo de Dejan ^[11] se describe un plóter de dibujo (DIY Pen Plotter) con un sistema de cambio automático de plumones, facilitando realizar dibujos en 2D a colores. La cinemática del plóter se basa en 3 grados de libertad lineales para el desplazamiento en los ejes X, Y y Z, actuados con motores NEMA 17, y en complemento, la sujeción y liberación de los plumones se realiza con un servomotor SG 90. El mecanismo presentado por Dejan funciona de manera similar al propuesto en ^[6].

En el trabajo de Engberg *et al.* ^[12] se describe la construcción de una bioimpresora de código abierto, que permite una variedad de tareas incluida la bioimpresión FRESH, así como, las impresiones con multimateriales y la extrusión de biotintas cargadas de células. El cambio de extrusor y el sistema de movimiento se basa en el sistema de cambio de herramienta desarrollado en ^[6].

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se basó en el flujo del proceso del diseño de nuevos productos, partiendo de la necesidad de obtener un dispositivo para el cambio automático de herramientas para una máquina híbrida que incluya cinco procesos de fabricación. Las limitaciones potenciales radican en la disponibilidad de datos técnicos de los procesos seleccionados, lo cual se manejó escogiendo aquellos de los cuales se tiene acceso directo mediante las máquinas y sus herramientas.

El procedimiento general incluye lo siguiente: a) seleccionar los procesos de fabricación, b) identificar la similitud en la cinemática del cambio de herramientas, c) contrastar las geometrías y dimensiones generales de las herramientas de cada proceso, d) diseñar un dispositivo para la sujeción, e) diseñar el mecanismo que garantice su cambio y f) obtener la propuesta del dispositivo para el cambio automático de estas.

Los métodos utilizados se basan en el método deductivo directo, que permite obtener premisas comprobadas que incluyan la diferencia de movimientos, geometrías y dimensiones, así como el método lógico-deductivo, con base en que se conocen los principios de cambio de herramientas que existen en la actualidad. La descripción de lo realizado se resume en los apartados Cinemática del proceso, Portaherramientas y Cambio de herramienta.

A. CINEMÁTICA DEL PROCESO

En esta etapa se evaluó la cinemática del cambio, manual y automáticamente, en los procesos de mecanizado CNC, la impresión 3D, el grabado láser de diodo, el plóter de corte y el plóter de dibujo. Como resultado, se identificó que las máquinas de dichos procesos sustentan los desplazamientos de las herramientas respectivas en el mismo tipo de cinemática. La [Tabla 1](#) muestra que prevalece el uso de juntas prismáticas de deslizamiento lineal.

TABLA 1
TIPO DE JUNTA CINEMÁTICA EN LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN

EJE	PROCESO DE FABRICACIÓN				
	CNC	3D	LÁSER	CORTE	DIBUJO
X	P	P	P	P	P
Y	P	P	P o R	P o R	P o R
Z	P	P	NA	NA	NA
A	R	R	NA	NA	NA
B	R	R	NA	NA	NA

P: prismática; R: revoluta; NA: no aplica.

El cambio de las herramientas implica la posición y orientación del dispositivo de sujeción en el almacén de las herramientas y se puede modelar utilizando los parámetros Denavit-Hartenberg [13], [14] y aplicando matrices de transformación homogénea para un sistema de cinco grados de libertad, tres lineales y dos rotacio-

nales. Considerando como variables de estudio el tipo de junta o unión cinemática, ya que permite identificar si el desplazamiento es lineal o rotacional, así como la distancia entre las uniones. Con estas variables se puede identificar la posición y la orientación del dispositivo de sujeción.

B. PORTAHERRAMIENTAS

El diseño del portaherramientas se basa en la geometría externa de las herramientas que debe sujetar. En este estudio se recurrió a las utilizadas en máquinas de escritorio o didácticas. La Figura 1 muestra las utilizadas en este trabajo: a) para el mecanizado CNC (cortador), b) para impresión 3D (extrusor), c) para el grabado láser de diodo (láser), d) para el plóter de corte (cuchilla) y e) para dibujo 2D (pluma). Las variables de estudio son la geometría externa (cilíndrica o prismática) y sus dimensiones generales (diámetro, largo, ancho, espesor).

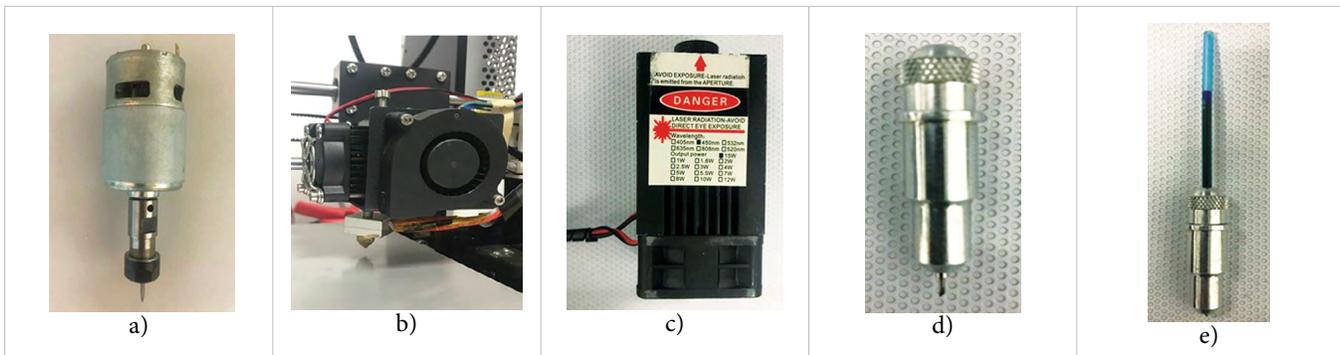


Figura 1. Herramientas: a) para mecanizado CNC, b) para impresión 3D, c) para grabado láser de diodo, d) para plóter de corte y e) para dibujo 2D.

La geometría general de las herramientas agrupa a tres de ellas del tipo cilíndrica, mientras que las otras dos son de tipo prismática. Aunado a lo anterior, se observaron diferencias en dimensiones, peso, materiales y fuente de accionamiento, información que se resume en la Tabla 2.

TABLA 2
VARIABLES PARA EL DISEÑO DEL PORTAHERRAMIENTAS

HERRAMIENTA	GEOMETRÍA	DIMENSIONES (mm)			
		D	L	A	E
Cortador	Cilíndrica	21	68.7	---	---
Extrusor	Prismática	---	67	47	41.5
Láser	Prismática	---	73.5	32.6	32.6
Cuchilla	Cilíndrica	12.7	41.6	---	---
Pluma	Cilíndrica	12	40	---	---

D: diámetro; L: longitud; A: ancho; E: espesor.

C. CAMBIO DE HERRAMIENTA

A través del análisis del funcionamiento de los dispositivos ATC que actualmente se emplean en los procesos seleccionados, se identificó que para sujetar o soltar las herramientas se hace uso de alguno de los siguientes medios: un actuador adicional que proporcione un movimiento rotacional, mecanismos actuados con aire comprimido o electromagnetismo.

Después de identificar dicho requerimiento se procedió a establecer la meta de encontrar una opción que permitiera eliminar la necesidad del actuador adicional para sujetar y soltar las herramientas. Para lo anterior, se realizaron análisis de mecanismos autobloqueantes, de cierre de empuje y de bloqueo deslizante y, enseguida, se procedió a sintetizar un mecanismo para sujetar o soltar sin recurrir al uso de algún tipo de actuador.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en la cinemática del proceso, se partió de un sistema de 5 grados de libertad empleando tres de traslación y dos de rotación. Al relacionar la cinemática de la máquina híbrida con la cinemática del cambio de herramientas, se obtuvo como resultado que esta se puede resolver dividiendo el modelo cinemático en dos sistemas uno de 2 grados de libertad rotacionales y otro de 3 grados de libertad lineales, sistemas que se pueden resolver por separado facilitando la orientación y la posición correcta de la placa portaherramientas.

Al analizar las restricciones geométricas, dimensionales, de peso y requerimientos de accionamiento de las herramientas seleccionadas en este proyecto, se logró un diseño modular tipo L. La Figura 2 muestra el concepto de la sección horizontal del portaherramientas, la cual permite sujetar un cortador para mecanizado..

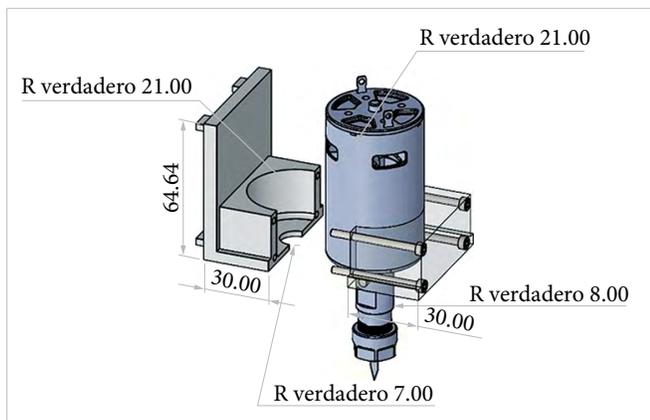


Figura 2. Portaherramientas para mecanizado CNC.

En la Figura 3 se evidencia el concepto de la sección lateral en donde, sin importar el tipo de herramienta, pueda colocarse en una única base localizada en la máquina híbrida. Además, el concepto de la base portaherramientas se muestra en la Figura 4.

En lo concerniente al mecanismo para sujetar y soltar las herramientas, en la solución de [5] se hace uso de una base modular con guías para restringir los grados de libertad al ensamblarse con una base similar localizada en el portaherramientas, mientras que para sujetar y soltar se emplea un servomotor. En la propuesta de [6] se parte de un diseño similar al presentado por [5] con la restricción de que lo aplicaron únicamente en impresoras 3D para intercambiar entre 4 *hotends*. Por otra parte, en [7] y [8] se describen sistemas para el cam-

bio de herramientas similares al desarrollado en [6]. En cualquiera de las soluciones anteriores se hace uso de un servomotor para realizar la sujeción o liberación. En otros casos, el funcionamiento del mecanismo para sujetar o soltar los portaherramientas se lleva a cabo utilizando aire comprimido o mediante algún dispositivo electromagnético.

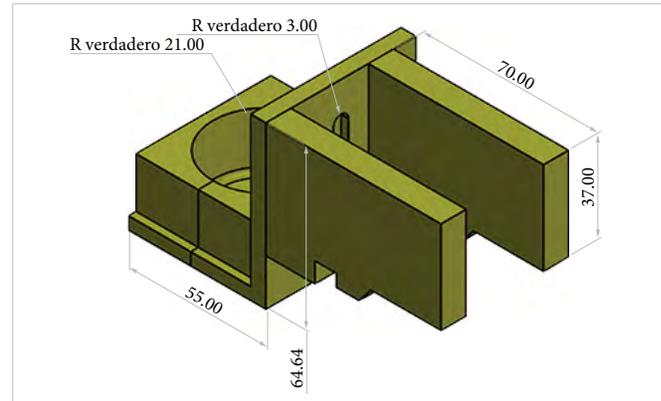


Figura 3. Sección modular del portaherramientas.

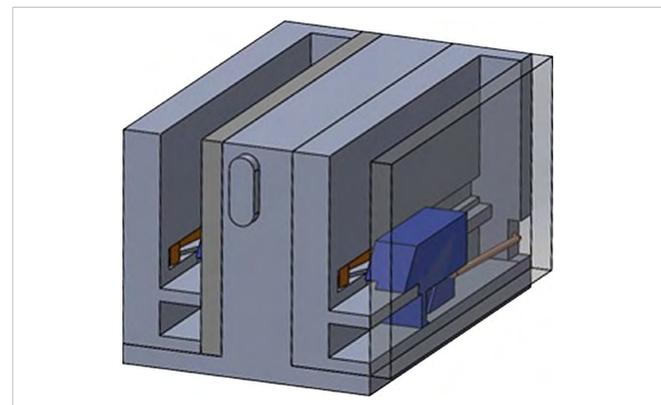


Figura 4. Base portaherramientas.

En este trabajo se tiene como resultado el diseño conceptual de un dispositivo para el cambio automático de herramientas aplicando el funcionamiento de los mecanismos autobloqueantes, de cierre de empuje y de bloqueo deslizante. Para el funcionamiento del mecanismo se aprovechó la dinámica de la máquina híbrida.

Para la selección de una herramienta se recurrió al diagrama de flujo de la Figura 5. Después de seleccionar la herramienta a sujetar, representada en la Figura 6, la base (Figura 4) se desplaza para ensamblarse en la sección modular del portaherramientas, activándose el mecanismo autobloqueante quedando ambas unidas, como se muestra en la Figura 7. Luego se retira del almacén para proceder a su uso (Figura 8).

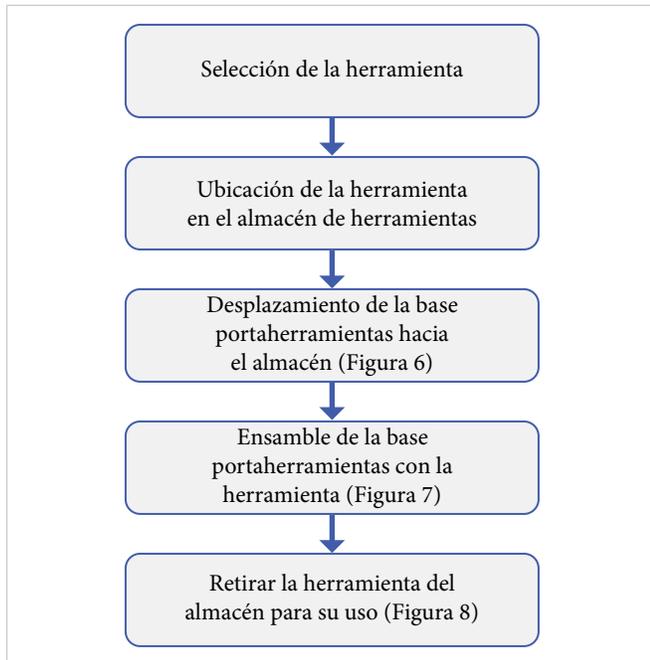


Figura 5. Secuencia para la sujeción de la herramienta.

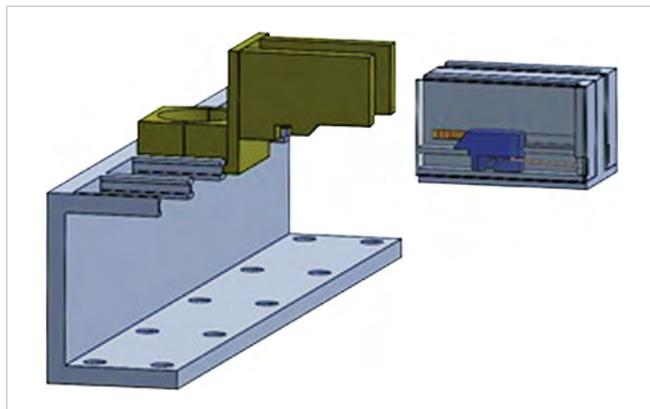


Figura 6. Selección del portaherramientas.

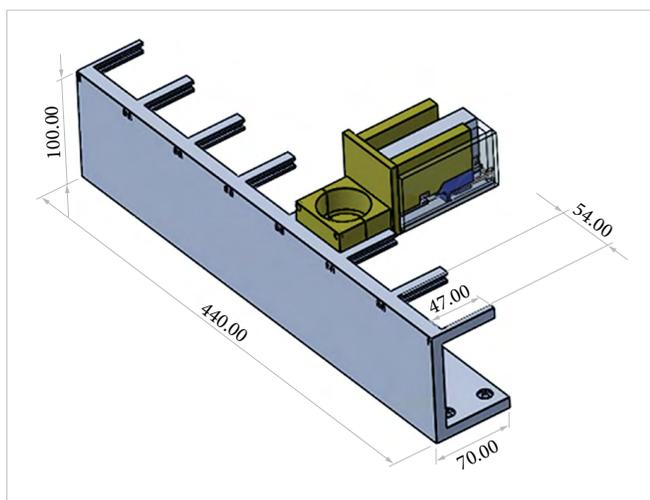


Figura 7. Sujeción de un portaherramientas.

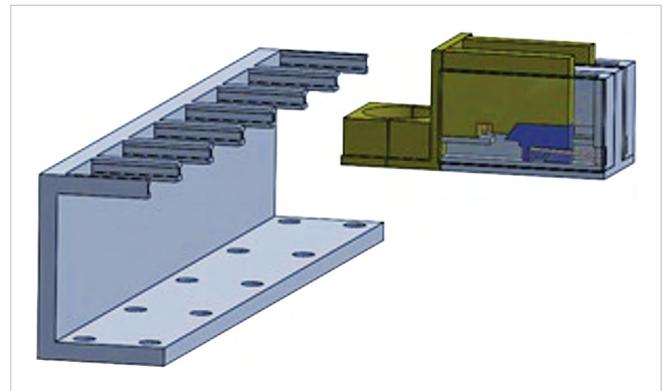


Figura 8. Uso del portaherramientas.

Al dejar una herramienta en el almacén se utiliza la secuencia presentada en la Figura 9, la cual se ejemplifica en la Figura 10. Para esto debe ejecutarse la instrucción de cambio de herramienta, y a) se elige un casillero libre en el almacén, b) se desplaza el conjunto sección modular-portaherramientas hasta liberar la base portaherramientas, c) se inicia el retiro de la base y d) se deja el portaherramientas en el almacén.

El mecanismo desarrollado funciona de manera similar a un botón liberador (*push button*). La principal ventaja de este mecanismo es que permite sujetar o soltar el portaherramientas sin necesidad de algún actuador adicional, como el uso de servomotores, electromagnetismo o aire comprimido.

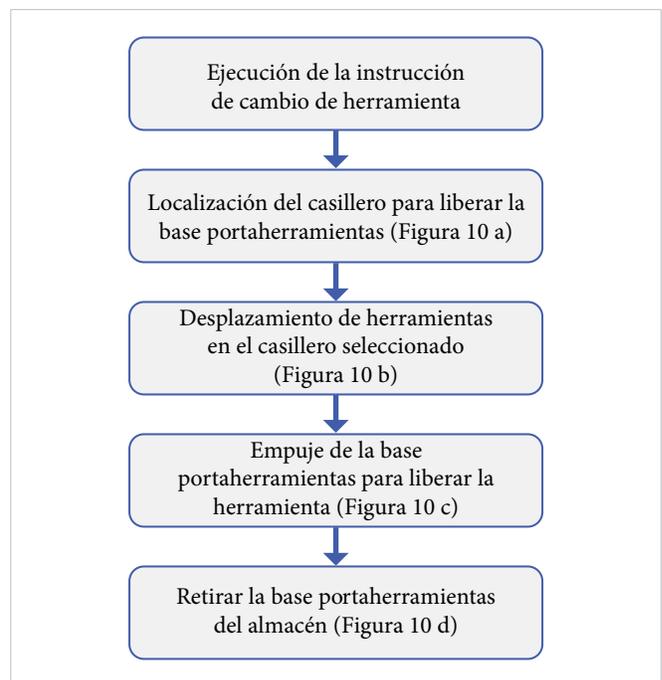


Figura 9. Secuencia para la liberación de la herramienta.

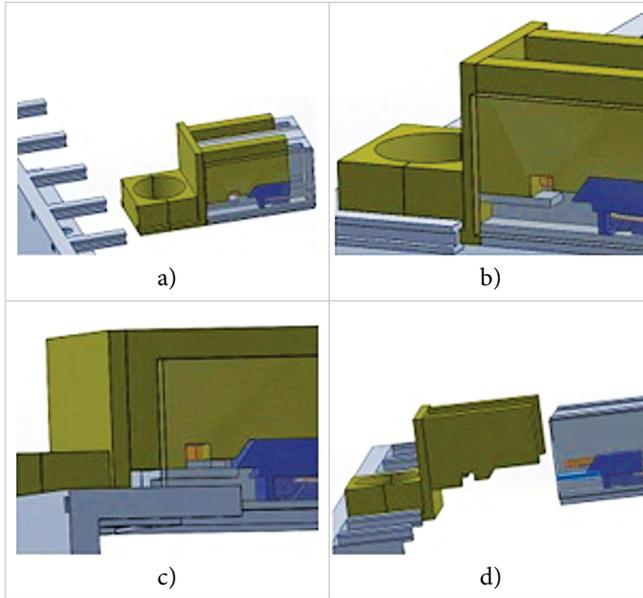


Figura 10. Secuencia para dejar la herramienta en el almacén.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo al enfoque del trabajo desarrollado, los procesos seleccionados permitieron establecer el contexto de manufactura híbrida. El análisis de la cinemática en dichos procesos favoreció identificar la similitud en el cambio de las herramientas. Asimismo, se identificó que la solución a la cinemática inversa para colocar el portaherramientas en la localización adecuada para el cambio de cada una se puede resolver vía programación o a través de software de código abierto.

Las variables de estudio relacionadas con la geometría, las dimensiones, la orientación y la posición, están directamente relacionadas con el diseño del módulo portaherramientas propuesto. Se logró su adaptación a las cinco herramientas seleccionadas. Aun cuando el diseño está a nivel de prototipo, se puede implementar en máquinas híbridas pequeñas y/o experimentales.

A diferencia de lo presentado en otros estudios, el principio de funcionamiento del mecanismo de bloqueo deslizante para el cambio de la herramienta elimina la necesidad de un actuador para la toma y descarga de las herramientas, tornándose en una alternativa más económica por todo lo que implica el agregar o quitar el uso de un actuador en el funcionamiento de una máquina. Como trabajo futuro se continuará con la implementación del prototipo en una máquina de 5 ejes, programable con software de código abierto y controlada mediante la plataforma Arduino.

REFERENCIAS

- [1] Z. Zhu, V. G. Dhokia, A. Nassehi y S. T. Newman, “A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives”. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 26, n.º 7, pp. 1-20, feb. 2013, doi: [10.1080/0951192X.2012.749530](https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.749530).
- [2] S. C. Altiparmak, V. A. Yardley, Z. Shi y J. Lin, “Challenges in additive manufacturing of High strength aluminum alloys and current developments in hybrid additive manufacturing”, *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, vol. 4, n.º 2, pp. 246-261, jun. 2021, doi: [10.1016/j.ijlmm.2020.12.004](https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.12.004).
- [3] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman y M. Dolen, “Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 113, pp. 623-648, en. 2021, doi: [10.1007/s00170-021-06688-1](https://doi.org/10.1007/s00170-021-06688-1).
- [4] N. P. V. Sebbe, F. Fernandes, V. F. C. Sousa y F. J. G. Silva, “Hybrid Manufacturing Processes Used in the Production of Complex Parts: A Comprehensive Review”, *Metals*, vol. 12, n.º 11, pp. 1874-1894, nov. 2022, doi: [10.3390/met12111874](https://doi.org/10.3390/met12111874).
- [5] S. Tayal. “Automatic Tool Changing 3D Printer”. Instructables.com. Accedido: ag. 7, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.instructables.com/Tool-Changing-3D-Printer/>
- [6] E3D. “Research and development: Motion system and Tool changer”. E3D.com. Accedido: ag. 9, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://e3d-online.com/blogs/news/research-and-development-motion-system-and-tool-changer>
- [7] C. Riley. E3D Tool Changer Update. (Feb. 19, 2020). Accedido: ag. 11, 2023. [Video en línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=7W5pPm0lZDE&t=62s>
- [8] M. Kramer. “Tool Changing 3D Printer”. mattkramersign.com. Accedido: ag. 14, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.mattkramersign.com/tool-changing-3d-printer>
- [9] B. Cockfield. “A 3D Printer with an Electromagnetic Tool Changer”. Hackaday.com. Accedido: ag. 17, 2023. [En lí-

- nea]. Disponible en: <https://hackaday.com/2021/06/12/magnets-how-do-they-work-on-3d-printers/>
- [10] D. Mourtzis, J. Angelopoulos, M. Papadokostakis y N. Panopoulos, “Design for 3D printing of a Robotic Arm Tool Changer under the framework of Industry 5.0”, *Procedia CIRP*, vol. 115, 2022, pp. 178-183, doi: [https://doi: 10.1016/j.procir.2022.10.070](https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.070).
- [11] How to Mechatronics. DIY Pen Plotter with Automatic Tool Changer | Arduino based CNC Drawing Machine. (Nov. 24, 2021). Accedido: ag. 17, 2023. [Vídeo en línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=--virDtVVt2Xo&ab_channel=HowToMechatronics
- [12] A. Engberg, C. Stelzl, O. Eriksson, P. O'Callaghan y J. Kreuger, “An open-source extrusion bioprinter based on the E3D motion system and tool changer to enable FRESH and multimaterial bioprinting”, *Sci Rep*, vol. 11, art. 21254, 2021, doi: [10.1038/s41598-021-00931-1](https://doi.org/10.1038/s41598-021-00931-1).
- [13] J. Denavit y R. S. Hartenberg, “A Kinematic notation for lowerpair mechanisms based on matrices”, *J. Appl. Mech.*, pp. 215-221, jun. 1955, doi: [10.1115/1.4011045](https://doi.org/10.1115/1.4011045).
- [14] C. Sánchez, *Introducción a la Cinemática de Manipuladores Conceptos Básicos*. Editorial Académica Española, 2013.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del proyecto (18044) IT16B088, en la convocatoria CI-2023.

Diseño de un controlador en tiempo discreto para sistemas no lineales

Design of a discrete-time controller for nonlinear systems

Miguel Hernández González¹  

¹Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

RESUMEN

En este trabajo se diseñó un controlador en tiempo discreto que estabiliza una ecuación en diferencias escalar, donde es posible elegir el tiempo de convergencia al origen como un parámetro en la ley de control. En ausencia de perturbaciones, se realizó un análisis del controlador para verificar que la solución converge al origen en un número de pasos finito. Con presencia de perturbaciones acotadas, se agregó al controlador propuesto un término integral discreto que rechaza dichas perturbaciones y al mismo tiempo se logran los objetivos de control. Finalmente, se aplicaron los resultados obtenidos a un sistema de ecuaciones en diferencias para comprobar la factibilidad de dicho estudio.

PALABRAS CLAVE: control discreto; tiempo de convergencia; perturbaciones; sistema no lineal.

ABSTRACT

In this work, a discrete-time controller was designed that stabilizes a scalar difference equation, where it is possible to choose the convergence time to the origin as a parameter in the control law. In the absence of disturbances, an analysis of the controller was performed to verify that the solution converges to the origin in a finite number of steps. In the presence of bounded disturbances, a discrete integral term was added to the proposed controller that rejects such disturbances and at the same time achieves the control objectives. Finally, the results obtained were applied to a system of difference equations to verify the feasibility of said study.

KEYWORDS: discrete-time controller; convergence time; disturbances; nonlinear system.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Miguel Hernández González
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Nuevo León
DIRECCIÓN: Pedro de Alba s/n, Ciudad Universitaria, C. P. 66455, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
CORREO ELECTRÓNICO: miguel.hernandezgnz@uanl.edu.mx

Fecha de recepción: 10 de marzo de 2024. **Fecha de aceptación:** 2 de octubre de 2024. **Fecha de publicación:** 14 de octubre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

El control de sistemas lineales y no lineales ha sido objeto de estudio por una gran variedad de investigadores en décadas recientes y diversos algoritmos se han ido desarrollando a lo largo de los años, como el control de sistemas lineales [1], H infinito [2] y control óptimo [3]. Para el control de sistemas no lineales se pueden mencionar el de modos deslizantes [4], [5] y el de retroalimentación del estado [6], el primero de los cuales ha recibido mucha atención debido a su robustez ante perturbaciones externas y a la variación de parámetros [7]. Este tipo de controlador se diseña utilizando una función discontinua que conmuta a muy alta frecuencia, lo que produce un fenómeno conocido como *chattering* causado por dinámicas no modeladas. Esta desventaja en el algoritmo por modos deslizantes se puede minimizar por medio de los modos deslizantes de segundo orden introducido por A. Levant [8].

Otro tipo de controladores que en años recientes han recibido mucha atención son los de tiempo de convergencia en tiempo finito [9], tiempo fijo [10] y tiempo pre-determinado [11], [12]. En el primero de ellos, el tiempo de convergencia al origen depende de las condiciones iniciales, por lo que si estas no están acotadas, el tiempo de convergencia tampoco. Esta desventaja se resolvió con los controladores cuyo tiempo de convergencia se presenta en tiempo fijo, es decir, tal tiempo de convergencia está acotado por una constante independientemente de cualquier condición inicial. Finalmente, en los controladores cuyo tiempo de convergencia es pre-determinado, el parámetro que indica la convergencia al origen aparece explícitamente en la ley de control (véase [11], por ejemplo).

Por otro lado, a pesar de los esfuerzos que se han realizado para el diseño de controladores de sistemas dinámicos, la mayoría de ellos han sido desarrollados para sistemas en tiempo continuo, pero su contraparte, en tiempo discreto, no ha recibido la misma atención o no ha sido aún tan amplia. Algunos trabajos que han contribuido al control en tiempo discreto se pueden encontrar en [13], [14], [15], [16], en donde se emplean técnicas como linealización por retroalimentación del estado y modos deslizantes en tiempo discreto [13], modos deslizantes integrales en tiempo discreto [14], *super-twisting* en tiempo discreto [16] y control en tiempo finito para sistemas discretos lineales variantes en el tiempo [17], entre otros.

Con base en las anteriores consideraciones, en este trabajo se presenta una propuesta de un controlador en tiempo discreto donde el tiempo de convergencia ante la ausencia de perturbaciones se puede seleccionar como parámetro en la ley de control. Si el sistema original está sujeto a perturbaciones externas acotadas, en la ley de control se agrega un término integral discreto que compensa dicha perturbación.

II. METODOLOGÍA

A. CONTROL EN AUSENCIA DE PERTURBACIONES

Considérese el siguiente sistema en tiempo discreto:

$$x(k+1) = u(k) \quad (1)$$

con la condición inicial $x(0) = x_0$. $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, $x(k) \in \mathbb{R}$ es el estado del sistema y $u(k) \in \mathbb{R}$ es una entrada de control.

El objetivo de la entrada de control $u(k)$ es llevar el estado del sistema desde la condición inicial x_0 al origen en un tiempo discreto k_f previamente asignado. Se propone la siguiente ley de control para el sistema (1):

$$u(k) = \begin{cases} x(k) - \frac{x_0}{k_f}, & 0 \leq k \leq k_f \\ x(k), & k > k_f \end{cases} \quad (2)$$

donde k_f es el número de pasos preasignados para llegar al origen, $k_f = \frac{t_f}{T}$, t_f es el tiempo en segundos para llegar al origen y T el periodo de muestreo.

B. ANÁLISIS DE LA LEY DE CONTROL

Considérese el intervalo de tiempo $0 \leq k \leq k_f$. Se sustituye la entrada de control $u(k)$ en la ecuación (1):

$$x(k+1) = x(k) - \frac{x_0}{k_f} \quad (3)$$

Se resuelve la ecuación (3) con $k = \{0, 1, 2, \dots, n\}$. Observe de la ecuación (2) que los valores que k puede tomar están limitados por k_f , $k \leq k_f$.

$$x(1) = x_0 - \frac{x_0}{k_f} \quad (4)$$

$$x(2) = x_0 - \frac{2x_0}{k_f} \quad (5)$$

y así sucesivamente, hasta $k = n$:

$$x(n) = x_0 - \frac{nx_0}{k_f} \quad (6)$$

Finalmente, en el paso $n = k_f$, $x(n = k_f) = 0$, es decir, cuando se han realizado k_f pasos desde la condición inicial en $k = 0$, la evolución del estado x alcanza al origen.

Enseguida, se sustituye ahora la ley de control $u(k) = x(k)$, para toda $k > k_f$, $x(k + 1) = x(k)$, con la condición inicial $x(k_f) = 0$. Supóngase que el estado $x(k)$ ha llegado al origen en el paso k_f , es decir, $x(k_f) = 0$, por lo que en el paso $k_f + 1$ se mantendrá en el origen, es decir, $x(k_f + 1) = x(k_f) = 0$, dada la condición inicial, y así sucesivamente para los tiempos posteriores, $x(k + 1) = x(k) = 0$, para toda $k \geq k_f$. Con esto se concluye el análisis.

El siguiente ejemplo ilustra la ley de control presentada en la ecuación (2).

Ejemplo 1. Considérese la siguiente ecuación en diferencias lineal:

$$x(k + 1) = 2x(k) + u(k) \quad (7)$$

donde $x(k) \in R$ es el estado del sistema, $u(k) \in R$ es la entrada de control y con la condición inicial $x(0) = x_0$. Se elige la ley de control $u(k)$ de acuerdo con la ecuación (2) como sigue:

$$u(k) = \begin{cases} -x(k) - \frac{x_0}{k_f}, & k_0 \leq k \leq k_f \\ -x(k), & k > k_f \end{cases} \quad (8)$$

Observe que si se sustituye en el intervalo de tiempo $0 \leq k \leq k_f$, la ley de control (8) en la ecuación lineal (7), la ecuación en diferencias resultante es similar a la ecuación (3). Por lo tanto, la convergencia al origen se alcanza en $n = k_f$ pasos. De igual forma para el intervalo de tiempo $k > k_f$.

Para el ejemplo 1, el tiempo de muestreo T se ha elegido como $T = 0.001$ segundos, $k_f = 500$, por lo que en el tiempo $t_f = 0.5$ segundos el estado $x(k)$ convergerá al origen sin importar la condición inicial. La Figura 1 muestra la evolución temporal del estado $x(k)$ y la entrada de control $u(k)$ en el intervalo de tiempo $[0, 1.5]$

segundos para diferentes condiciones iniciales. Observe que cuando $t_f = 0.5$ segundos, ambos el estado y la entrada de control convergen al origen y permanecen allí para tiempos futuros, $k > k_f$.

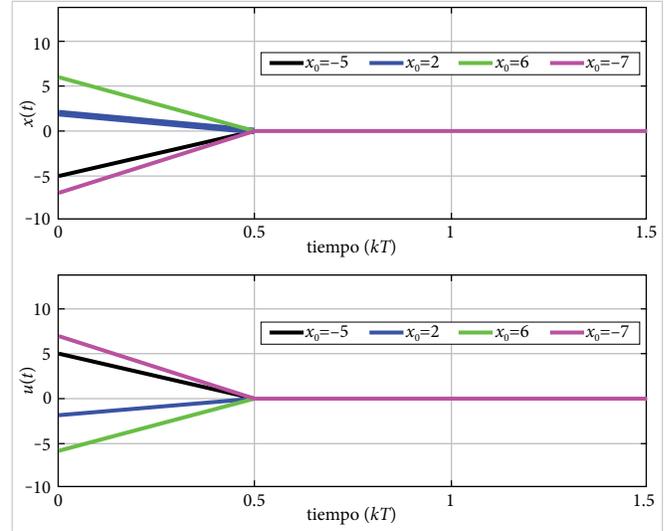


Figura 1. Evolución temporal de la variable $x(k)$ y $u(k)$.

C. RECHAZO DE PERTURBACIONES

Considérese ahora la siguiente ecuación:

$$x(k + 1) = u(k) + \rho(k) \quad (9)$$

con la condición inicial $x(0) = x_0$. $k \in N \cup \{0\}$, $x(k) \in R$ es el estado del sistema, $u(k) \in R$ es una entrada de control y $\rho(k)$ es una perturbación externa acotada.

La ley de control $u(k)$ propuesta es

$$u(k) = \begin{cases} x(k) - \frac{x_0}{k_f} - b_1 \sqrt{|x(k)|} \text{sign}(x(k)) \\ \quad + \delta(k), & k_0 \leq k < k_f \\ x(k) - b_2 \sqrt{|x(k)|} \text{sign}(x(k)) \\ \quad + \delta(k), & k \geq k_f \end{cases} \quad (10)$$

donde $\delta(k + 1) = \delta(k) - Tb_3 \text{sign}(x(k))$ es el término que rechaza la perturbación $\rho(k)$ con la condición inicial $\delta(0) = 0$, y b_1, b_2, b_3 son constantes positivas. El término $\sqrt{|x(k)|} \text{sign}(x(k))$ ayuda a mantener al estado $x(k)$ en el origen. Note que el término $x(k) - \frac{x_0}{k_f}$ en (10) es el mismo propuesto en la ley de control (2). El siguiente ejemplo ilustra la aplicabilidad de la ley de control (10).

Ejemplo 2. Considérese la siguiente ecuación en diferencias no lineal

$$x(k + 1) = x^2(k) + u(k) + \rho(k) \quad (11)$$

con condición inicial $x_0 = 5$ y perturbación externa $\rho(k) = 0.5\text{sen}\left(\frac{2\pi kT}{3}\right)$. La ley de control (10) toma la siguiente forma:

$$u(k) = \begin{cases} -x^2(k) + x(k) - \frac{x_0}{k_f} - b_1\sqrt{|x(k)|}\text{sign}(x(k)) + \delta(k), & k_0 \leq k < k_f \\ -x^2(k) - b_2\sqrt{|x(k)|}\text{sign}(x(k)) + x(k) + \delta(k), & k \geq k_f \end{cases} \quad (12)$$

y $\delta(k + 1) = \delta(k) - Tb_3\text{sign}(x(k))$, con $\delta(0) = 0$.

Los resultados de simulación se realizaron con los siguientes parámetros: $k_f = 100$, $T = 0.01$, $b_1 = 0.2$, $b_2 = 0.5$, $b_3 = 5$, que se muestran en la Figura 2. Observe que después del tiempo de convergencia $t_f = 1$ segundo, el estado del sistema $x(k)$ permanece en 0 para todo $k > k_f$, aun en presencia de perturbaciones (Figuras 2 y 3).

La Figura 2 ilustra la evolución temporal del estado $x(k)$ junto con la evolución temporal de la ley de control $u(k)$ aplicada (12).

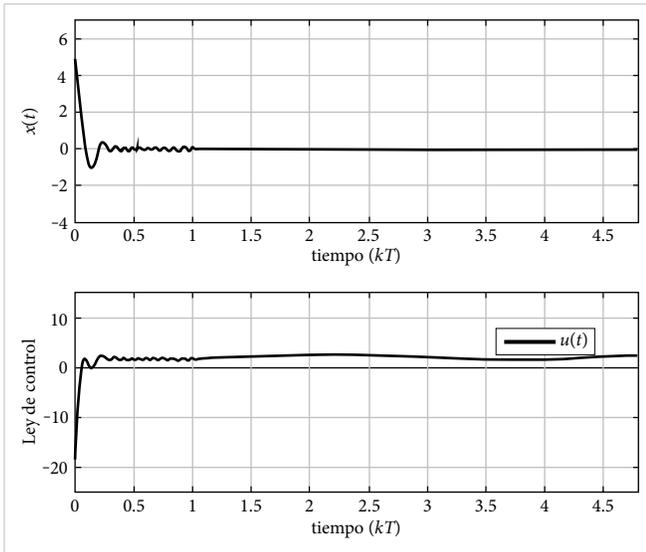


Figura 2. Evolución temporal del estado $x(k)$ y la entrada de control $u(k)$.

La Figura 3 ilustra la evolución temporal de la perturbación $\rho(k)$ (línea negra) y el término $\delta(k)$ que rechaza dicha perturbación.

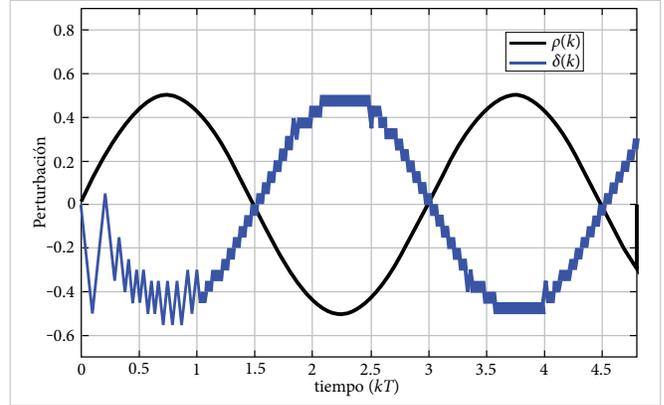


Figura 3. Línea negra: perturbación aplicada al sistema. Línea azul: variable que rechaza la perturbación.

En la sección II D se presenta un ejemplo de la ley de control propuesta a un sistema de ecuaciones en diferencias.

D. SISTEMA DE ECUACIONES EN DIFERENCIAS

Considérese el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} x_1(k + 1) &= x_1(k) + x_2(k) \\ x_2(k + 1) &= x_2(k) + u(k) + \rho(k) \end{aligned} \quad (13)$$

con condiciones iniciales $x_1(0) = x_{10}$, $x_2(0) = x_{20}$. $\rho(k)$ es una perturbación externa desconocida, pero acotada. La metodología para estabilizar el sistema de ecuaciones en (13) es como sigue.

Se define una nueva variable

$$z_1(k) = x_1(k) \quad (14)$$

y se toma un paso adelante

$$z_1(k + 1) = x_1(k) + x_2(k) \quad (15)$$

considerando $x_2(k)$ como una variable de control virtual, y para el intervalo de tiempo $k \geq 0$

$$x_2^{\text{des}}(k) = (l_1 - 1)z_1(k) \quad (16)$$

Se define una nueva variable de error $z_2(k) = x_2(k) - x_2^{\text{des}}(k)$ y tomando un paso adelante

$$z_2(k + 1) = x_2(k) + u(k) + \rho(k) - x_2^{\text{des}}(k + 1) \quad (17)$$

donde $x_2^{\text{des}}(k + 1) = (l_1 - 1)(x_1(k) + x_2(k))$.

Para la ecuación (17), considérese la siguiente ley de control:

$$u(k) = \vartheta(k) + (l_1 - 1)(x_1(k) + x_2(k)) - x_2(k) \quad (18)$$

Con la ley de control (18), la ecuación (17) se escribe como sigue:

$$z_2(k + 1) = \vartheta(k) + \rho(k) \quad (19)$$

Observe que la ecuación (19) toma la forma de la ecuación (9) de la sección II C, por lo que la ley de control $\vartheta(k)$ se obtiene de (10) y toma la forma siguiente:

$$\vartheta(k) = \begin{cases} z_2(k) - \frac{z_{20}}{k_f} - b_1 \sqrt{|z_2(k)|} \text{sign}(z_2(k)) \\ \quad + \delta(k), & 0 \leq k < k_f \\ z_2(k) - b_2 \sqrt{|z_2(k)|} \text{sign}(z_2(k)) \\ \quad + \delta(k), & k \geq k_f \end{cases} \quad (20)$$

donde $\delta(k + 1) = \delta(k) - T b_3 \text{sign}(z_2(k))$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de simulación se obtuvieron con las siguientes condiciones iniciales y parámetros: $x_1(0) = -5$, $x_2(0) = 8$, $b_1 = b_2 = 0.3$, $l_1 = 0.3$, $\delta(0) = 0$, $k_f = 150$, $N = 480$, $T = 0.01$. Las Figuras 4, 5 y 6 muestran los resultados de simulación en el intervalo de tiempo de 0 a 4.8 segundos. La Figura 4 muestra la evolución temporal de los estados $x_1(k)$, $x_2(k)$ del sistema de ecuaciones (13) ante la ausencia de control, es decir, $u(k) = 0$, y $\rho(k) = 0.5 \text{sen}(\frac{2\pi k T}{3})$.

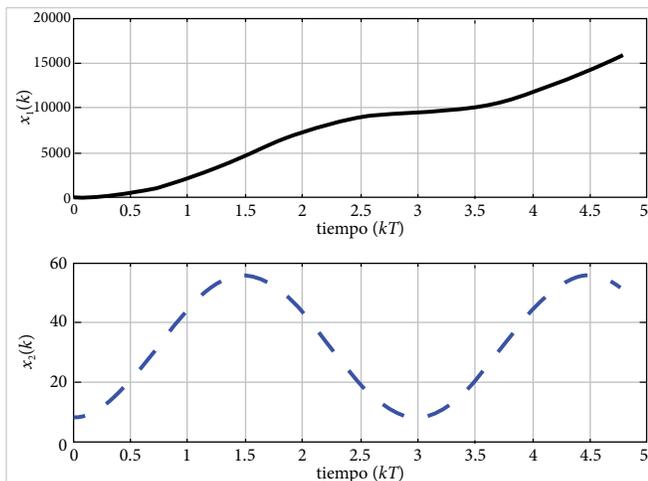


Figura 4. Evolución temporal de los estados $x_1(k)$, $x_2(k)$ en la ecuación (13) ante la ausencia de control $u(k) = 0$, y en presencia de la perturbación $\rho(k) = 0.5 \text{sen}(\frac{2\pi k T}{3})$.

DOI : 10.20983/culcyt.2024.3.2.4

El objetivo del controlador propuesto en las ecuaciones (18) y (20) es llevar al origen las variables de estado $x_1(k)$, $x_2(k)$, en las ecuaciones en diferencias (13), aun ante la presencia de perturbaciones.

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos al aplicar la ley de control (18) al sistema de ecuaciones en (13), donde $\vartheta(k)$ está dada por la ecuación (20). Observe que los estados son mantenidos en el origen por la ley de control $u(k)$ (18), aun ante la presencia de perturbaciones. La ley de control $u(k)$, una vez que se compensa la perturbación, se mantiene en un valor de 0, como se ve en la Figura 5.

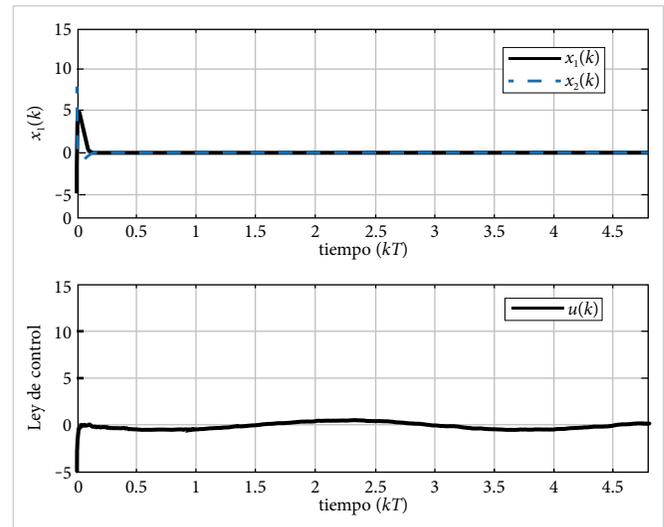


Figura 5. Arriba: evolución temporal de los estados $x_1(k)$, $x_2(k)$. Abajo: ley de control $u(k)$ que mantiene a los estados alrededor del origen.

La Figura 6 ilustra la perturbación $\rho(k) = 0.5 \text{sen}(\frac{2\pi k T}{3})$ aplicada al sistema (13) junto con la variable $\delta(k)$ (20) que rechaza dicha perturbación. Observe que ambas gráficas son similares, solo que de signo contrario. Esto es, con la suma de la perturbación $\rho(k)$ más el término que lo rechaza $\delta(k)$ en la ley de control $u(k)$ se obtiene 0.

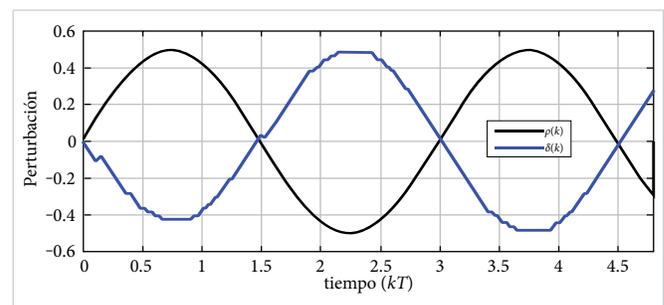


Figura 6. La línea negra representa la perturbación $\rho(k)$ aplicada en la ecuación (13), y la línea azul es la evolución temporal $\delta(k)$ en (20) que compensa la perturbación.

Como se puede ver en la metodología propuesta y en los resultados de los ejemplos numéricos, es posible aplicar este controlador en tarjetas programables, como pueden ser Arduino y Beagle Bone, entre otras, ya que no es necesario realizar complicadas operaciones y la ley de control se obtiene de manera recursiva.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado el diseño de una ley de control en tiempo discreto donde, en ausencia de perturbaciones, es posible elegir el tiempo de convergencia al origen para sistemas escalares.

A pesar de que el diseño del controlador se ha propuesto para sistemas escalares, es posible extenderlo a sistemas de ecuaciones en tiempo discreto como se ve en el ejemplo propuesto.

Como trabajo futuro se plantea otros tipos de controladores en tiempo discreto y su aplicación en tiempo real.

REFERENCIAS

- [1] E. Hendricks, O. Jannerup y P. H. Sørensen, "Linear control system design", en *Linear systems control. Deterministic and stochastic methods*, E. Hendricks, O. Jannerup y P. H. Sørensen, eds., 1.ª ed. Berlín, Alemania: Springer, 2008, cap. 4, pp. 193-291, doi: [10.1007/978-3-540-78486-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-78486-9).
- [2] J. B. Burl, "H infinity control", en *Linear optimal control*, J. B. Burl, ed., 1.ª ed. Menlo Park, Estados Unidos de América: Addison-Wesley, 1999, cap. 3, pp. 329-368.
- [3] D. E. Kirk, *Optimal control theory. An introduction*, 1.ª ed. Nueva York, Estados Unidos de América: Dover Publications, 2004.
- [4] V. I. Utkin, *Sliding modes in control optimization*, 1ª ed. Berlín, Alemania: Springer, 1992, doi: [10.1007/978-3-642-84379-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-84379-2).
- [5] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman y A. Levant, *Sliding mode control and observation*, 1ª ed. Londres, Reino Unido: Birkhauser, 2014, doi: [10.1007/978-0-8176-4893-0](https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4893-0).
- [6] A. Isidori, "Elementary theory of nonlinear feedback for single-input single-output systems", en *Nonlinear Control Systems*, A. Isidori, eds., 2.ª ed. Berlin, Alemania: Springer, 1989, cap. 4, pp. 145-233, doi: [10.1007/978-1-84628-615-5](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-615-5).
- [7] V. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes", en *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 22, n.º 2, pp. 212-222, abr. 1977, doi: [10.1109/TAC.1977.1101446](https://doi.org/10.1109/TAC.1977.1101446).
- [8] A. Levant, "Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control", *Int. J. Control*, vol. 58, n.º 6, pp. 1247-1263, mar. 2007, doi: [10.1080/00207179308923053](https://doi.org/10.1080/00207179308923053).
- [9] S. Bhat, D. Bernstein, "Finite-time stability of continuous autonomous systems", *SIAM J. Control Optim.*, vol. 38, n.º 3, pp. 751-766, 2000, doi: [10.1137/S0363012997321358](https://doi.org/10.1137/S0363012997321358).
- [10] A. Polyakov, "Nonlinear Feedback Design for Fixed-Time Stabilization of Linear Control Systems", en *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, n.º 8, pp. 2106-2110, ag. 2012, doi: [10.1109/TAC.2011.2179869](https://doi.org/10.1109/TAC.2011.2179869).
- [11] A. Garza-Alonso, M. Basin y P. Rodriguez-Ramirez, "Predefined-time stabilization permanent-magnet synchronous motor", *Trans. Inst. Meas. Control*, vol. 43, n.º 13, pp. 3044-3054, jun. 2021, doi: [10.1177/01423312211016741](https://doi.org/10.1177/01423312211016741).
- [12] J. D. Sánchez-Torres, D. Gómez-Gutiérrez, E. López y A. Loukianov, "A class of predefined-time stable dynamical systems", *IMA J. Math. Control. Inf.*, vol. 35, n.º 1, pp. i1-i29, abr. 2018, doi: [10.1093/imamci/dnx004](https://doi.org/10.1093/imamci/dnx004).
- [13] M. Galicia, A. Loukianov, J. Rivera y V. I. Utkin, "Discrete-time sliding mode regulator for nonminimum phase systems", *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Maui, HI, EUA, 2012, pp. 7708-7713, doi: [10.1109/CDC.2012.6425813](https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6425813).
- [14] K. Abidi, J.-X. Xu y Y. Xinghuo, "On the Discrete-Time Integral Sliding-Mode Control", en *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, n.º 4, pp. 709-715, abr. 2007, doi: [10.1109/TAC.2007.894537](https://doi.org/10.1109/TAC.2007.894537).
- [15] K. C. Veluvolu, Y. C. Soh y W. Cao, "Robust discrete-time nonlinear sliding mode state estimation of uncertain nonlinear systems", *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 17, n.º 9, pp. 803-828, nov. 2006, doi: [10.1002/rnc.1154](https://doi.org/10.1002/rnc.1154).

- [16] I. Salgado, S. Kamal, I. Chairez, B. Bandyopadhyay y L. Fridman, "Super-twisting-like algorithm in discrete time nonlinear systems", *The 2011 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, Zhengzhou, China, 2011, pp. 497-502.
- [17] F. Amato, M. Ariola y C. Cosentino, "Finite-time control of discrete-time linear systems: Analysis and design

conditions", *Automatica*, vol. 46, n.º 5, pp. 919-924, may. 2010, doi: [10.1016/j.automatica.2010.02.008](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2010.02.008).

RECONOCIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo brindado.

Análisis de conductas de seguridad en diferentes contextos laborales de Ciudad Juárez

Analysis of Safety Behaviors in Different Work Contexts in Ciudad Juarez

Dra. Karla Gabriela Gómez Bull^{1a}  , Dra. Aurora Irma Máynez Guaderrama^{1b} , Dra. María Marisela Vargas Salgado^{1c} , Dr. Jesús Andrés Hernández Gómez^{1b} 

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, {^aInstituto de Ingeniería y Tecnología, Programa de Ingeniería Industrial y de Sistemas en la División Multidisciplinaria de Ciudad Universitaria}, {^bInstituto de Ingeniería y Tecnología, Programa de Ingeniería Industrial y de Sistemas}, {^cInstituto de Ciencias Sociales y Administración, Programa de Administración de Empresas en la División Multidisciplinaria de Ciudad Universitaria}, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento de seguridad mostrado por trabajadores en diferentes contextos ocupacionales en el norte de México. El comportamiento de seguridad se midió con dos dimensiones: *participación en seguridad* y *cumplimiento de seguridad*, a través de un instrumento de 7 ítems previamente validado. Se recolectaron datos de una muestra de 201 trabajadores que laboran en diferentes sectores, incluyendo automotriz, médico, servicios y educación, entre otros. No se identificaron diferencias significativas en los comportamientos de seguridad exhibidos entre los distintos sectores laborales, sin embargo, cabe destacar que los trabajadores de los sectores educativo y de servicios son más propensos a exhibir mejores comportamientos de seguridad. Los contextos laborales con más comportamientos de riesgo son los de los sectores de la electrónica y el médico. Además, se constató que solo un bajo porcentaje de trabajadores es consciente de trabajar de forma insegura. Se recomienda seguir analizando los accidentes laborales y sus respectivos factores asociados, para utilizar dicha información en el diseño de medidas preventivas de seguridad.

PALABRAS CLAVE: conductas de seguridad; seguridad laboral; accidentes laborales.

ABSTRACT

This study aims to analyze safety behaviors displayed by workers in different occupational contexts in Northern Mexico. Safety behavior was measured with two dimensions: *safety participation* and *safety compliance*, through a previously validated 7-item instrument. Data were collected from a sample of 201 workers working in different employment sectors including automotive, medical, services, and education, among others. No significant differences were identified in safety behaviors exhibited among the different work sectors; however, it is noteworthy that workers in the educational and service sectors are more likely to exhibit better safety behaviors. The work contexts with more risky behaviors are those of the electronics and medical sectors. Moreover, it was found that only a low percentage of workers are aware of working in an unsafe manner. It is recommended to continue analyzing occupational accidents, and their respective associated factors, to use such information for designing preventive safety measures.

KEYWORDS: safety behavior; safety at work; work accidents.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Karla Gabriela Gómez Bull
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez /
División Multidisciplinaria de Ciudad Universitaria
DIRECCIÓN: Av. José Jesús Macías Delgado núm. 18100,
Ciudad Universitaria, C. P. 32000, Ciudad Juárez, Chih., México
CORREO ELECTRÓNICO: karla.gomez@uacj.mx

Fecha de recepción: 27 de junio de 2024. **Fecha de aceptación:**
14 de octubre de 2024. **Fecha de publicación:** 26 de octubre de
2024.



I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los accidentes laborales representan una problemática mundial que afecta de manera directa a los trabajadores, además de que conlleva costos considerables para las organizaciones [1] y se definen como aquellos sucesos que causan daño a las personas y que se vinculan al desarrollo de su trabajo [2]. En ocasiones estos percances traen consigo inestabilidad familiar, desempleo —a causa de los daños generados— y hasta pueden implicar la adaptación de instalaciones o nuevas formas de vida [3]. La Organización Mundial de la Salud (OMS) menciona que este tipo de accidentes saturan los sistemas de salud, reducen la productividad en las organizaciones y tienen un impacto negativo en los ingresos económicos de las personas [4]. Existe una alta incidencia de accidentes laborales; se afirma que aproximadamente 317 millones de estos se presentan a escala mundial [5] y se estima que alrededor de 2.34 millones de personas pierden la vida, ya sea a causa de accidentes o de enfermedades de origen laboral [6].

En México, según la memoria estadística más reciente del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), se registraron un total de 393 805 accidentes laborales en 2023. Esta cifra refleja un incremento del 11.73 % en comparación con 2022 y del 28.8 % respecto a 2021, lo que refleja una tendencia preocupante en términos de seguridad ocupacional. Estos accidentes se han presentado tanto en empleados de ventas como en cocineros, trabajadores de la construcción, operadores de maquinaria, transportistas, guardias y vigilantes, entre otros. Además, durante 2023 se registraron 733 fallecimientos como resultado de accidentes laborales, de los cuales 30 ocurrieron en el estado de Chihuahua [7].

Por lo anterior, resulta importante indagar e invertir en la seguridad e higiene en el trabajo, ya que de esta manera es posible contribuir a dignificar las labores de los trabajadores, además de fortalecer el desarrollo tecnológico [8]. La seguridad e higiene implica el empleo de métodos y protocolos en los sitios laborales, con el fin de identificar, evaluar y controlar agentes dañinos en las actividades laborales y con ello evitar accidentes o enfermedades laborales [9]. Cabe destacar la necesidad de que en los contextos laborales se desarrollen medidas y acciones preventivas que ayuden a contar con lugares de trabajo más sanos y seguros, resilientes y justos que promuevan la salud en el lugar de trabajo [4]. Es decir, todas las organizaciones deben implementar sistemas

de gestión de seguridad que brinden condiciones seguras de trabajo que ayuden a prevenir actos inseguros, donde se evalúen riesgos y se reduzcan fuentes de accidentes [10]. En resumen, la seguridad en el trabajo es indispensable para garantizar el desarrollo satisfactorio de este [11].

A pesar de la importancia de los protocolos de seguridad en las organizaciones, por lo general su cumplimiento se lleva a cabo superficialmente, lo que puede perjudicar los resultados de seguridad [12], sobre todo porque por el lado de los trabajadores existe resistencia a cambiar comportamientos o conductas comunes y que deben dejar de hacerse, es decir, existen paradigmas arraigados difíciles de cambiar [13]. De acuerdo con el IMSS, los accidentes laborales ocurren a causa de *condiciones peligrosas* y de *actos inseguros* [14]. Las condiciones inseguras o peligrosas son espacios o situaciones proclives a que se genere un riesgo, son situaciones del medio en que los trabajadores desempeñan sus actividades, es decir, tienen que ver con el ambiente laboral [15]. Por otra parte, los actos inseguros están relacionados con los comportamientos humanos, entre los que se pueden encontrar la operación de equipos sin contar con la autorización necesaria, trabajar a velocidades peligrosas, no utilizar dispositivos de seguridad y exposición innecesaria al peligro, entre otros [16].

Aunque los accidentes laborales puedan ser generados por diferentes factores, ya sea del medio ambiente, las deficiencias de la organización o el comportamiento humano [17], se considera que el factor humano es la fuente principal de los accidentes. El comportamiento humano implica todo tipo de conductas desplegadas por el trabajador [16]. En la literatura se ha encontrado que los altos índices de accidentabilidad tienen relación estrecha con este tipo de conductas [18].

De acuerdo con Neal y Griffin [19], existen dos tipos de conductas de seguridad: el *cumplimiento de seguridad* y la *participación en seguridad*; la primera hace referencia a las actividades principales que deben realizarse por los trabajadores para mantener la seguridad en el lugar de trabajo, mientras que la segunda se refiere a comportamientos que no contribuyen directamente a la seguridad del empleado, pero que sí aportan a la seguridad del ambiente de trabajo. Estas conductas dependen del proceso de toma de decisiones, el cual se ve influenciado por factores como las características personales, psicológicas, fisiológicas y sociales [20]. Últimamente, las inves-

tigaciones relacionadas con las conductas de seguridad han cobrado relevancia, ya que ayudan a reducir la alta incidencia de accidentes [21].

La conducta de seguridad ha sido examinada en diversos contextos laborales y en relación con múltiples variables. Ghasemi *et al.* llevaron a cabo una investigación con enfermeras, donde se identificó que la capacitación de los trabajadores es fundamental para mejorar la conducta de seguridad y prevenir el aumento de accidentes laborales [22]. De manera similar, en el ámbito de la minería, Ye *et al.* analizaron la relación entre la conducta de seguridad y el capital psicológico, encontrando que el compromiso percibido de la gestión influye significativamente en la conducta de seguridad de los trabajadores, por lo tanto, es un factor clave a considerar para evitar conductas de riesgo en el trabajo [23].

Por otro lado, Gao *et al.* [24] examinaron la relación entre la conducta de seguridad y los rasgos de personalidad en trabajadores de la construcción, y sus hallazgos indicaron que tanto la amabilidad como la consciencia se correlacionan positivamente con el comportamiento de seguridad, en contraste con la extraversión y el neuroticismo, que mostraron correlaciones negativas. A partir de estos resultados, los autores recomendaron que las personas con altos niveles de neuroticismo no sean asignadas a tareas que impliquen la operación de maquinaria de construcción, debido a la necesidad de mantener emociones estables y atención enfocada en dichas actividades.

En este mismo sentido, este trabajo tiene como objetivo analizar las conductas de seguridad presentes en una muestra de trabajadores mexicanos, en diferentes sectores laborales en el norte de México. Se considera que los resultados servirán para detectar el nivel de cumplimiento de protocolos de seguridad en dichos contextos, con el propósito de coadyuvar en la prevención de accidentes asociados a conductas inseguras, de forma que las organizaciones y sus empleados se concienticen de los riesgos y así intervenir lo antes posible.

II. METODOLOGÍA

A. MATERIALES

Para medir la conducta de seguridad en ambientes laborales, en esta investigación se utilizó el instrumento de Neal y Griffin [25] para medir la conducta de seguridad,

el cual fue validado mediante un estudio longitudinal con personal de un hospital en Australia. Los valores de alfa de Cronbach superaron 0.86 en las dos dimensiones del instrumento, lo que indica que es fiable para su uso en la investigación. Este instrumento se conforma de 7 ítems, de los cuales 3 corresponden a la dimensión de participación en seguridad (PS) y 4 a la de cumplimiento de seguridad (CS), tal como se muestra en la [Tabla 1](#). La valoración de los ítems se llevó a cabo con una escala de respuesta tipo Likert de 5 puntos, desde 1 “Totalmente en desacuerdo” a 5 “Totalmente de acuerdo”. Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software IBM SPSS Statistics 25.

TABLA 1 [21]
INSTRUMENTO PARA CONDUCTA DE SEGURIDAD

DIMENSIÓN	ÍTEM
Participación en seguridad	1. Ayudo a mis compañeros cuando están trabajando en condiciones peligrosas
	2. Hago un esfuerzo para mejorar la seguridad en mi lugar de trabajo
	3. Realizo actividades de forma voluntaria que mejoren la seguridad en el trabajo
Cumplimiento de seguridad	4. Realizo mi trabajo de manera segura
	5. Sigo los procedimientos de seguridad correctos para llevar a cabo el trabajo
	6. Utilizo todo el equipo de seguridad necesario para realizar mi trabajo
	7. Me aseguro de tener los más altos niveles de seguridad cuando trabajo

A. MATERIALES

El instrumento diseñado y adaptado se capturó en la plataforma Google Forms, para ser compartido a través de medios digitales de trabajadores de diferentes contextos laborales. Una vez recopilada la información de la muestra, se procedió al análisis estadístico de los datos, después se calcularon medidas de tendencia central, frecuencias y porcentajes tanto de las características sociodemográficas de los participantes como de sus conductas de seguridad y, finalmente, se llevó a cabo una prueba de análisis de varianza para determinar la existencia de diferencias significativas de conductas de seguridad en los contextos laborales bajo estudio, además de las diferencias en estas a partir de las características sociodemográficas de la muestra.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La muestra estuvo compuesta por 201 trabajadores, fundamentándose en un estudio previo que analizó la conducta de seguridad en trabajadores de la construcción, junto con otras variables relacionadas con los accidentes laborales [26]. Este tamaño de muestra se considera adecuado, ya que, como en el trabajo anteriormente citado, permite obtener resultados confiables para el campo de la seguridad industrial. En la **Tabla 2** se muestran las características sociodemográficas de los participantes del estudio. De la muestra de 201 trabajadores, 76 fueron hombres y 125 mujeres. El 52.2 % se encuentran en un rango de edad de entre 20 y 29 años, seguidos del 25.9 % que incluye trabajadores de entre 30 y 39 años. Solamente se tuvo 8 personas mayores de 50 años. La mayoría cuenta con estudios de preparatoria (25.4 %), seguidos de personas con licenciatura terminada (22.4 %). Además, el 59.7 % mencionó estar soltero.

TABLA 2
CARACTERÍSTICAS SOCIODEMGRÁFICAS

CARACTERÍSTICA	FRECUENCIA	%
Edad		
Menos de 20 años	15	7.5
20 a 29 años	105	52.2
30 a 39 años	52	25.9
40 a 49 años	21	10.4
Más de 50 años	8	4.0
Estado civil		
Soltero	120	59.7
Casado	68	33.8
Separado	13	6.4
Escolaridad		
Secundaria	5	2.5
Preparatoria	51	25.4
Técnico	21	10.4
Licenciatura trunca	40	19.9
Licenciatura terminada	45	22.4
Posgrado	30	14.9
Otro	9	4.5

En lo correspondiente al contexto laboral, la mayoría de los participantes trabaja en la industria del ramo automotriz (20 %), seguido del sector servicios (18.4 %), la industria de ramo electrónico (15.4 %), el sector médico

(12.9 %), y el educativo (6.5 %). En la **Figura 1** se encuentran los resultados correspondientes a la antigüedad laboral. La mayoría de las personas tiene menos de 1 año en la organización en la que se labora (32 %), el 29 % tiene entre 1 y 2 años de antigüedad laboral, el 17.9 % entre 3 y 4 años, y finalmente el 21.4 % de la muestra manifestó tener 5 años o más años.

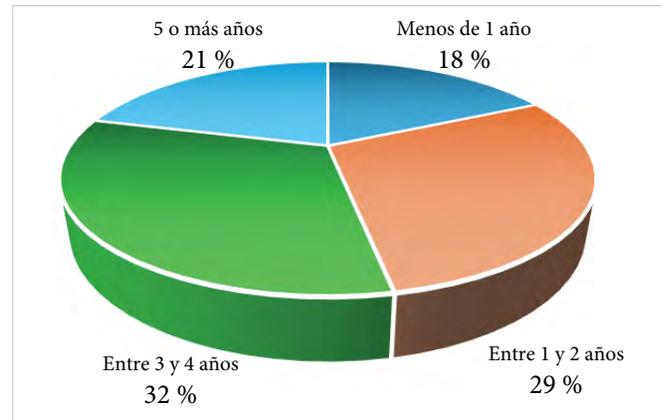


Figura 1. Resultados de antigüedad laboral.

En la **Tabla 3** se exhiben los resultados de las conductas de seguridad reportadas por los participantes del estudio. Se aprecia que dentro de los ítems utilizados para medir la participación en seguridad (PS), el ítem 2 “Hago un esfuerzo para mejorar la seguridad en mi lugar de trabajo” fue el que obtuvo el mayor promedio (4.18 ± 0.837). En este caso, la respuesta más común fue “De acuerdo” con 45.8 %, lo que indica que la mayoría de los empleados se preocupa por desarrollar acciones que van más allá de sus propias obligaciones, con el propósito de tener un lugar más seguro para laborar. Solamente el 2 % de los participantes manifestó estar en total desacuerdo.

En el caso de la dimensión de cumplimiento de seguridad (CS), el ítem con mayor puntuación promedio es el 6 “Utilizo todo el equipo de seguridad necesario para realizar mi trabajo” y la respuesta más común fue totalmente de acuerdo (44.8 %), con un promedio de puntuaciones de 4.26 ± 0.868 . Los participantes que expresaron estar en total desacuerdo y desacuerdo representaron solamente un 2.5 % y 1.5 % respectivamente.

Otro de los ítems de cumplimiento de seguridad con alta puntuación promedio fue el 4 “Realizo mi trabajo de manera segura”, con una media de 4.22 ± 0.946 . Es de destacar que un 3.5 % de los participantes estuvo en total desacuerdo, es decir, llama la atención que las

personas son conscientes de que no hacen su trabajo de manera segura y están expuestas a experimentar un accidente. Esto llama la atención debido a que también se les preguntó a los participantes si alguna vez habían su-

frido un accidente de trabajo, a lo que 36 participantes (17.9 %) respondieron afirmativamente, indicando que han experimentado alguna vez un accidente de origen laboral.

TABLA 3
RESULTADO DEL INSTRUMENTO PARA CONDUCTAS DE SEGURIDAD

ÍTEM	TOTALMENTE EN DESACUERDO (1)	DESACUERDO (2)	NI DE ACUERDO NI EN DESACUERDO (3)	DE ACUERDO (4)	TOTALMENTE DE ACUERDO (5)	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
1. Ayudo a mis compañeros cuando están trabajando en condiciones peligrosas (PS)	6.5 %	2.5 %	16.4 %	33.3 %	41.3 %	4.00	1.125
2. Hago un esfuerzo para mejorar la seguridad en mi lugar de trabajo (PS)	2.0 %	1.0 %	12.4 %	45.8 %	38.8 %	4.18	0.837
3. Realizo actividades de forma voluntaria que mejoren la seguridad en el trabajo (PS)	1.5 %	5.0 %	21.9 %	39.3 %	32.3 %	3.96	0.937
4. Realizo mi trabajo de manera segura (CS)	3.5 %	3.0 %	6.0 %	42.8 %	44.8 %	4.22	0.946
5. Sigo los procedimientos de seguridad correctos para llevar a cabo el trabajo (CS)	2.5 %	3.5 %	10.4 %	43.8 %	39.8 %	4.15	0.921
6. Utilizo todo el equipo de seguridad necesario para realizar mi trabajo (CS)	2.5 %	1.5 %	8.5 %	42.8 %	44.8 %	4.26	0.868
7. Me aseguro de tener los más altos niveles de seguridad cuando trabajo (CS)	3.0 %	1.0 %	11.9 %	48.3 %	35.8 %	4.13	0.879

De acuerdo al análisis de varianza mostrado en la Tabla 4, no existen diferencias estadísticamente significativas en las conductas de seguridad entre los sectores laborales bajo estudio y el *p-value* obtenido fue mayor al nivel de significancia (0.488). Esto indica que las conductas de seguridad de los trabajadores son similares, independientemente del sector en el que las personas se desenvuelven.

TABLA 4
INSTRUMENTO PARA CONDUCTA DE SEGURIDAD

	SUMA DE CUADRADOS	GL	MEDIA CUADRÁTICA	F	SIG.
Entre grupos	116.951	5	23.390	0.892	0.488
Dentro de grupos	5115.437	195	26.233		
Total	5232.388	200			

Abreviaturas. GL: grados de libertad, F: estadístico de la prueba para evaluar la variabilidad entre los grupos, Sig. significancia estadística.

Sin embargo, se puede observar en la Figura 2 que los trabajadores del sector educativo tienden a desplegar mayores conductas de seguridad, seguidos de los del sector de servicios. Es de destacar que los contextos laborales donde se reportan conductas de seguridad más bajas —mayores conductas de conductas de riesgo—, son los sectores de ramo electrónico y médico.

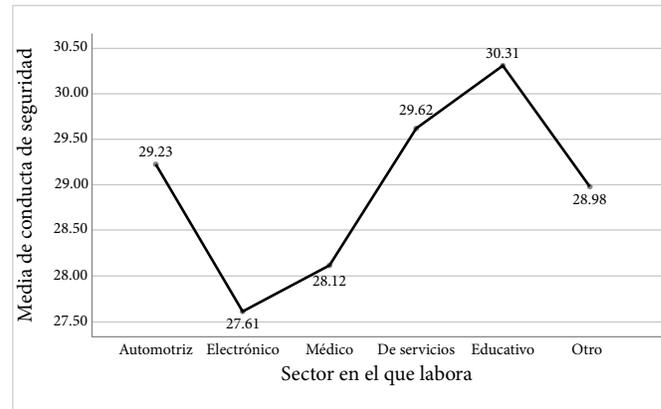


Figura 2. Comparación de conductas de seguridad por contexto laboral.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron conductas de seguridad de una muestra de trabajadores de diferentes contextos laborales (sector automotriz, electrónico, de servicios y médico, entre otros). No se identificaron diferencias estadísticamente significativas en las conductas de seguridad de los trabajadores entre los diferentes sectores laborales. Sin embargo, es de resaltar que se encontró que existen todavía trabajadores que son conscientes de que no utilizan el equipo de protección que deberían, incluso ellos mismos consideran que no realizan

su trabajo de manera segura, y aun así no cambian sus conductas, es decir, llevan a cabo actos inseguros, los cuales, como se mencionó al inicio de este trabajo, representan unas de las principales causas de generación de accidentes.

Es de vital importancia que las organizaciones diseñen e implementen medidas de seguridad que incluyan la concientización de los trabajadores y no solo se enfoquen en la mejora de las condiciones del lugar de trabajo, sino que tomen en cuenta el factor humano. Además, es necesario mantener comunicación constante con los trabajadores y tratar de motivarlos a buscar la seguridad no solo de ellos mismos, sino de sus compañeros.

Se recomienda seguir indagando sobre los accidentes laborales y analizar sus causas, debido a su alta incidencia. Se considera que la información obtenida en este trabajo puede ser utilizada en el diseño de medidas de seguridad que complementen los sistemas de gestión de riesgos, de forma tal que pueda prevenirse la ocurrencia de accidentes.

REFERENCIAS

- [1] A. V. Jaramillo, V. Castillo, Á. M. Pardo, T. A. Arias, P. A. Gil y M. García, “Accidente de trabajo y enfermedad profesional en Colombia. Las condiciones de seguridad y salud en el trabajo del sector metalúrgico en Colombia”, *Poliantea*, vol. 14, n.º 25, 2019, doi: [10.15765/poliantea.v14i25.1336](https://doi.org/10.15765/poliantea.v14i25.1336).
- [2] J. Dyreborg et al., “Safety interventions for the prevention of accidents at work: A systematic review”, *Campbell Syst. Rev.*, vol. 18, n.º 2, pp. 1-187, 2022, doi: [10.1002/cl2.1234](https://doi.org/10.1002/cl2.1234).
- [3] C. Aguilar, T. Cetina, G. Centeno y E. Ramírez, “Cultura de seguridad organizacional: variables grupales relacionadas con la conducta segura”, *Psicol. Am. Lat.*, vol. 35, pp. 1-13, 2021.
- [4] OMS. “OMS/OIT: Casi 2 millones de personas mueren cada año por causas relacionadas con el trabajo”. WHO. int. Accedido: may. 31, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/16-09-2021-who-ilo-almost-2-million-people-die-from-work-related-causes-each-year>
- [5] N. V. Ruíz y R. M. Gallegos, “Factores Asociados a la Ocurrencia de Accidentes de Trabajo en la Industria Manufacturera”, *Horiz. Enferm.*, vol. 29, n.º 1, pp. 42-55, 2018.
- [6] Organización Internacional del Trabajo. “Salud y seguridad en trabajo en América Latina y el Caribe”. ILO.org. Accedido: may. 31, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ilo.org/es/migration-stub-4877/salud-y-seguridad-en-trabajo-en-america-latina-y-el-caribe>
- [7] IMSS. “Memoria Estadística 2023”. IMSS.gob.mx. Accedido: sept. 25, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.imss.gob.mx/conoce-al-imss/memoria-estadistica-2023>
- [8] Di. F. Lotero y D. M. Robayo, “Seguridad y salud en el trabajo para MiPymes bajo restricciones de tiempo, costo y alcance”, *Rev. Cuba. Salud Trab.*, vol. 25, n.º 2, 2024.
- [9] S. A. Franco, M. Salazar y M. O. Peña, “Accidentes de Trabajo con Luxación, Esguince y Torcedura de Articulaciones y Ligamentos de Tobillo y del Pie, en el Estado de Jalisco, México, en los años 2012 y 2013”, *Rev. Cuba. Salud Trab.*, vol. 17, n.º 3, pp. 21-25, 2016.
- [10] J. A. Cangahuala y V. R. Salas, “Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional para la prevención de accidentes laborales en empresas mineras”, *Llamkasun*, vol. 3, n.º 1, pp. 112-118, 2022, doi: [10.47797/llamkasun.v3i1.90](https://doi.org/10.47797/llamkasun.v3i1.90).
- [11] R. A. Díaz, L. M. D. Zúñiga, M. I. Gómez y B. Medina, “La seguridad laboral y su incidencia en los niveles estrés en el trabajo”, *CAGI*, vol. 8, n.º 15, en. 2021.
- [12] X. Hu, G. Yeo y M. Griffin, “More to safety compliance than meets the eye: Differentiating deep compliance from surface compliance”, *Saf. Sci.*, vol. 130, art. 104852, 2020, doi: [10.1016/j.ssci.2020.104852](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104852).
- [13] C. Rodríguez, “Influencia del Programa Comportamiento Seguro en los Trabajadores de Planta Callao -CLSA, Lima-Perú”, *Ind. Data*, vol. 23, n.º 2, pp. 95-107, 2020, doi: [10.15381/idata.v23i2.17568](https://doi.org/10.15381/idata.v23i2.17568).
- [14] IMSS. “Prevención de accidentes en el trabajo”. IMSS.gob.mx. Accedido: may. 21, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.imss.gob.mx/salud-en-linea/prevencion-accidentestrabajo>

- [15] C. Severiche, C. Vidal, D. Muñoz, R. Martelo y Y. Gordon, "Condiciones inseguras de las políticas públicas ambientales en cooperativas de recicladores de residuos sólidos urbanos", *Arch. Venez. Farmacol. y Ter.*, vol. 40, n.º 8, pp. 818-823, 2021, doi: [10.5281/zenodo.5791116](https://doi.org/10.5281/zenodo.5791116).
- [16] C. Ramírez, *Seguridad industrial: un enfoque integral*. México: Limusa / Noriega Editores, 2005.
- [17] F. Luna, *Prevención de riesgos laborales*. Málaga: Editorial Vértice, 2012.
- [18] S. S. Man, A. H. S. Chan y S. Alabdulkarim, "Quantification of risk perception: Development and validation of the construction worker risk perception (CoWoRP) scale", *J. Safety Res.*, vol. 71, pp. 25-39, 2019, doi: [10.1016/j.jsr.2019.09.009](https://doi.org/10.1016/j.jsr.2019.09.009).
- [19] A. Neal y M. A. Griffin, "Safety Climate and Safety Behaviour", *Aust. J. Manag.*, vol. 27, n.º 1 supl., pp. 67-75, 2002, doi: [10.1177/031289620202701s08](https://doi.org/10.1177/031289620202701s08).
- [20] R. Tong, H. Li, B. Zhang, X. Yang y X. Ma, "Modeling of unsafe behavior risk assessment: A case study of Chinese furniture manufacturers", *Saf. Sci.*, vol. 136, art. 105157, abr. 2021, doi: [10.1016/J.SSCI.2020.105157](https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2020.105157).
- [21] Q. Meng, W. Liu, Z. Li y X. Hu, "Influencing factors, mechanism and prevention of construction workers' unsafe behaviors: A systematic literature review", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, n.º 5, art. 2644, pp. 1-23, 2021, doi: [10.3390/ijerph18052644](https://doi.org/10.3390/ijerph18052644).
- [22] F. Ghasemi, H. Aghaei, T. Askaripoor y F. Ghamari, "Analysis of occupational accidents among nurses working in hospitals based on safety climate and safety performance: a Bayesian network analysis", *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 28, n.º 1, pp. 440-446, en. 2022, doi: [10.1080/10803548.2020.1768759](https://doi.org/10.1080/10803548.2020.1768759).
- [23] X. Ye, S. Ren, X. Li y Z. Wang, "The mediating role of psychological capital between perceived management commitment and safety behavior", *J. Safety Res.*, vol. 72, pp. 29-40, feb. 2020, doi: [10.1016/J.JSR.2019.12.004](https://doi.org/10.1016/J.JSR.2019.12.004).
- [24] Y. Gao, V. A. González y T. W. Yiu, "Exploring the Relationship between Construction Workers' Personality Traits and Safety Behavior", *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 146, n.º 3, art. 04019111, 2020, doi: [10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001763](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001763).
- [25] A. Neal y M. A. Griffin, "A study of the lagged relationships among safety climate, safety motivation, safety behavior, and accidents at the individual and group levels", *J. Appl. Psychol.*, vol. 91, n.º 4, pp. 946-953, 2006, doi: [10.1037/0021-9010.91.4.946](https://doi.org/10.1037/0021-9010.91.4.946).
- [26] N. Xia, X. Wang, M. A. Griffin, C. Wu y B. Liu, "Do we see how they perceive risk? An integrated analysis of risk perception and its effect on workplace safety behavior", *Accid. Anal. Prev.*, vol. 106, pp. 234-242, 2017, doi: [10.1016/j.aap.2017.06.010](https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.06.010).

Optimización de la configuración de materiales compuestos laminados mediante redes neuronales y templado simulado

Optimization of laminated composite materials configuration using neural networks and simulated annealing

Julio César Galvis Chacón¹ , Alejandro E. Rodríguez-Sánchez² , Elías Rigoberto Ledesma Orozco¹ 

¹Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, México

²Universidad Panamericana, Facultad de Ingeniería, Zapopan, Jalisco, México

RESUMEN

La optimización de materiales compuestos laminados es uno de los principales desafíos en el diseño de componentes o sistemas estructurales debido a la influencia de múltiples parámetros en su desempeño y respuesta mecánica ante la deformación. Esta investigación utiliza un metamodelo basado en redes neuronales artificiales para predecir índices de desempeño, específicamente el índice de falla de Tsai-Wu, a partir de la configuración del laminado de un material compuesto sujeto a cargas considerando espesores y orientaciones de sus fibras. El metamodelo alimenta una función objetivo diseñada para mejorar la configuración de una pieza mediante la optimización de las orientaciones de las fibras. Se combina un algoritmo de templado simulado adaptado para materiales compuestos laminados con redes neuronales, generando un espacio de soluciones que ofrece al diseñador una amplia gama de opciones para abordar el análisis del problema. El método reportado es una alternativa eficiente al método tradicional de análisis de materiales compuestos laminados, agilizando el proceso y ampliando las posibilidades de configuración disponibles para su selección.

PALABRAS CLAVE: materiales compuestos, redes neuronales artificiales, optimización, templado simulado, función objetivo.

ABSTRACT

The optimization of laminated composite materials is one of the main challenges in the design of structural components or systems due to the influence of multiple parameters on their performance and mechanical response to deformation. This research uses a metamodel based on artificial neural networks to predict performance indices, specifically the Tsai-Wu failure index, from the configuration of a laminated composite material subject to loads, considering thicknesses and fiber orientations. The metamodel feeds an objective function designed to improve the configuration of a part by optimizing fiber orientations. A simulated annealing algorithm adapted for laminated composite materials is combined with neural networks, generating a solution space that offers the designer a wide range of options to approach the analysis of the problem. The reported method is an efficient alternative to the traditional method of analyzing laminated composite materials, streamlining the process, and expanding the configuration possibilities available for selection.

KEYWORDS: composite materials, artificial neural networks, optimization, simulated annealing, objective function.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Alejandro E. Rodríguez-Sánchez

INSTITUCIÓN: Universidad Panamericana / Facultad de Ingeniería

DIRECCIÓN: Álvaro del Portillo 49, Zapopan, Jalisco, C. P. 45010, México

CORREO ELECTRÓNICO: aerodriguez@up.edu.mx

Fecha de recepción: 29 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:** 18 de octubre de 2024. **Fecha de publicación:** 28 de octubre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos tienen una presencia relevante en el campo de la ingeniería, principalmente por la relación de rigidez y resistencia en relación con su baja densidad, y además se caracterizan por un bajo peso y al mismo tiempo una alta resistencia [1]. Como tal, esta clase de materiales son una combinación de fibras embebidas en una matriz y modificar la dirección de las primeras puede ser una opción versátil para los diseñadores de componentes mecánicos y estructurales, ya que, a través de ello, se pueden establecer direcciones que beneficien la resistencia de una pieza [2].

En el mercado, los materiales compuestos están presentes en el sector automotriz [3], en estructuras civiles y también en el sector aeronáutico [4]. De hecho, en la actualidad, debido a la amplia expansión de las energías alternativas, estos materiales han logrado posicionarse al alza en el mercado internacional, ya que su uso permite, entre otros, la reducción del consumo de combustible en aeronaves, pues gracias a sus propiedades, es posible generar componentes resistentes, pero más ligeros en comparación de aleaciones metálicas como el aluminio, y una buena capacidad de resistencia a la corrosión. Estas características también son importantes en sectores como el de producción de energía limpia, donde se utilizan, por ejemplo, en las palas de materiales compuestos en aerogeneradores [5], así como en el almacenamiento de hidrógeno [6].

El diseño de materiales compuestos para componentes estructurales se centra en la mejora de la resistencia y rigidez de las piezas fabricadas [7]. En concreto, el índice de falla de Tsai-Wu [8] es una relación entre los tensores de resistencias de un material compuesto y los esfuerzos en las direcciones principales que se dan ante una carga, el cual permite obtener una referencia de la posible falla del componente, reflejando con su magnitud la resistencia que posee una pieza. Otro parámetro de análisis es la energía de deformación volumétrica, que es una cantidad que se considera almacenada por un cuerpo cuando este se ve sometido a cambios de geometría debido a tensiones, siendo establecida como una relación de los esfuerzos que sufre una pieza y las deformaciones unitarias. Así, la energía de deformación permite establecer una medida de la rigidez de una pieza o estructura sometida a una carga [9].

En función del tipo de estructura o elemento de máquina, así como sus configuraciones topológicas, el obte-

ner el mejor diseño para materiales compuestos es un proceso que puede llegar a ser desafiante, especialmente porque no resulta sencillo determinar explícitamente cómo los cambios en las direcciones de las fibras y los espesores de las láminas de un material modifican la resistencia y rigidez. En el pasado, esto se ha abordado implementado diversos métodos [10], [11], algunos de los cuales establecen una serie de restricciones que permiten expresar como funciones analíticas la relación de la energía debido a la configuración del laminado de un material [12], mientras que otros definen la dirección de las fibras como una función de curvas específicas del tipo B-Spline [13]. En los últimos avances, también se ha postulado el uso de redes neuronales artificiales (RNA) para el análisis de los materiales compuestos, como lo demuestran los trabajos de Chen y Gu [14], [15], [16], en donde se reporta el uso de arquitecturas convolucionales [14] y generativas [17] para evaluar la energía en un laminado entretejido. La principal estrategia en estas investigaciones consiste en discretizar el dominio del material en pequeñas regiones cuyo módulo de elasticidad es variable y específico para cada sección.

Las metodologías anteriores se centran en materiales compuestos considerados como de rigidez variable [10] (fibras continuas o entretejidos). Por su parte, para el caso de laminados con rigidez constante, es decir, aquellos cuyo apilamiento es el mismo en todo el dominio [11], las alternativas se enfocan en tratar de encontrar arquitecturas RNA que permitan realizar regresiones de las propiedades a partir de parámetros del laminado, tales como orientaciones, espesores, módulos de elasticidad o fracciones volumétricas. Un ejemplo de ello es el trabajo de Chen *et al.* [18], donde se establece una RNA del tipo *feed-forward*, en forma de clasificador, cuyas entradas corresponden a los esfuerzos internos del laminado y su salida es un porcentaje de pertenencia a la zona de falla utilizando el índice de Tsai-Wu. También, en Liao *et al.* [19] se propone una metodología en la que para una barra cilíndrica sometida a torsión o flexión se presentan dos conjuntos de arquitecturas, cada uno con dos RNA, que permiten predecir, usando las direcciones de las fibras y el módulo de elasticidad en la dirección principal, el valor de la rigidez y la resistencia.

Finalmente, en un estudio reciente [20], el uso de metamodelos para la predicción del índice máximo de Tsai-Wu reportó una metodología alternativa para el diseño de materiales compuestos. Partiendo de este enfoque, la presente investigación hizo uso de un metamodelo para

la creación de una función objetivo en el análisis de materiales compuestos laminados, así como la implementación del algoritmo de optimización de templado simulado (SA, del inglés, Simulated Annealing), con el fin de evaluar el rendimiento de la implementación de redes neuronales en la mejora de piezas fabricadas con esta clase de materiales.

II. METODOLOGÍA

A. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LA MECÁNICA DE MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS

El análisis de los materiales compuestos laminados en la teoría clásica y del cortante de deformación de primer orden, parten de establecer una matriz de rigidez $\mathbf{Q}_p^{(i)}$, que relaciona los esfuerzos $\boldsymbol{\sigma}_p^{(i)}$ y deformaciones $\boldsymbol{\epsilon}_p^{(i)}$, en la i -ésima lámina como sigue:

$$\boldsymbol{\sigma}_p^{(i)} = \mathbf{Q}_p^{(i)} \boldsymbol{\epsilon}_p^{(i)} \quad (1)$$

A partir de la Ecuación (1), se puede establecer el aporte estructural de cada lámina a un material laminado. De esta manera, se definen tres matrices de rigidez: \mathbf{A} , \mathbf{B} y \mathbf{D} , que describen cómo el apilamiento de láminas puede comportarse a extensión y flexión. En conjunto con las matrices y ecuación anteriores, se desarrolla una relación entre las cargas \mathbf{N} y momentos \mathbf{M} , ambos por unidad de longitud, la cual permite determinar las deformaciones $\boldsymbol{\epsilon}_{x,y}^0$ y curvaturas \mathbf{k} de un plano medio de referencia en el laminado.

En la Ecuación (1), p corresponde al sistema de coordenadas relativo a la lámina, el cual posiciona la dirección principal orientada de forma paralela al sentido de la fibra y una segunda dirección dentro del plano y perpendicular a esta dirección longitudinal. Al momento de establecer el laminado de un material, es necesario transformar los esfuerzos y deformaciones al sistema global $\{x,y\}$ del empaquetado de láminas. Para esto se usa una matriz de rotación \mathbf{T} :

$$\boldsymbol{\sigma}_p^{(i)} = \mathbf{T} \boldsymbol{\sigma}_{x,y}^{(i)} \boldsymbol{\epsilon}_p^{(i)} = \mathbf{T} \boldsymbol{\epsilon}_{x,y}^{(i)} \quad (2)$$

Entonces, la expresión general en el sistema $\{x,y\}$, para la i -ésima lámina es la siguiente:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma}_{x,y}^{(i)} &= \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Q}_p^{(i)} \mathbf{T} \boldsymbol{\epsilon}_{x,y}^{(i)} \\ \boldsymbol{\sigma}_{x,y}^{(i)} &= \bar{\mathbf{Q}}^{(i)} \boldsymbol{\epsilon}_{x,y}^{(i)} \end{aligned} \quad (3)$$

De las expresiones anteriores, y en notación de índices, se pueden establecer los componentes de las matrices de rigidez extensional $A_{m,n}$, de acople $B_{m,n}$ y de flexión $D_{m,n}$. Cada una de estas se presentan en las siguientes ecuaciones en notación indicial:

$$A_{m,n} = \sum_{i=1}^N \bar{Q}_{m,n}^{(i)} (h_i - h_{i-1}) \quad (4)$$

$$B_{m,n} = \sum_{i=1}^N \bar{Q}_{m,n}^{(i)} (h_i^2 - h_{i-1}^2) \quad (5)$$

$$C_{m,n} = \sum_{i=1}^N \bar{Q}_{m,n}^{(i)} (h_i^3 - h_{i-1}^3) \quad (6)$$

donde para la i -ésima lámina, $\bar{Q}_{m,n}^{(i)}$ es una componente de la matriz de rigidez en el sistema del laminado, y h_i , h_{i-1} corresponden al inicio y fin de la lámina medida respecto al plano de referencia del laminado.

El conjunto de soluciones para el análisis de un material laminado compuesto se describe mediante las deformaciones para el plano medio de referencia y bajo la consideración de una perfecta adherencia entre capas:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A} \boldsymbol{\epsilon}_{x,y}^0 + \mathbf{B} \mathbf{k} \quad (7)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{B} \boldsymbol{\epsilon}_{x,y}^0 + \mathbf{D} \mathbf{k} \quad (8)$$

Así, las matrices de rigidez \mathbf{A} , \mathbf{B} y \mathbf{D} describen el apilado completo de las láminas de un material y se establece una relación entre las cargas \mathbf{N} , momentos \mathbf{M} por unidad de longitud, las deformaciones $\boldsymbol{\epsilon}_{x,y}^0$ y las curvaturas \mathbf{k} de un plano medio de referencia en el laminado de un material compuesto. Las Ecuaciones (1) a (8) describen el esfuerzo de un material laminado compuesto. Además, los lectores del presente artículo pueden encontrar el desarrollo matemático con mayor profundidad, así como la validación pertinente de estas descripciones en los trabajos de Mallick [1] y Reddy [21].

B. METAMODELOS PARA MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS: CASO DE ESTUDIO

En la presente investigación se tomó como caso de estudio el desarrollado por Ledesma-Orozco *et al.* [20], referente a una placa con agujero fijo y con un extremo empotrado y una carga de 7200 Nm aplicada sobre el semicírculo del agujero (Figura 1). El material de esta placa está considerado de un nylon reforzado con fibra de vidrio, presente en la impresión 3D, y sus propiedades se presentan en la Tabla 1.

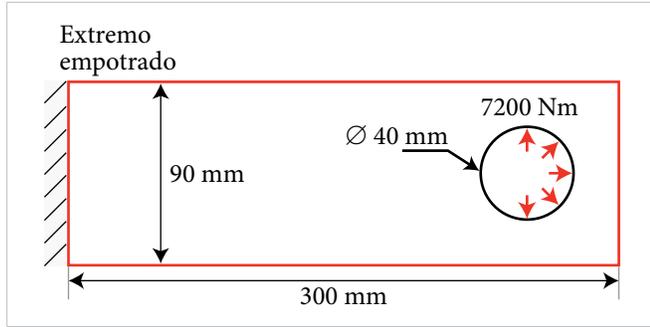


Figura 1. Placa con agujero fijo.

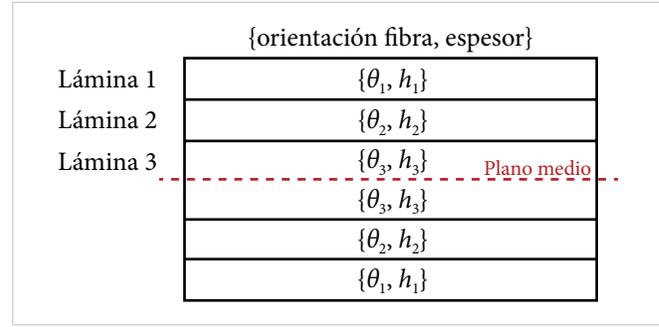


Figura 2. Esquema del laminado

TABLA 1 [20], [22], [23]
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL NYLON REFORZADO

MÓDULOS ELÁSTICOS	
PROPIEDAD	VALOR (GPa**)
E_1	21
$E_2 = E_3$	1.13
$G_{12} = G_{13}$	0.88
G_{23}	0.71
COEFICIENTE DE POISSON	
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.36
ν_{23}	0.3
RESISTENCIAS	
F_{1t}^*	574 a 590
F_{1c}^*	-130 a -82
$F_{2t} = F_{3t}$	9.84
$F_{2c} = F_{3c}$	-12.73
$F_4 = F_5 = F_6$	67.77

* c: compresión, t: tensión. **GPa: gigapascales.

Para el caso de estudio, el laminado se considera uniforme en todo el dominio, así como simétrico, ya que esto reduce los efectos que pueden surgir en los esfuerzos internos debido a la dirección de las fibras de un material, por lo tanto, dadas las Ecuaciones (7) y (8), se reducen a 0 los componentes de la matriz de rigidez de acople B . En resumen, la configuración del material del caso de estudio de este trabajo se presenta en la Figura 2.

La configuración se establece al dividir el empaquetado en tres regiones laminadas, cuyo espesor se modifica en espacios discretos que van de los 0.1 mm a los 0.3 mm, cuyos aumentos corresponden a 0.1 mm, la cual es una medida que se toma con base en el espesor de una capa en impresión 3D estándar. Por otra parte, para las orientaciones en cada lámina, estas se establecen en el rango de los -90° a los 90° , con aumentos de 1° .

Para entrenar el metamodelo de RNA encargado de predecir el índice de falla máximo Tsai-Wu, es necesario crear un conjunto de datos S , cuyas columnas correspondan a los valores de los espesores h y orientaciones θ , con su respectivo valor de I_F . Este conjunto de datos se obtuvo de un modelo discreto de elementos finitos de la placa que se muestra en la Figura 1 a partir de los parámetros de material de la Tabla 1 y el cual fue creado en el programa ANSYS Mechanical APDL [24]:

$$S = \{[\theta_i, h_i], I_F\} \quad (9)$$

Para este propósito, se usan las Ecuaciones (10), (11) y (12), que relacionan los esfuerzos internos con las resistencias a tensión, compresión y cortante en el material compuesto, así como su índice de falla I_F de Tsai-Wu:

$$C_1 = \frac{\sigma_1^2}{F_{1t}F_{1c}} + \frac{\sigma_2^2}{F_{2t}F_{2c}} + \frac{\sigma_3^2}{F_{3t}F_{3c}} + \frac{\sigma_4^2}{F_4^2} + \frac{\sigma_5^2}{F_5^2} + \frac{\sigma_6^2}{F_6^2} + c_4 \frac{\sigma_2\sigma_3}{F_{2t}F_{2c}F_{3t}F_{3c}} + c_5 \frac{\sigma_1\sigma_3}{F_{1t}F_{1c}F_{3t}F_{3c}} + c_6 \frac{\sigma_1\sigma_2}{F_{1t}F_{1c}F_{2t}F_{2c}} \quad (10)$$

$$C_2 = (F_{1t}^{-1} - F_{1c}^{-1})\sigma_1 + (F_{2t}^{-1} - F_{2c}^{-1})\sigma_2 + (F_{3t}^{-1} - F_{3c}^{-1})\sigma_3 \quad (11)$$

$$I_F = \left[-\frac{C_2}{2C_1} + \sqrt{\frac{C_2^2}{4C_1^2} + C_1^{-1}} \right]^{-1} \quad (12)$$

donde C_1 y C_2 son relaciones entre las resistencias y los esfuerzos en las láminas, los valores F_{ij} corresponden a los componentes del tensor de resistencias, mientras que σ_i son los esfuerzos en las direcciones principales de la lámina.

En ANSYS Mechanical APDL se establecieron las simulaciones a partir de las restricciones y condiciones de carga que se presentan en la Figura 1. Además, la configuración del laminado se creó en el elemento tipo SHELL 281, ya que este es el adecuado para el problema

analizado [20], [25]. De esta manera, se organizó un conjunto de datos con un tamaño de 6194 ejemplares de carga para el problema de la pieza que se modelará con redes neuronales artificiales.

C. METAMODELOS DE REDES NEURONALES PARA MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS

Las redes neuronales artificiales del tipo *feed-forward* son modelos basados en el comportamiento de las redes neuronales biológicas, las cuales, a través de la sinapsis, establecen vínculos que se adaptan mejor a la ejecución de una tarea [26].

La estructura de la RNA, utilizada para desarrollar el metamodelo que predice el valor de I_F , se describe de la siguiente manera: posee un conjunto de entradas (espesores y orientaciones del material compuesto del caso de estudio), que ingresan a una capa inicial, para luego pasar sucesivamente a una serie de arreglos de neuronas (capas ocultas), cuyas entradas en cada una de ellas corresponden a una combinación lineal de pesos, sesgos y respuestas de las neuronas de la capa previa. La salida de cada neurona de la capa oculta corresponde al resultado de la función de activación que la define y todas estas salidas convergen finalmente en la capa cuya respuesta corresponde al valor de regresión para el índice máximo de Tsai-Wu I_F . Este proceso se ilustra en la Figura 3.

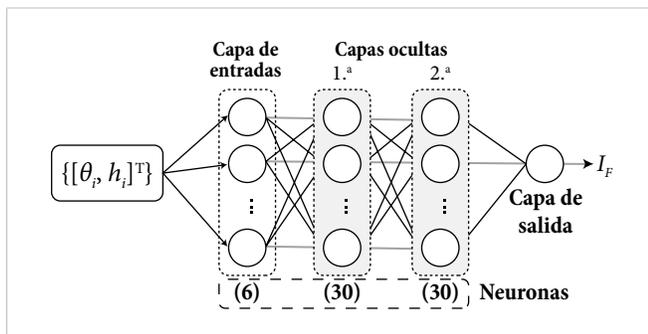


Figura 3. Topología red neuronal.

En la creación del metamodelo fue necesario entrenar, validar y evaluar los resultados generados por la RNA. Para este proceso, se tomó un total de 2477 muestras (40% del total de la base de datos) para el entrenamiento y validación, mientras que se utilizaron 3717 datos restantes (60%) para evaluación de la RNA. Es importante mencionar que, en una RNA, la evaluación corresponde al conjunto de datos que se encuentra fuera del entre-

namiento y validación, y se utiliza para diagnosticar el rendimiento del modelo cuando realiza la regresión de valores desconocidos o nuevos.

La topología de la RNA y los hiperparámetros definidos son cruciales para obtener los mejores resultados en las regresiones. En el metamodelo (véase la Figura 3), la capa de entrada consta de 6 neuronas y está seguida por dos capas ocultas, cada una con 30 neuronas, utilizando la función de activación ReLU (Rectified Linear Unit). El objetivo del entrenamiento es ajustar los pesos y sesgos de la RNA para minimizar el error o la función de costo, que resulta de comparar los valores predichos con los valores reales. En este caso, se utilizó la función de pérdida Error Absoluto Medio (MAE, por sus siglas en inglés) y el algoritmo de entrenamiento RMSprop. Para una descripción más detallada de los algoritmos de entrenamiento y la formulación de una RNA como el metamodelo empleado, se pueden consultar las fuentes [20] y [27].

La arquitectura de RNA del metamodelo se programó utilizando la biblioteca TensorFlow [28], empleando la clase Sequential y capas Dense, que se refieren a neuronas que están completamente conectadas entre sí desde la entrada hasta la neurona de salida.

Finalmente, los datos de entrada de los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba fueron normalizados y para el uso adecuado de los espesores y orientaciones fue necesario escalarlos antes de ingresarlos a la RNA. Para esto, en cuanto a los espesores, se asume como unidad el valor mínimo, que corresponde a 0.1 mm, y se dividió por este valor para obtener un número entero en la entrada. En cuanto a las orientaciones de la Ecuación (9), estas se expresaron en radianes. Los lectores pueden consultar dichos datos de entrenamiento en el enlace adjunto al final de este trabajo.

D. FUNCIÓN OBJETIVO EN LA OPTIMIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS

Una de las dificultades a las que se enfrentan los diseñadores de materiales compuestos laminados es la elección de la función objetivo. Si se elige una cuya entrada corresponda únicamente al índice de Tsai-Wu regulado por un factor de seguridad [29]. El resultado final de optimizar dicha función corresponderá al laminado, cuya cantidad de capas distribuye la carga lo suficiente para alcanzar el valor de falla.

En la presente investigación se alimentó un metamodelo con los parámetros del laminado. Luego, con esta información, se obtuvo el índice de falla de Tsai-Wu máximo, el cual forma parte de una función objetivo, cuya estructura busca favorecer la mejora del material compuesto principalmente por la orientación de las fibras (Figura 4).

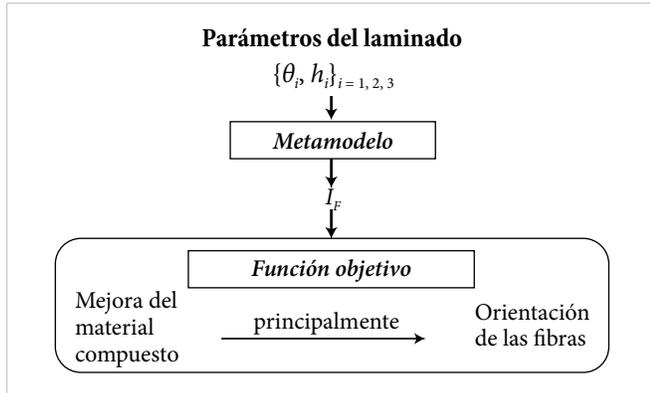


Figura 4. Función objetivo: análisis y desarrollo.

Para determinar la función objetivo, se empleó el principio del error en estado estable en los sistemas de control [30]. Así, en analogía a este principio, la función objetivo en este trabajo fue elegida para tener convergencia y estabilizarse hacia un valor cercano a 0 con el tiempo. Se espera entonces que, al utilizarla en un algoritmo de optimización, el aumento de iteraciones conduzca a un punto de convergencia donde, a pesar de que el índice de falla del laminado disminuya debido a la adición de capas, el cambio en la función objetivo sea mínimo, lo que permitirá su estabilización.

El primer paso para el desarrollo de la función objetivo es reconocer que, para evitar la falla, al diseñar y optimizar una estructura fabricada con materiales compuestos laminados el valor del índice de Tsai-Wu debe ser menor a 1 y, en su punto óptimo, se sitúe lo más cercano a 0. En un proceso de optimización, si se gráfica la evolución de este índice I_F respecto al avance en el número de iteraciones, manteniendo constante el espesor y solo reorientando las direcciones de las fibras, la naturaleza descrita sería similar a la ilustrada en la Figura 5.

Basado en el efecto anteriormente descrito, se optó por normalizar el espesor (dividiéndolo por su valor mínimo) de tal manera que, al realizar el producto con el valor del índice Tsai-Wu, se amplificarán los efectos.

Siguiendo la naturaleza esperada de la Figura 5 y que el valor del índice de Tsai-Wu, será menor a la unidad, se

puede entender que, al aproximarse a posiciones óptimas, se alcanzará un estado en el cual a pesar de que el espesor aumente, este ya no tendrá mayor repercusión en el valor de la función objetivo.

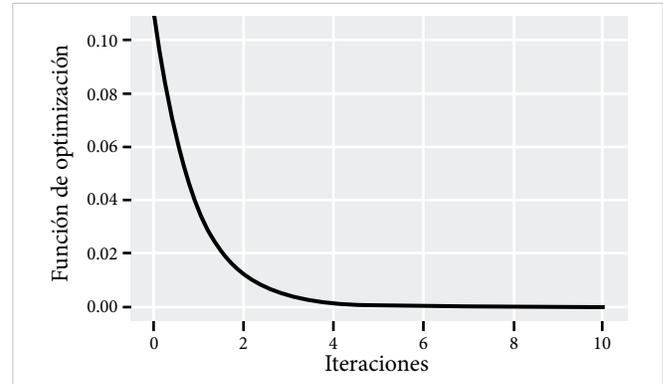


Figura 5. Naturaleza del I_F para un proceso de optimización.

Por lo anteriormente descrito, la función objetivo que se propone es la siguiente:

$$f(I_F, \text{espesor}) = \left(\frac{\text{espesor}}{\text{espesor}_{\min}} \right) I_F \quad (13)$$

$$\text{espesor} = \sum h_i \quad (14)$$

donde espesor y espesor_{\min} corresponden a la suma de los espesores de las secciones y al ancho mínimo.

La Ecuación (13) es la función objetivo resultado del presente estudio y es evaluada usando un algoritmo optimización de templado simulado. El objetivo de esta es encontrar la región o el punto límite donde inicia la mejora de una pieza fabricada con material compuesto y solo debido al aumento del espesor, es decir, que a partir de esas regiones la orientación de las fibras perdería relevancia en el diseño del material, pues el espesor se convierte en el factor más preponderante en la resistencia de un material laminado.

E. TEMPLADO SIMULADO APLICADO A MATERIALES COMPUESTOS

El templado es un proceso mecánico que consiste en calentar un sólido para después enfriarlo de forma controlada a fin de generar una estructura cristalina fuerte [31]. El templado simulado, como método de optimización, es propuesto inicialmente por Kirkpatrick *et al.* [32]. Similar a lo que sucede en el proceso físico, los átomos del material a altas temperaturas poseen una

mayor movilidad y, al enfriarse, esta energía disminuye, provocando que estos se estructuren en una forma particular, sin embargo, si el enfriamiento no es el adecuado se presentarán fisuras en la pieza.

Para el proceso de optimización, se parte de la distribución de probabilidad de Boltzmann [31], de la Ecuación (15), donde se expresa la probabilidad de que un sistema se encuentre en un estado de energía E , dada una temperatura T . La constante k se conoce como la constante de Boltzmann.

$$P(E) \propto e^{[-E/(kT)]} \quad (15)$$

A diferencia de otros algoritmos, donde las soluciones aceptadas son aquellas que presentan un mejor comportamiento, el templado simulado, a través del algoritmo propuesto por Metropolis *et al.* [33], establece de forma aleatoria un nivel de aceptación sobre soluciones que no necesariamente aportan una mejora, permitiendo al algoritmo una mejor exploración con el fin de evitar los mínimos locales.

En el algoritmo de Metropolis se establece una diferencia entre la energía obtenida con la solución actual propuesta $E_{current}$ y la mejor energía global obtenida E_{best} [Ecuación (16)].

$$\Delta E = E_{current} - E_{best} \quad (16)$$

La solución es aceptada bajo dos condiciones: cuando la diferencia es negativa, siendo mejor la energía encontrada con la solución actual, o cuando la diferencia es positiva, si esta es mayor, al valor aleatorio δ generado entre 0 y 1:

$$\delta < \Delta E \quad (17)$$

Como se mencionó previamente, la forma en que disminuye la temperatura es un proceso crucial y en el SA se establece un calendario de enfriamiento. Existen diferentes formulaciones para modificar la temperatura, como las lineales y las exponenciales, entre otras. En la presente investigación, se usó una regla geométrica de enfriamiento [34]. Aquí, para obtener la nueva temperatura es necesario obtener el producto de la temperatura anterior por un factor de enfriamiento $C_{cooling}$, Ecuación (18), donde $C_{cooling} = 0.8$.

$$T_{i+1} = C_{cooling} T_i \quad (18)$$

Se establece para cada temperatura un número específico de iteraciones, de ellas se obtiene la mejor solución, este proceso se repite hasta que la temperatura llegue a su valor final T_f .

Un parámetro importante para considerar en el templado simulado corresponde al cómo obtener la solución actual, utilizada para determinar $E_{current}$. El proceso consiste en perturbar una solución propuesta, generando así la aleatoriedad en la búsqueda de soluciones. Existen diferentes formas de crear este efecto [34]. En el presente desarrollo, se parte de lo postulado por Ledesma *et al.* [35]. Para ello, se crea una nueva función de perturbación adaptada a los parámetros del laminado. Así, el vector de solución perturbado es el resultado de un vector inicial propuesto (en este caso, la mejor solución encontrada) modificado por una relación entre la temperatura actual T y la inicial T_o , adicionado con el factor de perturbación:

$$R_{temp} = \frac{T_i}{T_o} \quad (19)$$

La forma de trabajo del SA, propuesto se presenta en el esquema de la Figura 6.

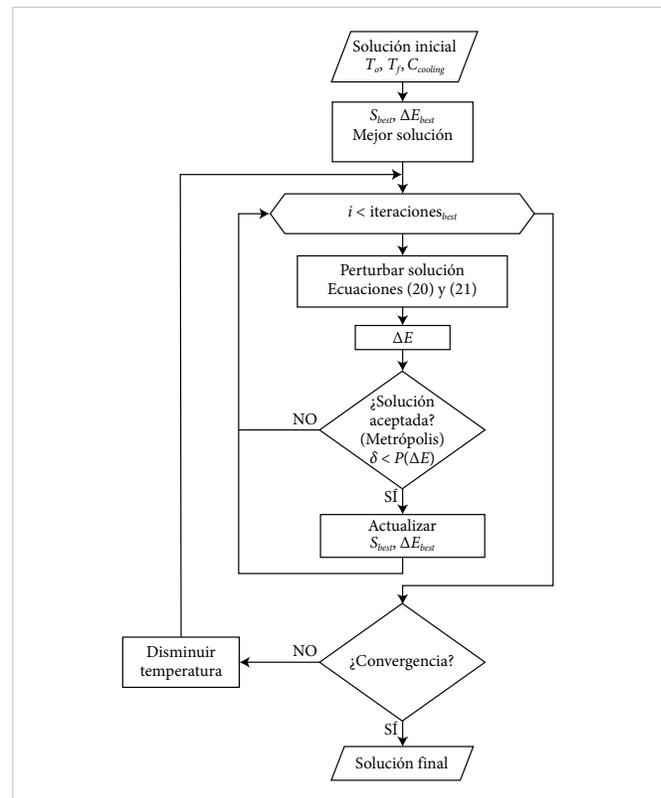


Figura 6. Algoritmo del templado simulado.

Debido a la diferencia que existe en los componentes que forman el vector solución del laminado (espesores y orientaciones), es necesario establecer dos estructuras diferentes para la perturbación; cuando se trabaje con el componente asociado a las orientaciones, el nuevo componente se describe por la Ecuación (20), donde la sección de perturbación obedece a un valor aleatorio entre -90° y 90° ($\mu[-90^\circ, 90^\circ]$), mientras que para los factores asociados a los espesores, la parte aleatoria se acota a una elección entre los espesores posibles para cada región ($\lambda[\text{espesor}]$) como se describe en la Ecuación (21):

$$\theta_{\text{perturbado}} = (1 - R_{\text{temp}})\theta_{\text{best}} + R_{\text{temp}}(\mu[-90^\circ, 90^\circ]) \quad (20)$$

$$h_{\text{perturbado}} = (1 - R_{\text{temp}})h_{\text{best}} + R_{\text{temp}}(\lambda[\text{espesor}]) \quad (21)$$

A fin de evaluar el rendimiento del algoritmo SA, antes de ser aplicado sobre la función objetivo-propuesta para los laminados, se examina para dos funciones de dos variables cuyos valores mínimos son fácilmente conocidos.

Caso 1: Función $f(x,y)=(x-3)^2+(y+2)^2$

Se usa el algoritmo SA, propuesto en esta función. Los resultados se ilustran en la Figura 7, donde se muestra cómo se parte de un punto inicial (triángulo verde) y finaliza en el vértice (triángulo azul) más bajo, ubicado en las coordenadas (3,-2).

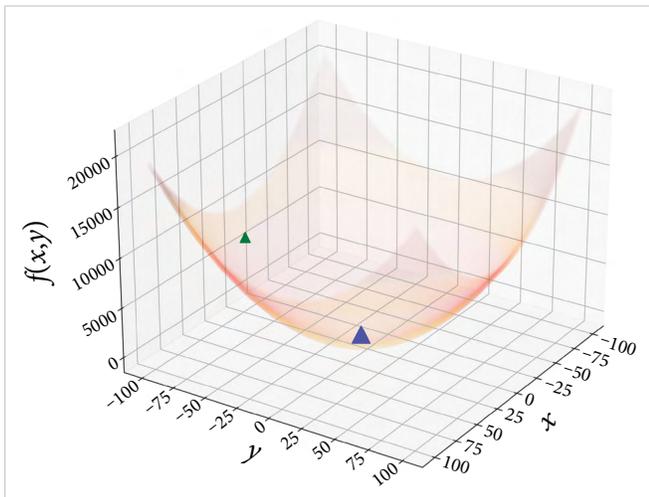


Figura 7. Caso 1.

Caso 2: Función $f(x,y) = -\cos(x - \pi/2) \cos(y)$

Esta función es particularmente especial, ya que posee varios puntos máximos y mínimos, pues permite, como

se muestra en la Figura 8, que el algoritmo SA inicie en un punto aleatorio (triángulo verde) y salte entre los diferentes puntos mínimos (triángulos grises), lo que demuestra la capacidad de evitar quedarse en los mínimos locales y encontrar el mínimo global (triángulo azul).

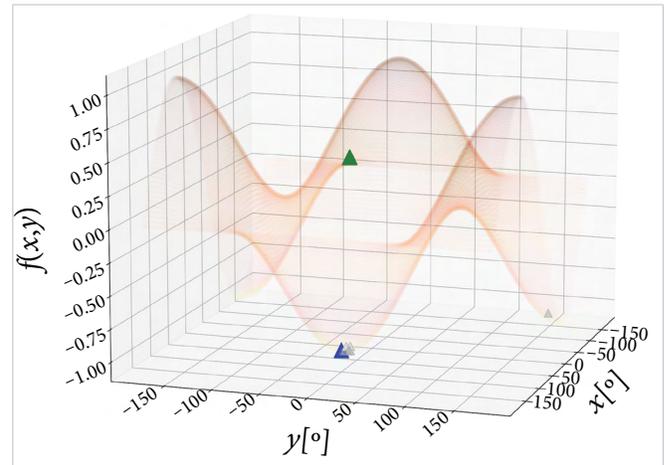


Figura 8. Caso 2.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar el rendimiento de la RNA en la regresión del I_F , se realizaron 35 ciclos de entrenamiento y evaluación de la red. En el conjunto de datos, los valores mínimo y máximo para el I_F son [0.1559, 2.2371].

A partir del conjunto de evaluación, se compararon los resultados obtenidos de la regresión contra los esperados. En la Figura 9 se puede observar que se distribuyen alrededor del comportamiento ideal esperado para un modelo de predicción (línea punteada).

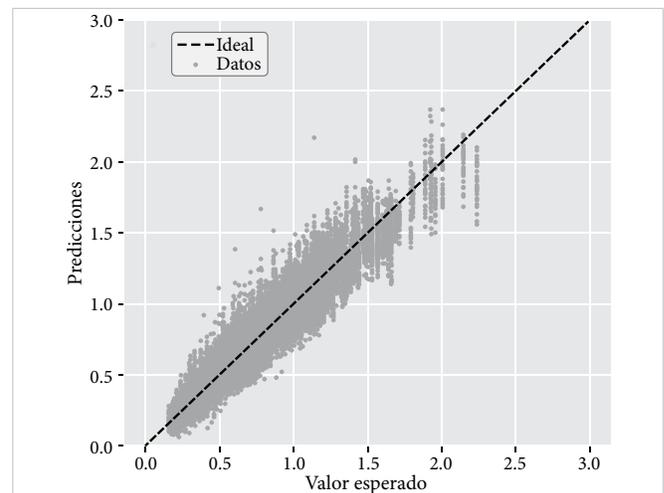


Figura 9. Gráfica de predicciones: índice de Tsai-Wu.

Para ampliar el análisis del rendimiento de la RNA, se usaron tres métricas (Figura 10).

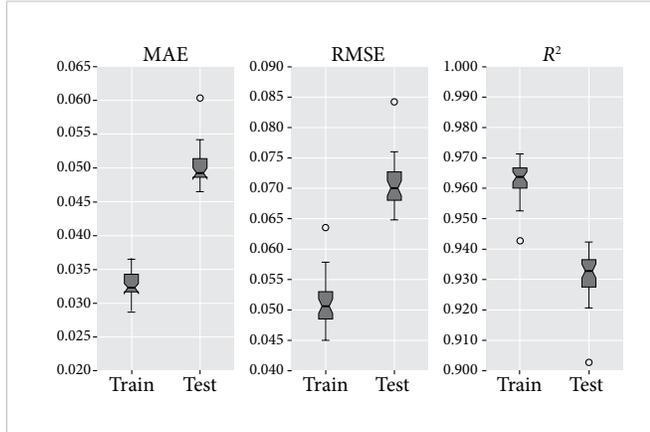


Figura 10. Rendimiento RNA (diagramas de cajas).

De los diagramas de caja (Figura 10), de izquierda a derecha, el primero corresponde al MAE:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (22)$$

donde y_i representa los datos que se ajustan con la red neuronal (en este trabajo, el índice de falla de Tsai-Wu I_F) y \hat{y}_i corresponde a la salida que se obtiene con la red neuronal. En dicha Figura 10 se observa que los valores obtenidos en el entrenamiento, y la evaluación, se encuentran por debajo del valor mínimo, registrado en la base de datos.

El segundo diagrama de la Figura 10 representa a la raíz del error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (23)$$

Esta medida brinda una referencia de la máxima sensibilidad que pueden tener las regresiones. En la Figura 10, al igual que el MAE, estos valores para el modelo se sitúan por debajo del valor mínimo.

Finalmente, la tercera métrica corresponde al coeficiente de determinación R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (24)$$

donde \bar{y} es la media de los valores con los que se entrena la red neuronal. Para la RNA, tanto en el entrenamiento

como en la evaluación los valores se encuentran entre 0.93 y 0.96, verificando un desempeño eficiente de la red neuronal, para predecir los valores de I_F .

Una vez confirmada la capacidad de predicción del metamodelo, esta se usa para encontrar I_F en la función objetivo (Ecuación 13), la cual se optimiza usando el algoritmo SA.

Los parámetros del SA se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2
PARÁMETROS SA

PROPIEDAD	VALOR
T_o	100
T_f	0.0001
$C_{cooling}$	0.8
Parámetro de convergencia	0.0001
Iteraciones por temperatura	50
Cantidad de temperaturas	100

El desempeño del algoritmo SA se refleja en la Figura 11, donde se observa que se estabiliza a partir de las 150 iteraciones.

El uso del metamodelo permite presentar de forma gráfica el comportamiento de la función objetivo, pues permite calcular, en un tiempo muy corto, una gran cantidad de soluciones. Esto es muy importante en el proceso de diseño, ya que brinda de forma explícita la interacción entre las variables de diseño y la propiedad estudiada.

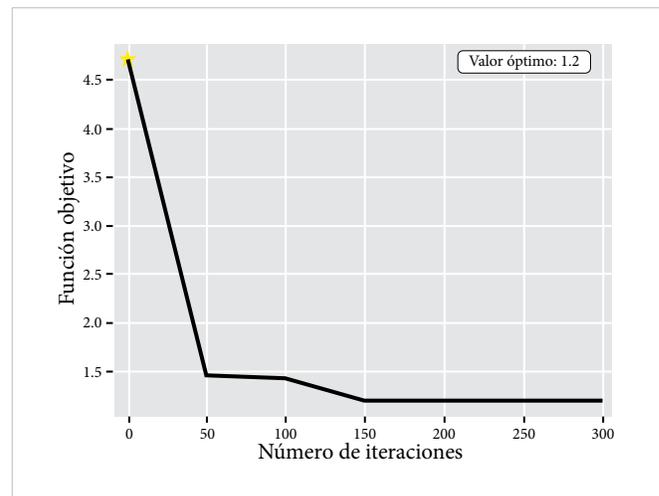


Figura 11. Rendimiento SA en materiales compuestos.

En la Figura 12 se representa de forma parcial el valor de la función objetivo respecto al cambio en los ángulos de las láminas 1 y 2 (Figura 2). Se incluye el recorrido que hace el algoritmo SA, partiendo de un punto aleatorio (triángulo verde), para llegar a la solución final (triángulo azul).

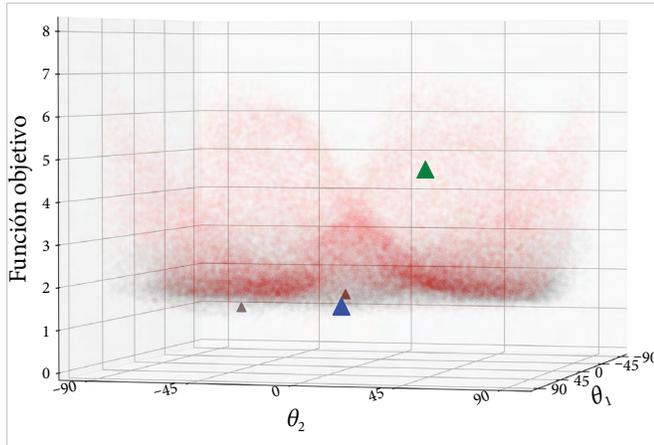


Figura 12. Función objetivo y SA.

Se realizó el proceso de optimización 15 veces, encontrando una región como se ve en las zonas de puntos grises cercanas a la unidad en el eje de valores de la función objetivo de la Figura 12. De esta región, es relevante analizar el valor del I_F y el peso en el laminado.

En la Figura 13 se presentan las optimizaciones realizadas, estipulando los valores de I_F para los mejores resultados de la función objetivo, a la que además se agrega un segundo eje, el cual corresponde a la relación entre el mínimo espesor óptimo obtenido y el dado en la solución analizada.

El espacio de soluciones descrito (véase la Figura 13) presenta una oportunidad para los diseñadores de materiales compuestos. Los puntos ubicados a la izquierda corresponden a situaciones en las que el valor óptimo se logra principalmente por el efecto de las direcciones de las fibras. En los puntos situados a la derecha se observa que el índice de falla disminuye debido al efecto de un espesor más grueso, lo que se refleja en relaciones mayores a 1 en el segundo eje. En esta imagen se observa que cuando el índice de Tsai-Wu, para valores de función objetivo de 1.124 y 1.206, donde la relación del espesor es mayor que 2.5, el material está sometido a esfuerzos que, en comparación con su capacidad de resistencia, lo ubicaría lejos de la falla. En otras palabras, el material se encuentra en un estado de esfuerzo seguro y está trabajando bien dentro de sus límites de

resistencia. Es importante observar que otras relaciones de espesor (que supondrían una composición del material más delgado), aun así, implicaría seguridad de este ante las cargas.

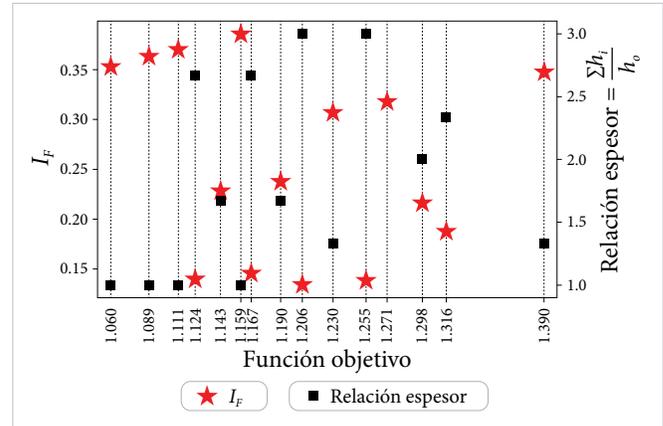


Figura 13. Espacio de soluciones óptimas.

Con los resultados anteriores, un diseñador puede elegir la opción más adecuada para su problema: para aplicaciones no críticas, podrá optar por la solución brindada por el efecto de las orientaciones, mientras que para aquellas con mayor riesgo, seleccionará las de mayor espesor.

El punto más relevante del estudio que demuestra su efectividad es la comparación con los métodos tradicionales. Según la literatura y lo comprobado en el presente análisis, para obtener una evaluación del sistema (placa con agujero fijo) a través de una simulación FEM, se requieren aproximadamente 13.95 segundos al ejecutarse en una computadora con un procesador Intel Core i5-8300H a 2.3 GHz y 16 GB de RAM. Conociendo además que, para encontrar una solución óptima por el presente método se requieren 40 segundos y al menos de 300 iteraciones (véase la Figura 11). Es posible establecer en la Tabla 3 una comparativa entre los tiempos necesarios para lograr un espacio de diseño, como el representado en la Figura 13 (15 soluciones), usando el método clásico y el postulado por la presente investigación.

TABLA 3
ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS EN EL DISEÑO

	CLÁSICO	ACTUAL
Tiempo para obtener una solución óptima	4185 segundos	40 segundos*
Tiempo necesario para un espacio de diseño (15 soluciones)	1046.25 minutos	10 minutos*

* Resultados obtenidos con RNA entrenada.

Es importante destacar que el método actual resulta útil cuando el equipo de diseñadores requiere o busca un rango amplio de alternativas viables, ya que para aplicarlo es necesario crear una base de datos previamente. Por lo tanto, si solo se busca una solución limitada al problema, la presente metodología de diseño podría no ser la más adecuada.

Finalmente, es importante destacar que los modelos basados en redes neuronales presentados en este trabajo no fueron entrenados con datos experimentales. No obstante, en futuros estudios, la inclusión de variables como el espesor de las láminas o aspectos relacionados con la fabricación de especímenes de prueba podría generar incertidumbre en la respuesta mecánica de los materiales. Por ello, se recomienda ajustar adecuadamente los modelos para garantizar su robustez.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio adapta el método de optimización del templado simulado al análisis de materiales compuestos laminados utilizando metamodelos basados en RNA para definir una función objetivo. De los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- El uso de metamodelos basados en RNA para el diseño de materiales compuestos laminados permite una exploración más efectiva al estudiar las relaciones que buscan mejorar el índice de falla de Tsai-Wu, a la vez que reduce el peso de la pieza.
- Una función objetivo que relaciona el producto entre el espesor escalado del laminado y el índice de falla de Tsai-Wu es adecuada y ventajosa en el diseño, ya que permite identificar explícitamente la región o el punto donde modificar las orientaciones en el laminado deja de mejorar la pieza, quedando esta únicamente dependiente del espesor del compuesto.
- Para lograr una buena convergencia en el templado simulado adaptado a los materiales compuestos es fundamental establecer correctamente las funciones de perturbación de las soluciones. Se aconseja utilizar para las orientaciones de las fibras ángulos expresados en forma de grados decimales, cuyos valores sean enteros. Para el espesor, es recomendable usar rangos que sean múltiplos del grosor esperado para una lámina.

- Finalmente, el uso de metamodelos, funciones objetivas centradas en el índice de Tsai-Wu y el espesor escalado, en combinación con el templado simulado adaptado a materiales compuestos, proporciona una ventaja competitiva notable sobre los métodos tradicionales. Esto se debe a su capacidad para encontrar un mayor número de soluciones de diseño en tiempos considerablemente más cortos.

REFERENCIAS

- [1] P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3.ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [2] T. W. Clyne y D. Hull, *An Introduction to Composite Materials*, 3.ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. doi: [10.1017/9781139050586](https://doi.org/10.1017/9781139050586).
- [3] P. Beardmore y C. F. Johnson, "The potential for composites in structural automotive applications", *Compos Sci Technol*, vol. 26, n.º 4, pp. 251-281, 1986, doi: [10.1016/0266-3538\(86\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0266-3538(86)90002-3).
- [4] O. Bas, E. Ates y F. Ozturk, "Thermoplastic Composite Materials for the Aerospace Industry", *RDMS*, vol. 15, n.º 5, 2021, doi: [10.31031/rdms.2021.15.000872](https://doi.org/10.31031/rdms.2021.15.000872).
- [5] J. Zhang, G. Lin, U. Vaidya y H. Wang, "Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications", *Compos B Eng*, vol. 250, p. 110463, 2023, doi: [10.1016/j.compositesb.2022.110463](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110463).
- [6] I. A. Hassan, H. S. Ramadan, M. A. Saleh y D. Hissel, "Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 149, art. 111311, oct. 2021, doi: [10.1016/j.rser.2021.111311](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311).
- [7] C. Jenkins y S. Khanna, *Mechanics of materials: a modern integration of mechanics and materials in structural design*, 1.ª ed. Academic Press, 2005.
- [8] S. W. Tsai y E. M. Wu, "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials", *J Compos Mater*, vol. 5, n.º 1, pp. 58-80, 1971, doi: [10.1177/002199837100500106](https://doi.org/10.1177/002199837100500106).
- [9] E. J. Hearn, "Strain energy", en *Mechanics of Materials I: An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural*, 3.ª ed., E. J. Hearn,

- ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997, cap. 11, pp. 254-296. doi: [10.1016/B978-075063265-2/50012-8](https://doi.org/10.1016/B978-075063265-2/50012-8).
- [10] H. Ghiasi, K. Fayazbakhsh, D. Pasini y L. Lessard, “Optimum stacking sequence design of composite materials Part II: Variable stiffness design”, *Compos. Struct.*, vol. 93, n.º 1, pp. 1-13, dic. 2010, doi: [10.1016/j.compstruct.2010.06.001](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.06.001).
- [11] H. Ghiasi, D. Pasini y L. Lessard, “Optimum stacking sequence design of composite materials Part I: Constant stiffness design”, *Compos. Struct.*, vol. 90, n.º 1, pp. 1-11, sept. 2009, doi: [10.1016/j.compstruct.2009.01.006](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.01.006).
- [12] S. Setoodeh, M. M. Abdalla y Z. Gürdal, “Design of variable-stiffness laminates using lamination parameters”, *Compos B Eng*, vol. 37, n.º 4, pp. 301-309, 2006, doi: [10.1016/j.compositesb.2005.12.001](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.12.001).
- [13] R. T. L. Ferreira, I. A. Ashcroft, S. Li y P. Zhuo, “Optimisation of Fibre-Paths in Composites Produced by Additive Manufacturing”, en *EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization*, Springer International Publishing, 2019, pp. 1083-1094, doi: [10.1007/978-3-319-97773-7_94](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97773-7_94).
- [14] G. X. Gu, C. T. Chen y M. J. Buehler, “De novo composite design based on machine learning algorithm”, *Extreme Mech Lett*, vol. 18, pp. 19-28, en. 2018, doi: [10.1016/j.eml.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.eml.2017.10.001).
- [15] C.-T. Chen y G. X. Gu, “Machine learning for composite materials”, *MRS Commun*, vol. 9, n.º 2, pp. 556-566, jun. 2019, doi: [10.1557/mrc.2019.32](https://doi.org/10.1557/mrc.2019.32).
- [16] G. X. Gu, C.-T. Chen, D. J. Richmond y M. J. Buehler, “Bioinspired hierarchical composite design using machine learning: Simulation, additive manufacturing, and experiment”, *Mater Horiz*, vol. 5, n.º 5, pp. 939-945, sept. 2018, doi: [10.1039/c8mh00653a](https://doi.org/10.1039/c8mh00653a).
- [17] C.-T. Chen y G. X. Gu, “Generative Deep Neural Networks for Inverse Materials Design Using Backpropagation and Active Learning”, *Adv. Sci.*, vol. 7, n.º 5, mar. 2020, doi: [10.1002/advs.201902607](https://doi.org/10.1002/advs.201902607).
- [18] J. Chen, L. Wan, Y. Ismail, J. Ye y D. Yang, “A micro-mechanics and machine learning coupled approach for failure prediction of unidirectional CFRP composites under triaxial loading: A preliminary study”, *Compos Struct*, vol. 267, art. 113876, jul. 2021, doi: [10.1016/j.compstruct.2021.113876](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113876).
- [19] Z. Liao, C. Qiu, J. Yang, J. Yang y L. Yang, “Accelerating the Layup Sequences Design of Composite Laminates via Theory-Guided Machine Learning Models”, *Polymers*, vol. 14, n.º 15, ag. 2022, doi: [10.3390/polym14153229](https://doi.org/10.3390/polym14153229).
- [20] E. Ledesma-Orozco, J. C. Galvis-Chacón y A. E. Rodríguez-Sánchez, “Neural networks modeling of strain energy density and Tsai-Wu index in laminated composites”, *J Compos Mater*, vol. 58, n.º 10, feb. 2024, doi: [10.1177/00219983241235856](https://doi.org/10.1177/00219983241235856).
- [21] J. N. Reddy, *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis*, 2.ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2003, doi: [10.1201/b12409](https://doi.org/10.1201/b12409).
- [22] J. Leon-Becerra, O. A. González-Estrada y H. Sánchez-Acevedo, “Comparison of Models to Predict Mechanical Properties of FR-AM Composites and a Fractographical Study”, *Polymers*, vol. 14, n.º 17, sept. 2022, doi: [10.3390/polym14173546](https://doi.org/10.3390/polym14173546).
- [23] J. León-Becerra, M. Á. Hidalgo-Salazar y O. A. González-Estrada, “Progressive damage analysis of carbon fiber-reinforced additive manufacturing composites”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 126, n.º 5, pp. 2617-2631, 2023, doi: [10.1007/s00170-023-11256-w](https://doi.org/10.1007/s00170-023-11256-w).
- [24] E. J. Barbero, *Finite element analysis of composite materials using ANSYS*, 2.ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2013, doi: [10.1201/b16295](https://doi.org/10.1201/b16295).
- [25] S. Zhang, “On the accuracy of Reissner-Mindlin plate model for stress boundary conditions”, *Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, vol. 40, n.º 2, 2006, doi: [10.1051/m2an:2006014](https://doi.org/10.1051/m2an:2006014).
- [26] C. C. Aggarwal, *Neural Networks and Deep Learning*. Springer International Publishing, 2018, doi: [10.1007/978-3-319-94463-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94463-0).
- [27] A. E. Rodríguez-Sánchez y H. Plascencia-Mora, “Modeling hysteresis in expanded polystyrene foams under compressive loads using feed-forward neural networks”, *J. Cell. Plast.*, vol. 59, n.º 4, may. 2023, doi: [10.1177/0021955X231174362](https://doi.org/10.1177/0021955X231174362).

- [28] M. Abadi *et al.*, “TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems”, *arXiv*, art. arXiv.1603.04467, mar. 2016, doi: [10.48550/arXiv.1603.04467](https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.04467).
- [29] V. A. Alcántar, “Optimización de recipientes a presión del Tipo III y IV”, tesis doctoral, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, 2015.
- [30] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 6.ª ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
- [31] D. T. Pham y D. Karaboga, *Intelligent Optimisation Techniques*, 1.ª ed. Londres: Springer London, 2000.
- [32] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt y M. P. Vecchi, “Optimization by Simulated Annealing”, *Science*, vol. 220, n.º 4598, pp. 671-680, may. 1983, doi: [10.1126/science.220.4598.671](https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671).
- [33] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller y E. Teller, “Equation of State Calculations by Fast Computing Machines”, *J Chem Phys*, vol. 21, n.º 6, pp. 1087-1092, jun. 1953, doi: [10.1063/1.1699114](https://doi.org/10.1063/1.1699114).
- [34] P. J. M. Laarhoven y E. H. L. Aarts, *Simulated annealing: theory and applications*. EUA: Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [35] S. Ledesma, G. Aviña y R. Sanchez, “Practical Considerations for Simulated Annealing Implementation”, en *Simulated Annealing*, C. M. Tan, ed. Rijeka: IntechOpen, 2008, cap. 20, doi: [10.5772/5560](https://doi.org/10.5772/5560).

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) y a la Universidad de Guanajuato por el apoyo financiero y la oportunidad de realizar sus estudios de doctorado.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

En respuesta a una recomendación arbitral, los autores ponen a disposición de los interesados la base de datos y los resultados de las métricas correspondientes al entrenamiento de los modelos en este estudio, comunicándose con el autor de correspondencia a la dirección de correo: aerodriguez@up.edu.mx.

Aplicación de gestores web para la clasificación de documentos en un área de gestión académica

Application of web managers for document classification in an academic office

Ricardo de Jesús Télles Peña^{1a} , Heriberto Niccolas Morales^{1b}  , César Alfonso Arroyo Barranco^{1b} 

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, {^aÁrea Académica de Computación y Electrónica, ^bÁrea Académica de Ingeniería y Arquitectura}, Colonia Carboneras de Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

RESUMEN

Los gestores web, como herramientas tecnológicas, juegan un papel crucial en la optimización de procesos administrativos al ofrecer soluciones eficientes para la gestión de información y documentos. Su impacto en el área administrativa radica en la simplificación de tareas tediosas y la mejora de la organización y accesibilidad de los datos. La implementación de un gestor web tiene como objetivo automatizar procesos de clasificación y búsqueda, los gestores web permiten a las organizaciones ahorrar tiempo y recursos, al tiempo que aumentan la productividad y la precisión en la toma de decisiones. Se aplicó la metodología Scrum para el desarrollo de una aplicación de gestor web una Dependencia de Educación Superior (DES) en México, por su adaptabilidad y flexibilidad, facilitando la entrega continua y la mejora constante a través de iteraciones cortas. Como resultado, se logró desarrollar un gestor web con un buscador en tiempo real el cual cumple con los criterios de la norma ISO/IEC 9126. Sin embargo, las limitaciones incluyen la necesidad de alojar el proyecto en un servidor para un acceso más amplio. Las conclusiones derivadas del estudio son que la implementación de un gestor web con un buscador en tiempo real ofrece una solución novedosa para automatizar la clasificación de archivos en una institución educativa.

PALABRAS CLAVE: gestores web; Scrum; automatizar; accesibilidad.

ABSTRACT

Web managers, as technological tools, play a crucial role in the optimization of administrative processes by offering efficient solutions for the management of information and documents. Their impact in the administrative area lies in the simplification of tedious tasks and the improvement of the organization and accessibility of data. The implementation of a web manager aims to automate classification and search processes; web managers allow organizations to save time and resources, while increasing productivity and accuracy in decision making. The Scrum methodology was applied to the development of a web manager application for a Higher Education Department (DES) in Mexico, due to its adaptability and flexibility, facilitating continuous delivery and constant improvement through short iterations. As a result, a web manager with a real-time search engine was developed which meets the criteria of the ISO/IEC 9126 standard. However, limitations include the need to host the project on a server for broader access. The conclusions derived from the study are that the implementation of a web manager with a real-time search engine offers a novel solution to automate the classification of files in an educational institution.

KEYWORDS: web managers; Scrum; automate; accessibility.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Heriberto Niccolas Morales

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo / Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

DIRECCIÓN: Ciudad del Conocimiento UAEH, Av. San Judas Tadeo núm. 132, Carboneras, C. P. 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

CORREO ELECTRÓNICO: hnicolas@uaeh.edu.mx

Fecha de recepción: 23 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:** 18 de octubre de 2024. **Fecha de publicación:** 19 de noviembre de 2024.



Licencia Creative Commons



I. INTRODUCCIÓN

Una página web se puede definir como los elementos visuales y de lenguaje de programación creados y a los que se accede a través de un navegador web, los cuales tienen una clasificación según el enfoque que se quiere trabajar, desde una página web estática hasta una aplicación escalable en tiempo real [1].

Las páginas web son una de las herramientas más utilizadas en el mundo y se han convertido en una parte integral de diversos ámbitos de la sociedad y la industria. Su versatilidad y accesibilidad han llevado a su adopción en una amplia gama de aplicaciones [2].

En este contexto, los gestores web emergen como las herramientas específicas que facilitan a individuos y organizaciones dar forma a sus espacios en línea de manera eficiente y funcional. Los gestores web, también conocidos como Sistemas de Gestión de Contenido (CMS, por sus siglas en inglés), constituyen el eslabón clave que transforma la forma de visualización y los contenidos en páginas web tangibles.

Por todo lo anterior, en el presente trabajo se planteó como objetivo el desarrollo y evaluación de la calidad de una aplicación (herramienta de software) para ayudar a los encargados de áreas administrativas a la automatización de la clasificación del archivo físico de documentos, con la ayuda de un gestor web, complementado de un buscador en tiempo real.

JUSTIFICACIÓN

Los gestores web son una herramienta muy eficaz, lo que resulta en una experiencia más fluida y eficiente para los propietarios de sitios y los visitantes por igual. Lo que se busca con este proyecto es generar una herramienta con la cual las distintas áreas administrativas de una Dependencia de Educación Superior (DES) en México puedan realizar de manera más ágil y fácil su trabajo al momento de clasificar archivos, y que a su vez esta actividad sea más clara y sencilla de llevar a cabo. En este caso, la DES en la que se desarrolló el proyecto cuenta con seis áreas académicas, cada una de las cuales tiene su área administrativa que genera y recibe diversos documentos como parte de sus actividades cotidianas.

De acuerdo a datos históricos que la DES tiene registrados, al año se generan o emiten en promedio 10 000

documentos y se reciben en promedio 11 500 de estos, los cuales se distribuyen entre las diferentes áreas que integran a la dependencia. Lo anterior da muestra del alto volumen de información que requieren gestionarse para su control, clasificación y almacenamiento. El manejo de los documentos se complica no solo por la cantidad, sino también por el número de instancias o dependencias con las que se interactúa al interior de la Institución de Educación Superior (IES) a la que pertenece la DES, así como dependencias u organismos externos. El número de las oficinas internas de las cuales se reciben documentos o se les envían es de 57, siendo variable el número de entidades externas, que suele ser de 20 en promedio.

La clasificación de los documentos se realiza de acuerdo con lo que establece el Catálogo de Disposición Documental de la IES, que contempla ocho secciones, de las cuales se desprenden 298 códigos de clasificación diferentes. La tarea se complica porque hay una amplia variedad de conceptos o asuntos en los documentos y buscar, mediante lectura del catálogo, una relación del asunto con el código de clasificación puede requerir entre 3 a 5 horas al día, tomando en cuenta desde que se reciben los documentos, se hace la distinción de acuerdo al área o dependencia, posteriormente se da lectura a cada uno de ellos, se consulta el catálogo y se asigna el código correspondiente, lo que finalmente permitirá archivarlos.

Los referentes anteriores muestran la necesidad de una herramienta que ayude a la automatización y agilice la identificación y selección de los códigos de clasificación de acuerdo a la sección correspondiente asociada a las funciones sustantivas y adjetivas de una institución educativa de nivel superior (docencia, investigación, vinculación, extensión y administración-gestión, entre otras). Es así que se visualizó como área de oportunidad el desarrollo de un gestor web para ayudar en esta tarea.

El problema de investigación se circunscribe en determinar cómo desarrollar una aplicación de gestión web que cumpla con criterios de calidad y se realice con una metodología de desarrollo de software robusta para abordar un dominio de aplicación complejo, dado por el volumen de documentos a gestionar y los códigos de clasificación a utilizar. En este sentido, la pregunta de investigación se plantea de la siguiente forma: ¿qué metodología de desarrollo ágil de software puede ser más conveniente para generar una aplicación de gestión web

para la clasificación de documentos y cómo se puede evaluar la calidad de la aplicación?

A partir de los conocimientos y metodologías de desarrollo de software se buscó poner en práctica el diseño y desarrollo de un gestor web tomando en cuenta los conocimientos de administración en el área de sistemas computacionales que contempla la gestión de proyectos, administración de tecnologías de información y automatización de organizaciones.

DESARROLLO TEÓRICO

Para la elaboración del presente proyecto se identificaron tres metodologías referentes a la elaboración de proyectos de software, las cuales son: Waterfall, Desarrollo Rápido de Aplicaciones (RAD) y Scrum.

Modelo Waterfall

El modelo Waterfall o cascada es una metodología lineal para la gestión de proyectos, dividida en distintas fases. Cada vez que se termina una fase, se comienza de inmediato con la siguiente [3]. Las fases que componen dicho modelo se muestran en la Figura 1.

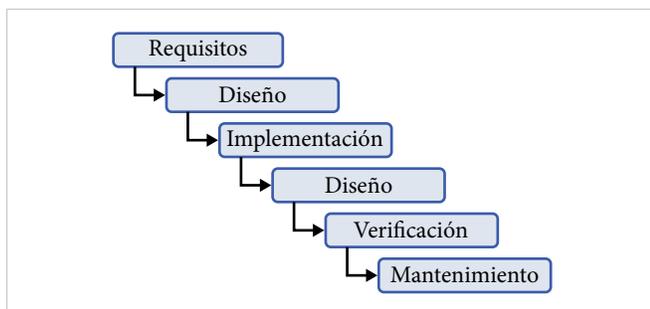


Figura 1. Fases del modelo Waterfall.

Esta metodología es útil para procesos que se deben producir de forma secuencial, por lo que es más difícil beneficiarse cuando hay tareas que se pueden finalizar simultáneamente. Sin embargo, el éxito del método Waterfall depende de la cantidad y calidad de trabajo hecho desde un inicio, como la documentación, interfaz de usuario, casos de uso y funcionalidad [4].

De esta forma, la estimación del tiempo requerido para cada tarea es más precisa, pero si algún parámetro cambia durante el desarrollo es más difícil alterar la estructura.

Modelo RAD

La metodología RAD, que proviene de las siglas en inglés Rapid Application Development (Desarrollo Rápido de Aplicaciones), constituye un modelo ágil para el desarrollo de aplicaciones. En otras palabras, se refiere al proceso ágil de construcción de software [5].

Este enfoque incorpora el desarrollo interactivo, la elaboración de prototipos y la utilización de utilidades CASE (Computer Aided Software Engineering, por sus siglas en inglés). Además, la metodología RAD generalmente incluye aspectos como la usabilidad, la funcionalidad y la velocidad de ejecución [6].

La idea principal de esta metodología es entregar sistemas de alta calidad, en poco tiempo y con un costo bajo de inversión. Las fases de las cuales se compone dicho modelo se muestran en la Figura 2.

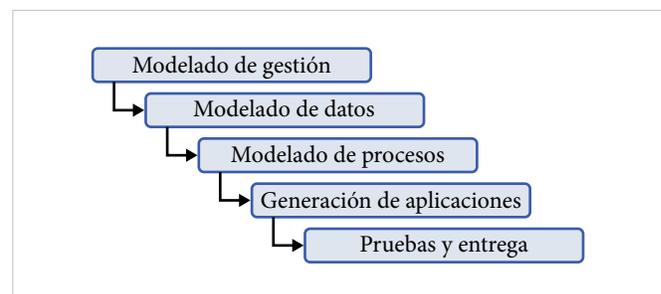


Figura 2. Fases del modelo RAD.

Modelo SCRUM

La metodología Scrum es un proceso para llevar a cabo un conjunto de tareas de forma regular con el objetivo principal de trabajar de manera colaborativa, es decir, para fomentar el trabajo en equipo [7].

Este enfoque de trabajo tiene como objetivo lograr el mejor resultado en un proyecto específico. Las prácticas dentro de la metodología Scrum se retroalimentan mutuamente y su integración se basa en un estudio sobre cómo coordinar equipos para ser potencialmente competitivos [8].

Asimismo, en la metodología Scrum se llevan a cabo entregas periódicas y parciales del trabajo final, priorizadas según el beneficio que aportan a los destinatarios del proyecto. Por esta razón, esta metodología es especialmente adecuada para proyectos complejos con

requisitos cambiantes, donde la innovación y la flexibilidad desempeñan un papel fundamental [8].

Dicha metodología consta de las siguientes cinco fases principales para su desarrollo:

- Planificación del *sprint*: en esta fase inicial de Scrum, se determinan las tareas asignadas a cada miembro del equipo, junto con el tiempo estimado para su finalización.
- Reunión del equipo *scrum*: estas reuniones breves y diarias son realizadas por los equipos para revisar el progreso del trabajo, discutir las tareas del día y anticipar posibles obstáculos.
- Refinamiento del *backlog*: esta fase se enfoca en que, el propietario del producto repase las tareas y su avance, evaluando el tiempo y esfuerzo dedicados a cada una, y resolviendo cualquier problema que surja durante el proceso.
- Revisión del *sprint*: se trata de reuniones en las que también participa el cliente, con el objetivo de mostrar los resultados obtenidos hasta el momento. La presencia del cliente es esencial para obtener un *feedback* auténtico y valioso, y para fortalecer la relación colaborativa.
- Retrospectiva: al concluir el *sprint* se lleva a cabo una reunión final para revisar lo ocurrido durante el proyecto, identificando los aspectos positivos y negativos, así como los principales desafíos enfrentados. El propósito es obtener lecciones aprendidas para mejorar en futuros proyectos.

De este modo atraviesa diversas fases que posibilitan su ejecución exitosa, las cuales se muestran en la Figura 3.

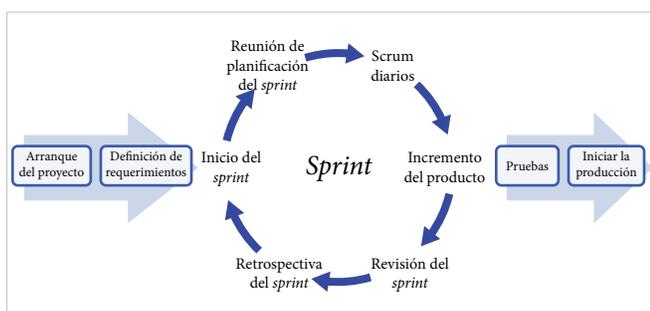


Figura 3. Fases del modelo Scrum. Fuente: Elaboración propia con base en [8].

LENGUAJES DE DESARROLLO WEB

Para el desarrollo de aplicaciones web existe una gran gama de lenguajes, basándose en las necesidades o especificaciones requeridas, por lo cual para este proyecto se utilizó HTML para la estructura, CSS para el apartado visual y JS (JavaScript) para el funcionamiento del buscador en tiempo real.

El lenguaje HTML (Lenguaje de Marcas de Hipertexto, del inglés HyperText Markup Language) fue inventado por Tim Berners-Lee, físico del Instituto de Investigación CERN en Suiza. Se le ocurrió la idea del sistema de hipertexto de Internet y publicó la primera versión HTML en 1991. Desde entonces, cada nueva versión de HTML incluye nuevas etiquetas y atributos de estas [9].

Sin embargo, es importante señalar que HTML no se clasifica como un lenguaje de programación debido a su incapacidad para crear funciones dinámicas. En cambio, brinda a los usuarios web la capacidad de crear y organizar secciones, párrafos y enlaces utilizando elementos, etiquetas y atributos [9].

Se emplea HTML en los siguientes rubros:

- Desarrollo web. Los desarrolladores emplean código HTML para definir cómo los navegadores deben representar elementos en una página web, tales como texto, hipervínculos y archivos multimedia.
- Navegar por Internet. Los visitantes pueden explorar y enlazarse fácilmente entre páginas y contenidos relacionados debido a que HTML se utiliza principalmente para la incorporación de hipervínculos.
- Documentación en línea. HTML proporciona la capacidad de organizar y formatear documentos, de manera similar a como lo haría en Microsoft Word.

El lenguaje CSS (Cascading Style Sheets) fue desarrollado por el W3C en 1996. Esto se denomina hoja de estilos en cascada porque las funciones se aplican de arriba a abajo mediante reglas con un esquema de preferencias. Esta especificación es un lenguaje de diseño gráfico integrado en el código HTML de un sitio web

que permite crear páginas más precisas y aplicar estilos (colores, márgenes, formas y fuentes, entre otros), ayudando a tener más control sobre el resultado final [9].

El lenguaje CSS separa el contenido de las páginas web de cómo se presentan. Esto ofrece muchos beneficios, como los siguientes:

- La presentación del documento final en diferentes estilos (pantalla, voz, impreso).
- Proporciona un sitio web responsivo.
- Ayuda a evitar generar archivos que sean demasiado grandes.
- Define el estilo visual de todo el sitio web. De esta forma, si se cambia de página, todas cambiarán automáticamente.
- Brinda trabajar con estándares y compartir (en cierto modo) la estructura de la presentación, resultando en un trabajo más transparente;
- Proporciona mayor flexibilidad y control sobre las especificaciones del sitio.
- Simplifica la creación de páginas.

Como último elemento se tiene a JavaScript, que es un lenguaje con una larga historia que se remonta a los inicios de la World Wide Web. Es un lenguaje muy popular para *front-end* y *back-end* y permite a los desarrolladores web hacer todo lo posible para mejorar la experiencia del usuario en sus sitios y aplicaciones web [9].

Entre sus aplicaciones más importantes se encuentran:

- Desarrollo de sitios web del lado del cliente (*front-end*, en el navegador).
- Construye todo tipo de aplicaciones con la plataforma NodeJS.
- Desarrollo de aplicaciones para móviles, compiladas nativas o híbridas.
- Creación de aplicaciones de escritorio para Windows, Linux y Mac con la capacidad de escribir código compatible con todas las plataformas.

Por lo tanto, JavaScript se cataloga como un lenguaje universal debido a su amplio rango de tipos de aplicaciones y casos de uso. Este lenguaje permite su implementación en diversos proyectos, algunos de los cuales se basan exclusivamente en JavaScript.

Con base en todo lo mencionado anteriormente, se llega a la conclusión de que HTML se emplea para añadir elementos de texto y contenido estructurado a una página web. No obstante, para crear un sitio web profesional y completamente receptivo, es necesario contar con la asistencia de hojas de estilo en cascada (CSS) y JavaScript. Estas tecnologías complementan HTML al permitir la creación y presentación efectiva de la mayor parte del contenido de la página web.

ESTADO DEL ARTE

En el desarrollo de este proyecto, resulta fundamental analizar los avances recientes en Sistemas de Gestión de Documentos (SGD), ya que proporcionan una base sólida para entender cómo estas herramientas se pueden implementar y optimizar en el contexto de una institución de educación superior. Para ello, se examinaron siete estudios recientes que abordan temas fundamentales para el diseño, la implementación y la mejora de los SGD, desde la adopción de nuevas tecnologías, como el *cloud computing* y la inteligencia artificial, hasta los desafíos relacionados con la seguridad y el cumplimiento de normativas de protección de datos. Estos trabajos proporcionan una visión integral de las tendencias actuales en el ámbito de la gestión documental y sirven como base teórica para este proyecto.

En primer lugar, el trabajo de Wu y Plakhtii [10] explora el uso de sistemas de gestión documental basados en la nube en el ámbito académico. Los autores destacan la flexibilidad y escalabilidad de estos sistemas, subrayando su capacidad para mejorar la accesibilidad y la colaboración en la gestión documental de las instituciones educativas.

Por otro lado, el estudio de Haveri *et al.* [11] propone el uso de la tecnología *blockchain* para reforzar la seguridad en los SGD. Este enfoque garantiza la integridad de los documentos y proporciona una mayor transparencia y trazabilidad en las interacciones con la información almacenada, lo que es especialmente relevante en contextos donde la protección de datos es prioritaria.

En tercer lugar, el trabajo de Aziz *et al.* [12] identifica los elementos críticos y desafíos en la adopción de SGD, como la necesidad de interoperabilidad, seguridad de datos y cumplimiento normativo en el manejo de documentos digitales en instituciones públicas.

A continuación, el estudio de Jordan, Zabukovšek y Šišovska [13] argumenta que el manejo clásico de documentos no satisface las necesidades actuales del mercado, donde la agilidad y la modernidad son esenciales. Implementar un SGD permite a las organizaciones almacenar y archivar documentación de manera eficiente, lo que a su vez facilita un flujo de trabajo más efectivo y contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir el uso de papel.

Asimismo, el estudio de Sambetbayeva *et al.* [14] propone un modelo de sistema de gestión documental electrónico inteligente, utilizando métodos de aprendizaje automático para optimizar el flujo de documentos a lo largo de su ciclo de vida, de igual forma argumentan que la implementación de este modelo no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce la intervención humana, lo que resulta en una gestión más efectiva y precisa de los documentos dentro de las organizaciones.

El trabajo de Gentile *et al.* [15] examina la intersección entre la seguridad de los protocolos de mensajería, como el Protocolo de Cola de Mensajes de Telemetría, del inglés Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), y la gestión documental en el contexto de la Red Oscura. Se enfoca en cómo el uso de redes como el enrutador cebolla, del inglés The Onion Router (TOR), puede proporcionar una capa adicional de seguridad y anonimato, crucial para cumplir con normativas de protección de datos, como el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD), del inglés General Data Protection Regulation (GDPR).

Finalmente, Ayaz y Yanartas [16] exploran los factores que afectan la adopción y el uso de Sistemas de Gestión de Datos Energéticos, del inglés Electronic Document Management System (EDMS), en el contexto entre los académicos y el personal administrativo de la Universidad de Bartın, Turquía.

Estos trabajos aportan una visión integral de los avances recientes en el campo de los Sistemas de Gestión de Documentos en instituciones educativas. Desde la

mejora en la accesibilidad y la colaboración a través de soluciones en la nube y la IA, hasta el refuerzo de la seguridad mediante *blockchain* y técnicas de cumplimiento de normativas de privacidad, estos trabajos destacan la importancia de los SGD como herramientas fundamentales para la gestión eficiente y segura de la información en el ámbito académico.

II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el desarrollo del gestor web presentado en este trabajo fue Scrum, por la versatilidad que ofrece en su aplicación y la posibilidad de realizar entregas de las versiones en periodos cortos de tiempo. Scrum ayuda a generar valor incrementalmente mediante soluciones adaptativas para problemas complejos. Está fundado en el empirismo, afirmando que el conocimiento proviene de la experiencia y de la toma de decisiones y, a la vez, reduciendo el desperdicio y enfocándose en lo esencial. También emplea un enfoque iterativo e incremental para optimizar la previsibilidad y controlar el riesgo.

Estas características lo hacen una gran opción para gestores web donde los requerimientos tienden a cambiar, se recibe retroalimentación constante y se entregan prototipos y avances en periodos cortos de tiempo. Esta es la naturaleza de los gestores web, donde una vez que se despliegan y la base de información crece, se requieren de actualizaciones y modificaciones para alcanzar expectativas crecientes.

La metodología Scrum es un marco de trabajo basado en un modelo de proceso empírico para el desarrollo ágil de software o cualquier otro tipo de proyecto.

Descrito de manera breve, esta metodología requiere de un ambiente caracterizado por lo siguiente:

- Se entregan incrementos de trabajo evaluable en ciclos cortos, generalmente de un mes o menos, llamados *sprints*. Un *sprint* recibe retroalimentación constante, permitiendo la inspección y adaptación de los procesos y sobre lo que será entregado.
- El *scrum team* tiene un *scrum master*, un *product owner* y desarrolladores, quienes son responsables de convertir el trabajo establecido en incrementos de valor durante un *sprint*.

- El *scrum team* y otros miembros de la organización, negocio y usuarios, llamados *stakeholders*, inspeccionan los resultados del *sprint* y se ajustan para el siguiente.

El equipo de trabajo encargado del proyecto se conformó por cinco personas, las cuales, a lo largo de todo el desarrollo, realizaron diferentes tareas. Además, cabe resaltar que gracias a los *scrum* diarios que se generaron, se posibilitó a todo el equipo estar al tanto del avance de cada miembro, lo que facilitó la interacción y la entrega de incrementos funcionales.

DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS

Como primer paso para el desarrollo de un gestor web, es importante definir qué es lo que se va a manejar y las funciones que realizará, cómo será desarrollada y quiénes serán los usuarios que la utilicen. Para este proyecto, se llegó a los siguientes requerimientos:

- El gestor debe permitir la automatización de procesos.
- Integración con áreas existentes, además del área de dirección, de modo que este gestor se pueda llegar a utilizar en otras áreas internas de la DES.
- Un gestor web para computadoras que permita realizar consultas rápidas a partir de palabras clave o un código. Las búsquedas serán a partir de un buscador implantado dentro del gestor, el cual funciona en tiempo real a partir de cada carácter que se va ingresando realiza la búsqueda.
- La utilización de las herramientas oficiales de Microsoft para el desarrollo de páginas web: Visual Studio Code y el lenguaje de programación JavaScript.
- Con el fin de limitar y controlar el alcance, el gestor web será probada por los trabajadores del área de Dirección, para que la usen para la automatización de la clasificación del archivo.
- Interfaz amigable e intuitiva que no requiera de formación especializada para su uso.
- El sistema debe utilizar una paleta de colores que refleje la imagen institucional, como los colores

oficiales presentes en su logotipo, sitio web o material institucional.

- Se debe emplear la tipografía oficial de la Dependencia de Educación Superior o una que se asemeje a la identidad visual institucional, asegurando consistencia con otras plataformas de la misma.

PLANIFICACIÓN DEL SPRINT

Una vez establecidos los objetivos de la aplicación, se comenzó con el diseño de un primer prototipo.

Se inició con un modelo de casos de uso, en el cual se representan las interacciones entre el usuario y la página, determinando las principales funciones de esta y la forma en que están relacionadas.

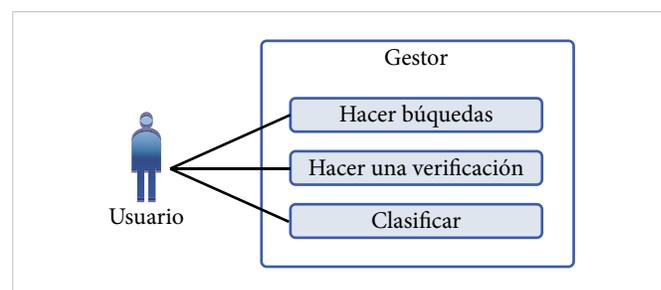


Figura 4. Diagrama de casos de uso de la primera etapa.

Los principales casos de uso que realiza el usuario son búsquedas, verificación y clasificación. Para cualquiera de estas tres acciones, primero se debe tener un oficio físico o digital con el cual se trabajará y en caso de que solo se quiera revisar alguna sección o serie, se realiza una búsqueda. Para el segundo caso, que es la verificación, se usa la barra de búsqueda para ingresar el número de serie y poder así visualizar de qué trata y saber si el que tiene el oficio es el indicado. Por último, para clasificar previamente ya se habrá tenido un análisis del contenido del oficio y, con base a ello, se busca con alguna palabra clave para así poder clasificarlo, pero en caso de no encontrarla se necesitará revisar las secciones y encontrar la que le corresponda.

DISTRIBUCIÓN DE TAREAS DEL EQUIPO DE DESARROLLO

La distribución de responsabilidades y tareas en el equipo se realizó con el objetivo de garantizar un flujo de trabajo organizado y eficiente en el desarrollo del Sistema de Gestión Documental, siguiendo la metodo-

logía Scrum, la cual promueve la colaboración, la flexibilidad y la entrega continua de valor, lo que resulta ideal para proyectos que requieren adaptabilidad y ciclos de desarrollo iterativos. Cada miembro del equipo ha sido asignado a un rol específico, acorde a sus habilidades y competencias, asegurando que las diferentes fases del proyecto, desde la planificación hasta la prueba y validación, se lleven a cabo de manera efectiva. Este enfoque permite una comunicación fluida entre los integrantes y facilita la identificación y resolución temprana de problemas, maximizando la eficiencia del equipo y minimizando los riesgos durante el desarrollo. En la [Tabla 1](#) se muestra la distribución de tareas.

TABLA 1
DISTRIBUCIÓN DE LAS TAREAS CON BASE EN LA METODOLOGÍA SCRUM

ROLES	TAREAS
<i>Product owner</i>	Representar a los usuarios finales. Definir requisitos del Sistema de Gestión Documental. Priorizar las funcionalidades. Garantizar que el proyecto aporte valor.
<i>Scrum master</i>	Facilitar el trabajo del equipo <i>scrum</i> . Eliminar impedimentos. Garantizar el cumplimiento de los procesos <i>scrum</i> . Promover la mejora continua. Organizar y facilitar las <i>daily scrum meetings</i> , <i>sprint planning</i> , <i>sprint review</i> y retrospectivas.
Desarrollador 1	Desarrollar y programar el sistema. Cumplir con los requisitos establecidos por el <i>product owner</i> .
Desarrollador 2	Desarrollar la interfaz de usuario (<i>front-end</i>). Garantizar una experiencia de usuario fluida y eficiente.
<i>Tester</i>	Ejecutar pruebas unitarias, funcionales y de integración. Asegurar la calidad del sistema.
Analista de sistema	Recopilar y documentar los requisitos del sistema. Asegurar que el SGD cumple con las necesidades de la organización beneficiaria.

SCRUM DIARIOS

Una vez que se asignan las tareas, los miembros del equipo se reúnen diariamente en sesiones conocidas como *daily scrum meeting*, donde discuten el avance logrado y cualquier obstáculo que haya surgido. El trabajo se monitorea a través de un artefacto llamado *scrum board*, tomado del marco Scrum. Los *scrum boards* son una herramienta clave en estas reuniones, ya que

ofrecen a los miembros una representación visual del trabajo completado y del que aún falta por hacer en el *sprint*, lo que les permite reorganizarse y ajustar su enfoque en caso de que el progreso sea más lento de lo esperado.

Durante los *scrum* diarios se buscó satisfacer los requerimientos a partir de revisiones frecuentes donde se implementan cambios o mejoras correspondientes a las necesidades del proyecto, con el fin de tener una sincronía de lo que se trabaja diariamente cumpliendo con el objetivo del *sprint*. Además, se identifican contratiempos, para que posteriormente, mediante una discusión breve, se decida la solución más conveniente a dicho problema.

REVISIÓN DEL SPRINT

Para las revisiones de los *sprints* se consideró la valoración de los avances del software, tomando en cuenta cada uno de los apartados necesarios, como lo eran el apartado visual y de funcionamiento, los cuales se fueron ajustando de acuerdo a los requerimientos de la institución educativa.

En el caso de las revisiones del apartado visual, se tomó en cuenta que este cumpliera con una organización de la información y, de igual manera, que tuviera los colores utilizados por la institución para así cumplir con una buena apariencia y estética, con el fin de brindar una buena experiencia a los usuarios siendo amigable e intuitiva.

Para el apartado de funcionalidad del software se contempló como herramienta principal un buscador en tiempo real y que además este ocultara los resultados que no coincidieran con la búsqueda realizada. Por otra parte, para una mayor organización de la información se incluyó un menú que contendría cada uno de los apartados de clasificación para tener una navegación más ágil dentro del gestor.

Al completar la meta del *sprint*, se procedió a la fase de pruebas Alfa. Durante esta etapa, los miembros encargados de realizar las pruebas examinan minuciosamente cada funcionalidad desarrollada en el *sprint*. Su objetivo es asegurarse de que la meta del *sprint* se haya cumplido de manera efectiva y que no existan errores en el código ni en la integración de los diferentes recursos. Los errores detectados se registraron en un artefacto denominado *buglist* y el *sprint* no puede considerarse

finalizado hasta que todos los problemas en este listado hayan sido corregidos.

Para esta revisión de *sprint* en la que ya se pueden considerar pruebas Alfa, hay tres aspectos principales: primero, se tiene la funcionalidad de la barra de búsqueda; segundo, esta la función de que al realizar búsquedas se oculten los resultados que no coinciden y, por último, pero no menos importante, es el menú hamburguesa que ayuda a desplazarse dentro del contenido del gestor.

Una vez que todos los *sprints* han sido completados, se alcanza un hito importante: la creación de una versión Beta del sistema de gestión. Esta versión fue probada por personas ajenas al equipo de desarrollo, que en este caso, fue el personal de la Dirección de la DES. Las pruebas de la versión Beta fueron realizadas en las computadoras de escritorio del personal de la DES, que son equipos de cómputo con sistema operativo Windows 10.

RETROSPECTIVA DEL SPRINT

Como último paso se tiene una retrospectiva de los *sprints* realizados, teniendo reuniones con el fin de reflexionar el trabajo realizado, identificando lo que salió bien, aspectos a mejorar y de igual manera el definir cómo implementar dichas mejoras.

En el proyecto, dichas retrospectivas cumplieron con los tres aspectos principales siguientes: recopilación de datos, generación de ideas y definición de acciones, todo esto con el fin de llegar a un plan de mejora.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan las interfaces desarrolladas para este gestor, las cuales fueron evaluadas y aprobadas por algunos usuarios finales para quienes están destinadas. Cabe destacar que las interfaces resultaron ser satisfactorias y de fácil manejo.

En la **Figura 5** se observa la pantalla principal del gestor propuesto. Una vez que entra el usuario iniciando desde Visual Studio Code, se muestra el encabezado con el título de Catálogo de Disposición Documental y, posteriormente, debajo se muestra una barra de búsqueda y del lado derecho en la parte superior un menú hamburguesa.

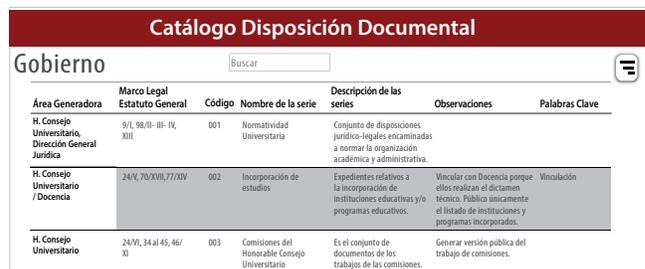


Figura 5. Interfaz principal o de inicio.

En la **Figura 6** se muestra el menú hamburguesa desplegable, el cual muestra cada una de las secciones con las que cuenta el catálogo, y de las cuales funcionan como herramienta de navegación para desplazarse entre ellas.

El menú hamburguesa es un icono de tres líneas horizontales que es de amplio uso en el diseño web para representar un menú desplegable en pantallas de tamaño reducido o dispositivos móviles. El icono se asemeja a una hamburguesa, por lo que de ahí se deriva su nombre.

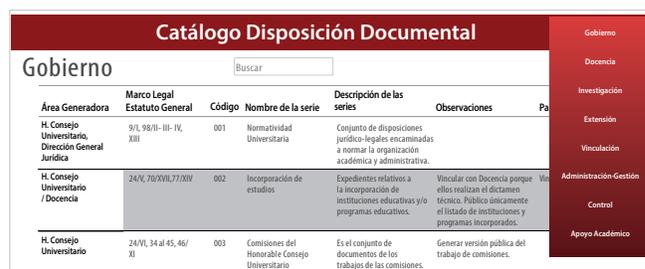


Figura 6. Menú hamburguesa de las secciones.

Por último, en la **Figura 7** se observa un ejemplo del funcionamiento de la barra de búsqueda en tiempo real, la cual muestra los resultados con base a la búsqueda propuesta, ocultando la información no requerida.



Figura 7. Funcionalidad de la barra de búsqueda.

Con la utilización del gestor web se logró reducir el tiempo de ejecución de las actividades necesarias para hacer la clasificación de documentos de acuerdo al Catálogo de Disposición Documental de la IES, pasan-

do de un tiempo de 3 a 5 horas de ejecución en forma “tradicional” a realizarlo entre 2 y 3 horas, lo que representa una disminución del tiempo de trabajo de un 40 %. Lo anterior permitirá al personal de apoyo administrativo enfocar su atención y talento a la realización de actividades de mayor relevancia para la institución. También se contempla una mejora en los aspectos de salud al reducir el nivel de estrés que genera dicha actividad.

A continuación, se describe la ISO/IEC 9126, la cual se utilizó para darle validez al proyecto, ya que es la que permite especificar y evaluar la calidad del software a partir de diferentes criterios.

ISO/IEC 9126

Este estándar presenta un marco conceptual para el modelo de calidad de un software, definiendo un conjunto de características y subcaracterísticas que debe cumplir. Las siete características principales que describe la ISO/IEC 9126 son [17]:

1. **Funcionalidad.** Evalúa adecuación, cumplimiento funcional, idoneidad, corrección, interoperabilidad, conformidad y seguridad de acceso. La funcionalidad de un software se refiere a su capacidad para operar según los requisitos del usuario, interactuar con otros sistemas y permitir el acceso en cumplimiento con las leyes de protección de datos.
2. **Confiabilidad.** Engloba la capacidad y la facilidad de recuperación, la mitigación de fallos, la cantidad de tiempo durante el cual el software está disponible para su uso y su tolerancia a posibles errores. Esta consideración abarca todos los aspectos relacionados con los fallos que podrían ocurrir en el producto de software.
3. **Usabilidad.** Mide el grado en que el software es fácil de usar, qué tan intuitivo es, el manejo que el usuario le da, si presenta menús sencillos, texto legible, entre otros aspectos.
4. **Eficiencia:** Analiza y evalúa la eficiencia del software en cuanto a la optimización del uso de los recursos del sistema, tanto en términos de tiempo de ejecución como de los recursos disponibles.

5. **Facilidad de mantenimiento.** Se refiere a la facilidad con la que se pueden llevar a cabo modificaciones, pruebas de rendimiento, pruebas de regresión, evaluaciones de accesibilidad, inspección de código y todas las actividades relacionadas con la ingeniería de requerimientos. Esto contribuye a que el software sea escalable y permita realizar mejoras continuas sin inconvenientes.
6. **Portabilidad.** Considera la facilidad con la que el software puede ser llevado de un entorno a otro. Proporciona facilidad de instalación, de ajuste, de adaptación al cambio y otros aspectos que lo hacen un sistema portable.
7. **Satisfacción.** Toma en cuenta el cumplimiento de los requerimientos para los que fue desarrollado el software, basado en las expectativas del cliente final, definidas de acuerdo a sus necesidades y basadas en la eficiencia y efectividad en coherencia para la finalidad del producto.

ESCALA DE LIKERT

La escala de Likert es una herramienta de medición utilizada para obtener respuestas en forma de niveles de acuerdo o desacuerdo con declaraciones específicas. Se emplea comúnmente en la investigación de mercados para comprender las opiniones y actitudes de los consumidores hacia una marca, producto o mercado objetivo. La escala de Likert permite medir el grado de conformidad de una persona con afirmaciones específicas, ya sean positivas o negativas [18].

Las respuestas se ofrecen generalmente en diferentes niveles de medición, como escalas de 5, 7 o 9 puntos, según la configuración previa del cuestionario. Estos puntos representan grados variables de acuerdo o desacuerdo con una afirmación [18].

En la [Tabla 2](#) se muestran algunos ejemplos del empleo de la escala de Likert.

INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN

Para realizar la evaluación de la calidad del gestor web se distribuyó un formulario mediante la herramienta de Formularios de Google, principalmente al personal administrativo de algunas áreas académicas. El formulario

mencionado anteriormente se contestó a partir de una prueba que hicieron del gestor web. Cada reactivo se respondió basándose en una escala de Likert, que considera cinco valores del 1 al 5, donde el 1 corresponde a “totalmente de acuerdo” y el 5 a “totalmente en desacuerdo”.

TABLA 2
EJEMPLOS DE RESPUESTAS EN LA ESCALA DE LIKERT

ACUERDO	FRECUENCIA
Totalmente de acuerdo	Muy frecuente
De acuerdo	Frecuentemente
Indeciso	Ocasionalmente
En desacuerdo	Raramente
Totalmente en desacuerdo	Nunca
IMPORTANCIA	PROBABILIDAD
Muy importante	Casi siempre
Importante	Usualmente
Moderadamente importante	Ocasionalmente
De poca importancia	Usualmente no
Sin importancia	Casi nunca

Los reactivos fueron formulados a partir de tres criterios: en primer lugar, los requerimientos que son la base de este proyecto; en segundo lugar, la norma ISO/IEC 9126 y, por último, la escala Likert, ya que debía cumplir con los criterios mencionados anteriormente. En la [Tabla 3](#) se muestran los reactivos según los criterios de funcionalidad, confiabilidad, usabilidad, eficiencia y satisfacción.

TABLA 3
REACTIVOS USADOS PARA EVALUAR LA APLICACIÓN DE ACUERDO A LOS CRITERIOS DEFINIDOS

CRITERIO ISO/IEC 9126	REACTIVO
Funcionalidad	La aplicación me permite hacer todo lo que esperaría de un software de clasificación. Todas las funciones de la aplicación son útiles; ninguna me parece innecesaria.
Confiabilidad	La aplicación está libre de fallos.
Usabilidad	La aplicación es intuitiva; aprendí a usarla fácilmente. La aplicación es fácil de usar, una vez sabiendo cómo. La interfaz tiene una buena organización de elementos. Los colores utilizados son adecuados. El tamaño y tipo de letra son adecuados.
Eficiencia	La aplicación es rápida y responsiva.
Satisfacción	Ha mejorado mi rendimiento para clasificar documentos de una forma más efectiva y rápida.

RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO

La aplicación del gestor web fue probada y el formulario fue contestado por 20 personas.

Características de los encuestados conforme a las áreas:

1. Directivos: 1 persona.
2. Encargados de área: 2 personas.
3. Personal administrativo: 17 personas.

En la [Tabla 4](#) se describen los resultados obtenidos del formulario que se aplicó.

TABLA 4
RESULTADOS DE LA ENCUESTA DE SATISFACCIÓN

NÚM. REACTIVO	TOTALMENTE DE ACUERDO	DE ACUERDO	NEUTRAL	EN DESACUERDO	TOTALMENTE EN DESACUERDO
1	95 %	5 %	0 %	0 %	0 %
2	95 %	5 %	0 %	0 %	0 %
3	65 %	25 %	10 %	0 %	0 %
4	85 %	15 %	0 %	0 %	0 %
5	85 %	15 %	0 %	0 %	0 %
6	85 %	15 %	0 %	0 %	0 %
7	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
8	65 %	30 %	5 %	0 %	0 %
9	95 %	5 %	0 %	0 %	0 %
10	85 %	15 %	0 %	0 %	0 %

De acuerdo a lo presentado en la [Tabla 3](#), se muestran los resultados obtenidos en cada reactivo, por lo cual a continuación se explican dichos resultados.

Reactivo 1: *La aplicación me permite hacer todo lo que esperaría de un software de clasificación*, el cual pertenece al apartado de funcionalidad. Los resultados reflejan que un 95 % de los usuarios está “totalmente de acuerdo” mientras que el resto está “de acuerdo”.

Reactivo 2: *Todas las funciones de la aplicación son útiles; ninguna me parece innecesaria*, el cual pertenece al apartado de funcionalidad, refleja que un 95 % está “totalmente de acuerdo” mientras que el resto está “de acuerdo”.

Reactivo 3: *La aplicación está libre de fallos*, que pertenece al apartado de confiabilidad, refleja que un 65 % está “totalmente de acuerdo” mientras que el 25 % “de acuerdo” y el resto “neutral”.

Reactivo 4: *La aplicación es intuitiva; aprendí a usarla fácilmente*, el cual pertenece al apartado de usabilidad, refleja que un 65 % está “totalmente de acuerdo” mientras que el 25 % “de acuerdo” y el resto “neutral”.

Reactivo 5: *La aplicación es fácil de usar, una vez sabiendo cómo*, que pertenece al apartado de usabilidad, refleja que un 85 % está “totalmente de acuerdo” y el resto “de acuerdo”.

Reactivo 6: *La interfaz tiene una buena organización de elementos*, el cual pertenece al apartado de usabilidad, refleja que un 85 % está “totalmente de acuerdo” y el resto “de acuerdo”.

Reactivo 7: *Los colores utilizados son adecuados*, que pertenece al apartado de usabilidad, refleja que todos están “totalmente de acuerdo”.

Reactivo 8: *El tamaño y tipo de letra son adecuados*, que también pertenece al apartado de usabilidad, refleja que 65 % están “totalmente de acuerdo”, el 30 % “De acuerdo” y solo el 5 % “Neutral”.

Reactivo 9: *La aplicación es rápida y responsiva*, que se refiere al apartado de eficiencia, refleja que el 95 % está “totalmente de acuerdo” y tan solo el 5 % de acuerdo.

Reactivo 10: *Ha mejorado mi rendimiento para clasificar documentos de una forma más efectiva y rápida*, el cual pertenece al apartado de eficiencia, refleja que el 95 % está “totalmente de acuerdo” y el 5 % de acuerdo.

TRABAJO A FUTURO

Debido a las limitaciones de tiempo y recursos durante el desarrollo de este proyecto, se optó por no profundizar en ciertos aspectos críticos, como el fortalecimiento de la seguridad en torno a la base de datos. Al tratarse de un prototipo inicial, se priorizó la funcionalidad básica del Sistema de Gestión de Documentos, garantizando que el sistema fuera operativo y cumpliera con los requisitos principales de gestión documental. En esta fase temprana no era imperativo implementar medidas de seguridad avanzadas, ya que el propósito principal era

demostrar la viabilidad técnica del sistema. Sin embargo, se reconoce que la seguridad es un componente esencial que deberá ser abordado en futuras iteraciones del proyecto para garantizar la protección de la información sensible.

En el contexto del desarrollo de un Sistema de Gestión de Documentos, un aspecto clave que deberá ser abordado en futuros trabajos es el fortalecimiento de la seguridad, particularmente en lo que respecta a la protección de la base de datos que almacena los documentos y la información sensible del sistema. A medida que las instituciones educativas generan y almacenan volúmenes crecientes de datos, como registros académicos, investigaciones y datos personales de estudiantes y empleados, se vuelve crucial asegurar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de esta información.

Una posible línea de investigación futura sería la implementación de mecanismos avanzados de cifrado de datos, tanto en tránsito como en reposo, asegurando que toda la información almacenada en la base de datos esté protegida contra accesos no autorizados y ciberataques. Además, el uso de tecnologías como la autenticación multifactor (MFA) y los sistemas de control de acceso basado en roles (RBAC) podría mejorar significativamente la seguridad del SGD, restringiendo el acceso a la información sensible solo a usuarios autorizados.

Otra dirección importante sería explorar el uso de *blockchain* como una tecnología complementaria para registrar y auditar todas las operaciones realizadas sobre la base de datos, garantizando así la transparencia y la inmutabilidad de los registros documentales. Esta tecnología podría ser particularmente útil para crear un historial de versiones de los documentos, permitiendo a las instituciones educativas rastrear cualquier modificación y asegurar la confiabilidad de la información almacenada.

Además, futuros estudios podrían enfocarse en la seguridad proactiva mediante la detección y prevención de intrusiones (IDS/IPS), que permitirían identificar y mitigar amenazas en tiempo real antes de que comprometan la base de datos. Estas tecnologías, combinadas con auditorías regulares y evaluaciones de vulnerabilidades, pueden crear un entorno de seguridad robusto que minimice los riesgos de pérdida de datos o filtraciones.

Por último, otra área a considerar es la adaptación de políticas de seguridad alineadas con normativas internacionales como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) o legislaciones locales equivalentes. Esto implica no solo proteger los datos almacenados, sino también garantizar que su gestión cumpla con los más altos estándares de privacidad y protección de la información.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo del gestor web para la clasificación de los oficios que se generan o reciben en las áreas administrativas de la Dependencia de Educación Superior beneficiaria del desarrollo web, ha servido a los usuarios como una herramienta útil y eficaz, para facilitar esta actividad cotidiana, lo cual es benéfico para su desempeño laboral y profesional.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que la aplicación cumple satisfactoriamente con los criterios de la norma ISO/IEC 9126, puesto que la mayoría de respuestas expresan estar “totalmente de acuerdo” con un valor promedio de 86 %, por lo cual se cumplió con el objetivo principal de este trabajo que se enfocó en desarrollar un gestor web que cumpla con dicha norma.

El proyecto también sirvió como experiencia en la aplicación de desarrollo web y de la metodología Scrum, así como de diversos aspectos de la ingeniería de software enfocada a los gestores web, puesto que es un componente esencial para el desarrollo efectivo y eficiente de aplicaciones y sitios web.

Otra aportación que se considera tiene este trabajo es mostrar la forma en que una innovación en los procesos de clasificación de archivo por medio del uso de tecnologías de información, se puede incorporar y adoptar de manera armoniosa en una organización, por parte de las personas que realizan una actividad que puede resultarles tediosa y cansada. En el marco de los sistemas sociotécnicos, se considera que el resultado de la investigación y el aplicativo desarrollado contribuyen a una mejora en el diseño del trabajo (*job design*) y a la humanización del trabajo a través del enriquecimiento del mismo, mejorando el rendimiento, reduciendo los errores y el estrés de los empleados.

El gestor web desarrollado refuerza el valor que aportan las tecnologías de información y la ingeniería de

software a la optimización de procesos en las organizaciones y su impacto en la mejora de los sistemas de actividad humana. Asimismo, conviene destacar que el principal contexto de los sistemas de información es la organización y que se hace uso de ellos con la intención de servir o apoyar a las personas para facilitar las tareas rutinarias por medio de la tecnología informática.

Además se debe considerar que un gestor web con capacidad de búsqueda en tiempo real aporta significativamente a la ingeniería de software, especialmente en términos de eficiencia y mejora de la experiencia de usuario. Este tipo de herramienta permite a los usuarios realizar consultas a través de un buscador, y a medida que se ingresan palabras clave, los resultados se actualizan de manera instantánea, ocultando aquellos que no coinciden con los términos de búsqueda. Esto ofrece una ventaja considerable, ya que elimina la necesidad de realizar múltiples búsquedas o navegar por grandes volúmenes de información irrelevante.

Desde la perspectiva de la ingeniería de software, un gestor web de este tipo optimiza los procesos de filtrado de datos y recuperación de información, lo que contribuye a la creación de sistemas más ágiles y orientados al usuario. Los algoritmos utilizados para implementar esta búsqueda en tiempo real permiten una interacción más fluida y precisa, facilitando el acceso rápido a los datos requeridos y mejorando la productividad en entornos donde la búsqueda de información es crítica. Además, este tipo de soluciones puede integrarse en plataformas más amplias de gestión documental, bases de conocimiento o sistemas de soporte, ayudando a los ingenieros de software a desarrollar aplicaciones más intuitivas y dinámicas.

El uso de búsquedas en tiempo real también fomenta la innovación en el diseño de interfaces, ya que los desarrolladores deben enfocarse en respuestas inmediatas y en la optimización del rendimiento de los sistemas para manejar grandes cantidades de información de forma rápida y eficiente, lo cual es crucial en proyectos complejos.

La metodología Scrum mostró ser útil en el desarrollo de este trabajo en su flexibilidad y adaptabilidad de trabajo. Una de sus principales ventajas a resaltar es que permite tener una visualización y control de todo lo que se desarrolla diariamente, tomando en cuenta cada uno de los avances, los problemas presentados para seguir con los requerimientos necesarios, además buscando

siempre tener una comunicación entre todos los involucrados para buscar cómo solucionar dichos problemas y cómo mejorar.

REFERENCIAS

- [1] J. Duckett, *HTML & CSS: Design and Build Web Sites*, John Wiley & Sons, 2011.
- [2] T. Felke-Morris, *Web Development and Design Foundations with HTML5*, 10.ª ed. Boston, MA: Pearson, 2021.
- [3] R. S. Pressman, *Software Engineering: A Practitioner's Approach*, 9.ª ed. Nueva York, NY: McGraw-Hill Education, 2013.
- [4] I. Sommerville, *Software Engineering*, 9.ª ed. Boston, MA: Pearson, 2010.
- [5] N. McFarlane, *Rapid Application Development with Mozilla*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003.
- [6] S. McConnell, *Rapid Development: Taming Wild Software Schedules*, Redmond, WA: Microsoft Press, 1996.
- [7] J. Sutherland, *Scrum: The Art of Doing Twice the Work in Half the Time*, Nueva York, NY: Crown Business, 2014.
- [8] M. Palacio. "Scrum Master". Scrummaster.com. https://www.scrummanager.com/files/scrum_master.pdf (accedido: mar 7, 2024).
- [9] J. Robbins, *Learning Web Design: A Beginner's Guide to HTML, CSS, JavaScript, and Web Graphics*, 4.ª ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2012.
- [10] W. Wu y A. Plakhtii, "E-Learning Based on Cloud Computing", *iJET*, vol. 16, n.º 10, pp. 4-17, 2021.
- [11] P. Haveri, U. B. Rashmi, D. G. Narayan, K. Nagaratna and K. Shivaraj, "EduBlock: Securing Educational Documents using Blockchain Technology", *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Kharagpur, India, 2020, pp. 1-7, doi: [10.1109/ICCCNT49239.2020.9225265](https://doi.org/10.1109/ICCCNT49239.2020.9225265).
- [12] A. A. Aziz, Z. M. Yusof, U. A. Mokhtar y D. I. Jambari, "The Implementation Guidelines of Digital Document Management System for Malaysia Public Sector: Expert Review", *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 10, n.º 1, pp. 198-204, feb. 2020, doi: [10.18517/ija-seit.10.1.10443](https://doi.org/10.18517/ija-seit.10.1.10443).
- [13] S. Jordan, S. S. Zabukovšek y I. Šišovska, "Document Management System – A Way to Digital Transformation", *Naše gospodarstvo / Our Economy*, vol. 68, n.º 2, pp. 43-54, Jun. 2022. doi: [10.2478/ngoe-2022-0010](https://doi.org/10.2478/ngoe-2022-0010).
- [14] M. Sambetbayeva, I. Kuspanova, A. Yerimbetova, S. Serikbayeva, y S. Bauyrzhanova, "Development of Intelligent Electronic Document Management System Model Based on Machine Learning Methods", *EEJET*, vol. 1, n.º 2 (115), pp. 68-76, feb. 2022, doi: [10.15587/1729-4061.2022.251689](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251689).
- [15] A. F. Gentile, D. Macri, D. L. Carni, E. Greco y F. Lamonaca, "A Network Performance Analysis of MQTT Security Protocols with Constrained Hardware in the Dark Net for DMS", *Appl. Sci.*, vol. 14, n.º 18, 2024, doi: [10.3390/app14188501](https://doi.org/10.3390/app14188501).
- [16] A. Ayaz y M. Yanartaş, "An analysis on the unified theory of acceptance and use of technology theory (UTAUT): Acceptance of electronic document management system (EDMS)", *Comput. Hum. Behav. Rep.*, vol. 2, art. 100032, pp. 1-7, 2020, doi: [10.1016/j.chbr.2020.100032](https://doi.org/10.1016/j.chbr.2020.100032).
- [17] R. S. Pressman, *Software Engineering: A Practitioner's Approach*, 9.ª ed. Nueva York, NY: McGraw-Hill Education, 2013.
- [18] S. G. Heeringa, B. T. West y P. A. Berglund, *Applied Survey Data Analysis*, 2.ª ed., Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor and Francis, 2017.

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento y eterna admiración por la Dra. Jazmín Georgina Licon Olmos †, quien con su impulso y guía hizo posible la elaboración de este artículo. Sus enseñanzas, energía y entusiasmo permanecerán por siempre entre nosotros.

Implementación de un método para el control de inventario en una microempresa familiar

Implementation of a method for inventory control in a family microenterprise

Luis Enrique Galaviz Magallanes^{1a} , Manuel Alonso Rodríguez Morachis^{1a}  , Mónica Gabriela Gutiérrez-Hernández^{1b,2} 

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, {^aDivisión de Estudios de Posgrado e Investigación, Maestría en Ingeniería Administrativa, ^bDepartamento de Ingeniería Industrial y Logística}, Ciudad Juárez, Chih., México

²Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Ciudad Juárez, Chih., México

RESUMEN

Las micro, pequeñas y medianas empresas (MIPYMES) conforman la base de la economía nacional e internacional. Sin embargo, constantemente se enfrentan a una gran diversidad de retos que en muchas ocasiones no pueden superar. Por esta razón, en este artículo se hace énfasis en la importancia de tener como mínimo un control de inventario que permita conocer en tiempo real la situación y establecer estrategias para incrementar la rentabilidad. El objetivo de este trabajo es la implementación de un método de control de inventario en una microempresa familiar de Ciudad Jiménez, Chihuahua, México. La metodología se compone de tres etapas: crear una base de datos, realizar un análisis descriptivo de las ventas e implementar un método de máximos y mínimos. Entre los resultados se reporta una dispersión elevada en el comportamiento de las ventas, así como un exceso de inventario en tres de los cinco productos seleccionados. En conclusión, en este estudio se evidencia la importancia de contar con un control de inventario que permita conocer el comportamiento de las ventas, así como evitar faltantes o excedentes que impactan directamente en la rentabilidad de la empresa.

PALABRAS CLAVE: MIPYMES; inventario; método de máximos y mínimos.

ABSTRACT

Small and medium-sized enterprises (SMEs) form the basis of the national and international economy. However, they are constantly faced with a wide variety of challenges that they are often unable to overcome. For this reason, this article emphasizes the importance of having at least one inventory control that allows you to know the situation in real time and establish strategies to increase profitability. The objective of this work is the implementation of an inventory control method in a family microenterprise in Ciudad Jiménez, Chihuahua, Mexico. The methodology consists of three stages: creating a database, performing a descriptive analysis of sales, and implementing the maximum and minimum method. Among the results, a high dispersion in sales behavior is reported, as well as an excess of inventory in three of the five selected products. In conclusion, this study highlights the importance of having inventory control that allows us knowing the behavior of sales, as well as avoiding shortages or surpluses that directly impact the profitability of the company.

KEYWORDS: SMEs; inventory; maximum and minimum method.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Manuel Alonso Rodríguez Morachis

INSTITUCIÓN: Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

DIRECCIÓN: Av. Tecnológico núm. 1340, Frac. El Crucero C. P. 32500, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

CORREO ELECTRÓNICO: mmorachis@itcj.edu.mx

Fecha de recepción: 6 de agosto de 2024. **Fecha de aceptación:** 25 de noviembre de 2024. **Fecha de publicación:** 2 de diciembre de 2024.



Licencia Creative Commons



I. INTRODUCCIÓN

Las pequeñas y medianas empresas (PYMES) son consideradas la base en la economía de todos los países porque generan el 52% de los empleos [1]-[4]. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) refiere que este tipo de empresas representan el 99.8% de los establecimientos económicos en México. Además, contribuyen en un 52% al PIB y generan el 78% de los empleos formales [5]. En México, las PYMES están compuestas por las micro, pequeñas y medianas empresas de acuerdo con la cantidad de empleados y monto de ventas anuales. Cabe señalar que 95.4% de las PYMES corresponden a microempresas, las cuales cuentan con menos de 10 trabajadores y sus ventas anuales no superan los cuatro millones de pesos. Además, generan el 45.6% de los empleos [6].

En este sentido, diversos autores resaltan la importancia de las microempresas para la economía de cualquier país. Entre estos estudios, destaca la investigación sobre las barreras que enfrentan las microempresas no solo para permanecer en el mercado, sino también para incrementar su participación en el mismo [7]. Aunado a ello, la Encuesta Nacional sobre la Productividad y Competitividad de las Micro, Pequeñas y Medianas empresas 2018 destaca que el 66.5% de estas no monitorea los indicadores de desempeño. Asimismo, el 40.4% de ellas no implementan acciones que les permita resolver los problemas que presentan sus procesos [8]. Es así como una PYME tiene sus ventajas y desventajas. Dentro de las ventajas se encuentra la rapidez en la toma de decisiones (ya que se tiene una cadena de mando corta) y la relación directa tanto con empleados como con clientes, lo cual permite conocer de primera mano sus necesidades [9]. Por el contrario, se enfrenta a una gran variedad de retos, entre los que se encuentran la carencia de un sistema administrativo formal, el acceso a financiamientos, acceso a precios más elevados, incremento de la competencia, los avances tecnológicos, el cumplimiento con las normativas y la ciberseguridad, entre otros [10]-[11].

Con base en lo anterior, se observa que un elemento indispensable en toda organización es un control de inventario, pues este sigue siendo dinero en efectivo que se encuentra detenido hasta el momento de su venta [12], [13], [14]. Es por ello que un control permite optimizar los costos de operación y de inversión, así como el servicio al cliente [15]. Su importancia radica en conocer la

rotación de los inventarios. Pues, carecer de un sistema de control propicia desorganización, escasez o excesos de productos que ponen en riesgo la rentabilidad de las empresas [16]. Por otro lado, aunque el inventario tiene como finalidad garantizar la disponibilidad del producto, es necesario mantener un equilibrio entre el inventario y el costo por mantenerlo. En este sentido, diversos autores refieren la importancia de mantener niveles óptimos de inventario que permitan afrontar las fluctuaciones del mercado sin perder ventas potenciales [13]. Sin embargo, dicho control sigue siendo una de las funciones más complejas de la organización, debido a que se debe considerar las características de la empresa y de la cadena de suministro como tal para poder tener una mayor certeza en el abastecimiento. Con ello, se puede reducir considerablemente la inversión en existencias, así como en el almacenamiento [17], [18], [19].

Actualmente se cuenta con una diversidad de métodos que permiten a una empresa tener el control de su inventario. Entre los más utilizados se encuentran los siguientes:

- 1) ABC. Este clasifica los productos de acuerdo con su precio y la relevancia para justificar su permanencia en el almacén [20].
- 2) De un solo lote (USL). Como su nombre lo dice, es aquel en el que se realiza solo un pedido anual de acuerdo con las ventas anuales [21].
- 3) Lote Económico (EOQ). Es uno de los más tradicionales y ha servido de referencia para desarrollar sistemas que permitan mejorar el nivel de producción y la gestión del inventario [22].
- 4) Híbrido. Este resulta de una combinación entre el método del lote económico y el punto de reorden y se utiliza cuando se tiene una demanda discreta y probabilística de los productos [21].
- 5) PEPS. Consiste en vender los productos que se adquirieron primero (de ahí su nombre de Primeras Entradas, Primeras Salidas) y ayuda a la reducción de productos obsoletos [23].
- 6) Máximos y mínimos. Se utiliza cuando se tiene una cantidad de productos considerable, lo cual se traduce en costos elevados para revisar y ordenar. Además, permite la administrar de mejor manera

los gastos en transporte y distribución, ya que solo se realiza pedido cuando las existencias están por debajo del mínimo establecido, es decir, únicamente cuando se requiere. Sin embargo, dentro de las desventajas se encuentra la necesidad de monitorear el nivel de inventario de manera continua y periódica [24], [25]. Es por ello que se considera el más eficiente, al ser una combinación de los sistemas de revisión periódica y el reabastecimiento continuo [25].

En este sentido, el punto de partida es identificar cuál es el método que más se adapta a las necesidades de la empresa [26], [27]. Entre los aspectos a considerar están la rotación del inventario, la capacidad de predicción, las fluctuaciones de la demanda y la inestabilidad del suministro [26], [28], [29].

Por otro lado, en la literatura revisada los estudios sobre el uso de métodos de control de inventarios en microempresas son escasos. La búsqueda se realizó en la base de datos Dialnet® y en Google Académico® durante el periodo 2019-2024 utilizando la frase *control de inventario en microempresas*. Sin duda, la implementación de un control de inventario es muy variante y depende de las características de la empresa. Por ejemplo, en empresas ecuatorianas Zambrano *et al.* [31] implementaron el método ABC y el lote económico en una microempresa de zapatos y Jadán-Maza [30] aplicó el método del lote económico y punto de reorden en una empresa de productos agropecuarios. Sin embargo, ninguno reporta que los métodos utilizados se hayan adoptado por la empresa de manera definitiva. Por otro lado, Ugando, Parrales y Bustos [13] implementaron el método de máximos y mínimos en una microempresa dedicada a la venta de muebles. En sus conclusiones se afirma que su implementación permitió conocer la cantidad exacta de inventario, dejando al descubierto problemas de exceso de productos, además de una desorganización interna.

Asimismo, en Colombia, Velásquez [28] comenta que al implementar el método de máximos y mínimos en una empresa de servicios se logró conocer el nivel de inventario óptimo para satisfacer la demanda y que los resultados son factibles, prácticos y confiables, al igual que otros métodos más sofisticados.

Mientras en México, Ramírez-Campos [31] se enfocó en mejorar el tiempo de respuesta de una microempresa familiar donde, si bien se realizó una simulación de Montecarlo, fue necesaria la clasificación ABC y la

determinación del lote económico y punto de reorden. Con los datos obtenidos y el historial de las ventas se desarrollo la simulación. Asimismo, Flores *et al.* [32] crearon un sistema de control de inventario y cuentas por cobrar en Microsoft Excel en una empresa dedicada a la compraventa de ropa ubicada en el estado de Chihuahua. Al implementar dicho método en medianas empresas, varios autores reportan ventajas considerables al incorporar un método de control de inventario.

Por tanto, al analizar los diferentes estudios reportados se puede apreciar que los métodos ABC, lote económico y máximos y mínimos son los que más se aplican. Como ya se mencionó anteriormente, son herramientas sencillas y fáciles de comprender e implementar con los recursos de una microempresa. Específicamente la implementación del método de máximos y mínimos reporta una precisión del 92.11%, garantizando un elevado nivel de satisfacción [29]. Como su nombre lo dice, su objetivo es definir tanto la cantidad máxima como mínima de inventario necesario para satisfacer la demanda. Para ello es necesario considerar las fluctuaciones de la demanda y los tiempos de abastecimiento [33], [34]. Asimismo, Pallo Ávila [35] refiere la necesidad de realizar revisiones periódicas aun cuando se implemente el método de máximos y mínimos. Dicha revisión permitirá realizar el contraste entre las existencias actuales y las necesarias, por si fuera necesario hacer un pedido antes de tiempo [25].

Dado que la mayoría de las MIPYMES realizan el control de inventarios de manera manual, empírica y de acuerdo con los criterios del dueño, resulta crucial dar el brinco al uso de las tecnologías que, sin lugar a dudas, facilitará la gestión [11]. Algunos autores destacan las ventajas de utilizar las tecnologías en la gestión para garantizar su permanencia en el mercado [29], [36], [37]. Asimismo, es de suma importancia que el sistema o método que se implemente no solo se quede en la primer etapa, sino que, a través de las tecnologías, se pueda continuar con él de manera permanente. Así pues, surgen los puntos de venta, que son diversos ya que varían de acuerdo con el giro, necesidades y tamaño de la empresa [38].

Con base en lo anterior, la literatura destaca la importancia de las MIPYMES para la economía de México y del mundo, sin embargo, enfatiza en la necesidad de implementar un control de inventario, pues cada año

se enfrentan a más retos, los cuales a menudo resultan difíciles de superar. En este sentido, este estudio tiene como objetivo la implementación de un control de inventario en una microempresa familiar mediante el método de máximos y mínimos, el cual será permanente a través del software Akasia®, que es un punto de venta mexicano diseñado específicamente para PYMES. Así, se pretende obtener tanto las ventajas que trae consigo la incorporación de las tecnologías en la microempresa como la optimización de los recursos y la satisfacción del cliente. En este software será capturado el mínimo y máximo de inventario de acuerdo con los resultados obtenidos al implementar el método. En esta perspectiva, el software lanzará alertas cuando las existencias de un producto se encuentren en el mínimo o inferior en lugar de tener que realizar una revisión continua.

II. METODOLOGÍA

De acuerdo con Hernández *et al.* [39] este es un estudio transversal, no experimental, cuantitativo, con alcance descriptivo, pues se va a analizar el comportamiento del inventario numéricamente a través de las ventas en un periodo determinado. Adicionalmente, se analizará el comportamiento de las ventas mensuales a través de gráficos. Dicho estudio se desarrolló en una MIPYME familiar cuyo giro es papelería. Para la implementación de un control de inventario, primeramente se contrató el software de punto de venta Akasia®, con la finalidad de conocer el comportamiento del inventario en tiempo real.

MÉTODOS

La metodología de este estudio se conformó de tres etapas para conocer el comportamiento real del inventario de una muestra de cinco productos esenciales. Con base en dicho comportamiento, se implementó el método de máximos y mínimos para determinar el nivel de inventario óptimo necesario para garantizar la satisfacción del cliente sin tener excesos de inventario (Figura 1).

ETAPA 1. BASE DE DATOS

La base de datos se creó en el software Akasia® versión 2.9.8.3. Dicho software está diseñado como punto de venta para MIPYMES, en el cual se puede conocer el inventario en tiempo real (incluyendo una lista de faltantes o a punto de agotarse), llevar un control en la

gestión de compraventa, facturar y establecer promociones, entre otras cosas [38]. Sin embargo, para este estudio se utilizó en la recolección de datos durante el periodo agosto-diciembre 2023.

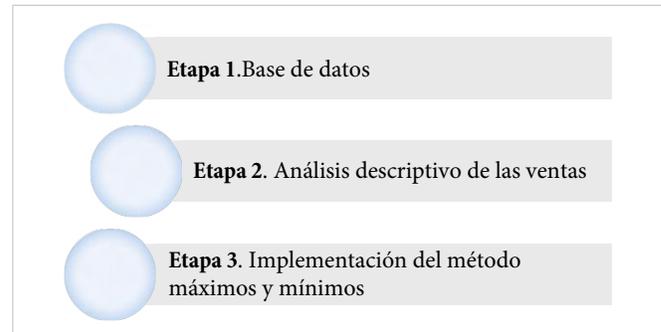


Figura 1. Etapas de la metodología.

ETAPA 2. ANÁLISIS DESCRIPTIVOS

Al tener acceso al historial de las ventas y flujo de inventario, se utilizó el software IBM SPSS Statistics® versión 26 para el análisis estadístico. Primeramente, se graficaron las ventas mensuales que se presentaron en el periodo agosto-diciembre 2023. Después, se identificaron los productos que presentaban mayor cantidad de ventas. Al final, a criterio de la gerencia y por una muestra no probabilística, se eligieron los cinco productos críticos, es decir, que no pueden faltar en la papelería.

Una vez que fueron seleccionados, se analizó el comportamiento de sus ventas a través del análisis descriptivo (así como las ventas atípicas). Luego se calculó la mediana y rangos intercuartílicos para apreciar el comportamiento de los datos.

ETAPA 3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE MÁXIMOS Y MÍNIMOS

Para la implementación del método, es necesario conocer el comportamiento de las ventas, es decir, tanto el promedio de las ventas como las ventas máximas y mínimas que se tuvieron en un día. Adicionalmente, se consideró el tiempo de reposición, el cual corresponde al tiempo que transcurre en días desde el momento en el que se ordena al proveedor un producto hasta que se recibe [28]. Una vez que se tiene la información, es necesario aplicar las fórmulas matemáticas que se muestran en la ecuación (1) a la ecuación (4) [13].

$$Pp = Cp \times Tr + Em \quad (1)$$

$$EM = CM \times Tr + Em \quad (2)$$

$$Em = Cm \times Tr \quad (3)$$

$$CP = EM - E \quad (4)$$

donde Pp : punto de pedido, Cp : consumo promedio, Tr : tiempo de reposición (días), Em : existencia mínima, EM : existencia máxima, CM : consumo máximo (diario), Cm : consumo mínimo (diario) y E : existencias actuales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS ETAPA 1. BASE DE DATOS

Durante el periodo agosto-diciembre 2023 se dieron de alta 11 681 productos distintos en Akasia®. En dicho software es posible analizar las ventas y rotación del inventario en tiempo real desde el momento en el que se registra. La base de datos contempla aproximadamente el 70% de los productos que se manejan en la MIPYME. El monto que se tuvo en inventario hasta el 31 de diciembre de 2023 fue de MX\$ 4 184 600.45.

RESULTADOS ETAPA 2. ANÁLISIS DESCRIPTIVOS

Primeramente, se consultaron las ventas mensuales que se registraron durante los meses de agosto a diciembre 2023. Las ventas corresponden solo a las ventas de los productos que se encuentran actualmente en el sistema. En la Figura 2 se aprecia que en tres de los cinco meses analizados se tuvieron ventas superiores a los MX\$ 100 000. Según la diversidad de productos que se tiene y las ventas mensuales registradas, es indispensable implementar un control de inventario que permita optimizar los recursos.

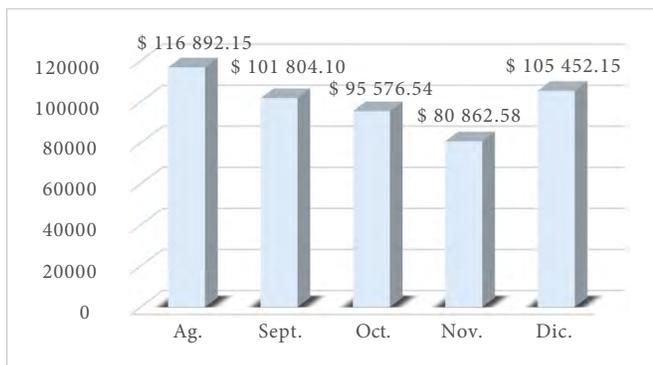


Figura 2. Ventas mensuales (MX\$) correspondientes a los productos dados de alta en el software.

Posteriormente, se identificaron los productos que presentaron mayor rotación. La gerencia seleccionó los cinco productos más críticos o esenciales en la papelería, es decir, se trata de una muestra no probabilística [40]. La Tabla 1 muestra los productos seleccionados para este estudio, así como la cantidad que se tiene en inventario.

TABLA 1
EXISTENCIAS DE PRODUCTOS SELECCIONADOS AL 31 DICIEMBRE DE 2023

PRODUCTO	EXISTENCIAS	UNIDADES
Silicón barra delgado Pascua®	1400	Piezas
Fólder crema carta MAPASA®	848	Piezas
Cartulina blanca Scribe®	328	Piezas
Contac transparente MAE®	267	Metros
Cinta adhesiva Navitec® 12 mm 10 m	203	Piezas

Por otro lado, se realizó el análisis descriptivo de las ventas correspondientes a los productos previamente seleccionados con ayuda del software estadístico SPSS versión 26°. Se generaron los diagramas de caja y bigotes, además de identificar el comportamiento de las ventas mediante las medidas de tendencia central y los rangos intercuartílicos por producto. En la Tabla 2 se observa que el silicón fue el producto con mayor número de ventas durante el periodo analizado (1550 piezas), seguido del Contac transparente, con 710 metros. Asimismo, se puede apreciar alta variación entre las ventas. Por ejemplo, el promedio de las ventas del silicón fue de 10.16, mientras la mediana fue 6. Lo anterior se debe a que la cantidad de piezas requeridas en cada venta es muy variable. Para este caso, hubo días en los que no se registraron ventas, mientras en otros días se llegó a vender hasta 72 piezas. Por otro lado, este producto presentó un rango intercuartílico de 11. Por el contrario, la cinta adhesiva fue la de menor cantidad de ventas (89), menor dispersión entre las ventas diarias de acuerdo con su desviación y rango intercuartílico.

RESULTADOS ETAPA 3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE MÁXIMOS Y MÍNIMOS

Para calcular los valores del inventario con el método de máximos y mínimos, es necesario conocer la venta máxima, mínima y promedio diaria que se registró, además del tiempo en días que transcurre entre el momento que se realiza el pedido y el día en que se recibe la

mercancía. Los cinco productos seleccionados pertenecen a un mismo proveedor, el cual entrega pedido cada semana (7 días naturales). Dichos datos permitirán calcular el nivel de inventario necesario para garantizar la satisfacción del cliente sin tener exceso [28]. Asimismo, cabe señalar que todos los productos seleccionados tuvieron una venta mínima diaria de cero.

TABLA 2
 ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE LAS VENTAS POR
 PRODUCTO (AGOSTO-DICIEMBRE 2023)

ÍTEM	VENTAS	MEDIA	DE*	MÁX.*	PERCENTILES		
					25	50	75
Silicón	1555	10.16	12.77	72	2	6	13
Fólder	513	3.35	3.590	21	1	2	5
Cartulina	571	3.73	6.069	50	0	2	5
Contac	710	4.64	9.786	61	0	0.9	4.65
Cinta	89	0.58	1.104	7	0	0	1

*DE: desviación estándar; Máx.: Máximas.

Con base en los resultados se puede apreciar que el comportamiento de las ventas presenta alta dispersión. Por ejemplo, el silicón fue el producto que presentó más ventas y aunque hubo días que no se vendió, hubo otros en los que se vendieron 72 de ahí que el rango intercuartílico fue 11 y su desviación estándar 12.77.

Posteriormente, en la [Tabla 3](#) se observa que tres de los cinco productos presentan un exceso de inventario, que se representa con símbolo negativo. Como acción de la gerencia, se adecuará el precio del primer producto por venta al mayoreo o unidades agrupadas y los últimos dos serán puestos en exhibición y descuento en compras de productos de oficina o afín, esto para reducir al máximo el tiempo de alcanzar el punto de pedido calculado. Estos tres productos no se surtirán hasta bajar el inventario, es decir, la cantidad en existencias que se reportaron el 31 para el cierre del año 2023 fue superior al máximo recomendado de acuerdo con el comportamiento de las ventas.

TABLA 3
 DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES ÓPTIMOS DE INVENTARIO Y PUNTO DE PEDIDO

PRODUCTO	FÓRMULA	CÁLCULOS	RESULTADO
Silicón	E. mínima: $Em = Cm \times Tr$	$Em = 0 * 7$	0
	E. máxima: $EM = CM \times Tr + Em$	$EM = 72 * 7 + 0$	504
	Punto de pedido: $Pp = Cp \times Tr - E$	$Pp = 10.16 * 7 + 0$	72
	Cantidad para pedir: $CP = EM - E$	$CP = 504 - 1400$	-896
Fólder	E. mínima	$Em = 0 * 7$	0
	E. máxima	$EM = 21 * 7 + 0$	147
	Punto de pedido	$Pp = 3.35 * 7 + 0$	24
	Cantidad para pedir	$CP = 147 - 1400$	-701
Cartulina	E. mínima	$Em = 0 * 7$	0
	E. máxima	$EM = 50 * 7 + 0$	350
	Punto de pedido	$Pp = 3.73 * 7 + 0$	27
	Cantidad para pedir	$CP = 350 - 328$	22
Contac	E. mínima	$Em = 0 * 7$	0
	E. máxima	$EM = 61 * 7 + 0$	427
	Punto de pedido	$Pp = 4.64 * 7 + 0$	33
	Cantidad para pedir	$CP = 427 - 267$	160
Cinta	E. mínima	$Em = 0 * 7$	0
	E. máxima	$EM = 7 * 7 + 0$	49
	Punto de pedido	$Pp = 0.58 * 7 + 0$	5
	Cantidad para pedir	$CP = 49 - 203$	-154

Cabe mencionar que fue necesario el entrenamiento y capacitación de gerencia y persona a cargo por vía re-

mota con el diseñador del software durante tres semanas para dominar las funciones y utilizarlo como base

de datos para monitorear los productos, seleccionar e implementar el control. Posteriormente, se analizó dicho comportamiento de los productos seleccionados.

Finalmente, al implementar el método de máximos y mínimos para el control de inventario se determinó el nivel de inventario mínimo, máximo, el punto de pedido y la cantidad a pedir. Los resultados corroboran los beneficios que trae consigo incorporar las tecnologías de la información al sistema de gestión y control de inventarios [3], [11], así como la necesidad de un sistema de control interno confiable que permita mejorar la rentabilidad de la empresa mientras se garantiza la satisfacción del cliente [41], [42]. Asimismo, los resultados coinciden con los obtenidos por Ugando, Parrales y Bustos [13] al dejar en evidencia el exceso de inventario hasta del 300%.

Por otro lado, el método de máximos y mínimos arrojó la información necesaria que permitió conocer el nivel de inventario y a su vez, poder compararlo con la finalidad de identificar faltantes o exceso de inventario. Por ende, representó un avance importante para la empresa, ya que desde su creación ha manejado el nivel de inventario de manera subjetiva, sin un control y bajo la responsabilidad de una sola persona. Entre los avances logrados se encuentra conocer en tiempo real el inventario y el comportamiento de las ventas, lo que permite identificar tendencias y el tipo de movimiento que presentan las ventas, como lo refiere [41].

IV. CONCLUSIONES

En la revisión de literatura se pudo constatar que la mayoría de las micro, pequeñas y medianas empresas, tanto nacionales como internacionales, carecen de un sistema de control de inventario eficaz, aunado a una serie de retos como lo es la globalización, los avances tecnológicos y los requerimientos fiscales, entre otros. Por ello, el porcentaje de empresas que se ven obligadas a cerrar definitivamente es superior al porcentaje de aperturas. Sin embargo, no se encontró literatura de utilización de métodos de control de inventarios en microempresas mexicanas.

En este sentido, y a partir de la implementación de un software para el control de inventario en la MIPYME, se pudo constatar inmediatamente los beneficios que trae consigo el uso de las tecnologías en el control y monitoreo del inventario. Dicho software facilitó la realización

de los pedidos al mostrar automáticamente los productos con bajo nivel de existencias. En tanto, a través de la implementación del método de máximos y mínimos se obtuvieron los niveles óptimos del inventario para cada producto de acuerdo con el comportamiento de sus ventas. Es importante señalar que este estudio solo se muestran cinco productos que fueron seleccionados por la gerencia, cuando en realidad la MIPYME maneja más de 10 000 productos distintos.

Con base en lo anterior, se concluye que la implementación de un sistema de control de inventarios y, mejor aún, si es a través del uso de las tecnologías de información, es el punto de partida para medir y acrecentar la rentabilidad de cualquier empresa, independientemente del tamaño, giro y ubicación, pero sobre todo las microempresas en México deben conocer este tipo de ventajas para su continuidad en el mercado.

En este estudio se ha detectado una serie de oportunidades a considerar en las futuras investigaciones, entre las que destacan las siguientes:

1. Evaluar los niveles de rentabilidad de la empresa después de la implementación de un control de inventario.
2. Contrastar los tiempos destinados a la gestión y la realización de pedidos antes y después de establecer el control de inventarios.
3. Realizar un análisis de mercado y contrastarlo con las ventas reales que se tiene para considerar la pertinencia de los productos que adquiere la empresa.
4. Realizar un censo local, regional y/o nacional que permita conocer mejor la situación que enfrentan las MIPYMEs en México con respecto al control de la gestión y la rentabilidad de estos, con la finalidad de establecer qué modelos de control de inventario se pueden aplicar.

REFERENCIAS

- [1] OECD, *Estudios Económicos de la OCDE: México 2022*. París: OECD Publishing, 2022, doi: [10.1787/8b913f19-es](https://doi.org/10.1787/8b913f19-es).
- [2] M. E. B. Bizarrón y E. M. C. Palacios, "Factores de permanencia empresarial de las microempresas del sector

comercio de Puerto Vallarta, Jalisco”, *RIDE*, vol. 9, n.º 17, dic. 2018, doi: [10.23913/ride.v9i17.412](https://doi.org/10.23913/ride.v9i17.412).

- [3] B. R. Macías-Linares, D. Ábrego-Almazán, y J. C. De la Cruz-Maldonado, “Influencia del Capital Intelectual y Tecnologías de la Información en el Rendimiento de Pymes zona centro de Tamaulipas”, *RIDE*, vol. 14, n.º 28, feb. 2024, doi: [10.23913/ride.v14i28.1809](https://doi.org/10.23913/ride.v14i28.1809).
- [4] G. Maldonado, G. C. López y S. Y. Pinzón, “Factores de éxito de las microempresas en México”, en *La microempresa en México: un diagnóstico de su situación actual*, G. Maldonado, J. F. Ojeda, L. J. Uc, L. E. Valdez y M. Medina, coords. México: Universidad Autónoma de Aguascalientes, cap. 15, 2017, pp. 263-288.
- [5] INEGI, “Producto Interno Bruto. PIB. Trimestral”, Economía y Sectores Productivos. Accedido: may. 8, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/pib/>
- [6] Mariana, “Clasificación de las empresas en México: Micro, Mediana y Grande”, Negocio y Emprendimiento. Accedido: jun. 4, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://negocioyemprendimiento.com/clasificacion-de-las-em-presas-en-mexico/>
- [7] S. Y. Pinzón, G. Maldonado y G. C. López, “Caracterización de la muestra de las microempresas en México”, en *La microempresa en México: un diagnóstico de su situación actual*, G. Maldonado, J. F. Ojeda, L. J. Uc, L. E. Valdez y M. Medina, coords. México: Universidad Autónoma de Aguascalientes, cap. 2, 2017, pp. 37-57.
- [8] INEGI/Secretaría de Economía/AMSDE. “INEGI Presenta Resultados de la Encuesta Nacional Sobre Productividad y Competitividad de las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (ENAPROCE) 2018”. INEGI.org. Accedido: sept. 2, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2019/especiales/ENAPROCE2018.pdf>
- [9] M. Alvarado. “Qué son las PYMES en México: Características y Ventajas”. [adquieremexico.com](https://www.adquieremexico.com). Accedido: en. 16, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.adquieremexico.com/index.php/blog/que-son-las-pymes-en-mexico-caracteristicas-y-ventajas>
- [10] V. M. López, “La competitividad de las pymes en México: Retos y oportunidades ante un mundo globalizado”, *Horizontes de la Contaduría en las Ciencias Sociales*, vol. 5, n.º 9, pp. 79-91, 2018.
- [11] Outhand. “Retos empresariales para las PyMEs en 2024: claves para el éxito”. Outhand.mx. Accedido: en. 17, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.outhand.mx/post/retos-empresariales-pymes-2024-claves-para-el-exito>
- [12] S. Ross, R. Westerfield y J. Jaffe, *Finanzas corporativas*, 9.ª ed. México: McGraw Hill Educación, 2012.
- [13] M. Ugando, B. Parrales y D. Bustos, “Modelo de gestión de inventarios a través de mínimos y máximos en la empresa comercial ‘Muebles Chabelita’”, *ECA Sinergia*, vol. 13, n.º 2, pp. 83-94, 2022, doi: [10.33936/eca_sinergia.v13i2.3759](https://doi.org/10.33936/eca_sinergia.v13i2.3759).
- [14] C. A. Valladares, K. V. Jiménez, M. Ugando, Á. R. Sabando y A. Villalón, “Gestión de capital de trabajo y su efecto en la rentabilidad para el grupo de empresas del sector manufacturero Ecuatoriano”, *S. F. J. of Dev.*, vol. 2, n.º 2, pp. 2082-2101, may. 2021, doi: [10.46932/sfjdv2n2-075](https://doi.org/10.46932/sfjdv2n2-075).
- [15] T. Wild, *Best Practice in Inventory Management*, 2.ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [16] L. R. Asencio, E. González, y M. Lozano, “El inventario como determinante en la rentabilidad de las distribuidoras farmacéuticas”, *Retos*, vol. 7, n.º 13, pp. 123-142, mar. 2017, doi: [10.17163/ret.n13.2017.08](https://doi.org/10.17163/ret.n13.2017.08).
- [17] S. Aro-Gordon y J. A. Gupte, “Review of modern inventory management techniques”, *The Global Journal of Business and Management*, vol. 1, n.º 2, pp. 1-22, sept. 2016.
- [18] O. Peña y R. Silva, “Factores incidentes sobre la gestión de sistemas de inventario en organizaciones venezolanas”, *Telos*, vol. 18, n.º 2, pp. 187-207, 2016.
- [19] H. Lara-Gavilánez, I. Naranjo-Peña y C. Banguera-Díaz, “Aplicación del modelo Montecarlo-Difuso para la correcta Gestión de Inventarios en empresas Pymes”, *Ecuad. Sci. J.*, vol. 4, n.º 2, pp. 80-88, sept. 2020, doi: [10.46480/esj.4.2.84](https://doi.org/10.46480/esj.4.2.84).
- [20] C. Veloz y O. Parada, “Métodos para mejorar la eficiencia y la toma de decisiones en la gestión de inventarios”, *CU*, vol. 10, n.º 22, jul. 2017, doi: [10.29076/issn.2528-](https://doi.org/10.29076/issn.2528-)

7737vol10iss22.2017pp29-38p.

- [21] J. M. Izar y H. Méndez, “Estudio comparativo de la aplicación de 6 modelos de inventarios para decidir la cantidad y el punto de reorden de un artículo”, *Ciencia y Tecnología*, vol. 1, n.º 13, dic. 2013, doi: [10.18682/cyt.v1i13.105](https://doi.org/10.18682/cyt.v1i13.105).
- [22] I. Lopes-Martínez y M. I. Gómez-Acosta, “Auditoría logística para evaluar el nivel de gestión de inventarios en empresas”, *Ing. Ind.*, vol. 34, n.º 1, pp. 108-118, en.-abr. 2013.
- [23] J. A. Fuertes, “Métodos, técnicas y sistemas de valuación de inventarios. Un enfoque global”, *Gestión Joven*, n.º 14, 2015.
- [24] L. J. Krajewski, L. P. Ritzman y M. K. Malhotra, *Administración de Operaciones. Procesos y Cadenas de Valor*, 8.ª ed. México: Pearson Educación, 2008.
- [25] USAID. “El Manual de Logística. Guía práctica para la gerencia de cadenas de suministros de productos de salud”. USAID Global Health Supply Chain Program. Accedido: feb. 23, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ghsupplychain.org/el-manual-de-logistica>
- [26] M. Cortez, “Revisión de conceptos y métodos del control interno de inventarios de una empresa,” trabajo de investigación para optar el grado académico de bachiller en contabilidad, Fac. de CC. Econ. y Com., Universidad Católica Sedes Sapientiae, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uccs.edu.pe/handle/20.500.14095/882>
- [27] V. Gutiérrez y C. J. Vidal, “Modelos de Gestión de Inventarios en Cadenas de Abastecimiento: Revisión de la Literatura”, *Rev. Fac. Ing. Uni. Antioquia*, n.º 43, pp. 134-149, mar. 2008.
- [28] E. M. Velásquez. “Estudio del modelo de gestión de inventarios basado en máximos y mínimos”. studocu.com. Accedido: en. 15, 2024. [En línea]. Disponible en: http://5.161.118.10:8080/bitstream/20.500.12421/246/1/ESTUDIO_DEL_MODELO.pdf
- [29] J. L. Chamorro, J. E. Díaz, O. D. Fuentes y H. Y. Lovo, “Política de inventarios máximos y mínimos en cadenas de suministro multinivel. Caso de estudio: una empresa de distribución farmacéutica”, *Nexo Revista Científica*, vol. 31, n.º 2, pp. 144-156, dic. 2018, doi: [10.5377/nexo.v31i2.6837](https://doi.org/10.5377/nexo.v31i2.6837).
- [30] V. K. Jadán y C. P. López, “Buenas prácticas de control y gestión de inventarios para la Asociación Productores Agropecuarios Llanitos Verdes”, *CIENCIAMATRIA*, vol. 7, n.º extra 2, pp. 248-278, 2021.
- [31] M. A. Ramírez-Campos, R. Pérez-Rodríguez, y M. Á. Silva-Olvera, “Mejora en el tiempo de respuesta mediante simulación de inventarios en una microempresa familiar”, *ConCiencia Tecnológica*, n.º 64, 2022.
- [32] Y. Flores, J. Pendones, G. Espino Sánchez y L. Acosta, “Modelo de un sistema de control de inventarios y cuentas por cobrar para MIPYMES en Excel. Caso de MIPYME comercial”, *Religación*, vol. 7, n.º 34, art. e210964, 2022, doi: [10.46652/rgn.v7i34.964](https://doi.org/10.46652/rgn.v7i34.964).
- [33] “Almacenar sin riesgo: el secreto del stock máximo”, EAE.es. Accedido: may. 22, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/almacenar-sin-riesgo-el-secreto-del-stock-maximo/>
- [34] Fundación Iberoamericana de Altos Estudios Profesionales (FIAEP). “Control y manejo de inventarios FIAEP”. Academia.edu. Accedido: may. 23, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/36867500/Control_y_manejo_de_inventarios_FIAEP
- [35] V. M. Pallo, “El nivel de inventarios y la rentabilidad en la empresa ‘Comercial Diana’”, tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ambato, Ecuador, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.puce.edu.ec/items/f2995d1a-fde4-43b5-8426-47c5b0e172ac>
- [36] E. Lozano, C. O. Ibarra, C. G. Alvarado y M. Ramírez, “Transformación digital en las MiPyMEs mexicanas y su permanencia en el mercado”, *Jóvenes en la Ciencia*, vol. 28, pp. 1-10, oct. 2024.
- [37] K. G. Rodríguez, O. J. Ortiz, A. I. Quiroz y M. L. Parrales, “El e-commerce y las Mipymes en tiempos de Covid-19”, *Espacios*, vol. 41, n.º 42, nov. 2020, doi: [10.48082/espacios-a20v41n42p09](https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n42p09).
- [38] *Akasia Punto de Venta*. (2024). Akasia Software Development. Accedido: en. 15, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://akasia.com.mx/index.php>

- [39] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la investigación*, 6.ª ed. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2014.
- [40] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la investigación*, 5.ª ed. México: McGraw-Hill, 2010.
- [41] M. Ugando, Á. R. Sabando, Á. E. Zapata, A. Villalón y B. X. Sabando, “Modelación financiera y pronósticos de fondos externos requeridos en el contexto de las pymes de Santo Domingo De Los Tsáchilas, caso Ecuador”, *Sinapsis*, vol. 11, n.º 2, pp. 65-78, 2019.
- [42] D. W. Sierra, “Propuesta de mejoramiento de procedimientos para el Control de Inventarios aplicado en la Empresa ‘VANIDADES S. A.’”, tesis para la obtención

del título de Ingeniero en Contabilidad y Auditoría, Fac. de CC. Advtas., Universidad Central del Ecuador, Quito, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.ds-pace.uce.edu.ec/handle/25000/1063>

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a Don Mónico Gutiérrez y a la Sra. Celsa Hernández, propietarios de la microempresa, por el apoyo brindado y la disposición para realizar este proyecto.

Además, esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), a través de la beca para posgrados nacionales con CVU: 1245026.

Procedimiento iterativo de integración por partes y la evaluación de su eficacia en el aula

Iterative integration-by-parts procedure and its efficacy assessment in the classroom

Jorge Eduardo Macías Díaz^{1a} , Miguel Ángel Abreu Terán², Alejandro Román Loera^{1b}  

¹Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias Básicas, {^aDepartamento de Matemáticas y Física,

^bDepartamento de Sistemas Electrónicos, Centro de Ciencias Básicas}, Aguascalientes, México

²Universidad de Oriente, Departamento de Matemática Aplicada, Santiago de Cuba, Cuba

RESUMEN

En este trabajo se evaluó una estrategia simple para aplicar iterativamente la regla de integración de Leibniz desde cálculo elemental a problemas operativos. La regla de integración de Leibniz (también conocida como “fórmula de integración por partes”) es una fórmula relativamente simple. Sin embargo, algunos problemas típicos de cálculo de antiderivadas requieren aplicar esta fórmula de forma iterativa. Lamentablemente, este proceso provoca soluciones erróneas y que requieren mucho tiempo por las diversas aplicaciones de la regla de Leibniz y la complejidad de los cálculos. La estrategia propuesta en el presente trabajo reduce el tiempo empleado para obtener las soluciones de aquellos problemas iterativos. Además, el procedimiento empleado es simple, fácil de describir algorítmicamente y produce resultados más rápidos. Para mostrar la eficiencia de esta estrategia, se realizó un estudio experimental con un grupo de estudiantes de pregrado de ingeniería en una universidad pública de México. La capacidad de estos estudiantes para utilizar reglas elementales de integración se demostró mediante una prueba preliminar y el grupo se dividió en dos subgrupos, a uno de los cuales se le enseñó la regla tradicional de Leibniz, mientras que el segundo aprendió la estrategia estudiada en este trabajo. Los resultados mostraron que el enfoque actual produce resultados decisivamente más rápidos que el método tradicional.

PALABRAS CLAVE: estrategia de resolución de problemas; regla integral de Leibniz; integración recursiva por partes; método de solución; evaluación cuantitativa.

ABSTRACT

In this work, a simple strategy for iteratively applying Leibniz's integration rule from elementary calculus to operational problems was evaluated. Leibniz's integration rule (also known as the “integration by parts formula”) is a relatively simple formula. However, some typical antiderivative calculus problems require applying this formula iteratively. Unfortunately, this process leads to erroneous and time-consuming solutions due to the various applications of Leibniz's rule and the complexity of the calculations. The strategy proposed in this work reduces the time spent obtaining the solutions of those iterative problems. Furthermore, the procedure used is simple, easy to describe algorithmically, and produces faster results. To show the efficiency of this strategy, an experimental study was conducted with a group of undergraduate engineering students at a public university in Mexico. The ability of these students to use elementary rules of integration was demonstrated by a pretest and the group was divided into two subgroups, one of which was taught the traditional Leibniz rule, while the second learned the strategy studied in this work. The results showed that the current approach produces decisively faster results than the traditional method.

KEYWORDS: problem-solving strategy; Leibniz's integral rule; recursive integration by parts; solution method; quantitative assessment.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Alejandro Román Loera

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Aguascalientes / Centro de Ciencias Básicas

DIRECCIÓN: Ave. Universidad 940, Ciudad Universitaria, Aguascalientes, Ags. C. P. 20100, México

CORREO ELECTRÓNICO: alejandro.roman@edu.uaa.mx

Fecha de recepción: 23 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:** 19 de noviembre de 2024. **Fecha de publicación:** 4 de diciembre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

La resolución de problemas en matemáticas es una de las vías de investigación más interesantes en educación [1]. Este tema ha sido investigado en diversos niveles educativos y en diferentes entornos culturales [2], [3]. Algunos estudios han sugerido que el nivel de comprensión lectora es crucial en el rendimiento en ciencias y matemáticas [4], y se han propuesto diferentes enfoques para mejorar la alfabetización de los estudiantes con ese fin. En particular, algunos informes interesantes han correlacionado positivamente el entendimiento de lectura y las habilidades de análisis y solución de situaciones matemáticas escritas en las primeras etapas de la infancia [5]. Otros estudios han establecido una correlación positiva entre el dominio de la lectura en inglés y el rendimiento académico de estudiantes de primer año de ciencias y matemáticas en entornos multilingües [6], mientras que otros trabajos han demostrado que el uso de textos descriptivos facilita el aprendizaje del conocimiento científico [7]. Sin embargo, el problema de buscar estrategias óptimas para mejorar las habilidades en el tratamiento de problemas matemáticas basadas en el desarrollo del entendimiento de la información escrita es una tarea abierta de discusión e investigación [8].

Vale la pena señalar que los problemas de matemáticas en todos los niveles educativos en México varían en su naturaleza y grado de dificultad. Por ejemplo, la formulación de problemas es quizás una de las tareas más importantes y críticas en matemáticas [9]. Se demostró que la manera en cómo los estudiantes abordan el planteamiento de problemas afecta al desarrollo de habilidades de resolución de problemas y a la conciencia metacognitiva, en todos los niveles de la educación formal [10]. Como han señalado recientemente algunos autores en el contexto de la educación matemática en el nivel secundario, las dificultades en la resolución de problemas pueden deberse a una falta de capacidad para traducir enunciados verbales al lenguaje matemático [11]. Estos autores han propuesto algunas conjeturas para minimizar este problema, pero aún falta una solución concreta y eficaz. Mientras tanto, otros investigadores han abogado por integrar las artes visuales para enriquecer la educación matemática en el nivel de escuela primaria [12]. Se ha hecho hincapié en el planteamiento de problemas en geometría, aunque las mejoras en la comprensión y explicación del pensamiento geométrico no muestran diferencias con los enfoques tradicionales.

Se han propuesto varias estrategias para aliviar las dificultades en la resolución de problemas matemáticos, por ejemplo. Por ejemplo, un diseño multimedia interactivo [13], un sistema de aprendizaje móvil basado en una estrategia colaborativa de planteamiento de problemas [14] y la propuesta de un enfoque interactivo de planteamiento de problemas con el objetivo de unir y facilitar el aprendizaje previo y en clase para las aulas invertidas [15]. Mientras tanto, otros estudios han asesorado sobre el desarrollo de materiales de aprendizaje para mejorar las habilidades de resolución de problemas matemáticos utilizando un modelo de aprendizaje basado en problemas [16] y el diseño y análisis de guiones colaborativos para mejorar la autorregulación y la alfabetización matemática [17].

Actualmente, hay muchos enfoques diferentes para resolver la resolución de problemas en matemáticas en todos los niveles educativos y los recursos propuestos para resolver las dificultades van desde la teoría hasta el uso de artefactos tecnológicos adecuados. Sin embargo, el problema sigue siendo un tema abierto de investigación activa [18] que puede estudiarse en el escenario general o en casos particulares.

El propósito de este trabajo es abordar una familia específica de problemas de cálculo elemental en los niveles de secundaria y pregrado de escuelas mexicanas, utilizando un enfoque metodológico novedoso. Concretamente, se estudió una estrategia sencilla para resolver problemas complejos utilizando la integración por partes [19]. La fórmula para la integración por partes es consecuencia de la regla de diferenciación de Leibniz (llamada “regla del producto” en el cálculo diferencial), que puede llevar a una cantidad sustancial de cálculos que consumen mucho tiempo y, por tanto, errores [20]. En este manuscrito, se examina y proporciona una generalización de un enfoque recientemente reportado en la literatura [21] para aplicar la integración por partes de manera iterativa. Utilizando un entorno experimental, se dilucida la eficiencia de dicho enfoque en comparación con la aplicación tradicional de la fórmula de integración. El experimento se llevó a cabo con la ayuda de dos grupos de estudiantes de primer año de ingeniería de una universidad pública del estado de Aguascalientes, aunque se pueden esperar resultados similares si se consideraran estudiantes de secundaria en el experimento. Los detalles de ese experimento se proporcionan en la sección de metodología.

PRELIMINARES

Los problemas de cálculo de límites, derivadas e integrales en matemáticas presentan una amplia gama de enfoques diferentes. Dejando de lado las complicaciones de plantear problemas en aquellos temas de cálculo elemental [22] y la formación matemática inherente de los estudiantes [23], los meros problemas de cálculo representan un interesante objeto de estudio que puede ser sistematizado [24]. De manera concreta, la aplicación de fórmulas estándar para límites, derivadas e integrales en el contexto de la enseñanza universitaria o secundaria es un área interesante de mejora constante en matemáticas y educación. Restringiendo nuestra atención al cálculo de integrales indefinidas, algunas fórmulas son relativamente sencillas de aplicar. Sin embargo, hay otros que conllevan más complicaciones. Tal es el caso de la fórmula de integración por partes, que es consecuencia de la regla del producto de Leibniz [25].

La fórmula de integración por partes no solo es importante en matemáticas elementales. De hecho, los teoremas clásicos del cálculo vectorial de Green, Gauss y Stokes son extensiones de esta fórmula [26]. Además, la integración por partes se ha extendido a diversas ramas de las matemáticas modernas. De manera específica, recientemente se ha demostrado una fórmula para la integración por partes para un modelo de cambio de régimen de Markov [27]; recientemente ha aparecido otra forma de esta fórmula en forma generalizada dentro de la teoría del cálculo fraccionario [28] y en el cálculo de medidas de difusión degeneradas sobre espacios de camino y grupos de difeomorfismo [29]. Además, ese teorema del análisis funcional que establece que todo operador positivo autoadjunto sobre un espacio de Hilbert tiene un operador de raíz cuadrada, es una extensión de la fórmula de integración por partes [30]. En otras palabras, la importancia del uso de esta fórmula va más allá de la capacidad de determinar integrales indefinidas en el cálculo de la escuela secundaria o la universidad. De hecho, puede ser una herramienta útil para comprender las matemáticas avanzadas.

En aras de la exhaustividad, vale la pena recordar la fórmula de integración por partes en este contexto. Esa fórmula resulta de una aplicación de la regla de Leibniz para la derivada de un producto. Formalmente, si $[a, b]$ es un intervalo no vacío de los números reales y $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ son diferenciables, entonces fg es diferenciable en $[a, b]$ y $[f(x)g'(x)]' = f(x)g''(x) + f'(x)g'(x)$, $x \in [a, b]$.

Aquí, el símbolo ' representa el operador de diferenciación con respecto a x . Esta fórmula forma parte de los cursos estándar de cálculo a nivel secundario y universitario en los Estados Unidos de América y otros países [31], y da lugar a la fórmula de integración por partes que establece que si f y g son continuamente diferenciables en $[a, b]$, entonces

$$\int f(x)g'(x)dx = f(x)g(x) - \int f'(x)g(x) \quad (1)$$

En esta ecuación, las integrales son indefinidas. Como mnemónico, los cursos universitarios de cálculo utilizan la siguiente forma de fórmula de integración por partes [32]:

$$\int u dv = uv - \int v du$$

Es bien sabido que existen problemas típicos que emplean esta fórmula de forma iterativa. El proceso suele ser tedioso en esos casos, dando lugar a largos cálculos y dando lugar a muchos errores potenciales.

A lo largo de este estudio, se asumió que se conocen las fórmulas elementales de integración y que la aplicación de estas es una tarea relativamente estándar para el lector. En estas circunstancias, la fórmula de integración por partes se aplica normalmente cuando el integrando es el producto de un polinomio por una función trascendental, o el producto de dos funciones trascendentales. En este trabajo no se consideraron aplicaciones simples de la ecuación (1). En cambio, se estudió un enfoque sistemático para resolver problemas que requieren varias aplicaciones de la fórmula de integración por partes. Concretamente, se consideraron problemas en los que la antiderivada de $fg^{(n)}$ debe calcularse en $[a, b]$, para algún número natural n , y $g^{(n)}$ es la derivada de n -ésimo orden de g .

Formalmente, se asumió que f y g tienen derivadas hasta el orden n , que son continuas en $[a, b]$. Una aplicación recursiva de la fórmula de integración por partes muestra fácilmente que

$$\int f(x)g^{(n)}(x)dx = f(x)g^{(n-1)}(x) - f'(x)g^{(n-1)}(x) \quad (2) \\ + \dots + (-1)^{(n-1)} \int f^{(n)}(x)g(x)dx, \\ \text{para cada } x \in [a, b]$$

Es importante notar que n es arbitrario. En un problema típico de la escuela secundaria o la universidad, al estudiante se le presenta una integral para calcular, sin

tener ninguna pista sobre cómo obtener la integral indefinida. Ante este hecho, los libros de texto proponen la aplicación de la fórmula de integración por partes cuando el problema de integración adopta cualquiera de las siguientes formas [32]:

- **Tipo 1:** $\int P(x)T(x)dx$. Aquí, se asumió que $P(x)$ es un polinomio y $T(x)$ puede ser cualquiera de las funciones $e^{\alpha x}$, $\text{sen}\alpha x$ o $\text{cos}\alpha x$, donde α es una constante. En este caso, la estrategia consiste en hacer $f(x) = P(x)$ y $g^n(x) = T(x)$.
- **Tipo 2:** $\int R(x)T(x)dx$. En este caso, $R(x)$ es un polinomio o una función racional, y $T(x)$ contiene expresiones con las funciones \ln , arcsen o arctan . En esta situación, la sugerencia es emplear $f(x) = T(x)$.
- **Tipo 3.** $\int T(x)U(x)dx$. Aquí, se asumió que tanto $T(x) = e^{\alpha x}$ como $U(x)$ son cualquiera de las funciones $\text{sen}\beta x$ o $\text{cos}\beta x$, donde α y β son constantes. En estas circunstancias, no se distingue qué función se elige $f(x)$.

La estrategia actual se diseñó porque la mayoría de los estudiantes universitarios sin matemáticas están más interesados en aprender a aplicar fórmulas que en comprender los conceptos subyacentes [33]. Siguiendo esa perspectiva, se propone el Algoritmo 1 para resolver problemas utilizando la fórmula de integración por partes. El algoritmo se basa en la siguiente estrategia:

El problema es calcular $\int h(s)ds$.

1. Determinar si la integral se puede calcular mediante fórmulas elementales. Si ese es el caso, se hace usando la fórmula correcta, sustituciones adecuadas y/o manipulaciones algebraicas.
2. Si la integral no se puede calcular usando fórmulas elementales, determinar si h se puede expresar como $h(x) = f(x)g^{(n)}(x)$ y si la integral tiene la forma de tipo 1, 2 o 3. Si ese es el caso, se siguen los siguientes pasos:
 - a. Determinar f y $g^{(n)}$ dependiendo de si la integral es de tipo 1, 2 o 3.
 - b. Calcular f, f', f'', \dots por diferenciación elemental. Al mismo tiempo, calcular $g^{(n)}, g^{(n-1)}, \dots$ mediante integración elemental.
 - c. Dejar de calcular $f^{(k)}$ y $g^{(n-k)}$ cuando se cumpla alguna de las siguientes condiciones: o $f^{(k)}g^{(n-k)}$

es integrable o $f^{(k)}g^{(n-k)}$ es un múltiplo escalar de $fg^{(n)}$.

- d. Tomar $n = k$.
- e. La solución del problema viene dada por la ecuación (2). De forma tabular se puede aplicar el siguiente diagrama, que representa los términos que se multiplican en (2) y el signo que afecta a cada uno de ellos:

f		f'		\dots		$f^{(n)}$		
	\searrow		\swarrow		\pm		\mp	
$g^{(n)}$		$g^{(n-1)}$				g		g

- f. Si la última integral del lado derecho de la ecuación (2) es computable, entonces debe ser calculada. Si $f^{(k)}g^{(n-k)}$ es un múltiplo escalar de $fg^{(n)}$, entonces se resuelve para $\int fg^{(n)}$.
3. Si la integral no es del tipo 1, 2 o 3, o si el procedimiento descrito en el paso 2 (a)–(f) no funciona, hay que utilizar otro método.

A continuación, se muestran tres ejemplos sobre la aplicación de nuestra estrategia. Esos ejemplos son importantes en nuestro estudio, en vista de que se utilizarán para probar la eficiencia de nuestro enfoque en un entorno experimental.

Ejemplo 1 (tipo 1). Calcular la integral indefinida $\int x^2 \cos 2x dx$.

El problema corresponde al primer tipo considerado anteriormente. Entonces, debe elegirse $f(x) = x^2$ y $g^{(n)}(x) = \cos 2x$. Usando la estrategia descrita en este trabajo, se obtiene la **Tabla 1(a)**. Obviamente, $n = 2$ en este caso. En consecuencia, la solución al problema es

$$\int x^2 \cos 2x dx = \frac{1}{2}x^2 \text{sen} 2x + \frac{1}{2}x \text{cos} 2x - \frac{1}{4} \text{sen} 2x + C$$

Ejemplo 2 (tipo 2). Calcular la integral indefinida $\int x \ln x dx$.

Este problema corresponde al segundo tipo descrito anteriormente. Como se sugirió, quedó $f(x) = \ln x$ y $g^{(n)}(x) = x$. La **Tabla 1(b)** proporciona los detalles sobre la aplicación de la estrategia propuesta en el trabajo. La solución a este problema es

$$\int x \ln x dx = \frac{1}{2}x^2 \ln x - \frac{1}{4}x^2 + C$$

Ejemplo 3 (tipo 3). Calcular la integral indefinida $\int e^x \cos x dx$

Los detalles de la aplicación de los algoritmos utilizados en este trabajo se proporcionan en la [Tabla 1 \(c\)](#). En este caso se llegó fácilmente a la fórmula siguiente:

$$\int e^x \cos x dx = e^x \cos x + e^x \sin x - \int e^x \cos x dx$$

Reordenando términos y resolviendo esta integral indefinida, se obtuvo

$$\int e^x \cos x dx = \frac{1}{2} e^x (\cos x + \sin x) + C$$

TABLA 1
DETALLES DE LOS CÁLCULOS PARA RESOLVER, USANDO EL ALGORITMO PROPUESTO

(a) EJEMPLO 1							
	$k = 0$		$k = 1$		$k = 2$	\rightarrow	$n = 2$
$f^{(n)}(x)$	x^2		$2x$		2		
		\downarrow^+		\downarrow^-		\downarrow^+	
$f^{(n-k)}(x)$	$\cos 2x$		$\frac{1}{2} \sin 2x$		$-\frac{1}{4} \cos 2x$		$\frac{1}{4} \cos 2x$

(b) EJEMPLO 2					
	$k = 0$		$k = 1$	\rightarrow	$n = 1$
$f^{(k)}(x)$	$\ln x$		$\frac{1}{x}$		
		\downarrow^+		\downarrow^-	
$g^{(n-k)}(x)$	x		$\frac{1}{2} x$		$\frac{1}{2} x$

(c) EJEMPLO 3							
	$k = 0$		$k = 1$		$K = 2$	\rightarrow	$n = 2$
$f^{(k)}(x)$	$\cos x$		$-\sin x$		$-\cos x$		
		\downarrow^+		\downarrow^-		\downarrow^+	
$g^{(n-k)}(x)$	e^x		e^x		e^x		e^x

II. METODOLOGÍA

Para evaluar la eficacia de la estrategia, se llevó a cabo una prueba experimental en un aula. El experimento se realizó en una universidad pública durante el receso de verano de 2020. Se consideró un grupo de 52 estudiantes de primer año de la carrera de Cálculo Integral para ingeniería informática. Los estudiantes ya habían cubierto fórmulas de integración simples (véase el [Apéndice A](#)) y se evaluaron sobre el uso de estas fórmulas antes del inicio del experimento. Los 20 mejores estudiantes

de esa evaluación fueron seleccionados para ser parte del experimento y aceptaron de buen grado ser parte de este. Durante una semana, estos estudiantes reforzaron sus capacidades en el cálculo de integrales indefinidas usando solo las reglas de integración y las integrales 1-11 del [Apéndice A](#). Para ello, los estudiantes debían asistir a una hora más de clase durante la semana (además del horario oficial del curso). Se aplicó otra prueba al final de esa semana. Los resultados (no presentados aquí por falta de relevancia) mostraron que los estudiantes fueron muy eficientes y efectivos en la resolución de problemas que requerían el uso de esas fórmulas. En ese sentido, el grupo de 20 estudiantes era aproximadamente homogéneo en sus habilidades básicas de integración.

La semana siguiente, el grupo de 20 estudiantes se dividió aleatoriamente en dos grupos de 10 estudiantes cada uno. Al primer grupo (llamado Grupo I) se le enseñó a resolver problemas utilizando la fórmula estándar de integración por partes (1). Durante tres días dedicaron una hora a resolver problemas con esa fórmula y los problemas fueron elegidos de [32]. Cabe señalar que los estudiantes conocieron los tres problemas mencionados en el apartado anterior, y siempre se les recordó que los problemas se pueden resolver con la fórmula de integración por partes. El segundo grupo (llamado Grupo II) fue capacitado en el uso de la ecuación (2) y, de manera precisa, en el uso del Algoritmo 1 (véase el [Apéndice B](#)). Los estudiantes también se reunieron con el instructor durante tres días y resolvieron el mismo conjunto de problemas que Grupo I. De hecho, el instructor fue el mismo para ambos grupos. Se aseguró de enseñar el uso de la fórmula (1) al Grupo I, y el Algoritmo 1 y la fórmula (2) al Grupo II.

Luego de esos tres días de instrucción, se aplicó una prueba escrita a ambos grupos. Las siguientes fueron instrucciones comunes para ambos grupos, y fueron anunciadas públicamente el día previo a la prueba:

- Las pruebas fueron anónimas. Sin embargo, se animó a los estudiantes a hacer lo mejor que pudieran y trabajar lo más rápido posible.
- El tiempo límite para responder el test fue de 1 hora.
- Se recordó a los alumnos que los resultados no iban a afectar a su nota en el curso oficial. La participación en el experimento, por el contrario, se recompensaría con puntos extra en el curso oficial.

- La prueba constaba de tres problemas. En cada problema, se pidió a los estudiantes calcular las integrales de los Ejemplos 1 a 3, respectivamente. Se pidió a los estudiantes que mostraran su trabajo.
- Las respuestas de esos problemas se entregaron a los estudiantes al inicio de la prueba. Se les pidió que verificaran sus soluciones y, si había un error, se les pidió que corrigieran los errores y finalmente obtuvieran las respuestas correctas.
- Al comienzo de la prueba se entregó a cada estudiante una hoja de fórmulas con las fórmulas y propiedades del Apéndice A. No se permitió material adicional.
- Quedó prohibido usar calculadoras y dispositivos electrónicos. Sin embargo, a los participantes se les permitió usar un cronómetro digital para registrar el tiempo necesario para resolver cada problema de la prueba.
- A los instructores que supervisaban la prueba no se les permitió interactuar con los estudiantes.
- A los estudiantes se les permitió usar el baño antes del comienzo de la prueba, pero no se les permitió levantarse de sus asientos hasta que entregaron sus exámenes.

Por otro lado, las instrucciones específicas del grupo fueron las siguientes:

- Grupo I Los estudiantes sólo pudieron utilizar la fórmula (1) para resolver problemas.
- Grupo II Los estudiantes sólo pudieron utilizar la fórmula (2) y, por tanto, el Algoritmo 1.

Cada uno de los grupos realizó la prueba al mismo tiempo. De esta forma se evitó la filtración de información y se favoreció la igualdad de condiciones previa a la prueba. Se impuso el silencio dentro y fuera de los lugares de prueba. También se respetó una sana distancia de 1.5 metros entre estudiantes. De esta manera se garantizó que no hubo trampas durante el examen y se cumplió con las medidas universitarias para evitar la propagación de cualquier posible enfermedad infecciosa. También se requerían mascarillas y había gel desinfectante a base de alcohol en la entrada de las aulas.

Los exámenes de los individuos del Grupo I fueron etiquetados como I-n, fueron $n = 1, 2, \dots, 10$. De manera similar, las pruebas para el Grupo II fueron etiquetadas como II-n, donde $n = 1, 2, \dots, 10$. Para cada individuo y cada problema de prueba, cada uno de los participantes registró el tiempo necesario para completarlo en el lado del enunciado del problema. Al final de las pruebas, los profesores dedicaron tiempo a calificar los trabajos y analizar los resultados desde el punto de vista matemático y estadístico.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de la evaluación de las pruebas, se confirmó que cada grupo empleó las fórmulas que se les pidió que usaran. Esto significa en particular que los individuos del Grupo I utilizaron la ecuación (1), mientras que los sujetos del Grupo II emplearon el enfoque estudiado en este trabajo.

Se encontró también que 19 de los 20 estudiantes tenían todas las respuestas correctas. Desafortunadamente, uno de los estudiantes del Grupo I no pudo resolver correctamente dos de los tres problemas del examen. Como consecuencia, los resultados de su prueba fueron eliminados de la lista de resultados y del análisis estadístico consecutivo. En particular, las pruebas correspondientes al Grupo I fueron reetiquetadas como I-n, donde $n = 1, 2, \dots, 9$, mientras que las pruebas del Grupo II mantuvieron el mismo etiquetado: II-n, donde $n = 1, 2, \dots, 10$.

Los resultados se presentan en la Tabla 2, la cual consta de dos partes: una para el Grupo I y otra para el Grupo II. En ambos se consideró a cada individuo del grupo y se proporcionó el tiempo total usado para resolver cada problema de la prueba, junto con el tiempo total empleado por persona para completar la prueba.

Es pertinente señalar que los datos están dados en minutos y que los fueron redondeado al primer decimal. En una primera inspección de los resultados se desprende que los individuos del Grupo II emplearon menos tiempo para responder cada preguntas de examen. Para establecer este hecho de forma rigurosa, se realizaron pruebas de hipótesis sobre el tiempo medio necesario para resolver cada problema por grupo. En vista de que el tamaño de la población es relativamente pequeño (menos de 20 individuos por grupo), se hicieron pruebas de hipótesis basadas en la distribución t de Student con varianzas desconocidas y desiguales.

TABLA 2
TABLA DE RESULTADOS DE LOS GRUPOS I Y II

INDIVIDUO	TIEMPO (min)			
	PROBLEMA 1	PROBLEMA 2	PROBLEMA 3	TOTAL
GRUPO I				
I-1	21.9	6.5	14.5	42.9
I-2	15.3	11.8	8.9	36.0
I-3	13.1	9.1	11.7	33.9
I-4	15.3	6.6	10.3	32.2
I-5	12.7	11.6	13.5	37.8
I-6	12.9	4.4	8.2	25.5
I-7	17.5	8.1	10.9	36.5
I-8	17.2	7.8	12.1	37.1
I-9	17.3	9.1	13.4	39.8
GRUPO II				
II-1	8.9	5.5	7.4	21.8
II-2	10.6	3.4	5.1	19.1
II-3	5.4	5.6	6.7	17.7
II-4	9.4	6.6	6.5	22.5
II-5	8.7	5.3	8.0	22.0
II-6	6.6	6.0	9.1	21.7
II-7	7.7	4.4	9.0	21.1
II-8	8.7	5.1	5.1	18.9
II-9	12.8	3.8	6.9	23.5
II-10	11.8	5.8	6.8	24.4

Los resultados se dan a continuación para cada uno de los cuatro escenarios posibles. En cada caso, μ_1 y μ_2 representan el tiempo medio empleado por los Grupos I y Grupo II, respectivamente, y se consideró el conjunto de hipótesis:

- $H_0: \mu_1 = \mu_2$.
- $H_a: \mu_1 > \mu_2$.

Los valores p resultantes para cada caso se proporcionan a continuación:

- Problema 1. Valor $p = 2.4327 \times 10^{-5}$.
- Problema 2. Valor $p = 1.8952 \times 10^{-3}$.
- Problema 3. Valor $p = 6.1952 \times 10^{-5}$.
- Total. Valor $p = 3.4826 \times 10^{-6}$.

De ello se deduce que el nivel de significancia en todos los casos es aproximadamente igual al 100%. Se concluye que existe suficiente evidencia estadística de que

el enfoque estudiado en este trabajo produce resultados más rápidos en comparación con la aplicación tradicional de la fórmula de integración por partes.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo, se estudió la eficiencia de una nueva estrategia para resolver problemas de cálculo que involucran la regla de integración de Leibniz (también conocida como “fórmula de integración por partes”. Se sabe que usar esta fórmula de integración requiere más concentración, cálculos y fórmulas elementales adicionales del cálculo integral. La experiencia también dice que aplicar esta regla conduce a errores por la complejidad de los problemas y los cálculos algebraicos necesarios. Además, algunos problemas típicos del uso de esta fórmula requieren aplicarla iterativamente varias veces, en esos casos el tiempo requerido para resolver el problema aumenta drásticamente, así como la posibilidad de incurrir en errores, siendo una fórmula importante en los tradicionales cursos de introducción al cálculo en la escuela secundaria y A nivel universitario en los Estados Unidos de América y otros países, dominar su uso es una tarea de suma importancia.

El enfoque descrito en este trabajo pretende aliviar la problemática sobre el uso iterado de la fórmula de integración por partes. La estrategia propuesta se basa formalmente en una generalización de la regla de integración de Leibniz, que puede demostrarse fácilmente en el nivel secundario y universitario. Sin embargo, no se hace énfasis en probar esta fórmula. En cambio, la fórmula se proporciona a los estudiantes con la intención de emplearla algorítmicamente. De hecho, el presente trabajo proporciona descripciones de la estrategia en palabras, utilizando un algoritmo y mediante una mnemónica tabular que los estudiantes pueden memorizar fácilmente. Se proporcionaron algunos ejemplos para ilustrar la aplicación de la estrategia y en cada caso se presentaron algunas tablas como material de apoyo. Vale la pena señalar que el algoritmo funciona tanto para problemas simples como complicados donde se necesita integración por partes.

Para evaluar la eficiencia de la estrategia, se realizó un estudio experimental entre estudiantes de primer año de la carrera de ingeniería de una universidad pública. En nuestro estudio, se consideró un grupo de 20 estudiantes y se aseguró que dominaran el uso de fórmulas de integración elemental. El grupo era homogéneo en

ese sentido y se dividió en dos grupos de 10 personas cada uno. Ambos grupos fueron capacitados para resolver problemas que requerían la fórmula de integración por partes. Sin embargo, al primero de los grupos se le enseñó la fórmula tradicional de integración por partes, mientras que al segundo se le instruyó en el uso del enfoque actual. Durante 3 días, ambos grupos se entrenaron exhaustivamente en clase. Ambos grupos resolvieron el mismo conjunto de problemas de cálculo utilizando sus respectivos enfoques. Al final de esa capacitación, a ambos grupos se les aplicó el mismo examen para determinar si existían diferencias en sus aprendizajes.

Las pruebas fueron las mismas para los dos grupos y se llevaron a cabo en circunstancias similares. Además, se proporcionaron las respuestas a los estudiantes para que llegaran a las respuestas correctas. Se registró el tiempo para resolver cada una de las tres preguntas de las pruebas para cada problema y para cada estudiante. Una evaluación exhaustiva de las pruebas mostró que 19 de los estudiantes alcanzaron todas las respuestas correctas. Por otro lado, se realizó de forma detallada un análisis estadístico de los tiempos registrados para resolver cada pregunta. Los resultados de nuestro análisis proporcionan una fuerte evidencia estadística de que la estrategia propuesta da como resultado tiempos más rápidos para calcular integrales utilizando la fórmula de integración por partes.

Estos resultados se obtuvieron después de aplicar una prueba de hipótesis sobre las medias de los dos grupos. Este estudio se realizó para cada problema de la prueba y el tiempo total por grupo. En cualquier caso, los resultados estadísticos arrojaron resultados concluyentes. Este resultado es interesante porque a ambos grupos se les dio el mismo tiempo para aprender cada estrategia para resolver problemas usando la regla de integración de Leibniz. Como conclusión, el enfoque actual puede implementarse en carreras de ingeniería de primer año, para que los estudiantes obtengan resultados más rápidos en el cálculo de integrales mediante la fórmula de integración por partes.

REFERENCIAS

- [1] A. J. Boonen, B. B. de Koning, J. Jolles y M. van der Schoot, "Word problem solving in contemporary math education: A plea for reading comprehension skills training", *Front. Psychol.*, vol. 7, art. 191, 2016, doi: [10.3389/fpsyg.2016.00191](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00191).
- [2] H. Altun, "Examining the problem solving skills of primary education mathematics teacher candidates according to their learning styles", *Int. Educ. Stud.*, vol. 12, n.º 4, pp. 60-73, 2019, doi: [10.5539/ies.v12n4p60](https://doi.org/10.5539/ies.v12n4p60).
- [3] E. Kikas, K. Mädamürk y A. Palu, "What role do comprehension-oriented learning strategies have in solving math calculation and word problems at the end of middle school?" *Br J Educ Psychol*, vol. 90, supl., pp. 105-123, 2020, doi: [10.1111/bjep.12308](https://doi.org/10.1111/bjep.12308).
- [4] S. Akbasli, M. Sahin y Z. Yaykiran, "The effect of reading comprehension on the performance in science and mathematics", *Journal of Education and Practice*, vol. 7, n.º 16, pp. 108-121, 2016.
- [5] J. M. Goodrich y J. M. Namkung, "Correlates of reading comprehension and word-problem solving skills of Spanish-speaking dual language learners", *Early Child. Res. Q.*, vol. 48, pp. 256-266, 2019, doi: [10.1016/j.ecresq.2019.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2019.04.006).
- [6] L. Stoffelsma y W. Spooren, "The relationship between English reading proficiency and academic achievement of first-year science and mathematics students in a multilingual context", *Int J of Sci and Math Educ*, vol. 17, pp. 905-922, 2019, doi: [10.1007/s10763-018-9905-z](https://doi.org/10.1007/s10763-018-9905-z).
- [7] Y.-C. Jian, "Reading instructions facilitate signaling effect on science text for young readers: an eye-movement study", *Int J of Sci and Math Educ*, vol. 17, pp. 503-522, 2019, doi: [10.1007/s10763-018-9878-y](https://doi.org/10.1007/s10763-018-9878-y).
- [8] S. Kim, M. Pollanen, M. G. Reynolds y W. S. Burr, "Problem solving as a path to comprehension", *Math. Comput. Sci.*, vol. 14, pp. 1-15, 2020, doi: [10.1007/s11786-020-00457-1](https://doi.org/10.1007/s11786-020-00457-1).
- [9] J. Cai y C. Jiang, "An analysis of problem-posing tasks in Chinese and us elementary mathematics textbooks", *Int J of Sci and Math Educ*, vol. 15, n.º 8, pp. 1521-1540, 2017, doi: [10.1007/s10763-016-9758-2](https://doi.org/10.1007/s10763-016-9758-2).
- [10] N. Akben, "Effects of the problem-posing approach on students' problem solving skills and metacognitive awareness in science education", *Res Sci Educ*, vol. 50, n.º 3, pp. 1143-1165, 2020, doi: [10.1007/s11165-018-9726-7](https://doi.org/10.1007/s11165-018-9726-7).
- [11] M. Molina, S. Rodríguez-Domingo, M. C. Cañadas y E. Castro, "Secondary school students' errors in the trans-

- lation of algebraic statements”, *Int. J. Sci. Math. Educ.*, vol. 15, n.º 6, pp. 1137-1156, 2017, doi: [10.1007/s10763-016-9739-5](https://doi.org/10.1007/s10763-016-9739-5).
- [12] E. M. Schoevers, P. P. Leseman y E. H. Kroesbergen, “Enriching mathematics education with visual arts: Effects on elementary school students’ ability in geometry and visual arts”, *Int. J. Sci. Math. Educ.*, vol. 18, pp. 1613-1634, 2019, doi: [10.1007/s10763-019-10018-z](https://doi.org/10.1007/s10763-019-10018-z).
- [13] M. F. Amir, F. N. Hasanah y H. Musthofa, “Interactive multimedia based mathematics problem solving to develop students’ reasoning”, *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, n.º 2.14, pp. 272-276, 2018, doi: [10.14419/ijet.v7i2.12.14691](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.12.14691).
- [14] H.-Y. Sung, G.-J. Hwang y Y.-C. Chang, “Development of a mobile learning system based on a collaborative problem-posing strategy”, *Interact. Learn. Environ.*, vol. 24, n.º 3, pp. 456-471, 2016, doi: [10.1080/10494820.2013.867889](https://doi.org/10.1080/10494820.2013.867889).
- [15] X.-D. Ye, Y.-H. Chang y C.-L. Lai, “An interactive problem-posing guiding approach to bridging and facilitating pre-and in-class learning for flipped classrooms”, *Interact. Learn. Environ.*, vol. 27, n.º 8, pp. 1075-1092, 2019, doi: [10.1080/10494820.2018.1495651](https://doi.org/10.1080/10494820.2018.1495651).
- [16] M. V. Siagan, S. Saragih y B. Sinaga, “Development of learning materials oriented on problem-based learning model to improve students’ mathematical problem solving ability and metacognition ability”, *Int Elect J Math Ed*, vol. 14, n.º 2, pp. 331-340, 2019, doi: [10.29333/iejme/5717](https://doi.org/10.29333/iejme/5717).
- [17] C.-H. Chen y C.-H. Chiu, “Collaboration scripts for enhancing metacognitive self-regulation and mathematics literacy”, *Int J of Sci and Math Educ*, vol. 14, n.º 2, pp. 263-280, 2016, doi: [10.1007/s10763-015-9681-y](https://doi.org/10.1007/s10763-015-9681-y).
- [18] B. Rott, “Teachers’ behaviors, epistemological beliefs, and their interplay in lessons on the topic of problem solving”, *Int. J. Sci. Math. Educ.*, vol. 18, n.º 5, pp. 903-924, 2020, doi: [10.1007/s10763-019-09993-0](https://doi.org/10.1007/s10763-019-09993-0).
- [19] P. W. Hempson, “Repeated integration by parts”, *Int. J. Math. Educ. Sci. Technol.*, vol. 14, n.º 4, pp. 437-439, 1983, doi: [10.1080/0020739830140407](https://doi.org/10.1080/0020739830140407).
- [20] M. J. Barany, “Integration by parts: Wordplay, abuses of language, and modern mathematical theory on the move”, *Hist. Stud. Nat. Sci.*, vol. 48, n.º 3, pp. 259-299, 2018, doi: [10.1525/hsns.2018.48.3.259](https://doi.org/10.1525/hsns.2018.48.3.259).
- [21] C. C. Tisdell, “Tic-tac-toe and repeated integration by parts: alternative pedagogical perspectives to Lima’s integral challenge”, *Int. J. Math. Educ. Sci. Technol.*, vol. 51, n.º 3, pp. 424-430, 2020, doi: [10.1080/0020739X.2019.1620969](https://doi.org/10.1080/0020739X.2019.1620969).
- [22] M. Özgeldi y U. Aydın, “Identifying competency demands in calculus textbook examples: the case of integrals”, *Int. J. Sci. Math. Educ.*, vol. 19, pp. 171-191, 2020, doi: [10.1007/s10763-019-10046-9](https://doi.org/10.1007/s10763-019-10046-9).
- [23] A. Ayebo y A. Mrutu, “An exploration of calculus students’ beliefs about mathematics”, *Int Elect J Math Ed*, vol. 14, n.º 2, pp. 385-392, 2019, doi: [10.29333/iejme/5728](https://doi.org/10.29333/iejme/5728).
- [24] P. Liljedahl, M. Santos-Trigo, U. Malaspina y R. Bruder, “Problem-solving in mathematics education”, en *Problem-solving in mathematics education* (Serie ICME-13 Tropical Surveys). Springer, Cham., pp. 686-693, 2020, doi: [10.1007/978-3-319-40730-2_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-40730-2_1).
- [25] V. Borji y V. Font, “Exploring students’ understanding of integration by parts: A combined use of APOS and OSA”, *EURASIA J Math Sci Tech Ed*, vol. 15, n.º 7, art. em1721, 2019, doi: [10.29333/ejmste/106166](https://doi.org/10.29333/ejmste/106166).
- [26] J. E. Marsden y A. Tromba, *Vector Calculus*. Nueva York: MacMillan, 2003.
- [27] Y. Liu y N. Privault, “An integration by parts formula in a Markovian regime switching model and application to sensitivity analysis”, *Stoch Anal Appl*, vol. 35, n.º 5, pp. 919-940, 2017, doi: [10.1080/07362994.2017.1339613](https://doi.org/10.1080/07362994.2017.1339613).
- [28] T. Abdeljawad, A. Atangana, J. Gómez-Aguilar y F. Jarad, “On a more general fractional integration by parts formulae and applications”, *Phys. A: Stat. Mech. Appl.*, vol. 536, art. 122494, 2019, doi: [10.1016/j.physa.2019.122494](https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122494).
- [29] K. Elworthy, Y. Le Jan y X.-M. Li, “Integration by parts formulae for degenerate diffusion measures on path spaces and diffeomorphism groups”, *C. R. Acad. Sci. Paris Ser. I Math.*, vol. 323, n.º 8, pp. 921-926, 1996, doi: [10.48550/arXiv.1911.09739](https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.09739).

- [30] A. Friedman, *Foundations of modern analysis*, 1.ª ed. Nueva York: Courier Corporation, 1982.
- [31] P. Merrotsy, “A brief but important note on the product rule”, *Aust Sr Math J*, vol. 30, n.º 2, pp. 57-63, 2016.
- [32] J. Stewart, *Calculus: Concepts and Contexts*. Nueva York: Cengage Learning, 2009.
- [33] M. Mann y M. C. Enderson, “Give me a formula not the concept! student preference to mathematical problem solving”, *J. Adv. Mark. Educ.*, n.º 25 (núm. especial), pp. 15-24, 2017.

FINANCIAMIENTO

El autor Jorge Eduardo Macías Díaz agradece el apoyo financiero del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías de México (CONAHCYT), a través de la subvención A1-S-45928.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Los autores contribuyeron igualmente a este trabajo.

DISPONIBILIDAD DE DATOS Y CÓDIGO

Datos y código disponibles previa solicitud al autor de correspondencia.

APÉNDICE A

En la aplicación del experimento realizado en este trabajo, se proporcionó a los estudiantes una hoja que contenía las reglas de integración y una tabla de integrales. Las siguientes fueron fórmulas comunes para los Grupos I y II.

- 1) $\int cf(x)dx = c \int f(x)dx$, donde c es una constante
- 2) $\int (f(x) + g(x))dx = \int f(x)dx + \int g(x)dx$
- 3) $\int [f(x)]^n f'(x)dx = \frac{1}{(n+1)} [f(x)]^{n+1} + C$
- 4) $\int \frac{f'(x)}{f(x)}dx = \ln|f(x)| + C$
- 5) $\int e^{f(x)} f'(x)dx = e^{f(x)} + C$

- 6) $\int a^{f(x)} f'(x)dx = \frac{a^{f(x)}}{\ln a} + C$
- 7) $\int \text{sen}(f(x)) f'(x)dx = -\text{cos}(f(x)) + C$
- 8) $\int \text{cos}(f(x)) f'(x)dx = \text{sen}(f(x)) + C$
- 9) $\int \frac{f'(x)}{1+f^2(x)}dx = \arctan(f(x)) + C$
- 10) $\int \text{sec}^2(f(x)) f'(x)dx = \text{tan}(f(x)) + C$
- 11) $\int \frac{f'(x)}{\sqrt{1-f^2(x)}}dx = \arcsen(f(x)) + C$

Además, se proporcionaron las siguientes fórmulas para cada uno de los dos grupos:

Grupo I

$$\int (x)g'(x)dx = f(x)g(x) - \int f'(x)g(x)dx$$

Grupo II

$$\int f(x)g^{(n)}(x)dx = f(x)g^{(n-1)}(x) - f'(x)g^{(n-1)}(x) + (-1)^{(n-1)} \int f^{(n)}(x)g(x)dx$$

APÉNDICE B

Algoritmo 1. Algoritmo de la estrategia estudiada en este trabajo para resolver $\int f(x)g^{(n)}(x)dx$.

if la integral es elemental **then**
usar fórmulas elementales

else

if la integral es del tipo 1, 2 o 3 **then**

Seleccione f y $g(n)$

$k \leftarrow 0$

repeat

$k \leftarrow k + 1$

Calcular $f^{(k)}$ diferenciando

Calcular $g^{(n-k)}$ integrando

until ($f^{(k)}g^{(n-k)}$ integrable) **or** ($f^{(k)}g^{(n-k)}$ es un múltiplo escalar de $fg^{(n)}$)

$n \leftarrow k$

$\int fg^{(n)} \leftarrow fg^{(n-1)} - f'g^{(n-2)} + (-1)^{(n-1)} \int f^{(n)}g$

if la última integral del lado derecho es calculable

then

Calcular la última integral

else

Resuelva para $\int fg^{(n)}$

end if

else

Pruebe otro enfoque

end if

end if

Análisis del Sistema de Salud Colombiano. Caso de estudio: Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS) en Cali

Analysis of the Colombian Healthcare System. Case Study: Healthcare Service Providers (IPS) in Cali

Katherine Castillo Rojas¹  , Elena Valentina Gutiérrez Gutiérrez¹ , Diego Fernando Manotas Duque¹ 

¹Universidad Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Industrial, Santiago de Cali, Colombia

RESUMEN

La presente investigación analiza el sistema de salud desde el punto de vista de las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS) ubicadas en la ciudad de Cali, Valle del Cauca, asumiendo como criterio los indicadores de calidad de la atención establecidos por el Ministerio de Salud colombiano. Empleando fuentes de información públicas, se realizó la consulta y selección de las IPS e indicadores. Estos datos fueron clasificados acorde con el grupo al cual pertenecen los servicios habilitados y analizados empleando el lenguaje de programación Python y herramientas de estadística descriptiva. Entre los resultados obtenidos se encuentran la identificación de los servicios especializados y del comportamiento de los indicadores de calidad en las IPS de la ciudad. Esta investigación da respuesta a la necesidad de actualizar el análisis de los indicadores que fueron en su momento presentados por el Ministerio de Salud mediante el Informe Nacional de Calidad de Atención en Salud, cuya última emisión fue en el año 2017, así como realizar un estudio enfocado a nivel local. Dentro de las conclusiones, fue posible corroborar el impacto de la estancia hospitalaria en la incidencia de eventos adversos e identificar oportunidades de mejoramiento que permita destacar el valor agregado de la ciudad.

PALABRAS CLAVE: sistema de salud; prestadores de servicios de salud; calidad de la atención.

ABSTRACT

This research analyzes the health system from the point of view of the Health Service Provider Institutions (IPS) located in the city of Cali, Valle del Cauca, assuming as criteria the quality indicators of care established by the Colombian Ministry of Health. Using public information sources, the IPS and indicators were consulted and selected. These data were classified according to the group to which the enabled services belong and analyzed using the Python programming language and descriptive statistics tools. Among the results obtained are the identification of specialized services and the behavior of quality indicators in the IPS of the city. This research responds to the need to update the analysis of the indicators that were previously presented by the Ministry of Health through the National Report on Quality of Health Care, whose last issue was in 2017, as well as to carry out a study focused on the local level. Among the conclusions, it was possible to corroborate the impact of hospital stay on the incidence of adverse events and identify opportunities for improvement that highlight the added value of the city.

KEYWORDS: healthcare system; healthcare service providers; service quality.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Katherine Castillo Rojas
INSTITUCIÓN: Universidad del Valle / Facultad de Ingeniería
DIRECCIÓN: Calle 13 núm. 100-00, C. P. 760042, Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia
CORREO ELECTRÓNICO: castillo.katherine@correounivalle.edu.co

Fecha de recepción: 31 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:** 3 de diciembre de 2024. **Fecha de publicación:** 27 de diciembre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

La salud es uno de los pilares que ha estado presente en discusiones trascendentales a lo largo de la historia y para la cual se han empleado diversos mecanismos no solo en el ámbito nacional sino mundial, con el fin de garantizar el acceso y la prestación de la atención esencial para el sostenimiento de la calidad de vida. Es considerada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como uno de los principios básicos para la felicidad, las relaciones armoniosas y la seguridad de los pueblos, definiéndola como un estado completo de bienestar físico, mental y social, estipulado como uno de los derechos del que debe gozar todo ser humano sin distinción alguna [1].

Adicionalmente, la salud es parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en la Agenda 2030 aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas. Específicamente, en el objetivo 3, “Salud y bienestar”, se espera garantizar una vida sana y promover el bienestar a partir de diferentes actividades orientadas a la promoción y prevención [2]. Asimismo, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) presenta la Agenda de Salud Sostenible para las Américas 2018-2023 como la respuesta del sector a los compromisos asumidos por los Estados que la integran, a través de 11 objetivos, entre ellos el acceso equitativo a los servicios de salud, gobernanza, recurso humano, financiación, control de enfermedades y sistemas de información [3].

En América Latina, los gobiernos de los países que la conforman han promovido e incluido dentro de los pilares de su gestión la garantía al derecho de la salud, de los cuales surgen diferentes estrategias e instrumentos tanto públicos como privados, donde, en su gran mayoría, se ha optado por un modelo de financiación mixto sostenido por contribuciones gubernamentales y de la población bajo el rol de empleador, trabajador o contribución mediante el pago de impuestos. Dicho sistema de salud opera bajo la distinción del sector público y privado, donde se entiende por privado la financiación del acceso a servicios con recursos propios. Cabe aclarar que no es un esquema mutuamente excluyente, por tanto, se pueden presentar casos en que personas acogidas en regímenes de fondos administrados por entes públicos pueden, con recursos propios, acceder a servicios privados, como pólizas, medicina prepagada, plan complementario, etcétera.

A. ESTRUCTURA Y FINANCIACIÓN

En el marco establecido por la Ley 100 de 1993, en Colombia, con respecto al aseguramiento de la población, surge la figura de la Entidad Promotora de Servicios de Salud (EPS), actualmente conocida como Entidad Administradora del Plan de Beneficios (EAPB), la cual se encarga de afiliar a los usuarios bajo el régimen contributivo si se trata de una persona con trabajo formal, independiente o pensionado, con ingreso mayor a un salario mínimo, o bajo el régimen subsidiado en el caso de la población que no cuente con capacidad de pago. Lo anterior se encuentra ligado al objetivo de lograr la cobertura universal de la población y con esto el acceso a los servicios de salud, los cuales son ofertados por Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS) o Empresas Sociales del Estado (ESE), mediante una negociación con la EAPB del Plan de Beneficios establecido por el Consejo Nacional de Seguridad Social en Salud (CNSSS), que contiene una serie de servicios, medicamentos y tecnología a los que tiene derecho el usuario durante la atención. Los elementos que se encuentren por fuera de este plan deben ser solicitados mediante el MIPRES o acceder de forma particular [4].

Adicionalmente, se cuenta con la figura del régimen especial, en el cual se encuentran afiliados aquellas personas que forman parte de las fuerzas militares, policía nacional, magisterio, universidades o la empresa colombiana de petróleos (ECOPETROL). Esta población realiza un aporte del 4 %, 10 % o 12 %, según corresponda para el sistema de salud, y su afiliación no depende de una EPS. Por otro lado, la prestación de los servicios se brinda por entidades propias para este régimen o a través de las IPS y ESE de acuerdo con la capacidad, nivel de complejidad y/o especialidad requerida para la atención del usuario. Otros canales que han surgido son el acceso a pólizas, seguros y planes complementarios con diversas entidades que a través de un pago de bolsillo o particular del usuario busca ampliar los beneficios a los que estas personas puedan acceder [4].

En relación con la financiación del sistema, inicialmente se contaba con el Fondo de Solidaridad y Garantía (FOSYGA) como una cuenta adscrita al Ministerio de Salud y Protección Social con el objetivo de financiar el SGSSS mediante cuatro subcuentas destinadas para el régimen contributivo, régimen subsidiado, programas de promoción en salud y seguro de riesgos catastróficos o accidentes de tránsito, a las que se añadió posterior-

mente una quinta subcuenta destinada para la garantía de la salud. En el año 2017, consecuente con los cambios del Plan de Desarrollo 2014-2018 y la Ley Estatutaria del 2015, se creó la Administradora de Recursos del Sistema General de Seguridad Social en Salud (ADRES), con el fin de garantizar el flujo adecuado de los recursos y realizar los respectivos controles, por tanto, reemplaza las funciones realizadas por el FOSYGA, quedando este último solo con la administración de los recursos para los programas de promoción en salud [5], [6].

A nivel de gestión, la ADRES se encarga de realizar el pago correspondiente a las EAPB mediante la figura de la Unidad de Pago por Capitación (UPC) que hace referencia a la suma de dinero que se reconoce por cada afiliado al SGSSS para cubrir las prestaciones del plan de beneficios. Para el año 2023, la UPC se estableció mediante la resolución 2809 de 2022 en un valor anual para del régimen contributivo de COP\$ 1 289 246.40 (equivalente a un valor en dólares estadounidenses de \$ 298.08, de acuerdo con la TMR promedio para 2023) y para el régimen subsidiado de COP\$ 1 211 396.40 (equivalente a un valor en dólares de \$ 280.08, de acuerdo con la TMR promedio para 2023), lo anterior sujeto a primas por condiciones demográficas, culturales y de algunas patologías.

En este orden de ideas, las EAPB captan los aportes realizados por los contribuyentes (equivalente a un 4 % por parte del titular y un 8.5 % por parte del empleador cuando devenguen más de 10 Salarios Mínimos Legales Vigentes) y entrega a la ADRES el excedente en el caso de que dichos recursos superen las UPC que le son reconocidas o solicita el dinero faltante cuando dicho recaudo no es suficiente para compensar las UPC que deben ser reconocidas para sus afiliados en ambos regímenes. Cabe aclarar que la ADRES puede realizar el pago directo a las IPS cuando este movimiento haya sido autorizado por la EPS o este se encuentre en proceso de liquidación o intervención administrativa, con el fin de mejorar la liquidez de las IPS mediante la agilización del pago de obligaciones [6].

Adicionalmente, dentro de los recursos financieros que administra la ADRES se encuentra el Impuesto de Renta para la Equidad (CREE) que se estableció luego de la exención del aporte del 8.5 % para las empresas cuando el trabajador devengue menos de 10 Salarios Mínimos Legales Vigentes y se encuentra destinado para el SENA, ICBF y Salud, recursos del Presupuesto General de la

Nación (incluido el Sistema General de Participaciones), rentas territoriales (impuestos al consumo de cerveza, licores, juegos de suerte y azar (Coljuegos) y tabaco, entre otros), transferencias de la caja de compensación familiar, primas del Fondo del Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito (FONSAT) y recursos de las entidades territoriales [6].

Ahora bien, en términos del Producto Interno Bruto de Colombia, los recursos del Sistema de Salud para el año 2022 corresponden a un 5.2 % del PIB, siendo las fuentes principales de financiación los recursos fiscales y las contribuciones de los afiliados. Dentro de los recursos fiscales se encuentran las transferencias de la nación, de las entidades territoriales y otras transferencias. La primera proviene los impuestos CREE y de renta (0.42 %) y recursos del Presupuesto General de la Nación (PGN) (1.25 %), que involucra a su vez el Sistema General de Participaciones (SGP), residencias médicas y recursos FOME. La segunda corresponde a las transferencias realizadas por los aportes municipales y departamentales (0.16 %), regalías y recursos del FONPET (en los años 2015-2019). Y la tercera corresponde a las transferencias de las cajas de compensación familiar (0.05 %), recursos de Coljuegos (0.03 %) y la prima FONSAT y SOAT (0.17 %). Debe tenerse en cuenta que a partir de 2019 se han recibido recursos adicionales por concepto de financiación del Acuerdo Punto Final, el sistema nacional de residencias médicas y la pandemia de COVID-19 [6].

El uso principal de los recursos en términos del PIB en el año 2022 correspondió en un 4.17 % a la financiación de pagos de la UPC del régimen contributivo y subsidiado (2.13 % y 2.04 % respectivamente), seguido de esto se encuentran los gastos no UPC que representan el 0.22 % y hace referencia a aquellos ítems que no se encuentran contemplados en el Plan de Beneficios. El 0.20 % se emplea en salud pública y los programas de promoción y prevención en salud; y el 0.22 % y 0.11 % en la financiación de las medidas COVID-19 y el Acuerdo de Punto Final, para lo cual cuenta con unos ingresos entregados a la ADRES para tal fin, como lo es el Fondo de Mitigación de Emergencias (FOME) y aportes contenidos en los recursos fiscales [6].

B. COBERTURA

De acuerdo con la información obtenida en el último Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV) reali-

zado en el año 2018 por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), el total de habitantes en Colombia se estimaba en 48 258 494 personas en ese año, donde el 48.8 % de la población son personas del género masculino y el 51.2 % corresponde a población femenina [7]. A partir de dicha información, el DANE realizó una proyección ajustada con los efectos de la COVID-19 de 55 990 158 habitantes para el año 2035, junto con la estimación de una reducción de la tasa global de fecundidad en el año 2023, ubicándose en 1.59 hijos por mujer [8].

En relación con la longevidad de la población colombiana, el DANE refiere que el 22.61 % de la población cuenta con edades entre los 0 y 14 años, el 68.26 % entre los 15 y 64 años y el 9.14 % son mayores de 65 años. Asimismo, respecto al nivel de distribución de la población, el 77.1 % de los habitantes se encuentran en las cabeceras municipales, el 15.8 % en la zona rural dispersa y el 7.1 % en los centros poblados [7].

En este contexto, la reestructuración del sistema de salud se realiza con el objetivo de ampliar la cobertura de afiliación, de tal manera que se alcanzara gradualmente la cobertura universal de salud en la población colombiana, garantizando así el acceso a la salud como derecho fundamental de los habitantes [9]. En los resultados de la evaluación de dicho objetivo, en el año 1995 se contaba con una cobertura del 29.21 %, la cual creció gradualmente y logró ubicarse por encima del 90.00 % a partir del año 2009. Para los años 2020, 2021 y 2022, la cobertura fue estimada teniendo como base la proyección de población del censo realizado por el DANE, dando como resultado una cobertura estimada en 97.78 %, 99.03 % y 99.12 % respectivamente, de población afiliada al SGSSS bajo el régimen especial, subsidiado o contributivo [10]. Sin embargo, la cifra de la cobertura del año 2022 fue actualizada por el Ministerio de Salud, estableciéndose en 99.6 % con un total de 24 399 839 de personas en el régimen contributivo y 24 745 934 en el subsidiado [11].

C. CALIDAD DE LA ATENCIÓN EN SALUD

Las líneas de investigación en el sector salud también se han enfocado en la aplicación de diferentes herramientas, a partir de la identificación de oportunidades de mejora en el sector y en las diferentes instituciones que lo conforman. Dentro de las líneas de investigación se encuentran temas específicos en salud, como el flujo de

pacientes en el servicio de urgencias, la estancia hospitalaria, la valoración de tratamientos médicos y de enfermedades de alto costo, mientras que otros involucran disciplinas como la gerencia de operaciones, el análisis de datos, la gestión de inventarios y aplicaciones variadas de la investigación de operaciones en las cuales se han utilizado diferentes herramientas y metodologías como simulación, teoría de colas y análisis multicriterio, entre otras. Esto se soporta con la recopilación de ponencias presentadas en el Congreso Colombiano de Investigación de Operaciones (versiones 2015, 2017 y 2019) y en el Congreso Internacional Industria y Organizaciones (versiones 2016, 2017 y 2018), en los cuales se encontraron 42 trabajos cuyos temas fueron categorizados en problemas de planeación, apoyo a decisiones médicas, apoyo a las operaciones y revisión de literatura [12].

En el ámbito internacional, de acuerdo con el repositorio del Grupo de Trabajo Europeo ORAHS (European Working Group Operational Research Applied to Health Services), el cual cuenta con miembros de más de 30 países y se encuentra orientado a la comunicación de ideas, conocimientos y experiencia sobre la aplicación de análisis sistemático y cuantitativos al área de la salud, en los últimos cuatro años, correspondientes al periodo 2019-2022, las contribuciones académicas se han orientado a los temas relacionados con la COVID-19, servicio de emergencias, programación de personal, Unidad de Cuidados Intensivos, planeación del cuidado en casa, modelación de políticas institucionales y sistemas de salud, entre otros [13].

Por otra parte, desde el año 2016, con relación al Sistema de Información para la Calidad de Colombia, en cumplimiento con la Resolución 0256 emitida por el Ministerio de Salud y Protección Social, las diferentes instituciones relacionadas con el sector salud deben reportar los indicadores establecidos en el anexo de esta, como el monitoreo de la calidad en salud, los cuales se encuentran disponibles para consulta pública a través del Observatorio Nacional de Calidad en Salud (ONCAS) [14]. El reporte de dicha información alimenta el Sistema de Información para la Calidad, el cual contempla, dentro de sus objetivos, el seguimiento y la evaluación de la calidad de la atención en salud en el Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad de la Atención en Salud (SOGCS) y brindar información a los usuarios para la toma de decisiones. Un factor que es importante destacar para Colombia es el acceso abierto para la consulta de los datos y seguimiento a indicado-

res que obedecen tanto a aspectos epidemiológicos y de interés social como a eficiencia hospitalaria, puesto que en otros países latinoamericanos es restringido el acceso a la consulta de los indicadores en sitio web, incluidos aquellos orientados a factores de morbilidad, esperanza de vida y cobertura del aseguramiento en salud. En este sentido, en la literatura para el año 2020 se evidencia una propuesta de indicadores de gestión para evaluar el desempeño de hospitales públicos en Chile y Ecuador, donde, luego de la revisión de los autores y la validación de los expertos, se definen indicadores de oportunidad, eficiencia, financieros, de capacidad y calidad, los cuales incluyen la satisfacción del usuario [15], encontrando así un soporte literario que evidencia la alineación con los indicadores monitoreados actualmente en Colombia.

Con relación al análisis de la información de los indicadores, el Informe Nacional de Calidad de la Atención en Salud (INCA) para los años 2009, 2015 y 2017 se encuentra disponible para consulta pública en el sitio web oficial del Ministerio de Salud, donde, respecto al contenido del informe, es posible observar una diferencia en la estructura, puesto que en el año 2017, a diferencia de los dos reportes anteriores, se omite la contextualización y análisis comparativo de los indicadores, exponiendo así una dificultad con relación al acceso del análisis de la información de monitoreo de calidad [16], [17].

II. METODOLOGÍA

Para el análisis de los prestadores de servicios de salud se tuvo en cuenta la información disponible en el Observatorio Nacional de Calidad en Salud (ONCAS), en el cual se consolidan los indicadores de la Resolución 0256 de 2016. Los indicadores que aplican conforme a la resolución están tipificados en tres dimensiones: *efectividad*, *experiencia de la atención* y *seguridad*. Adicionalmente, se empleó la información consignada en el Registro Especial de Prestadores de Salud (REPS), en el cual se encuentran código de habilitación, número de sedes, servicios habilitados, clase de prestador, naturaleza, representante legal, contacto y dirección, entre otros. Al considerar el volumen de la información, se limitó el alcance del estudio acorde con los grupos de servicios.

En el análisis de los datos se empleó como herramienta el lenguaje de programación Python y se aplicó estadística descriptiva. Se partió de la identificación de

la distribución de las IPS en Colombia, como parte del contexto demográfico del lugar objeto de estudio. Esto se logró haciendo uso de la base de distribución nacional del REPS, filtrando únicamente por *clase de prestador*. Esta búsqueda arrojó el número de prestadores habilitados por departamento, información que fue cruzada con los puntos de latitud y longitud, lo que permitió ubicar geográficamente en un mapa de Colombia, en archivo tipo GeoJSON, las burbujas que representan el número de prestadores por departamento empleando la librería GeoPandas.

La información correspondiente a los grupos de servicios se tomó del REPS, teniendo como filtro la ciudad de Cali, en clase de prestador a las IPS y generando el informe por cada uno de los grupos que son: Consulta Externa, Apoyo Diagnóstico y Complementación Terapéutica, Internación, Quirúrgico y Atención Inmediata. Dado que esta información considera todas las sedes en las que se presta el servicio y que una misma IPS puede ser contabilizada más de una vez porque es posible prestar el mismo servicio en diferentes sedes, se procedió a eliminar estos registros duplicados bajo el criterio del código de habilitación. Este código consta de un número de 12 dígitos que inicia con el código del departamento y municipio (76001 para la ciudad de Cali), seguido del número único asignado a la institución y del consecutivo de la sede, por lo tanto, se tomó únicamente los primeros 10 dígitos del código para filtrar los valores duplicados y lograr, de esta manera, contabilizar a cada IPS una única vez por cada uno de los servicios ofertados que se encuentran dentro del grupo.

Por otra parte, la base de datos descargada desde el ONCAS contaba inicialmente con registros de profesionales independientes e IPS, por lo tanto, fue necesario realizar un cruce con los datos del REPS a partir del código de habilitación con el fin de obtener una base de datos en la cual se considera solo las IPS de la ciudad, ya sean públicas o privadas, y que se encuentran actualmente operando. Con base en la explicación dada anteriormente, la forma en la cual se realizó el registro conlleva a que cada sede que se encuentre habilitada en el sistema deba reportar los resultados obtenidos en los indicadores para el periodo, sin embargo, considerando la dificultad del manejo de la información se consolidó el resultado para cada una de las IPS, incluyendo las sedes, mediante un promedio simple y asignando un "ID" a los prestadores, con el fin de garantizar la confidencialidad de sus nombres e información.

La base de datos estudiada contaba inicialmente con un total de 147 772 registros, correspondiente a 558 prestadores en la ciudad de Santiago de Cali de 2020 a 2022. Como primer paso, se procedió a realizar un análisis de la estructura de la información y limpiar la base de datos. Los datos faltantes corresponden a cuatro columnas específicas: UCI, numerador, denominador y Textbox2 (Resultado). En la primera columna no se intervino, puesto que está diligenciada únicamente para clasificar las Unidades de Cuidados Intensivos (UCI) en adulto o pediátrica para la dimensión de seguridad.

Con relación a las columnas siguientes, no fue posible establecer los valores faltantes porque se contó a lo más con 12 datos por IPS, un valor poco representativo para emplear herramientas que permitan proyectar el dato faltante. Adicionalmente, el reporte de los indicadores depende de los servicios habilitados, por tanto, las IPS no reportan la totalidad de los indicadores establecidos por el ministerio y, por esta razón, se eliminaron estos registros de la columna de numerador y denominador. Con relación a la columna Textbox2, esta representa el resultado de la división del numerador entre el denominador, los datos faltantes en esta corresponden a denominadores iguales a cero, es decir, que no se presentó población para este indicador, por tanto, no se tiene en cuenta el registro y se elimina. El resultado final de los registros a emplear se redujo a 548 IPS.

Para el manejo de los datos atípicos presentados en los indicadores, este fue definido acorde con el resultado del indicador y el factor (unidad de medición), por lo tanto, se realizó un tratamiento inicial de eliminar aquellos valores atípicos presente en los indicadores medidos como porcentaje y cuyo resultado era mayor de 100 %. En segundo lugar, se realizó el tratamiento considerando el numerador y denominador presentados para identificar en los valores históricos registrados si existe un valor atípico atribuible a errores de digitación. También, se tuvo en cuenta la unidad de medición (tasa por 1000, días, unidades) antes de tomar la decisión sobre el tratamiento del valor.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la información del Registro Especial de Prestadores de Servicios de Salud (REPS) [18], en Colombia se encuentran habilitadas 11 207 IPS distribuidas en el territorio nacional, donde el 90.95 % son instituciones privadas, el 8.91 % pertenecen al sector

público y el 0.16 % son mixtas. El 50.17 % de las IPS se encuentran en seis departamentos: Bogotá D.C., Valle del Cauca, Antioquia, Atlántico, Santander y Bolívar. En el primer lugar se ubica Bogotá D.C., con 1568 instituciones que representan el 13.99 % del total del país, mientras que el segundo lugar lo obtiene Valle del Cauca con 994 prestadores, correspondiente al 8.87 % del total. En la **Figura 1** se presenta la distribución de las IPS en el territorio, donde el tamaño y color de cada burbuja representa la cantidad de entidades prestadoras de servicios en el departamento.

Adicionalmente, es posible observar en la **Figura 1** cómo las áreas que se encuentran con un grado menor de urbanización, como los departamentos Vichada, Guainía, Guaviare, Vaupés y Amazonas, cuentan con un escaso número de instituciones, evidenciando la necesidad del apoyo de una Red de Salud para garantizar a la población el acceso a los servicios.

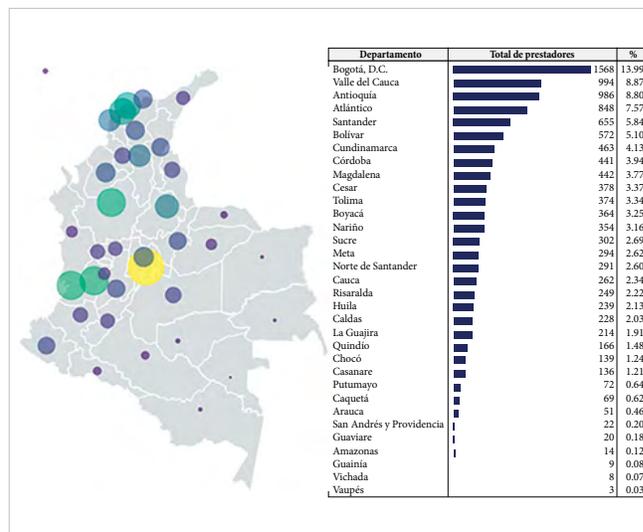


Figura 1. Distribución de las IPS en el territorio.

El departamento del Valle del Cauca cuenta con 994 IPS, cifra que representa el 8.87 % del total país, y ahí el 94.46 % de dichos prestadores son de carácter privado, el 5.43 % son IPS públicas y el 0.10 % son mixtas, que corresponde puntualmente al Centro Internacional de Entrenamiento e Investigaciones Médicas (CIDEIM). En esta demarcación, el 90.54 % de los prestadores se centran en siete municipios: Santiago de Cali (60.97 %), Palmira (8.35 %), Buenaventura (6.44 %), Tuluá (5.43 %), Cartago (3.62 %), Guadalajara de Buga (3.62 %) y Jamundí (2.11 %), y el valor restante se distribuye entre los otros 35 municipios del departamento.

Adicionalmente, el REPS clasifica en cinco grupos a las IPS acorde con el área a la cual pertenecen los servicios habilitados por el prestador: Consulta Externa, para los casos de atención de consulta con especialistas y procedimientos ambulatorios; Apoyo Diagnóstico y Complementario, en el cual se relaciona los servicios de imágenes diagnósticas y laboratorio clínico; Internación, que incluye hospitalización y unidad de cuidado intermedio e intensivo; Quirúrgico, el cual hace referencia a los procedimientos de cirugía; y Atención Inmediata, conocida también como urgencias.

En Santiago de Cali, el mayor grupo de servicio habilitado por las IPS corresponde a consulta externa con 486 prestadores, seguido por apoyo diagnóstico con 429, lo cual es coherente al considerar que estos dos grupos pueden ser un servicio tercerizado o particular, así como ser parte de los servicios ofertados por una IPS que preste los otros tres grupos y desee brindar un servicio integral. El tercer grupo de servicio mayormente habilitado por las IPS corresponde a Internación, con 104 instituciones, seguido de Quirúrgico con 78 prestadores y finalmente Atención Inmediata con 44 IPS.

Los servicios habilitados pertenecientes al grupo de Consulta Externa obedecen generalmente a atención de médicos especialistas. No obstante, en Cali se encuentran, principalmente en este grupo, consultorios de medicina general, con 218 IPS habilitadas para la prestación de este servicio; psicología, con 197 prestadores; enfermería, con 124 entidades habilitadas; nutrición, con 124 consultorios; odontología general, con un total de 121 IPS que prestan el servicio; y medicina interna, con 106 instituciones. Después de estas instalaciones, se ubican en esta ciudad alrededor de 82 especialidades habilitadas.

Por otro lado, en el grupo de Apoyo Diagnóstico y Complementación Terapéutica se encuentran aquellos servicios habilitados por las entidades, que pueden ser de carácter particular o que apoyan la prestación de otros servicios de la IPS, como son, por ejemplo, los servicios de imágenes diagnósticas y laboratorio clínico, que son requeridos para la definición del diagnóstico del paciente en urgencias o internación, o los servicios de rehabilitación (fisioterapia) para mantener el acondicionamiento físico del paciente durante la estancia hospitalaria. En la [Figura 2](#) se observa el número de IPS (incluye sedes) con los servicios habilitados del este grupo de servicios.

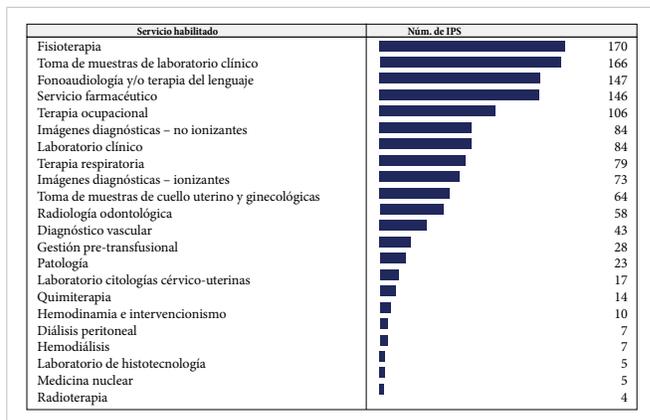


Figura 2. Servicios habilitados del grupo Apoyo Diagnóstico y Complementación Terapéutica en Cali.

Por su parte, los servicios habilitados en Cali para el grupo Quirúrgico se presentan en la [Figura 3](#), donde se cuenta con alrededor de 24 tipos de cirugía en la ciudad, entre los cuales destaca la cirugía plástica con 55 IPS habilitadas, la cirugía ortopédica con 44 prestadores, cirugía otorrinolaringológica con 43 instituciones, y la cirugía general con 42 prestadores habilitados para este servicio.

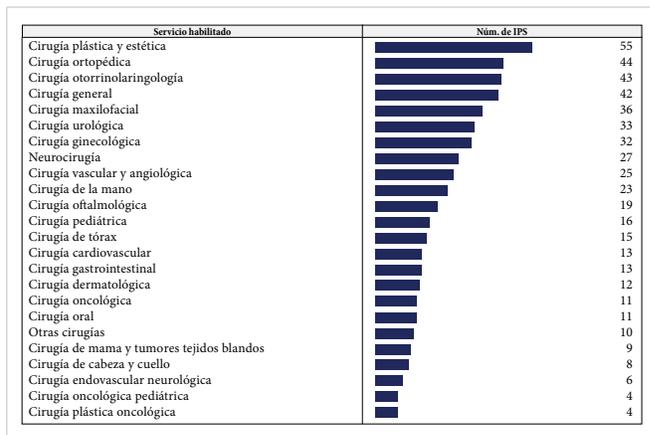


Figura 3. Servicios habilitados del grupo Quirúrgico en Cali.

Los servicios de Internación se integran, a grandes rasgos, por hospitalización, cuidado intermedio y cuidados intensivos. En Cali se cuenta con 85 IPS habilitadas para prestación del servicio de hospitalización de adultos, que es de los más representativos del grupo, y enseguida se encuentra el servicio de hospitalización de paciente crónico sin ventilador, con 57 prestadores, y la hospitalización de paciente crónico con ventilador, con 29 instituciones. En la [Figura 4](#) se presenta el número de prestadores que tienen habilitados los servicios de este grupo en Cali.

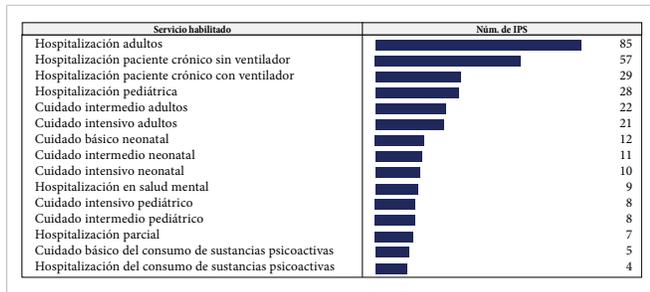


Figura 4. Servicios habilitados del grupo Internación en Cali.

Finalmente, en el grupo de Atención Inmediata se encuentra la prestación del servicio de urgencias habilitado en 34 IPS, atención del parto en 16 prestadores y atención prehospitalaria con 3 centros.

Para realizar el análisis de los indicadores de calidad de la atención [19] en salud se empleó como referente el Informe Nacional de Calidad de la Atención en Salud (INCAS), emitido por el Ministerio de Salud, el cual se encuentra disponible para los años 2009, 2015 y 2017. Partiendo de la dimensión de Seguridad del Paciente, en la Tabla 1 se presenta el resultado de los indicadores de Seguridad para las IPS a nivel nacional en el año 2016.

TABLA 1
INDICADORES DE SEGURIDAD PARA IPS (2016).
REPRODUCIDA DE [17]

INDICADOR	Ind	p10	p50	p90
Proporción de cancelación de cirugía	2.14	0	0	4.72
Tasa de incidencia de infección del torrente sanguíneo asociada a catéter (ITS-AC)	3.37	0	2.25	8.73
Tasa de incidencia de infección del tracto urinario asociada a catéter (ISTU-AC)	2.94	0	2.26	7.23
Tasa de incidencia de neumonía asociada a ventilador mecánico (NAV)	4.2	0	2.23	11.33
Tasa de caída de pacientes en el servicio de consulta externa	0.09	0	0	0
Tasa de caída de pacientes en el servicio de hospitalización	1.35	0	0	2.05
Tasa de caída de pacientes en el servicio de urgencias	0.76	0	0	1.00

Abreviaturas. Ind: indicador nacional y p10, p50, p90: percentil 10, 50 y 90, respectivamente.

En el área hospitalaria existen cuatro indicadores de suma importancia medidos bajo un factor de tasa por 1000, tres de ellos orientados al control de la aparición de infecciones durante la estancia del paciente y el cuarto enfocado en evitar las lesiones en la piel ocurridas por la

permanencia del paciente en una misma posición. Para el caso de las IPS de Cali, el percentil 75 indicador de incidencia de Infección del Torrente Sanguíneo (ITS-AC) se ubica en 2.64; para la tasa de incidencia de Infección del Trato Urinario Asociada a Catéter (ISTU-AC) dicho percentil se encuentra en 2.53 con una alta variabilidad de los datos, mientras que la incidencia de Neumonía Asociada a Ventilador Mecánico (NAV) se ubica en 3.13, lo cual implica que en el área hospitalaria existe una mayor presencia de NAV. Finalmente, en la tasa de úlceras por presión el percentil 75 se ubica en 2.26, sin embargo, cuenta con una mayor aparición de datos atípicos que pueden llegar hasta una tasa de 224.31.

En la Figura 5 se presentan los diagramas correspondientes a los indicadores anteriores, donde se evidencia, al nivel de las IPS de Cali, que se continúa sosteniendo la tendencia del indicador de ISTU-AC con respecto al valor del indicador para el año 2016 en el Valle del Cauca, el cual fue de 2.61, y para el indicador de NAV se observa una mejora en este si se toma como comparativo el mismo año, donde la tasa de incidencia de NAV se ubicaba en 3.52 para el Valle del Cauca. Lo anterior se puede atribuir al mejoramiento en las prácticas de enfermería, así como en los insumos y dispositivos que son empleados en el transcurso del tiempo, aunque es posible constatar en la línea de tiempo que para los años 2019, 2020 y 2021 se presentaron incrementos en estos indicadores hospitalarios coincidentes con la pandemia de COVID-19.

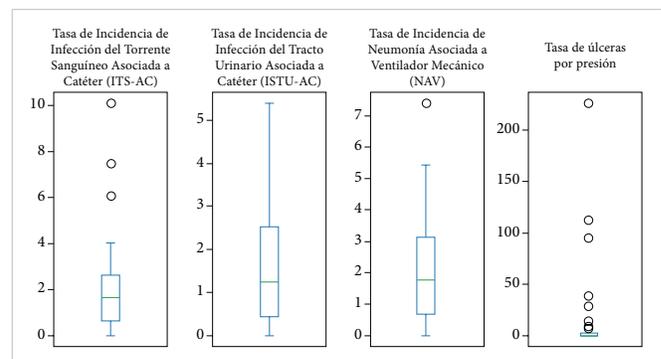


Figura 5. Indicadores de hospitalización.

Para año 2016 en Colombia, hospitalización fue el servicio en el cual se presentó una mayor tasa de caídas de pacientes, que es un indicador que se mide con un factor de tasa por 1000, con un resultado de 1.35. Esta métrica coincide con un estudio realizado en cuatro hospitales de alta complejidad en Colombia, ubicados en los departamentos de Risaralda, Quindío, Valle del Cauca y

Cauca, en el cual se analizó la tasa de caídas en pacientes mayores de 65 años durante 2018 y 2020, concluyendo que el servicio con mayor tasa correspondía a hospitalización, seguido de urgencias, donde la mayoría de estas le ocurrieron a pacientes de género masculino con edad promedio de 77.5 ± 7.4 años [20].

Adicionalmente, un estudio realizado en un hospital del departamento de Risaralda, Colombia, concluyó que en 2021 el servicio de urgencias presentó el mayor número de caídas, donde el 61.70 % de los pacientes que las padecieron fue de sexo masculino y dentro de los factores de riesgo asociados se encontraban edades mayores a 50 años y falta de acompañamiento familiar durante la estancia del paciente [21]. Lo anterior concuerda con la información tomada directamente del ONCAS, para el año 2022, donde el servicio en el que se presentó una mayor tasa de caídas en el Valle del Cauca fue en urgencias, siendo este también a nivel de Colombia el de mayor tasa (Figura 6). Lo anterior permite destacar que en estos años hubo un notorio crecimiento de la tasa de caída en urgencias, donde este indicador a nivel nacional fue de 0.76, convirtiéndose para las IPS en unos de los servicios en que se debe focalizar los esfuerzos para disminuir el riesgo de caída de pacientes.

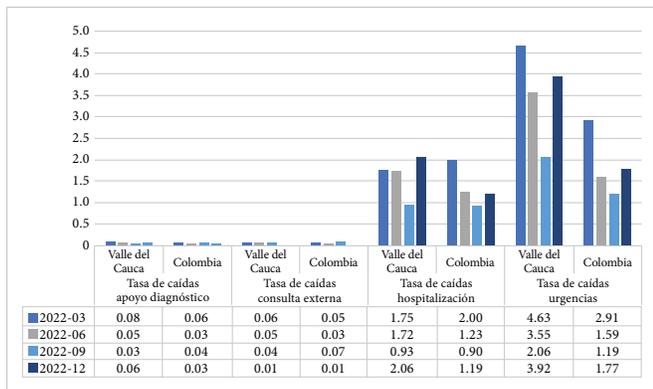


Figura 6. Tasa de caída de pacientes en el Valle del Cauca.

En la Figura 7 se presenta el resultado de las IPS de Cali para los grupos de servicio de hospitalización, urgencias, consulta externa y apoyo diagnóstico. No se consideran los servicios quirúrgicos, puesto que los pacientes no transitan en el quirófano. En el servicio de hospitalización, el percentil 75 se ubicó en el valor de 5.44, mientras que en el área de urgencias este mismo percentil se ubicó en 4.77. Ahora bien, en los servicios de apoyo diagnóstico y consulta externa este percentil se ubicó en 0, por tanto, este es un indicador en el cual es posible evidenciar que entre mayor sea la circulación del pacien-

te en el servicio aumentan las caídas, lo cual, a su vez, se relaciona de forma intrínseca con la estancia hospitalaria, considerando que entre mayor sea esta más grandes serán las necesidades de deambulación del paciente en las instalaciones para cubrir necesidades básicas. Entre los factores de riesgo prevalente que han sido determinados por la literatura como influyentes en el riesgo de caídas se encuentran pacientes sujetos a prescripción de polifármacos, haber sufrido caídas previas, alteraciones del estado mental, encontrarse sin acompañante o supervisión durante la estancia, edad superior a 50 años y diagnósticos asociados con el sistema circulatorio y respiratorio [20], [21], [22].

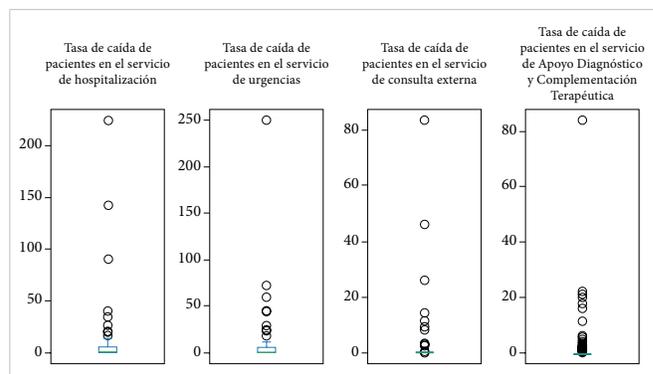


Figura 7. Tasa de caída de pacientes en los servicios en Cali.

Con relación a los datos atípicos, por tratarse de un indicador de tasa por 1000, es altamente sensible al número de pacientes que acuden al servicio (denominador), por tanto, la caída de un solo paciente frente a un denominador bajo puede convertir el resultado en un valor ácido y presentarse casos, como ocurren en los dos primeros servicios, de una estimación de la tasa en más de 200 eventos de caídas de pacientes.

Otro de los indicadores que son controlados en los servicios de hospitalización y urgencias es la incidencia de eventos adversos asociados a reacciones medicamentosas, el cual se mide como un porcentaje. Las Reacciones Adversas Medicamentosas (RAM) impactan en el aumento de los costos de la atención y son causantes de la morbimortalidad. La literatura refiere que pueden llegar a presentarse incluso en el 10-20 % de los pacientes hospitalizados y aumentar la estancia media en 4.5 días, siendo estos eventos un foco a prevenir por los programas de farmacovigilancia [23]. A partir de la información de consulta directa disponible en el ONCAS, se presenta en la Figura 8 el resultado de las reacciones adversas asociadas a medicamentos para Colombia

y el Valle del Cauca en el año 2022, donde se observa que hospitalización es el servicio en el cual ocurre la mayor cantidad de eventos asociados a reacciones medicamentosas, siendo el cuarto trimestre el de mayor frecuencia de casos para el Valle.

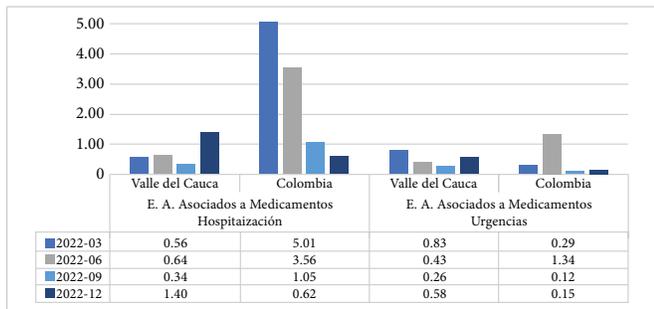


Figura 8. Eventos adversos asociados a medicamentos.

En la Figura 9 es posible observar que en las IPS de Cali el servicio de hospitalización es también el que presenta con mayor frecuencia este tipo de eventos adversos, con un resultado del percentil 75 de 1.15 %, mientras que para urgencias este valor es de 0.22 %.

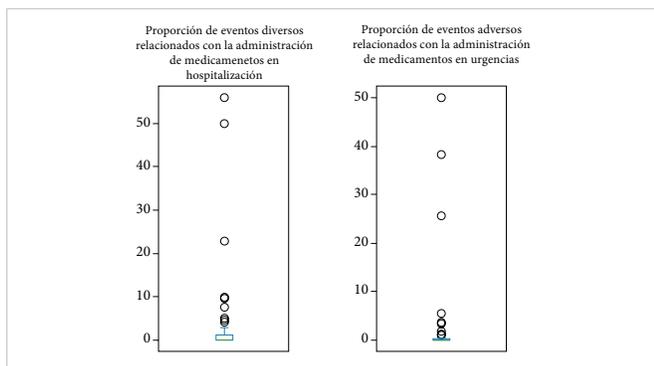


Figura 9. Proporción de eventos adversos relacionados con la administración de medicamentos.

Adicionalmente, en estos dos servicios también se evalúa el reingreso. Como valores de referencia del indicador se toman los encontrados en el informe INCAS 2015, los cuales son presentados en la Figura 10, donde se puede apreciar que no existe una tendencia estable del indicador para esos años.

Año	Tasa
2009	1.82
2010	1.35
2011	2.02
2012	1.42
2013	1.69
2014	1.35

Figura 10. Tasa de reingreso hospitalario años anteriores.

Actualmente, para el servicio de hospitalización se toma como medida el reingreso al servicio en un tiempo menor a 15 días bajo un factor de tasa por 1000, mientras que para el área de urgencias se establece como un porcentaje el reingreso de los pacientes en menos de 72 horas. Cabe aclarar que para considerarse un reingreso, la causa y/o diagnóstico debe ser el mismo bajo el cual ingresó en la primera ocasión.

En la Figura 11 se presenta el resultado para estos indicadores en Cali, donde el percentil 75 de la tasa de reingreso en hospitalización es 14.35, con valores atípicos de hasta 218.79, y la proporción de reingreso en urgencias es de 0.35 con valores atípicos hasta 50.

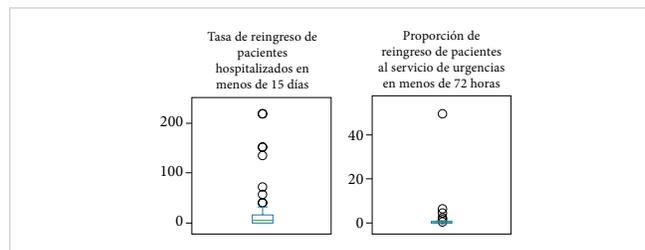


Figura 11. Reingreso de pacientes a los servicios de hospitalización y urgencias.

Por otra parte, para la dimensión experiencia de la atención se encuentran, en su mayoría, indicadores relacionados con la oportunidad, lo cual hace referencia al tiempo que transcurre desde que se realiza la solicitud hasta que esta es atendida (indicador medido en días). Para el año 2022, el tiempo promedio de espera en los servicios de ginecología, medicina general, obstetricia, odontología general y pediatría estuvo en el Valle del Cauca por encima de la media nacional, siendo pediatría uno de los servicios con mayor tiempo de espera, seguido de ginecología (Figura 12).

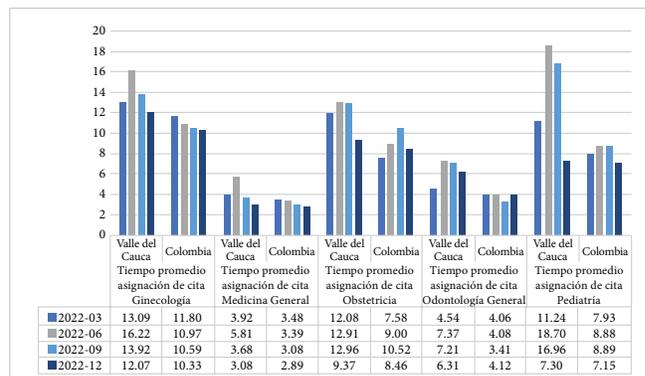


Figura 12. Tiempo promedio de espera para la asignación de cita (Consulta Externa) en 2022.

De acuerdo con la información contenido en el INCAS 2017, en comparación con el año 2016, en el ámbito nacional se ha presentado una disminución en los tiempos de espera para la asignación de citas en ginecología y

pediatría, mientras que se sostuvo el tiempo promedio para consulta de medicina general, obstetricia y odontología.

TABLA 2
INDICADORES DE LA EXPERIENCIA PARA LA ATENCIÓN PARA IPS (2016). REPRODUCIDA DE [17]

INDICADOR	Ind	n	p10	p50	p90
Proporción de satisfacción global de los usuarios en la IPS	91.46	4494	86.25	98.24	100
Proporción de usuarios que recomendaría su IPS a familiares y amigos	93.71	4208	92.22	99.87	100
Tiempo promedio de espera para la asignación de cita de cirugía general	12.4	583	1.33	6.8	17.67
Tiempo promedio de espera para la asignación de cita ginecología	12.23	806	0.2	6.53	17.39
Tiempo promedio de espera para la asignación de cita medicina general	2.97	2424	0	1.47	6.9
Tiempo promedio de espera para la asignación de cita medicina interna	12.68	916	0.38	7.39	21.17
Tiempo promedio de espera para la asignación de cita obstetricia	8.67	487	1.29	5.84	16.21
Tiempo promedio de espera para la asignación de cita odontología general	4.15	1880	0	1.52	5.89
Tiempo promedio de espera para la asignación de cita de pediatría	10.19	737	0.01	5.02	14.19
Tiempo promedio de espera para la atención del paciente clasificado como <i>triage 2</i> en el servicio de urgencias	117.6	1050	1.94	19.72	145
Tiempo promedio de espera para la realización de cirugía de cataratas	21.61	180	0.05	10.03	41.48
Tiempo promedio de espera para la realización de cirugía de reemplazo de cadera	11.58	202	0	4.14	29.41
Tiempo promedio de espera para la realización de cirugía para revascularización miocárdica	3.72	66	0	2.35	10
Tiempo promedio de espera para la toma de ecografía	9.85	702	0	4.52	15.75
Tiempo promedio de espera para la toma de resonancia magnética nuclear	10.01	144	0	5.08	19.77

Abreviaturas. Ind: indicador nacional; ; n: número de EAPB que reportaron el indicador y p10, p50, p90: percentil 10, 50 y 90, respectivamente.

En la Figura 13 se presenta el diagrama de cajas y alambres correspondiente a servicios de la dimensión de consulta externa en Cali, donde se puede observar para la especialidad de ginecología una espera de cita de máximo 25.11 días, donde el 75 % de los pacientes esperan 12.73 días o menos.

En el caso de medicina general, se evidencia una alta concentración de los registros en menos de 5.91 días, con una alta presencia también de datos atípicos que pueden verse afectados por los controles médicos del diagnóstico. En la consulta obstétrica se observa una respuesta oportuna, donde el percentil 75 se ubica en 10.56 días y el registro más alto del periodo analizado corresponde a 17.37 días de espera. Para odontología, el percentil 75 se ubica en 5.11 días, con límite superior en 11.25 días y datos atípicos hasta de 38.16 días. Finalmente, en la oportunidad de atención en cita de pediatría, el percentil 75 se ubica en 7.85 días y hay escasos registros de datos atípicos que llegan hasta los 21.55 días de espera para la atención. A continuación, se presenta los diagramas correspondientes para estos indicadores.

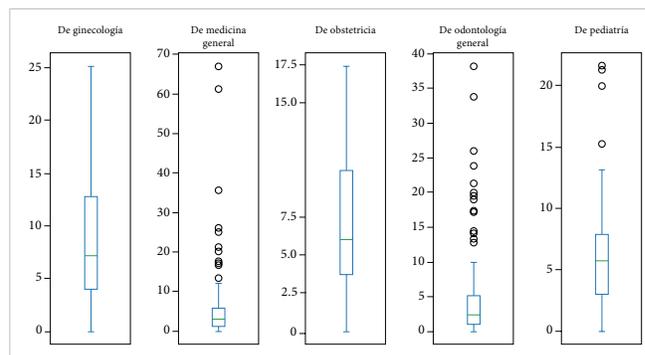


Figura 13. Tiempo promedio de espera para la asignación de cita (Consulta Externa).

En relación con la oportunidad de la atención de pacientes clasificados como *triage 2*, es necesario aclarar que, de acuerdo con la Resolución 5596 de 2015, que establece los criterios para la clasificación de quienes ingresan por el servicio de urgencias con el fin de priorizar la atención acorde con la condición clínica del paciente, los pacientes clasificados bajo *triage 2* deben ser atendidos en tiempo igual o menor a 30 minutos. Teniendo en cuenta esta meta, se observa en la Figura 14 que el 78 % de los registros reportados por las IPS de

Cali se encuentran en un tiempo entre 0 (atención inmediata) y 29.81 minutos, presentando valores atípicos de esperas hasta de 101.07 minutos.

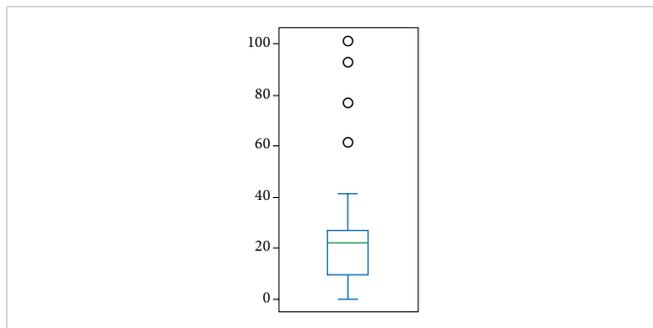


Figura 14. Tiempo promedio de espera para la atención de paciente clasificado como *triage 2* en el servicio de urgencias.

Adicionalmente, se puede analizar, a partir de la gráfica presentada en la Figura 15, el comportamiento del indicador en el Valle del Cauca, que evidencia una disminución del tiempo de espera en comparación al segundo semestre del año 2018, donde se cumple en el 81.25 % de las veces la meta establecida.

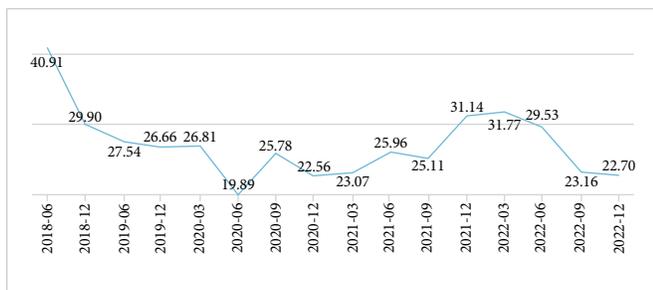


Figura 15. Tiempo de oportunidad de *triage 2* en el Valle del Cauca. Fuente: reproducido de [14].

De forma análoga a los indicadores del grupo de consulta externa, existen algunos indicadores específicos de experiencia de la atención para los servicios quirúrgicos, los cuales son presentados en la Figura 16 con los datos correspondientes a Cali. En el primer indicador se observa un tiempo promedio de espera para cita de cirugía general en el percentil 75 de 13.27 días, con la presencia de un único registro atípico de 30.25 días. El 75 % de los registros de tiempo de espera para la realización de cirugía de cataratas en la Cali se ubica en 23.86 días o menos, con valor atípico de hasta 68.11.

Para la cirugía de reemplazo de cadera, al 75 % de los pacientes se les realiza el procedimiento antes de 15.82 días, sin embargo, se presentó en el periodo analizado casos de hasta 85.27 días de espera, mientras que para la

cirugía de revascularización miocárdica el tiempo promedio de espera se ubica por debajo de los 10 días con un único dato atípico de 24.20 días. En la Figura 16 se presenta los gráficos de los indicadores anteriores y se incluye el indicador de la dimensión de seguridad correspondiente a proporción de cancelación de cirugía, donde se observa que el 75 % de los datos el porcentaje oscila entre el 0 % y el 2 %.

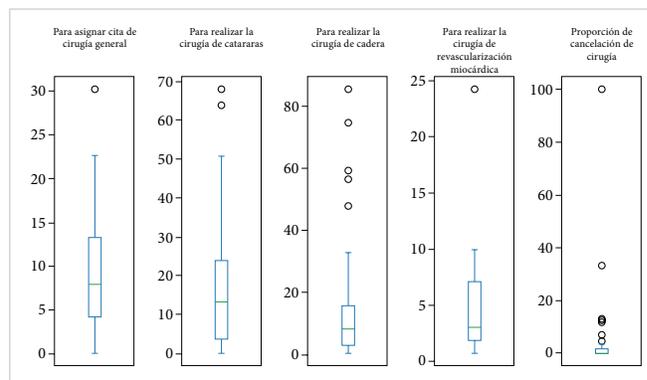


Figura 16. Tiempo promedio de espera (Quirúrgicos).

En este indicador es posible constatar un comportamiento interesante con relación a la asignación de citas para reemplazo de cadera, donde si se considera la información presentada en la Figura 17, se aprecia que en el Valle del Cauca esta oportunidad es menor a la registrada en el país y teniendo en cuenta que existen 44 IPS que cuentan con este servicio habilitado (cirugía de ortopedia) en Cali, siendo el segundo servicio quirúrgico de mayor frecuencia ahí ofertado (Figura 3), se puede identificar un servicio en el cual esta ciudad puede destacar y reforzar las diferentes estrategias para explotar el potencial de este valor agregado.

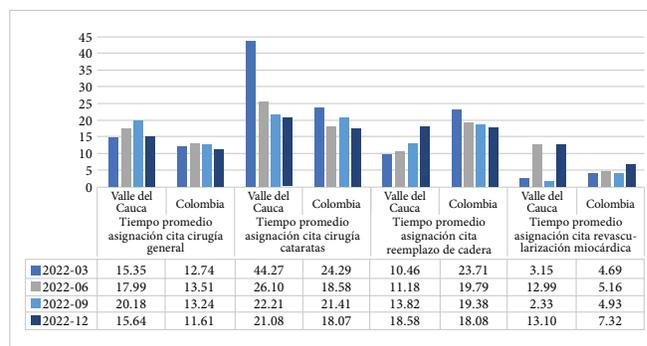


Figura 17. Tiempo promedio de asignación de citas de cirugía en el Valle del Cauca.

Para los servicios de apoyo diagnóstico y complementación terapéutica se encuentran establecidos dos indi-

cadadores de la dimensión de experiencia de la atención enfocados en la toma de ecografías y resonancia magnética nuclear, los cuales son presentados en la **Figura 18** con los valores obtenidos para la ciudad de Cali. Entre estos dos se observa un tiempo de espera similar: en el primero, el percentil 75 se ubica en 9.44 días, mientras que para el segundo este mismo se sitúa en 9.54. Con relación a los datos atípicos, el mayor registro en el periodo analizado para ecografía fue de 79 días y para la toma de resonancia de 108.15 días.

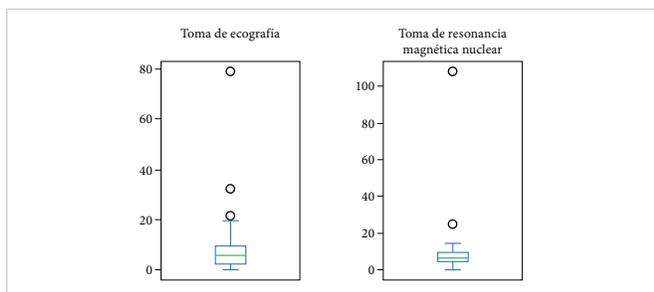


Figura 18. Tiempo promedio de espera para asignación de cita (Apoyo Diagnóstico).

Finalmente, el resultado de satisfacción global de los usuarios de las IPS y su disposición a recomendar la institución evidencia una mejora en la percepción de los usuarios, teniendo en cuenta que para el año 2016 el indicador de satisfacción global con la IPS en el país se encontraba en 91.46 (**Tabla 2**) y actualmente oscila entre el 95 % y 96 %.

Asimismo, como se presenta en la **Figura 19**, se evidencia que el Valle del Cauca se encuentra por encima de la media nacional, tanto para proporción de satisfacción global como para recomendación de los usuarios de la IPS en que fueron atendidos.

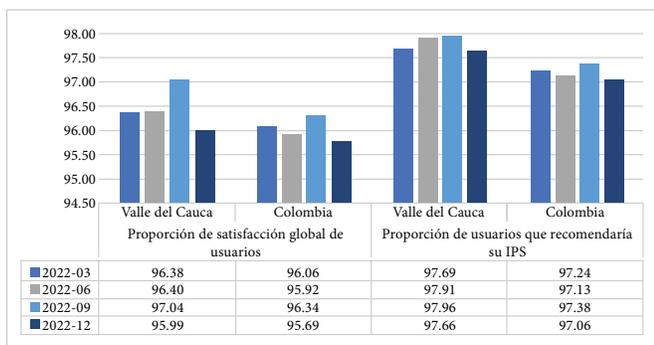


Figura 19. Satisfacción de usuarios con su IPS en el Valle del Cauca.

En la **Figura 20** se presentan los resultados del análisis para la ciudad de Cali, en la cual se observa una alta con-

centración de los registros entre el 95 % y 100 % con relación a la satisfacción del usuario, mientras que por el otro lado se observa dicha acumulación entre el 97 % y el 100 % sobre la recomendación de esta a familiares y amigos. Estos dos indicadores muestran una perspectiva interesante al observar el comportamiento de los datos atípicos, donde es posible observar que se presenta un registro no menospreciable de datos atípicos que pueden llevar a la disminución del indicador si observa desde el punto de vista de las IPS como entidades individuales, como puede evidenciarse en un estudio realizado en el año 2019 con una muestra de ciudadanos de Ibagué, Tolima, en el cual se analiza el nivel de satisfacción de los afiliados al sistema de salud bajo un instrumento y criterios propios, lo que arrojó como resultado que el 29 % de los participantes se encontraba insatisfecho con el sistema por factores como humanización, infraestructura, humanización y tiempo de espera [24].

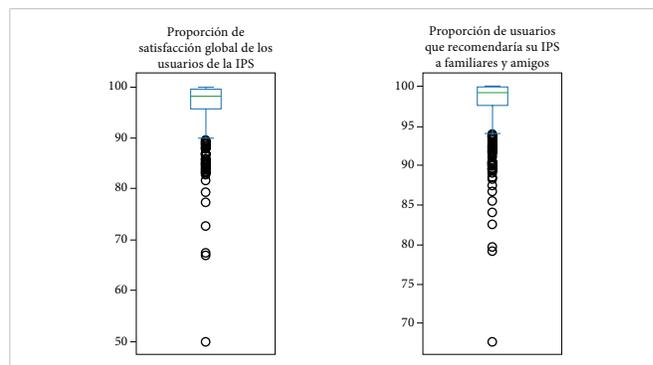


Figura 20. Proporción de satisfacción del usuario.

IV. CONCLUSIONES

El análisis de los indicadores de calidad de la atención registrados por las IPS de Cali permite evidenciar de forma intrínseca que prolongar la estancia hospitalaria influye en el aumento de la probabilidad de que ocurra un evento adverso, como lo es la caída del paciente. Esto se reflejado en los indicadores de hospitalización y urgencias, que es donde el paciente permanece más tiempo y, por tanto, ahí se registran con mayor frecuencia eventos de este tipo. En urgencias debe tenerse en cuenta que, por ejemplo, es un servicio en el que existe una mayor circulación tanto de pacientes como de profesionales y colaboradores, lo que puede incrementar la posibilidad de materialización del riesgo.

Con relación a la oportunidad de la prestación del servicio de urgencias, queda en evidencia el impacto que

ha ocasionado la medición del indicador en la calidad de la prestación del servicio, pues existe actualmente una aproximación al cumplimiento de la meta establecida por el Ministerio de Salud de brindar la atención de las urgencias de *triage 2* en 30 minutos o menos, con 78 % de los prestadores, y en el comportamiento histórico del Valle del Cauca desde el año 2018 hasta 2022 con un cumplimiento del 81.25 %, sin embargo, aún existen posibilidades de emplear estrategias que permitan mejorar la oportunidad de la atención y con esto el resultado del indicador.

Cabe destacar que este ha sido un tema de interés en las líneas de investigación y actualmente se encuentra un número significativo de estudios orientados a la disminución del tiempo de espera, empleando diferentes estrategias, como teorías de colas, simulación y Lean Six Sigma, entre otras. Del mismo modo, de los indicadores de proporción de satisfacción del usuario se deriva la necesidad de mejoramiento en este aspecto, especialmente por el volumen de datos atípicos que logran ubicarse incluso por debajo del 90 % y que representan la inconformidad de la población, a partir de lo cual se puede generar la base para plantear acciones de mejora que permitan no solo el cumplimiento al usuario sino la mejora de la institución per se. Por tanto, es relevante que en los indicadores donde se presenta dicho comportamiento no se limite al cálculo indicador al promedio, sino que se realice un análisis estratificado, ya sea por percentiles o intervalos definidos a nivel institucional que posibilite identificar los casos en el que el paciente no recibe la atención conforme a lineamientos de calidad.

Por otra parte, se evidencia que no existe una relación fuerte entre los servicios habilitados con los indicadores específicos que son manejados para los grupos de consulta externa y quirúrgicos en las IPS de Cali, es decir, no hay una medición establecida acorde con la mayor frecuencia de servicios habilitados en la ciudad para esos grupos, a excepción del indicador de tiempo de oportunidad para la cirugía de reemplazo de cadera. Al hacer el cruce entre el resultado de este indicador para Cali y el Valle del Cauca frente al nacional, se identifica que se encuentra por encima de dicha línea de base y, asimismo, el segundo servicio de cirugía habilitado por las IPS de Cali es ortopedia. Lo anterior deja a la vista una oportunidad de mejora para Cali, desde un enfoque de conformación de centros de referencia a nivel nacional, en donde el manejo no formal o estandarizado para los otros servicios habilitados termina en la no identi-

ficación de fortalezas a nivel local que pueden llegar a generar valor agregado.

Finalmente, la investigación permitió identificar una brecha en el sector frente al análisis de la calidad en la prestación del servicio, visto desde la perspectiva de las instituciones prestadoras. Ahora bien, este estudio puede ser extrapolado a las EAPB para líneas de investigación futuras, teniendo en cuenta el contexto e impacto de la reforma a la salud que se adelanta en Colombia. Por otra parte, se debe destacar que el ONCAS actualmente cuenta con un volumen significativo de información que ha sido recopilado a partir de 2016, donde si bien en los primeros años la cantidad de datos faltantes y atípicos es alto, con el paso del tiempo se ha fortalecido e incluso ajustado la periodicidad del reporte de la información, ayudando a que esta se encuentre uniforme, por tanto, es un insumo importante del cual se puede hacer uso para fortalecer los diferentes análisis e investigaciones que se adelantan actualmente en el sector.

REFERENCIAS

- [1] OMS, “Constitución de la Organización Mundial de la Salud Organización Mundial de la Salud”, en *Documentos Básicos*, 49.ª ed. Ginebra: Organización Mundial de la Salud, Documentos básicos, 2020, pp. 1-19.
- [2] ONU. “Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades”. UN.org. Accedido: feb. 3, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>
- [3] OPS. “Agenda de salud sostenible para las Américas 2018-2023”. PAHO.org. Accedido: feb. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/agenda-salud-sostenible-para-americas-2018-2030>
- [4] R. Guerrero, A. I. Gallego, V. Becerril-Montekio y J. Vásquez, “Sistema de salud de Colombia”, *Salud Pública de México*, vol. 53, n.º 2, pp. 144-155, 2011.
- [5] J.J.Espinal-Piedrahita y J.H.Restrepo-Zea, “Financiamiento del sistema de salud colombiano: Tendencias y desafíos”, *Revista de Salud Pública*, vol. 24, n.º 1, pp. 1-8, 2022.
- [6] C. Granger, J. E. Ramos-Forero, L. A. Melo-Becerra y G. T. Silva-Samudio, “Financiamiento del Sistema de Salud en Colombia: Fuentes y Usos”, *Borradores de Economía*, n.º 1233, pp. 6-20, 2023, doi: [10.32468/be.1233](https://doi.org/10.32468/be.1233).

- [7] DANE. “Censo Nacional de Población y Vivienda 2018”. DANE.gov.co. Accedido: abr. 22, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- [8] DANE. “Proyecciones de Población”. [En línea]. DANE.gov.co. Accedido: abr. 25, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- [9] A. C. Santos, M. García y L. Chicaiza, “¿Crisis financiera o de gestión? Evolución del sector salud desde la perspectiva de los entes territoriales”, *Apuntes del CENES*, vol. 35, n.º 61, pp. 177-206, 2016.
- [10] Ministerio de Salud. “Comportamiento del aseguramiento”. MINSALUD.gov.co. Accedido: abr. 30, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/proteccionsocial/Regimensubsubdiado/Paginas/coberturas-del-regimen-subsubdiado.aspx>
- [11] Ministerio de Salud. “Colombia llegó al aseguramiento universal en salud al alcanzar el 99,6%”. MINSALUD.gov.co. Accedido: abr. 30, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Colombia-llego-al-aseguramiento-universal-en-salud-al-alcanzar-el-99.6.aspx>
- [12] D. Barrera, E. V. Gutiérrez y A. F. Osorio, *Aplicaciones de Investigación de Operaciones en Sistemas de Salud en Colombia*. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2020.
- [13] ORAHS. “Repository”. UNITO.it. [En línea]. Accedido: oct. 19, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://orahs.di.unito.it/repository.html>
- [14] Ministerio de Salud. “Observatorio Nacional de la Calidad en Salud”. MINSALUD.gov.co. Accedido: ag. 30, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://rssvr2.sispro.gov.co/IndicadoresMOCA/>
- [15] J. C. Armijos y A. Núñez, “Indicadores de gestión para evaluar el desempeño de hospitales públicos: Un caso de estudio en Chile y Ecuador”, vol. 148, n.º 5, *Rev. Méd. Chile*, 2020, pp. 626-643, doi: [10.4067/S0034-98872020000500626](https://doi.org/10.4067/S0034-98872020000500626).
- [16] Ministerio de Salud y Protección Social. “Informe Nacional de Calidad de la Atención en Salud 2015”. MINSALUD.gov.co. Accedido: abr. 30, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/informe-nal-calidad-atencion-salud-2015.pdf>
- [17] Ministerio de Salud y Protección Social. “Informe Nacional de Calidad en Salud INCAS 2017”. MINSALUD.gov.co. Accedido: abr. 30, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/CA/informe-nacional-calidad-salud-incas-2017.pdf>
- [18] Ministerio de Salud. “Registro Especial de Prestadores en Salud”. MINSALUD.gov.co. Accedido: ag. 22, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://prestadores.minsalud.gov.co/habilitacion/>
- [19] Ministerio de Salud. “Indicadores de Calidad de la Atención”. SISPRO.gov.co. Accedido: ag. 22, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.sispro.gov.co/observatorios/oncalidadsalud/Paginas/default.aspx>
- [20] M. E. Machado-Duque, L. Camacho-Arteaga, M. Sabaté y J. E. Machado-Alba, “Caídas en ancianos hospitalizados en cuatro centros de alta complejidad de Colombia. Descripción clínica y complicaciones”, *Enfermería Clínica*, vol. 34, n.º 4, pp. 302-311, 2024, doi: [10.1016/j.enfcli.2024.04.004](https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2024.04.004).
- [21] E. Correa, M. L. Garzón, D. Tabima García y J. González, “Caídas en los pacientes de un hospital universitario de Colombia”, *Revista Sapientia*, vol. 16, n.º 32, pp. 36-43, 2021, doi: [10.54278/sapientia.v16i32.169](https://doi.org/10.54278/sapientia.v16i32.169).
- [22] Á. Agudelo, R. A. Castiblanco, M. Pérez y C. Y. Buitrago, “Factores asociados con caídas de pacientes y su relación con la valoración de riesgo”, *Repertorio de Medicina y Cirugía*, vol. 33, n.º 1, pp. 41-47, 2024, doi: [10.31260/RepertMedCir.01217372.1147](https://doi.org/10.31260/RepertMedCir.01217372.1147).
- [23] E. Montané y J. Santesmases, “Reacciones adversas a medicamentos”, *Medicina Clínica*, vol. 154, n.º 5, pp. 178-184, 2020, doi: [10.1016/j.medcli.2019.08.007](https://doi.org/10.1016/j.medcli.2019.08.007).
- [24] M. S. Rodríguez, A. Buitrago, N. Varón y R. Quintero, “La satisfacción de los usuarios afiliados al sistema de salud en la ciudad de Ibagué, Colombia”, *Revista Le Bret*, n.º 11, pp. 123-147, 2019, doi: [10.15332/rl.v0i11.2415](https://doi.org/10.15332/rl.v0i11.2415).

Evaluación de funcionalidad de ajuste y propiedades mecánicas de una prótesis transradial para impresión 3D

Evaluation of adjustable functionality and mechanical properties of a transradial mechanical prosthesis for 3D printing

Paola Lizeth Orquiz Avila^{1a}, Erika Guadalupe Meraz Tena¹ ✉ , José Ricardo Oropeza Casillas^{1a}

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, {^aLicenciatura en Ingeniería Biomédica}, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

Este trabajo planteó evaluar la funcionalidad de ajuste de un diseño propuesto para una prótesis mecánica transradial mediante impresión 3D y comparar las propiedades mecánicas de tres materiales: PLA, ABS y PETG. Se obtuvieron medidas antropométricas de EBSCOhost y se ingresaron al diseño para evaluar su funcionalidad de ajuste. Además, se realizaron simulaciones para comparar las propiedades mecánicas de los materiales en diferentes posiciones y fuerzas, con el fin de identificar el material con el mejor desempeño. Posteriormente, se realizó un prototipo con dicho material seleccionado para realizar pruebas de rendimiento con un equipo Mark-10 para compararlas con las simulaciones. Los datos de la evaluación del ajuste mostraron variaciones menores que no supusieron un obstáculo para su funcionalidad mecánica, mientras que las evaluaciones de la tensión von Mises, desplazamientos, deformación, transferencia de calor, compresión, costos de adquisición y accesibilidad, establecieron al PLA como el más idóneo. Finalmente, el prototipo demostró que, tanto en simulación como en laboratorio, las piezas sufrieron un mayor desplazamiento en la posición de supinación. A pesar de los daños mínimos en la unión mano-antebrazo, este diseño ofrece una alternativa accesible, ajustable y económica, además de reducir significativamente el tiempo de fabricación a comparación de los dispositivos tradicionales.

PALABRAS CLAVE: prótesis mecánica; amputación transradial; propiedades mecánicas; impresión 3D.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the adjustable functionality of a proposed design for a transradial mechanical prosthesis for 3D printing and to compare the mechanical properties of 3 material: PLA, ABS, and PETG. Anthropometric measurements were obtained from EBSCOhost and entered the design to evaluate its adjustable functionality. In addition, simulations were performed to compare the mechanical properties of the materials at different positions and forces to identify the material with the best performance. Subsequently, a prototype of the selected material was created for performance testing with a Mark-10 machine to compare with the simulations. The adjustable evaluation data showed minor variations that didn't pose an obstacle to its mechanical functionality while evaluations of von Mises stress, displacements, deformation, heat transfer, compression, acquisition, and accessibility established PLA as the most suitable. Finally, the prototype showed that, both in simulation and in the laboratory, the parts suffered greater displacement in the supination position. Despite minimal damage to the hand-arm joint, this design offers an accessible alternative, adjustable and cost-effective, and significantly reduced the fabrication time compared to traditional devices.

KEYWORDS: mechanical prosthesis; transradial amputee; mechanical properties; 3D printing.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Erika Guadalupe Meraz Tena
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Ave. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: emeraz@uacj.mx

Fecha de recepción: 21 de junio de 2024. **Fecha de aceptación:** 2 de diciembre de 2024. **Fecha de publicación:** 31 de diciembre de 2024.



Licencia Creative Commons



I. INTRODUCCIÓN

Las prótesis son dispositivos que buscan reemplazar parcial o totalmente un miembro ausente del cuerpo [1] para proveer la funcionalidad o la apariencia de la parte del cuerpo faltante. Existen al menos tres clasificaciones: prótesis cosméticas, accionadas por el cuerpo y accionadas de forma externa.

El uso de la impresión 3D ha tenido un gran impacto, particularmente en la elaboración de prótesis. Esta técnica de fabricación, que inició con una prótesis de mano llamada Robohand en 2012, posibilita la elaboración de prótesis más complejas con menor costo y una mayor personalización para un mejor ajuste [2]. Las prótesis impresas en 3D son una solución valiosa debido a su accesibilidad y potencial de personalización, sin embargo, su durabilidad es un tema de preocupación dentro del campo biomédico debido a parámetros como longitud, ancho y el diseño de la cubierta, así como a limitaciones como las propiedades mecánicas del material y el peso que varían de un paciente a otro y que deben considerarse [3], ya que tanto su funcionalidad como su durabilidad dependerán en gran medida de estas.

Dado que las prótesis tienden a ser costosas y tardadas, las personas con niveles socioeconómicos bajos suelen enfrentar dificultades para acceder a ellas. Como respuesta a esto, organizaciones como e-NABLE [4] han desarrollado diseños que permitan la accesibilidad a dispositivos protésicos a través de esta tecnología. No obstante, según resultados obtenidos en proyectos anteriores, se llegó a la conclusión de que las prótesis transradiales tienen una gran área de oportunidad para incrementar la funcionalidad que poseen actualmente, mediante modificaciones de diseño. Debido a esto, el equipo de investigación desarrolló previamente un diseño de una prótesis mecánica transradial a través de SolidWorks para su fabricación con impresión 3D, con la finalidad de brindar a la comunidad de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, la posibilidad de acceder a un diseño personalizado [5] y que cuente con un mayor desempeño.

El objetivo de este trabajo es evaluar el funcionamiento de ajuste de dicho diseño y evaluar las propiedades mecánicas de los materiales disponibles para su impresión.

Como resultado, fue posible garantizar su precisión para un ajuste adecuado según las medidas antropométricas

del usuario y que permitirá agilizar el proceso de fabricación, reducir costos y aumentar la probabilidad de aceptación del dispositivo por parte del usuario. Además, mediante la evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales, se logró identificar si estos realmente pudieran representar una alternativa de bajo costo para fabricantes y usuarios finales

II. METODOLOGÍA

INVESTIGACIÓN DE ASPECTOS GENERALES PARA EVALUAR EL DISEÑO

Se realizó una investigación teórica sobre el funcionamiento y la anatomía simulados en un dispositivo protésico. El objetivo fue identificar las características importantes para comparar diferentes diseños de prótesis de miembro superior a nivel transradial, incluyendo un diseño de un proyecto anterior [5] que se evalúa en este trabajo. Con esta finalidad, se tomó en cuenta la información obtenida en artículos provenientes de EBSCOhost, libros de texto y la página web de e-NABLE [4]. En esta última, se revisaron las características técnicas de los diseños comparables a los del proyecto y cómo se personalizan, ya que cuenta con una considerable variedad de diseños de prótesis de acceso libre. Debido a la gran cantidad de diseños que existen en la actualidad y que cumplen con diferentes funcionalidades acorde a las necesidades que tiene el usuario, tales como uGrip II, SmartHand [6] y Myo Kinisi [7], y dado que hay cierta escasez de proyectos que impliquen el uso de impresión 3D para prótesis mecánicas transradiales gratuitos, se tomó en cuenta el diseño de UnLimbited Arm v2.1- Alfie Edition [8] y RIT Arm [9], presentados por la organización e-NABLE.

COMPARACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DISEÑO EN SOLIDWORKS CON DISEÑOS YA EXISTENTES

Para realizar una comparación confiable, se identificaron los diseños que utilizan la impresión 3D, que son de fácil acceso, son prótesis mecánicas, se accionan con el codo y se utilizan en casos de amputaciones a nivel transradial. En este trabajo, el diseño UnLimbited Arm v2.1- Alfie Edition fue elegido entre las opciones de e-NABLE porque tenía más características similares a las que se buscaban evaluar en el diseño del proyecto anterior. La [Figura 1](#) muestra los diseños utilizados para la comparación.

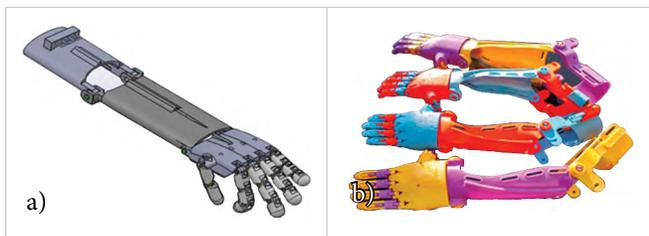


Figura 1. Diseños de prótesis para amputación transradial: a) diseño realizado en [5] y b) UnLimbited Arm v2.1 - Alfie Edition, presentado en [10].

Para comparar las características de ambos diseños, se definieron cinco parámetros a evaluar:

- **Funcionalidad.** Define cómo debe de accionarse y los tipos de movimientos que posee.
- **Construcción.** Establece las características físicas que cumple o debe cumplir cada diseño para que funcione según el creador del diseño o las necesidades del usuario.
- **Personalización.** Se refiere a las medidas antropométricas del paciente que se deben ingresar.
- **Configuración de parámetros.** Es la forma en que los diseños deben configurarse para adaptarse al paciente.
- **Vistas previas.** Indica si el diseño previo a la impresión en 3D puede visualizarse en diferentes ángulos.

ADQUISICIÓN DE MEDIDAS ANTROPOMÉTRICAS

La funcionalidad autoajutable del diseño se evaluó utilizando medidas antropométricas de artículos disponibles en EBSCOhost. Sin embargo, debido a la especificidad de algunos parámetros requeridos por el diseño, se obtuvieron algunas medidas a través de cálculos, ya que no se encontraron en bases de datos, por ejemplo:

Alto del antebrazo. Se calculó a partir de la circunferencia obtenida en una investigación sobre la relación entre las medidas antropométricas y posturas del antebrazo con la fuerza de prensión [11], cuyos participantes tenían una circunferencia de antebrazo promedio de 26.4 ± 1.9 cm. La Ecuación (1) se obtuvo convirtiendo las medidas obtenidas a mm:

$$d = \frac{C}{\pi} = \frac{264 \text{ mm}}{3.1416} \quad (1)$$

donde d es el diámetro, C la circunferencia y se tomó el valor de π como 3.1416. Sin embargo, dado que el diseño está creado para enfocarse en la mitad superior del antebrazo, se consideró usar el radio obtenido a par-

tir del diámetro obtenido en la Ecuación (1), como se muestra en la Ecuación (2), es decir, el resultado de la Ecuación (1) se divide entre dos:

$$d = 2r \rightarrow r = \frac{d}{2} \quad (2)$$

Alto del socket. Se calculó a partir del diámetro de la circunferencia del punto medio del brazo, que es de 250 mm en una comparación del perfil antropométrico entre hombres y mujeres [12]. Para esta medida se utilizó la Ecuación (1), variando únicamente la circunferencia (C) y, dado que solo se considera la mitad superior del brazo, el alto del *socket* es la mitad de la resultante.

$$d = \frac{C}{\pi} = \frac{250 \text{ mm}}{3.1416} \quad (1)$$

Largo del socket. En un estudio para identificar un punto de referencia anatómico con el fin de localizar el nervio radial [13], se midió la distancia desde la punta del acromión hasta la punta del epicóndilo lateral del húmero, obteniendo un promedio de 326.4 mm. Se tomó en cuenta solo la mitad de la distancia del húmero, es decir, el valor obtenido se dividió entre dos, resultando en la Ecuación (3):

$$\text{largo del socket} = \frac{326.4 \text{ mm}}{2} \quad (3)$$

Diámetro de la cuerda elástica. Este parámetro se definió solo para fines didácticos, por lo que se estableció un diámetro de 2.5 mm como máximo. Esta medida fue seleccionada para facilitar la observación directa y la manipulación práctica al ser de tamaño medio.

Diámetro del cuerpo en el perno. Este parámetro se definió solo para fines didácticos, por lo que se estableció un diámetro de 6 mm. Esta medida, empleada para las piezas de unión entre *socket*, antebrazo y mano, representa las perforaciones entre dichas piezas donde se coloca el perno para ensamblar la prótesis. No obstante, hay que tomar en cuenta que este debe ser lo suficientemente robusto para soportar las fuerzas y cargas asociadas a las actividades diarias del usuario final y, sobre todo, que no afecte la comodidad del paciente.

Las medidas antropométricas que se obtuvieron para evaluar este diseño son presentadas en la Figura 2 que se muestra a continuación.

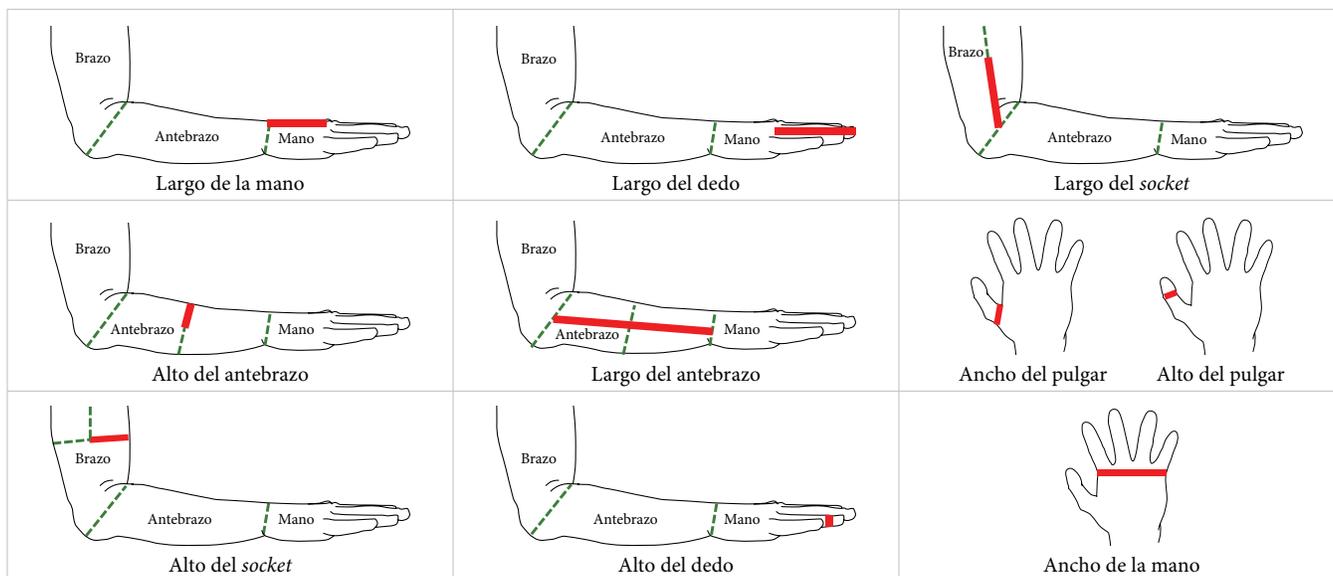


Figura 2. Posiciones para tomar las medidas antropométricas. Dibujos modificados a partir de [14], [15].

EVALUACIÓN DE FUNCIONALIDAD

Para realizar la evaluación de funcionalidad, se ingresaron las medidas antropométricas descritas en la [Tabla 1](#) a un archivo de texto que se encuentra enlazado al diseño de SolidWorks y luego se reconstruyó el diseño para que se autoajustara. Una vez reconstruido, se utilizó la función *medida* de SolidWorks para medir la distancia recta entre dos puntos aproximados y verificar que se aproximaran a las medidas antropométricas ingresadas.

TABLA 1

PARÁMETROS Y MEDIDAS ANTROPOMÉTRICAS UTILIZADAS

PARÁMETROS	MEDIDAS ANTROPOMÉTRICAS* (mm)
Ancho de la mano (a nivel de los nudillos)	74.8
Largo de la mano	106.8
Largo del dedo	71.2
Alto del dedo	17.6
Ancho del pulgar	24.8
Alto del pulgar	18.4
Alto del antebrazo	42.02
Largo del antebrazo	270
Largo del socket	163.2
Alto del socket	39.79
Diámetro de la cuerda elástica	2.5
Diámetro del cuerpo en el perno	6

*Obtenidas de EBSCOhost

DEFINICIÓN DE MATERIALES

En la actualidad, PLA, ABS, Ninja flex®, Nailon y PETG son algunos de los materiales más usados para impresiones en 3D. Para este trabajo, se optó por considerar como opciones para realizar las evaluaciones en simulaciones el PLA por su facilidad de impresión, bajo costo y disponibilidad en el laboratorio Centro Autofinanciable de Prototipos y Arquetipos (CAPA), el ABS por sus buenas propiedades mecánicas y térmicas y el PETG por su potencial para combinar las ventajas del PLA y del ABS en la fabricación de una prótesis, encontrándose este último incluido en los catálogos de filamentos ideales para imprimir dispositivos de e-NABLE [16].

La selección del material se realizó a través de un análisis comparativo teórico por medio de simulaciones en software con las que, bajo ciertas condiciones, es posible evaluar la viabilidad de la utilización de dichos materiales en un prototipo. Con esta finalidad, a través del programa SolidWorks simulation y Ansys, se evaluó el diseño con los tres materiales seleccionados, realizándose los siguientes estudios:

EVALUACIÓN MECÁNICA

En este estudio se tomó en cuenta las propiedades mecánicas de cada material, tales como módulo elástico, proporción de Poisson, módulo de cizallamiento, densidad, resistencia a la tracción, límite elástico y resistencia a la compresión, las cuales están descritas en la [Tabla 2](#).

TABLA 2
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES PROPUESTOS

PARÁMETROS	MATERIALES		
	PLA [17], [18]	ABS [19], [20]	PETG [18]
Módulo elástico (MPa)	3750	2000	2200
Proporción de Poisson	0.3897	0.394	0.33
Módulo de cizallamiento (MPa)	862	318.9	470
Densidad (g/cm ³)	1.252	1.02	1.29
Resistencia a la tracción (MPa)	55	30	53
Límite elástico (MPa)	45	30	47.9
Resistencia a la compresión (MPa)	55	37	55

NOTA. Los valores asignados en las tablas 2 y 4 proceden de publicaciones académicas y de valores predefinidos en la biblioteca de materiales de SolidWorks, por lo que se recomienda consultar las especificaciones técnicas del fabricante del material de interés.

Se aplicaron fuerzas equivalentes hasta 25 kg (245 N) en la palma de la mano, que es la masa máxima que una persona puede manipular al cargar objetos [21], y se definió como soporte fijo la parte del *socket* y del antebrazo, ya que se encuentran sujetos al usuario. Se evaluaron tres posiciones diferentes: pronación (palma hacia abajo), supinación (palma hacia arriba) y posición anatómica o neutral. En cada uno de estas, las fuerzas se aplicaron de forma distribuida y no puntual, como se muestra en la Figura 3.

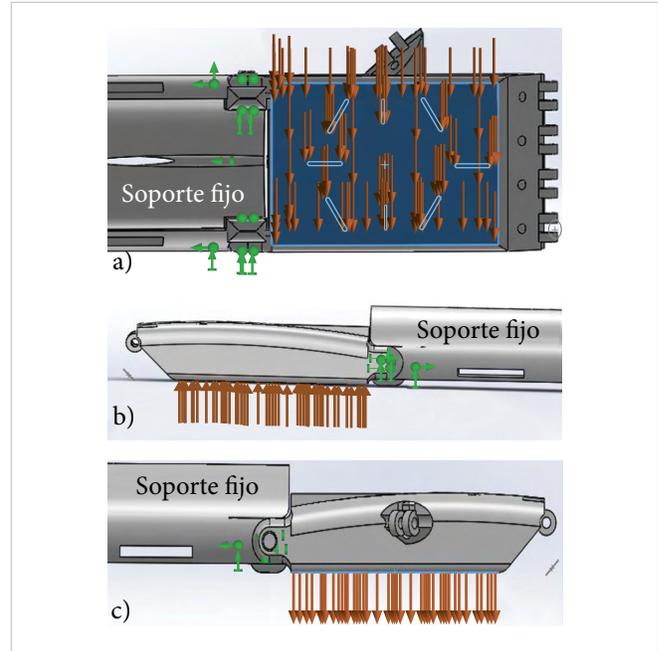


Figura 3. Previsualización de la aplicación de los vectores de carga en la palma de la mano: a) posición anatómica (con la palma en posición neutra o de lado), b) posición de pronación (con la palma hacia abajo) y c) posición de supinación (con la palma hacia arriba).

Los estudios mecánicos realizados tanto en SolidWorks como en Ansys con cada material, se llevaron a cabo con los parámetros detallados en la Tabla 3.

TABLA 3
CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS PARA LOS ESTUDIOS MECÁNICOS EN SOFTWARE

MENÚ	PARÁMETRO:	
	REQUERIDO	ESTABLECIDO
Partes	Selección del material y de las partes del diseño que se incluyen en este estudio.	Materiales: PLA, ABS y PETG. Partes incluidas: antebrazo, mano izquierda, pieza de ensamble para antebrazo-mano, pieza de ensamble para antebrazo- <i>socket</i> y <i>socket</i> bueno.
Conexiones	Interacción de componentes.	Se estableció una interacción global del diseño del tipo vinculada.
Fixturas	Definir cómo se apoya el modelo, es decir, los movimientos que se imponen.	Se establecieron dos geometrías fijas: 1) las perforaciones que se unen del antebrazo y la mano y 2) la pieza de antebrazo y <i>socket</i> .
Cargas externas	Se define el tipo de carga.	Se estableció una fuerza con unidades en el Sistema Internacional (SI) en la cara de la palma y con la dirección cambiando, dependiendo de la posición de la mano. La cantidad de fuerza aplicada fue variando acorde con las pruebas realizadas (de 0 N a 245 N).
Mallado	Definición de la malla.	Se dejó la densidad de mallado que SolidWorks estableció automáticamente.

Las pruebas mecánicas en software se llevaron a cabo para determinar cuál de los materiales poseía un mejor rendimiento y proporcionaría al usuario una expe-

riencia de uso mejorada. Esto se debe a que al evaluar la prótesis mecánicamente se puede identificar cómo esta responde a las fuerzas o cargas aplicadas y se po-

dría garantizar que sea segura y funcional, lo que ofrece directamente al usuario una mayor confianza e independencia al utilizarla, contribuyendo a mejorar su calidad de vida. Para esto, se realizaron cuatro pruebas: tensión von Mises, para identificar el punto de fractura del diseño; desplazamiento, para determinar cuánto se mueven las partes del diseño ante la aplicación de cargas; deformación, equivalente para determinar cuánto se ve afectado el diseño ante la aplicación de cargas, y compresión, para evaluar la resistencia del material cuando se le aplican fuerzas de compresión.

En esta última prueba solo se usó la pieza de la mano, ya que, si bien una prótesis transradial no sufre de fuerzas de compresión, se optó evaluarlo para identificar algún caso especial, como el aplastamiento por objetos pesados. En este caso, se estableció como geometría fija el dorso de la mano para simular una situación en la que esta se encuentra en contacto con una superficie (Figura 4a) y se aplicaron las fuerzas de compresión en la palma para simular el aplastamiento por algún objeto, como una caja (Figura 4b).

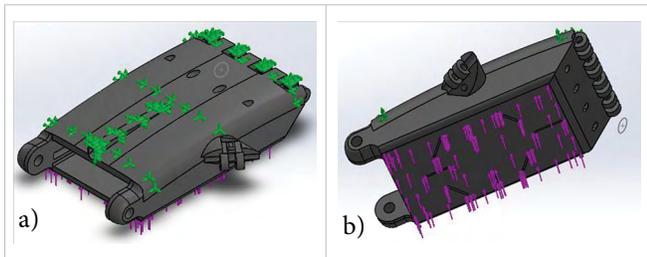


Figura 4. Configuración de parámetros: a) definición de la geometría fija en el dorso y b) definición de la superficie para aplicación de fuerzas en la palma.

EVALUACIÓN TÉRMICA

Ciudad Juárez es una urbe con cambio drástico de las condiciones meteorológicas en periodos cortos de tiempo, por lo que fue importante determinar el comportamiento térmico de los materiales evaluados. Para esto, se consideraron propiedades térmicas, tales como conductividad térmica; coeficiente de dilatación térmica; calor específico; temperatura de transición vítrea, que determina la temperatura en la que ocurre un cambio de fase rígida a flexible; y temperatura máxima de servicio, que corresponde a la temperatura máxima en la que se puede usar un material por periodos prolongados sin verse afectadas sus propiedades mecánicas. Los parámetros de estas propiedades se encuentran en la Tabla 4.

TABLA 4
PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES [17]-[26]

PARÁMETROS	MATERIALES		
	PLA	ABS	PETG
Conductividad térmica (W/mK)	0.13	0.2256	0.29
Coefficiente de dilatación térmica (1/K)	4.1×10^{-5}	7.2×10^{-5}	1.2×10^{-5}
Calor específico (J/kgK)	1180	1386	1470
Temperatura de transición vítrea (°C)	52-60	97	81-91
Temperatura máxima de servicio (°C)	55	88-89	51-64

Se evaluaron las dos temperaturas más extremas que se han registrado en Ciudad Juárez, Chihuahua (-17 °C y 50 °C, aproximadamente) en cada material a través de SolidWorks. Se establecieron las mismas partes del ensamble que en los estudios estáticos para realizar las simulaciones y se aplicaron dos cargas térmicas:

Temperatura. Se le asignó un valor de -17 °C y 50 °C, según el estudio, y se aplicó en la parte superior del diseño suponiendo que el dispositivo es dejado a la intemperie (Figura 5).

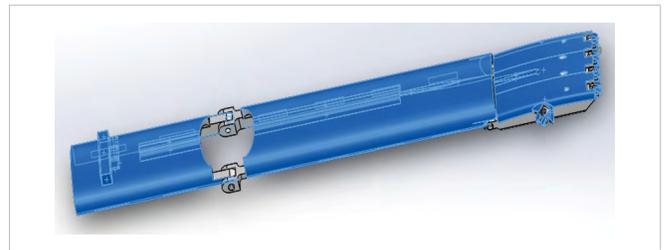


Figura 5. Aplicación de la carga térmica "temperatura".

Convección. Este parámetro se encuentra relacionado con la *transferencia del calor* desde la superficie caliente hacia el aire. Se le asignó un *coeficiente de transferencia de calor* de 25 W/(m²K) y una temperatura ambiente de 25 °C, correspondiente al aire por *convección natural* [32] y se aplicó a todo el ensamble (Figura 6).



Figura 6. Aplicación de la carga térmica "convección".

FABRICACIÓN DE PRÓTESIS

Material. La selección del material se realizó considerando los resultados de las evaluaciones mecánicas, térmicas, costos y disponibilidad. El filamento utilizado fue el PLA, ya que se tuvo la restricción de que era el único material disponible, de los evaluados, en las instalaciones donde se realizó la impresión.

Calidad. Este parámetro depende de las características del equipo y sus valores predeterminados. El laboratorio en donde se imprimió tiene una calidad de media-alta.

Resistencia. Se refiere a la densidad del relleno y se basa en porcentajes. Este parámetro define la solidez de las piezas, en donde el 100 % equivale a un relleno total y el 50 % equivale a la mitad del volumen relleno, lo que reduce el peso y los costos de la pieza. Para este prototipo, se utilizó una resistencia del 50 %.

Todas las piezas se imprimieron en la impresora Ultimaker 2 Extended, aunque a la del antebrazo se le ajustaron sus dimensiones porque este aparato tenía un límite de altura de 30 cm. Para el ensamble, fue necesario corregir las imperfecciones de impresión de las piezas. Los dedos tuvieron que limarse porque las zonas de ensamble eran demasiado anchas y se usaron tornillos comerciales para unir las piezas más grandes del prototipo.

PRUEBAS MECÁNICAS EN LABORATORIO

Las pruebas físicas se realizaron con el equipo de ensayos Mark-10 ESM1500 para evaluar los esfuerzos y la resistencia del diseño en físico bajo determinadas cargas e identificar los desplazamientos resultantes con una fuerza máxima de 10 kilogramos (masas mayores suelen ser manejadas con las dos manos, por lo que estas se distribuyen entre ambas extremidades). Posteriormente, se realizaron estudios de compresión.

Para estas pruebas, se usó una velocidad de 10 mm/min y, se evaluó hasta 100 N, dado que la máquina solo registraba fuerzas con incrementos de 20 N entre lecturas. El material utilizado fue el PLA de Ultimaker proporcionado por el laboratorio.

No obstante, la parte superior del equipo Mark-10 no lograba tocar la prótesis por un límite inferior en el des-

censo de la cruceta para entrar en contacto. Para solucionarlo, se elevó la prótesis con la madera disponible en el laboratorio y se sujetó el antebrazo manualmente. Aunado a esto, se realizaron ajustes en la aplicación de cargas en las posiciones evaluadas, como se detalla a continuación:

- **Supinación:** aunque la fuerza se aplicó en la palma de la mano, la cruceta no hizo contacto completo con la pieza impresa, lo que resultó en que la fuerza no se distribuyó por toda la palma de manera uniforme (Figura 7a).
- **Pronación:** la aplicación de fuerzas se realizó en la parte superior de la mano, no en la palma. Al igual que en la posición de supinación, no tuvo un contacto completo con la cruceta (Figura 7b).
- **Neutral:** se aplicaron las fuerzas en un costado. No obstante, debido a que el punto de conexión del pulgar chocaba con la cruceta en esta posición y no permitía colocar la prótesis lo más centrada posible, se tuvo que colocar en posición neutral correspondiente a una mano derecha, con el punto de conexión hacia abajo (Figura 7c).
- La aplicación de fuerzas de compresión se muestra en la Figura 7d.



Figura 7. Punto de contacto entre la mano y la cruceta de la máquina: a) supinación, b) pronación, c) neutral y d) fuerzas de compresión en supinación.

COMPARACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Finalmente, con los datos obtenidos del rendimiento del dispositivo protésico dentro del laboratorio con el diseño en físico y los datos obtenidos en la simulación usando en ambos el PLA, se realizó una comparación entre estos para identificar si el comportamiento obtenido en condiciones reales correspondía al mostrado en condiciones simuladas y si el diseño era una buena opción como alternativa a los dispositivos actuales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

COMPARACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DISEÑO EN SOLIDWORKS CON DISEÑOS YA EXISTENTES

A partir de los parámetros establecidos para comparar el Alfie [8] y el diseño evaluado, se obtuvo la información que se consideró más relevante para la comparativa, así como se muestra en la [Tabla 5](#).

TABLA 5
COMPARACIÓN ENTRE DISEÑOS DE PRÓTESIS TRANSRADIALES

CARACTERÍSTICAS	DISEÑOS	
	ALFIE EDITION (e-NABLE) [8]	DISEÑO DE PRÓTESIS TRANSRADIAL [5]
Funcionalidad	Es accionado con el codo. Cuenta con solo dos falanges accionables con cable en cada dedo, permitiendo limitados movimientos como el básico cilíndrico.	Es accionado con el codo. Cuenta con todas las falanges anatómicas correspondientes a cada dedo accionables con cable, permitiendo movimientos de agarre como el básico cilíndrico y precisión índice-pulgar.
Construcción	Para el diseño final, la palma de la mano debe de estar a casi 90° del antebrazo.	La palma de la mano y el antebrazo se encuentran en la misma posición.
	Para el ensamblaje, se requiere de la termoformación con agua hirviendo para moldear y ensamblar el antebrazo y el brazalete del tríceps.	No se requiere de la termoformación para moldear la prótesis, sin embargo, en el diseño de Oropeza [5] se dio la recomendación de someter las piezas a un recipiente con agua caliente, introducir las y dejarlas enfriarse para mejorar la rigidez de las piezas.
	Se puede seleccionar si el diseño es para el brazo izquierdo o derecho.	El diseño está enfocado principalmente para el brazo izquierdo.
Personalización	Las medidas antropométricas requeridas son: Longitud de la mano, longitud del antebrazo, perímetro del bíceps, longitud del soporte del manguito y diámetro del perno tensor.	Las medidas antropométricas requeridas son: alto y largo del dedo, ancho y alto del pulgar, ancho y largo de la mano, largo y alto del antebrazo, largo y alto del <i>socket</i> , diámetro del cuerpo en el perno y el diámetro de la cuerda elástica.
Configuración de parámetros	La configuración de los parámetros se realiza a través de la página de e-NABLE en la opción <i>customize</i> donde se hace uso de un software llamado OpenSCAD, donde una vez configurada acorde al usuario, se puede descargar el diseño final listo para la impresión en 3D.	La configuración de los parámetros se realiza a través de un archivo de texto vinculado al diseño y, una vez configurado acorde al usuario, se debe de abrir el diseño en SolidWorks de la prótesis completo y reconstruirse para poder tener el diseño final listo para la impresión en 3D.
Vistas previas	Tiene un visor de vistas previas para cada pieza por individual.	Se puede manipular el archivo en SolidWorks para ver la visualización de la prótesis completa en diferentes vistas. Es posible visualizar cada pieza abriendo sus archivos o seleccionándolos para resaltarlos dentro del diseño completo.

EVALUACIÓN DE FUNCIONALIDAD DEL DISEÑO EN SOLIDWORKS

Una vez obtenidas las medidas antropométricas para la reconstrucción del diseño a través de artículos de investigación, cálculos y selección propia, se ingresaron las

variables en el archivo de texto estructurado de manera que permitía ingresar las medidas antropométricas necesarias y, simultáneamente, contenía las ecuaciones necesarias para calcular las dimensiones requeridas para el autoajuste del diseño. En la [Figura 8](#) se muestran diferentes vistas de la prótesis antes y en la [Figura 9](#) des-

pués de modificar las medidas antropométricas en los archivos de texto.

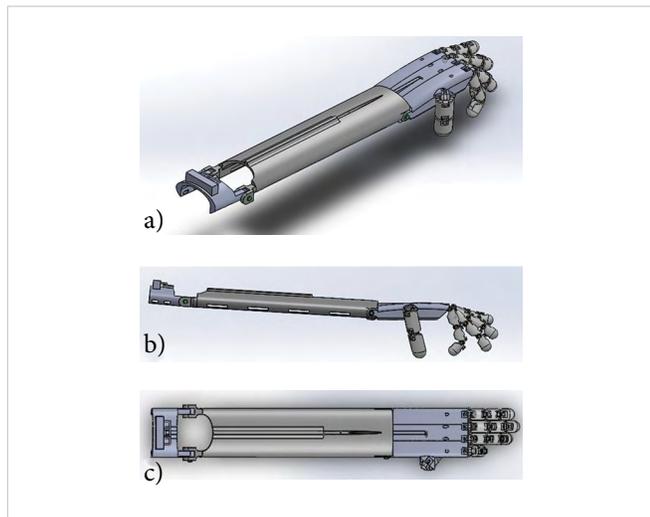


Figura 8. Diseño de prótesis con parámetros aleatorios: a) vista isométrica, b) vista frontal y c) vista superior.



Figura 9. Diseño de prótesis con parámetros modificados: a) vista isométrica, b) vista frontal y c) vista superior.

Una vez que se tuvo el diseño con las medidas actualizadas, se verificó su correcto autoajuste. Con este fin, se empleó la herramienta *medida* de SolidWorks, que permitió medir las dimensiones del diseño actualizada.

Posteriormente, se hizo una comparación entre las medidas obtenidas durante la revisión y las resultantes con la herramienta del programa. Este procedimiento se implementó para determinar si existía alguna variación entre ambos conjuntos de medidas (Tabla 6).

TABLA 6
MEDIDAS ANTROPOMÉTRICAS (mm) [7]-[9], [33], [34]

PARÁMETROS	MEDIDAS ANTROPOMÉTRICAS		VARIACIÓN (mm)
	OBTENIDAS EN EBSCO-HOST	CALCULADAS CON SOLID-WORKS	
Ancho de la mano (a nivel de los nudillos)	74.8	74.8	0
Largo de la mano	106.8	107.85	1.05
Largo del dedo	71.2	71.3	0.1
Alto del dedo	17.6	17.98	0.38
Ancho del pulgar	24.8	24.62	0.18
Alto del pulgar	18.4	18.4	0
Alto del antebrazo	42.02	40.31	1.71
Largo del antebrazo	270	280.42	10.42
Largo del <i>socket</i>	163.2	163.47	0.27
Alto del <i>socket</i>	39.79	33.01	6.78
Diámetro de la cuerda elástica	2.5	2.5	0
Diámetro del cuerpo en el perno	6	6	0

Como se pudo observar en la tabla anterior, existen algunas variaciones entre las medidas ingresadas y las medidas resultantes de la función de SolidWorks. Esto puede deberse a diferentes factores como los que se mencionan a continuación:

- Respecto a la obtención de medidas en el programa: a) la forma en la que el programa o el usuario seleccionan los puntos para tomar las distancias, b) las precisiones y tolerancias que maneja SolidWorks pueden ajustarse de forma automática para evitar algún tipo de error en la construcción y c) cálculos internos que realiza el programa que derivan en cantidades redondeadas y causan variaciones en las dimensiones ingresadas.
- Sesgo en la información teórica: a) dado que no se definió en el trabajo anterior la forma ni las zonas en las que deben de ser tomadas las medidas antropométricas dentro del diseño, no se tiene precisión en la información que se necesita para modificar los parámetros. Es decir, al momento de tomar las medidas, es posible que se considerase un punto diferente al que el creador del diseño tomó para definir cada parámetro para las medidas antropométricas.

Debido a esto se estandarizó la obtención de medidas a través de la función *medida* de SolidWorks, propor-

cionando una guía para tomar las medidas del paciente (Figura 10) y mejorar la precisión del diseño en un am-

biente práctico, considerando las variaciones que se pueden presentar en la toma de medidas antropométricas.

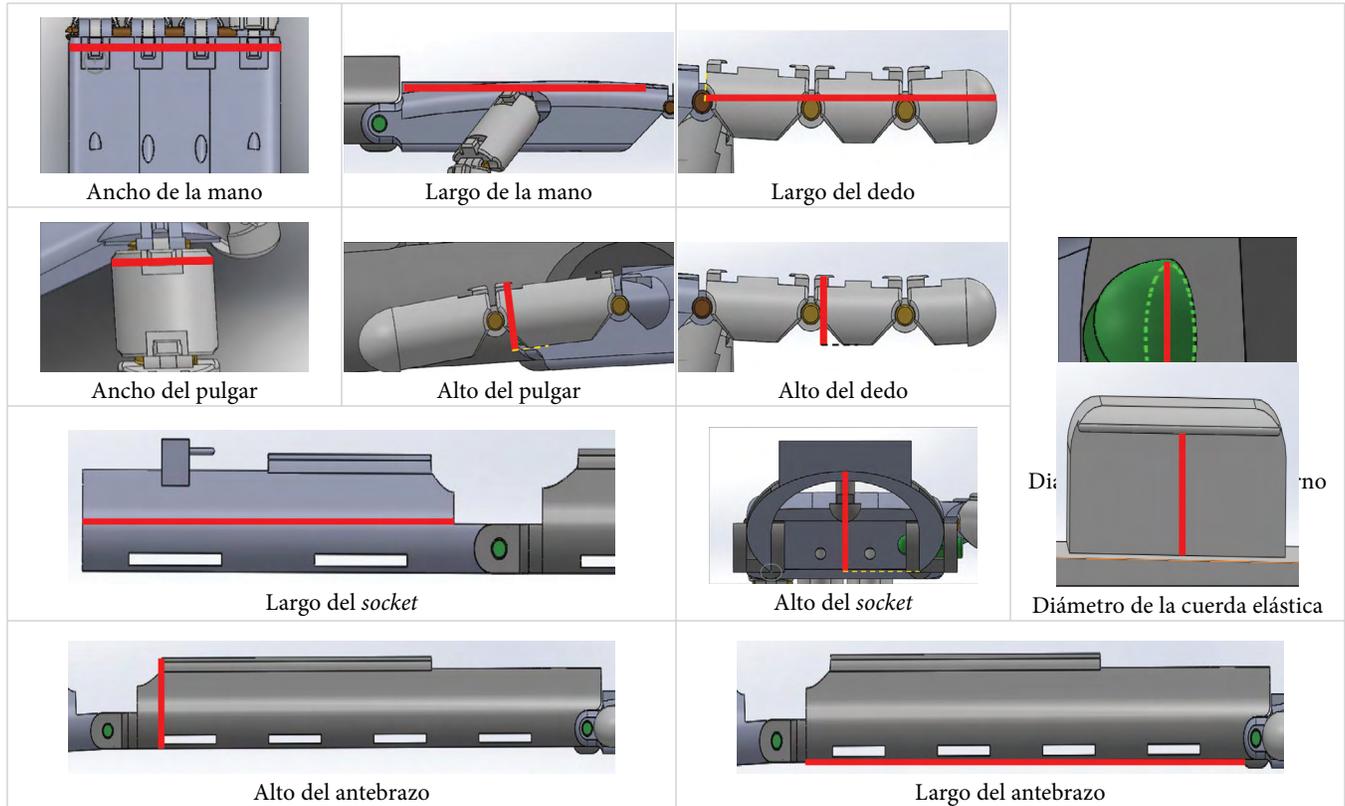


Figura 10. Mediciones tomadas para evaluar la funcionalidad autoajutable.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ESTUDIOS MECÁNICOS DEL PLA, ABS Y PETG EN SOFTWARE

Los estudios de tensión de von Mises, desplazamiento y deformación se realizaron en SolidWorks y Ansys y en tres posiciones de la palma de la mano: pronación, supinación y posición anatómica. Los datos necesarios para realizar los estudios se presentan en la [Tabla 7](#).

TABLA 7

VALORES ESTABLECIDOS PARA LOS ESTUDIOS DE PRUEBAS MECÁNICAS SIMULADAS

PRUEBA	MASA (KG)	FUERZA (N)
0	0	0
1	1	9.8
2	5	49
3	10	98
4	15	147
5	20	196
6	25	245

TENSIÓN DE VON MISES

La tensión en los materiales varió según la posición de la mano, pero con una tendencia similar entre ellos, así como se detectó una posible fractura en la zona de ensamblaje entre la mano y el antebrazo en los tres materiales evaluados (Figura 11 y Figura 12). Las tendencias gráficas de los resultados se muestran desde la Figura 13 a la Figura 15.

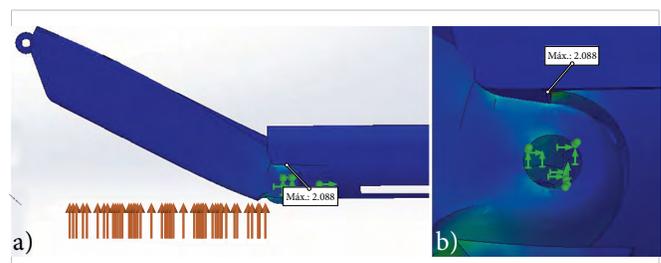


Figura 11. Tensión de von Mises resultante en PETG en SolidWorks: a) simulación de la aplicación de las fuerzas en posición de supinación y b) acercamiento a la zona afectada en la zona de ensamblaje mano-antebrazo.

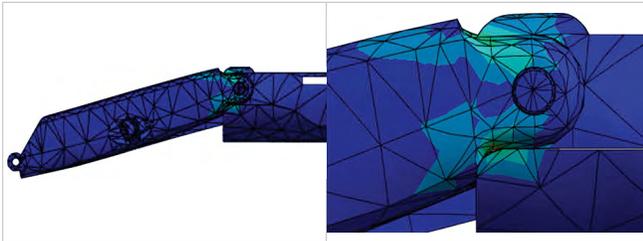


Figura 12. Tensión de von Mises resultante en PETG en Ansys: a) simulación de la aplicación de las fuerzas en posición de supinación y b) acercamiento a la zona afectada en la zona de ensamble mano-antebrazo.

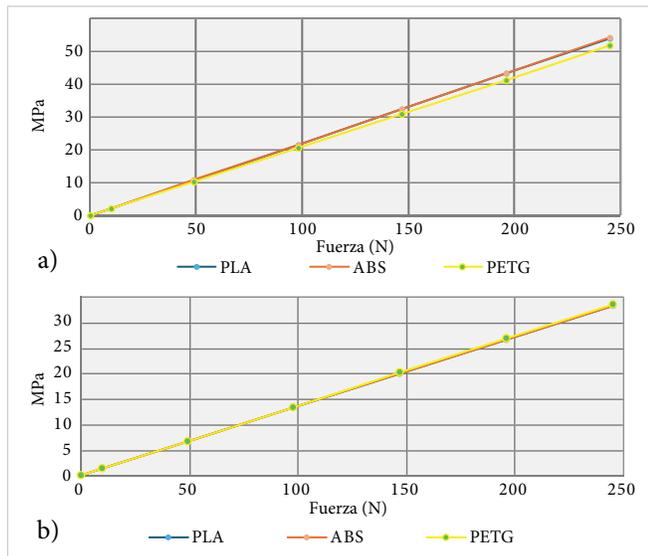


Figura 13. Gráficos resultantes de la tensión de von Mises en posición de pronación obtenida en a) SolidWorks y b) Ansys.

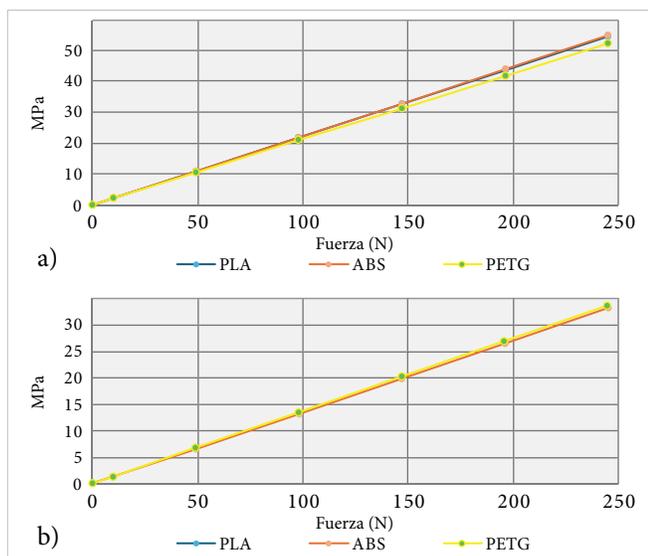


Figura 14. Gráficos resultantes de la tensión de von Mises en posición de supinación obtenida a) en SolidWorks y b) Ansys.

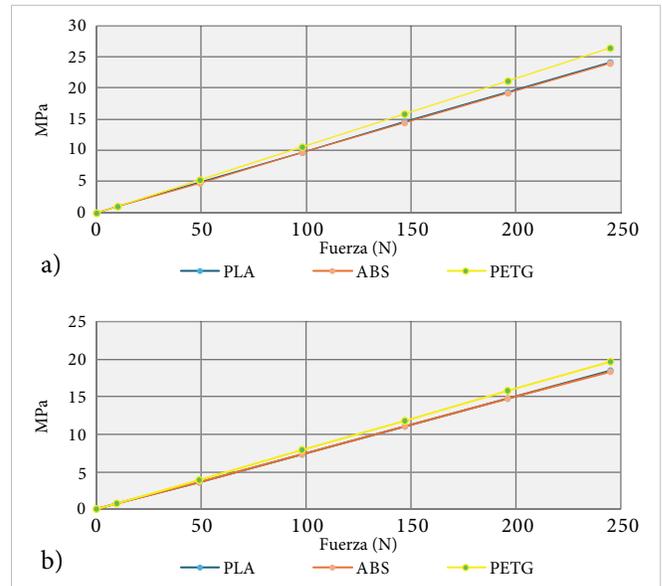


Figura 15. Gráficos resultantes de la tensión de von Mises en posición neutral obtenida en a) SolidWorks y b) Ansys.

Estos resultados mostraron una tendencia entre materiales tan similar que algunas líneas indicativas en los gráficos se superpusieron entre sí.

En este estudio, un valor más bajo indica que el material experimenta menores niveles de tensión, lo cual es crucial para garantizar que el dispositivo no presente fallas. En este caso, el material ABS presentó un mejor comportamiento de forma general.

DESPLAZAMIENTO

Este estudio tuvo el objetivo de determinar cuánto se mueven las piezas después de aplicar fuerzas y determinar si puede cumplir con los requisitos de seguridad y rendimiento que un dispositivo protésico debe de tener. El mayor desplazamiento se produjo en la zona donde se une la palma con las falanges (Figura 16).

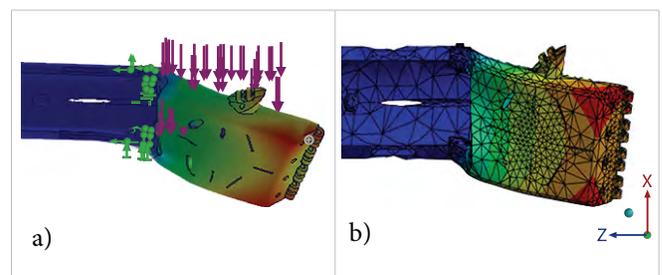


Figura 16. Desplazamiento sobre ABS en posición neutral: a) simulación de la aplicación de las fuerzas en SolidWorks y b) simulación de la aplicación de las fuerzas en Ansys.

Las tendencias gráficas de los resultados se muestran desde la Figura 17 a la Figura 19.

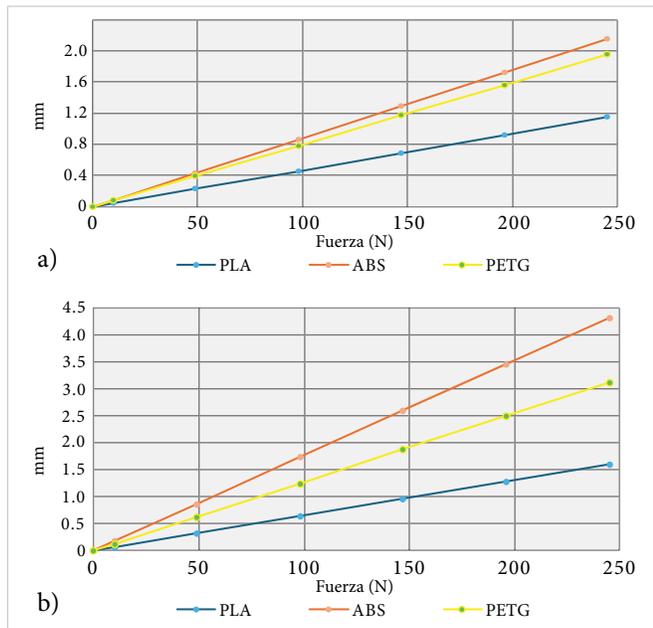


Figura 17. Gráficos resultantes del desplazamiento en posición de pronación obtenida en a) SolidWorks y b) Ansys.

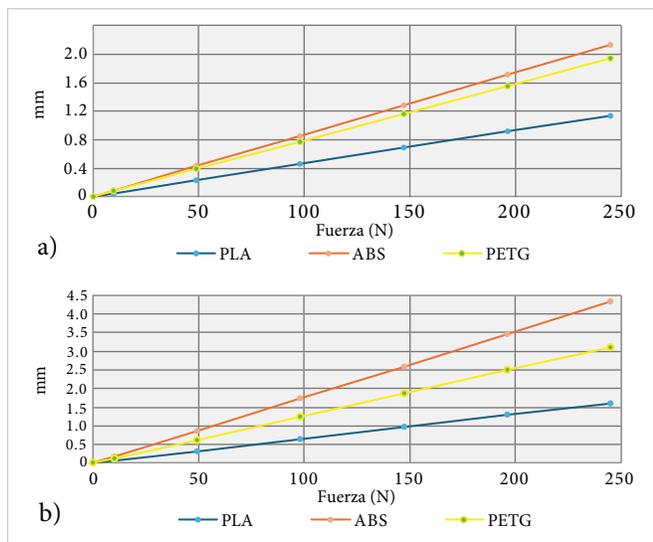


Figura 18. Gráficos resultantes del desplazamiento en posición de supinación obtenida en a) SolidWorks y b) Ansys.

Los hallazgos de este estudio muestran que, aunque las variaciones entre materiales son poco significativas, el PLA es el que tiene el menor desplazamiento.

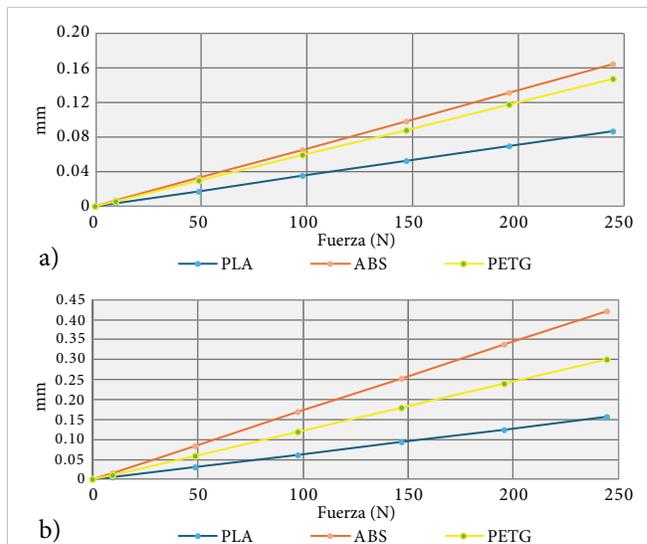


Figura 19. Gráficos resultantes del desplazamiento en posición neutral obtenida en a) SolidWorks y b) Ansys.

DEFORMACIÓN EQUIVALENTE

Con este estudio se busca identificar la cantidad resultante de deformación equivalente al aplicar una tensión, ya que los resultados permiten prever el daño que se puede acumular en un material conforme pasa el tiempo. En las Figuras 20 y 21 se observa que la zona con una mayor afectación se encuentra en la parte inferior de la parte de ensamble entre el antebrazo y la mano.



Figura 20. Deformación resultante en PLA en SolidWorks: a) simulación de la aplicación de las fuerzas en posición de pronación y b) acercamiento a la zona afectada en la parte inferior de la zona de ensamble mano-antebrazo.

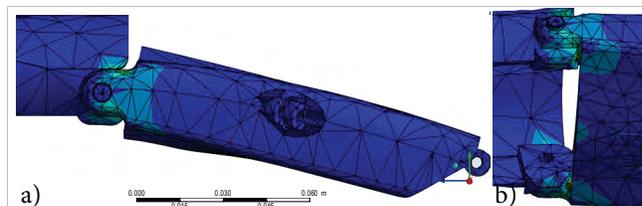


Figura 21. Deformación resultante en PLA en Ansys: a) simulación de la aplicación de las fuerzas en posición de pronación y b) acercamiento a la zona afectada en la parte inferior de la zona de ensamble mano-antebrazo.

Las representaciones gráficas de las deformaciones sufridas en cada material según las fuerzas aplicadas se muestran de la [Figura 22](#) a la [Figura 24](#).

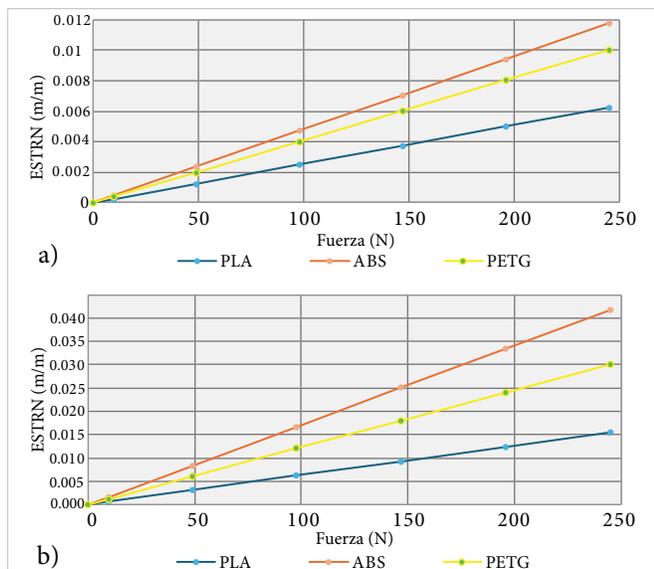


Figura 22. Gráficos resultantes de deformación en posición de pronación obtenida en a) SolidWorks y b) Ansys.

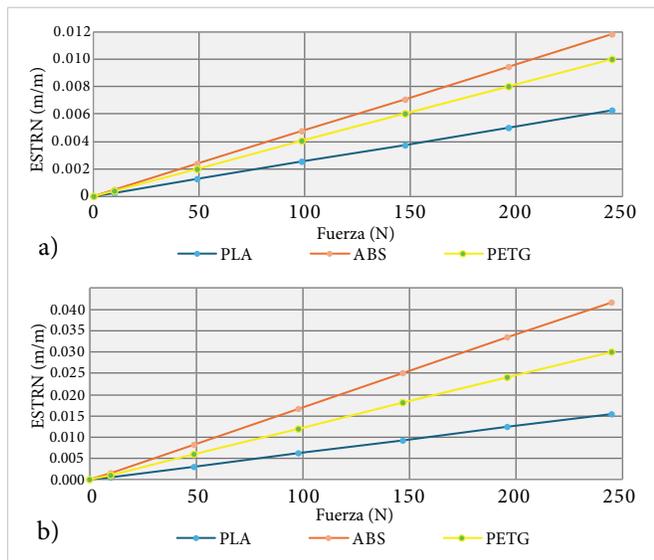


Figura 23. Gráficos resultantes de deformación en posición de supinación obtenida en a) SolidWorks y b) Ansys.

Estos datos muestran que aquel que posee un mejor comportamiento es el PLA.

La principal variación en los datos entre programas para cada estudio se puede generar debido a los cálculos internos dentro de cada programa. A diferencia de SolidWorks, donde se ingresan manualmente todas las propiedades mecánicas necesarias, Ansys solamente

solicita dos propiedades y, a partir de estas, realiza los cálculos de forma automática para los datos adicionales. Si bien los resultados entre programas mostraron diferencias considerables entre magnitudes para un mismo estudio, las tendencias generales en el desempeño de los materiales son consistentes.

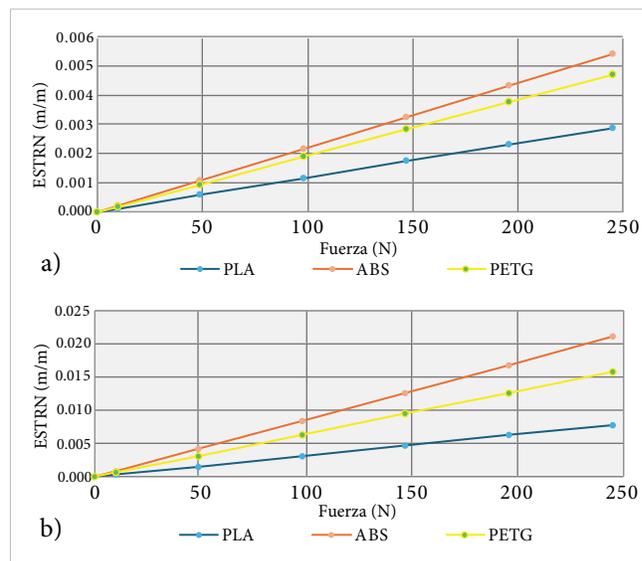


Figura 24. Gráficos resultantes de deformación en posición neutral obtenida en a) SolidWorks y b) Ansys.

COMPRESIÓN

Debido a que ambos programas presentaron tendencias similares, a partir de este estudio se decidió utilizar solamente SolidWorks. Al aplicarle fuerzas de compresión, se observó que la parte más afectada se encuentra en la parte inferior de la palma de la mano ([Figura 25](#)), que es donde se encuentra hueca para que los hilos tensores puedan pasar sin que se encuentren expuestos y evitar que se dañen al manipular objetos. Los resultados tanto de estrés von Mises como el desplazamiento ante la aplicación de fuerzas de compresión se encuentran en la [Tabla 8](#).

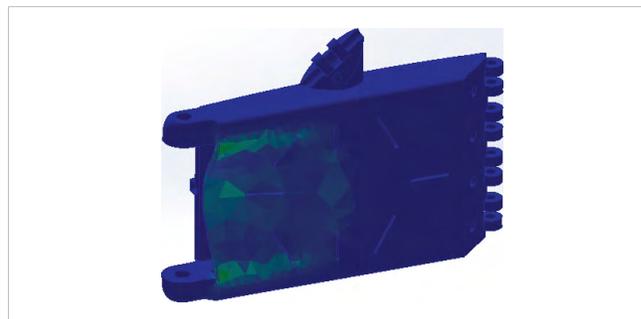


Figura 25. Compresión resultante de la aplicación de las fuerzas.

TABLA 8
RESULTADOS DE TENSIÓN DE VON MISES Y DESPLAZAMIENTO ANTE FUERZAS DE COMPRESIÓN EN PLA, ABS Y PETG EN SUPINACIÓN

MATERIAL	FUERZA (N)	COMPRESIÓN EN SUPINACIÓN	
		TENSIÓN MPa (N/mm ²)	DESPLAZAMIENTO (mm)
PLA	0	0	0
	9.8	0.460	0.0058
	49	2.301	0.0288
	98	4.601	0.0576
	147	6.902	0.0863
	196	9.202	0.1150
	245	11.506	0.1440
ABS	0	0	0
	9.8	0.460	0.0108
	49	2.298	0.0539
	98	4.595	0.1080
	147	6.893	0.1620
	196	9.191	0.2160
	245	11.488	0.2700
PETG	0	0	0
	9.8	0.468	0.0099
	49	2.340	0.0495
	98	4.680	0.0991
	147	7.019	0.1490
	196	9.359	0.1980
	245	11.699	0.2480

Acorde a los resultados obtenidos, el material que posee un menor desplazamiento ante cargas de compresión es el PLA, pero el que resiste mejor la tensión de von Mises es el ABS.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ESTUDIOS TÉRMICOS DEL PLA, ABS Y PETG

Un dispositivo protésico debe de ser hecho con un material que no llegue a ocasionar daños a la piel del paciente por la concentración del calor, es decir, resultados más bajos son más deseables, ya que indica que el material resiste mejor la transferencia del calor. Para esto, se seleccionaron cinco nodos dentro del antebrazo, que es la pieza principal que se encuentra en contacto con el usuario y que se muestran en la [Figura 26](#).

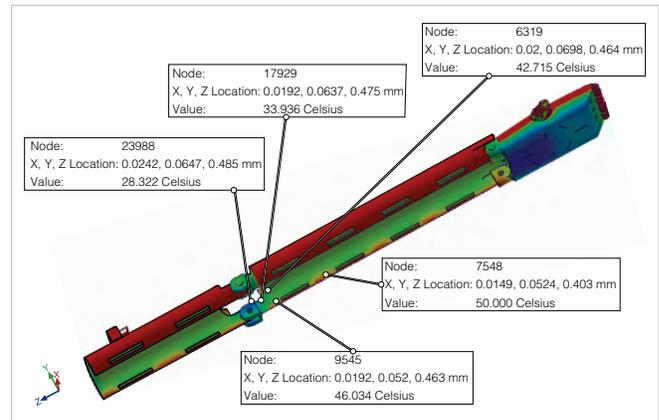


Figura 26. Número y ubicación X, Y, Z de los nodos utilizados para los tres materiales. Los valores obtenidos corresponden al PETG.

Cada nodo corresponde a un color diferente en la escala con la que se identificaban las temperaturas que adquirirían. Las temperaturas localizadas en cada nodo cuando el dispositivo se encontraba expuesto a un máximo de 50 °C y a un mínimo de -17 °C se detallan en la [Tabla 9](#).

TABLA 9
TEMPERATURAS ALCANZADAS EN CADA NODO EVALUADO APLICANDO -17 °C Y 50 °C RESPECTIVAMENTE

NODOS UTILIZADOS	TEMPERATURA					
	MÁXIMA 50 °C			MÍNIMA 50 °C		
	PLA	ABS	PETG	PLA	ABS	PETG
23988	25.8	27.3	28.3	23.6	21.2	19.4
17929	29.5	32.4	33.9	17.4	12.6	10.0
6319	38.8	41.5	42.7	1.9	-2.7	-4.8
9545	43.8	45.4	46.0	-6.5	-9.2	-10.3
7548	50.0	50.0	50.0	-17.0	-17.0	-17.0

Temperaturas cercanas a 25 °C indican que el material es más eficiente para resistir la transferencia del calor y, por ende, mantiene temperaturas más estables en los nodos evaluados. Como resultado, se obtuvo que el PLA era un mejor aislante térmico, lo cual se debe principalmente a que la conductividad térmica del PLA es menor que la del ABS y el PETG.

SELECCIÓN DEL MATERIAL IDÓNEO

Para seleccionar el material con el cual se realizaría la impresión en 3D, se contemplaron los diferentes resultados obtenidos en los estudios previamente hechos, es decir, los de tensión de von Mises, desplazamiento, deformación equivalente, compresión y térmicos.

Evaluaciones mecánicas simuladas

En todas las simulaciones, se encontró que las variaciones en cada estudio entre los materiales fueron sumamente pequeñas. El ABS por excelencia suele ser mejor que el PLA, pero normalmente presenta más dificultades al momento de imprimir, además de que suele desprender gases nocivos [35].

Entre el PETG y el PLA, el primero tiene mejores propiedades mecánicas que el PLA, es por esto por lo que este presenta un mejor rendimiento con respecto a los niveles de tensión que el PLA, pero por debajo del ABS.

Con respecto al desplazamiento y la deformación, los gráficos de las Figuras 17-19 y 22-24 muestran que el PLA es el material que sufre un menor desplazamiento en comparación con el PETG y el ABS. Sin embargo, se debe de tomar en cuenta que una de las propiedades del PETG es una mayor flexibilidad, por lo que presentará mayores deformaciones y desplazamientos que el PLA.

Evaluación térmica

Un aspecto importante para considerar en los materiales usados para una prótesis es que las propiedades mecánicas de un material se encuentran directamente afectadas por la temperatura a la que se encuentra sometido. El PLA es un material comúnmente utilizado para la impresión en 3D por la facilidad de impresión que posee, además de ser bastante asequible. Sin embargo, su *temperatura de transición vítrea*, es decir, aquella en la que un material pasa de un estado duro a otro más elástico, y su *temperatura máxima de servicio* se encuentra en rangos tan cercanos (55 °C a 60 °C y de 45 °C a 55 °C, respectivamente), ocasionan que este material deba de ser vigilado por el usuario, ya que, ante las temperaturas más altas que Ciudad Juárez ha tenido, la prótesis podría verse afectada.

El PETG es un material muy resistente a condiciones meteorológicas y su temperatura de transición vítrea es del rango de 81 °C a 91 °C. También, la temperatura máxima de servicio que posee (de 51 °C a 64 °C) muestra que hasta este nivel el material puede funcionar sin sufrir modificaciones en sus propiedades mecánicas, demostrando que a mayores temperaturas, sus propiedades mecánicas pueden sufrir alteraciones que hagan que el material pudiera ser menos idóneo para dispositivos protésicos usados en lugares con altas temperaturas.

El ABS, en comparación del PLA y el PETG, muestra una mayor tolerancia con respecto a las temperaturas, ya que su temperatura de transición vítrea es de 97 °C y la temperatura máxima de servicio es de 90 °C. Esto hace del ABS un material muy resistente a las altas temperaturas.

Costos y disponibilidad

Con respecto a los costos evaluados teóricamente, el filamento del PETG resultó ser el más económico. Sin embargo, el único material disponible dentro de las instalaciones del laboratorio CAPA al momento de la realización del trabajo fue el PLA. Por esto, aquellos que no se encontraron disponibles sufrieron un aumento en el costo, ya que hubiera sido necesario comprar el filamento por terceros y evaluar el costo por el uso de la impresora dentro de este laboratorio, aunado a un mayor de tiempo de espera por el filamento y la impresión.

Finalmente, considerando todos estos aspectos, se optó por utilizar el PLA para la fabricación del diseño protésico.

FABRICACIÓN DE PRÓTESIS

Acorde a los resultados previos, se optó por imprimirlo en PLA en el laboratorio de CAPA con una calidad media-alta y una resistencia del 50 %.

Debido a que la impresora que tiene el CAPA cuenta con una altura máxima de 30 cm, fue necesario reducir la longitud ingresada del largo del antebrazo a 230 mm ya que, si bien el largo se mide hasta por debajo del codo, la pieza tiene puntos de unión con el *socket* y la mano que agregan longitud y se deben considerar al imprimir como parte de la pieza del antebrazo. Esto redujo la longitud de la medida antropométrica inicial en 40 mm. La longitud resultante con esta modificación fue de 289.5 mm, quedando por poco dentro del límite de altura. El costo de impresión fue de \$ 1330.00 MXN y esta actividad tomó 10 días naturales.

El diseño fue elaborado para que se autoajuste a las medidas del paciente, lo cual se logró al ingresar las medidas a un archivo de texto enlazado al diseño de SolidWorks y se reconstruyó. No obstante, las medidas resultantes de las piezas impresas para este proyecto se encuentran descritas en la [Figura 27](#).

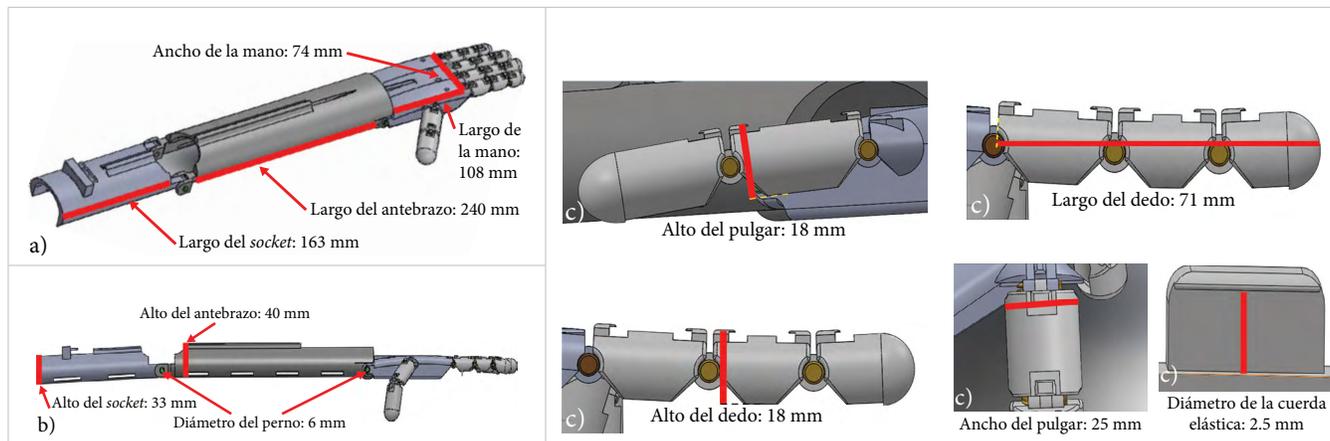


Figura 27. Medidas resultantes de la impresión: a) vista isométrica, b) vista frontal y c) acercamiento a las partes de las falanges.

El diseño de la prótesis impreso fue nombrado Extremidad Variable y Adaptable (EVA) y se encuentra en la Figura 28.



Figura 28. Ensamble completo de la prótesis EVA.

PRUEBAS MECÁNICAS FÍSICAS REALIZADAS EN LABORATORIO

Se realizaron pruebas de desplazamiento en posición anatómica, supinación y ante fuerzas de compresión, y se evaluó el desplazamiento en la posición de pronación. No obstante, no se pudo obtener lecturas debido a que el sensor no era capaz de registrar datos, aunque la pieza sí estaba sufriendo de un desplazamiento por la aplicación de fuerzas.

Al considerar una velocidad de 10 mm/min, que fue la velocidad mínima que podía ser utilizada en el equipo, se tomó una gran cantidad de datos, por lo que se optó por obtener la media de todos los valores resultantes de desplazamiento en cada fuerza aplicada. En la Tabla 10 se detallan los datos obtenidos en todas las demás posiciones.

Estos resultados demostraron que donde hubo un mayor desplazamiento fue en la posición de supinación, con un valor máximo de 8.2771 mm.

TABLA 10

DESPLAZAMIENTOS RESULTANTES DEL PLA EN 3 POSICIONES

Fuerza (N)	DESPLAZAMIENTO (mm)		
	POSICIÓN ANATÓMICA	SUPINACIÓN	COMPRESIÓN
0	0.2308	0.0089	0.0424
20	0.5433	2.3119	0.2331
40	0.6613	5.2158	0.4807
60	0.8095	6.3635	0.7042
80	0.9736	7.4971	0.9023
100	1.1617	8.2771	1.116

Nota. Los valores registrados se encuentran sujetos a las condiciones con las que se realizaron las pruebas.

En cuanto a los daños generados en la prótesis, al realizar la evaluación de compresión no se detectó algún daño visible en la pieza. Por otro lado, en la evaluación de la posición de supinación, la pieza de la mano presentó fisuras en el punto de unión de la mano y el antebrazo (Figura 29), tales como se predijeron en la simulación.

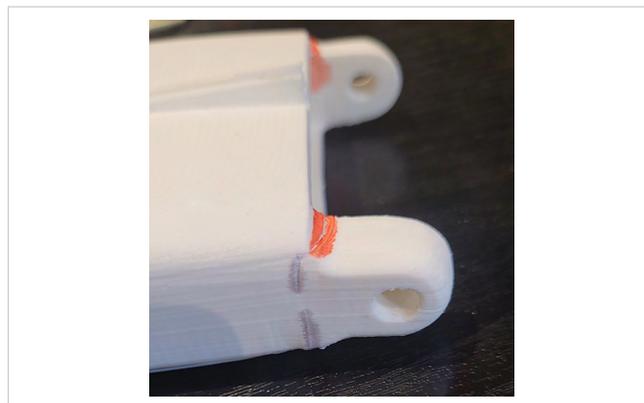


Figura 29. Daños resultantes en la pieza de la mano. En naranja se encuentran marcadas las fisuras y en gris la zona en donde se encontró un daño antes de convertirse en fisura.

COMPARACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS

De forma general, los resultados de las evaluaciones en laboratorio muestran diferencias a los resultantes en simulación. Esto se debe a que los datos utilizados para realizar las simulaciones se obtuvieron de diversas fuentes, por lo que la información podría variar debido al fabricante y las especificaciones de los materiales utilizados en el laboratorio. Además, no todas las fuerzas se aplicaron en la palma de la mano como en la simulación dado que la máquina poseía una limitación importante, ya que solo puede aplicar fuerzas en una dirección vertical (de arriba hacia abajo).

Los desplazamientos que se produjeron tanto en la simulación como en el laboratorio se muestran en la **Tabla 11**. Las representaciones gráficas se encuentran en la **Figura 30**. Se debe destacar que los datos obtenidos no permitieron una comparación directa porque en las fuerzas evaluadas en la simulación se consideraron los kilogramos que se podrían cargar, mientras que el equipo del laboratorio se encontraba limitado a un aumento de 20 N en cada medición. Por lo tanto, para determinar la posición con mayor desplazamiento se tomó en cuenta las fuerzas más altas evaluadas en cada escenario.

TABLA 11
COMPARATIVA DE LOS DESPLAZAMIENTOS (mm) RESULTANTES ENTRE LA SIMULACIÓN Y EL LABORATORIO BAJO DETERMINADAS CARGAS

SIMULACIÓN				LABORATORIO			
FUERZA (N)	POSICIÓN ANATÓMICA	SUPINACIÓN	COMPRESIÓN	FUERZA (N)	POSICIÓN ANATÓMICA	SUPINACIÓN	COMPRESIÓN
0	0	0	0	0	0.2308	0.0089	0.0424
9.8	0.0063	0.0642	0.00576	20	0.5433	2.3119	0.2331
49	0.0313	0.3211	0.0288	40	0.6613	5.2158	0.4807
98	0.0626	0.6421	0.0576	60	0.8095	6.3635	0.7042
147	0.094	0.9632	0.0863	80	0.9736	7.4971	0.9023
196	0.1253	1.2843	0.115	100	1.1617	8.2771	1.116
245	0.1566	1.6054	0.144	-	-	-	-

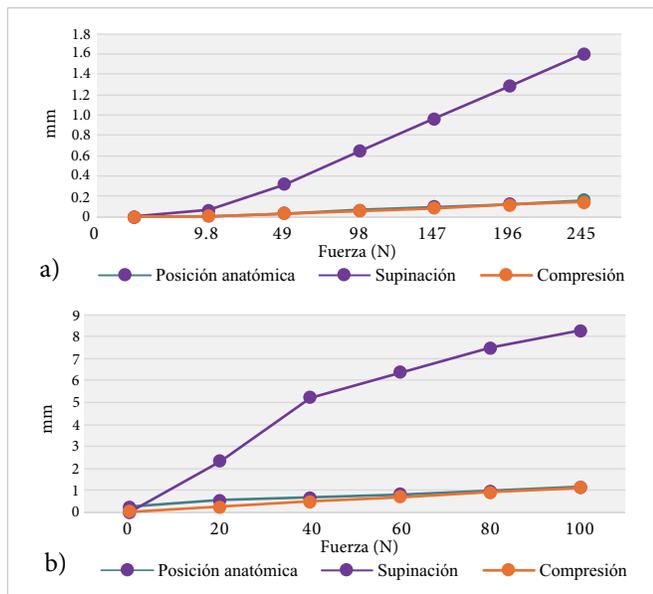


Figura 30. Gráficos resultantes del desplazamiento en a) simulación y b) laboratorio.

Los resultados del laboratorio, así como los de las simulaciones, han demostrado que entre las posiciones que

se evaluaron en el laboratorio bajo las condiciones previamente mencionadas, la que mostró un mayor desplazamiento al aplicar las cargas fue cuando el prototipo se encontraba en supinación. De igual forma, los daños en las piezas ocurrieron principalmente en el punto de unión de la mano y el antebrazo.

IV. CONCLUSIONES

En esta investigación se realizó una evaluación de la función de ajuste del diseño de una prótesis mecánica transradial para impresión en 3D usando medidas antropométricas disponibles en EBSCOhost y las medidas resultantes con la herramienta de SolidWorks, demostrando un ajuste con variaciones mínimas que no obstaculizan la funcionalidad mecánica del diseño.

Por otro lado, debido a la preocupación sobre el rendimiento de los materiales empleados, se evaluaron tres materiales: PLA, ABS y PETG. Los hallazgos indicaron que el ABS tenía un comportamiento superior, seguido de cerca del PETG y finalmente, el PLA. La compara-

ción de los resultados físicos y los simulados del PLA mostró que, en ambas, la posición que sufrió un mayor desplazamiento fue la supinación, mientras que la zona más afectada con daños mínimos fue en la unión entre la mano y el antebrazo.

Esto confirma que el diseño evaluado representa una oportunidad más amplia para permitir mejorar la calidad de vida de las personas que lo requieren. Esto es debido a que, principalmente, ayuda a que el nivel económico de su usuario no represente un impedimento para realizar sus actividades diarias, así como también que el uso de la tecnología de impresión 3D disminuye los tiempos de entrega del dispositivo de asistencia, permitiendo que se reduzca la posibilidad de rechazo de este.

Sin embargo, aunque en este trabajo se hizo uso del PLA, se determinó el PETG como un material altamente recomendable, ya que tuvo un rendimiento muy parecido al ABS sin sus desventajas más importantes, como los gases nocivos y su dificultad de impresión; soporta mejores temperaturas que el PLA y es relativamente nuevo dentro del campo de las órtesis y prótesis. Por tanto, se recomienda emplearlo en una futura línea de investigación y realizar pruebas de funcionalidad mecánica, así como también modificar los parámetros y a las tolerancias de impresión para los problemas de ensamble de las falanges, acorde al material que se desee utilizar, con el fin de evitar un trabajo post impresión.

REFERENCIAS

- [1] R. Zambudio, *Prótesis, órtesis y ayudas técnicas*. Barcelona: Elsevier Masson, 2009.
- [2] K. Wendo *et al.*, “Open-Source 3D Printing in the Prosthetic Field—The Case of Upper Limb Prostheses: A Review”, *Machines*, vol. 10, n.º 2, 2022, doi: [10.3390/machines10060413](https://doi.org/10.3390/machines10060413).
- [3] E. Guffey, *After Universal Design: The Disability Design Revolution*, 1.ª ed. Londres: Bloomsbury Visual Arts, 2023.
- [4] “What is e-NABLE?”. Enabling the Future. Accedido: sept. 21, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://enablingthefuture.org/>
- [5] J. R. Oropeza, “Diseño de prótesis mecánica para impresión 3D para suplir la ausencia de un miembro superior a nivel transradial”, tesis, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, 2022, inédita.
- [6] C. L. Semasinghe, D. G. K. Madusanka, R. K. P. S. Ranaweera R. A. R. C. Gopura, “Transradial prostheses: Trends in development of hardware and control systems”, *Int. J. Med. Robot.*, vol. 15, n.º 1, art. e1960, 2019, doi: [10.1002/rcs.1960](https://doi.org/10.1002/rcs.1960).
- [7] “Upper Limb Prosthetic Solutions”. Steepergroup.com. Accedido: oct. 26, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.steepergroup.com/prosthetics/upper-limb-prosthetics/>
- [8] Team_UnLimbited. “The unlimbited arm v2.1 - Alfie Edition”. Thingiverse.com. Accedido: oct. 26, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:1672381>
- [9] “THE RIT ARM”, Enabling the future. Accedido: oct. 26, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/rit-arm/>
- [10] J. Simon. “Which Design?”. e-NABLE Devices Catalog. Accedido: feb. 18, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hub.e-nable.org/s/e-nable-devices/wiki/Which+Design%3F>
- [11] M. M. Alam, I. Ahmad, Y. Kumar, A. Samad, Y. Upadhyay y A. A. Khan, “Investigation of the Relationship Between Anthropometric Measurements and Forearm Postures with Grip Strength in Young Adults”, *J Musculoskelet Res*, vol. 25, n.º 4, dic. 2022, doi: [10.1142/S021895772250004X](https://doi.org/10.1142/S021895772250004X).
- [12] I. R. Musa, S. M. Omar y I. Adam, “Mid-upper arm circumference as a substitute for body mass index in the assessment of nutritional status among adults in eastern Sudan”, *BMC Public Health*, vol. 22, n.º 1, dic. 2022, doi: [10.1186/s12889-022-14536-4](https://doi.org/10.1186/s12889-022-14536-4).
- [13] A. Patra, P. Chaudhary, V. Malhotra y K. Arora, “Identification of most consistent and reliable anatomical landmark to locate and protect radial nerve during posterior approach to humerus: A cadaveric study”, *Anat Cell Biol*, vol. 53, n.º 2, pp. 132-136, jun. 2020, doi: [10.5115/acb.20.075](https://doi.org/10.5115/acb.20.075).
- [14] “Amplitud de Movimiento”. TAFAY y Cursos. Accedido: feb. 17, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tafaycursos.com/cuerpo-humano/amplitud-de-movimiento>

- [15] J. González. “Dibujo de manos: lo básico”. TTAMAYO.com. Accedido: feb. 17, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ttamayo.com/2020/11/dibujo-de-manos-basico/>
- [16] 3DUniverse. “3D Universe Terrafilem PETG Filament”. shop3duniverse.com. Accedido: feb. 18, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://shop3duniverse.com/collections/3d-universe-terrafilem-materials>
- [17] H. Kamel, O. Harraz, K. Azab y T. Attia, “Developing an Optimized Low-Cost Transtibial Energy Storage and Release Prosthetic Foot Using Three-Dimensional Printing”, *J Eng Sci Med Diagn Ther*, vol. 3, n.º 2, art. 21103, may. 2020, doi: [10.1115/1.4046319](https://doi.org/10.1115/1.4046319).
- [18] H. W. Huysamen, W. A. Kinnear, T. E. Fonternel, E. Turton, I. Yadroitsava y I. Yadroitsev, “3D Printed Laryngoscope For Endotracheal Intubation”, *S Afr J Ind Eng*, vol. 31, no. 3, pp. 209-217, nov. 2020, doi: [10.7166/31-3-2446](https://doi.org/10.7166/31-3-2446).
- [19] G. K. Jones y R. Stopforth, “Mechanical Design and Development of the Touch Hand II Prosthetic Hand”, *R&D Journal*, vol. 32, pp. 23-34, en. 2016.
- [20] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang y J. Zhao, “Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS”, *Materials*, vol. 8, n.º 9, pp. 5834-5846, sept. 2015, doi: [10.3390/ma8095271](https://doi.org/10.3390/ma8095271).
- [21] *Factores de riesgo ergonómico en el Trabajo-Identificación, análisis, prevención y control. Parte I: Manejo manual de cargas*, NOM-036-1-STPS-2018, STPS, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/7468/stps11_C/stps11_C.html
- [22] S. Islam, G. Bhat y P. Sikdar, “Thermal and acoustic performance evaluation of 3D-Printable PLA materials”, *J. Build. Eng.*, vol. 67, art. 105979, 2023, doi: [10.1016/j.jobe.2023.105979](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105979).
- [23] B. Rădulescu *et al.*, “Thermal Expansion of Plastics Used for 3D Printing”, *Polymers*, vol. 14, n.º 15, art. 3061, jul. 2022, doi: [10.3390/polym14153061](https://doi.org/10.3390/polym14153061).
- [24] MSE Supplies. “List of Thermal Expansion Coefficients (CTE) for Natural and Engineered Materials”. MSESUPPLIES.COM. Accedido: feb. 27, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.msesupplies.com/pages/list-of-thermal-expansion-coefficients-cte-for-natural-and-engineered-materials>
- [25] O. Zmeskal, L. Marackova, T. Lapcikova, P. Mencik y R. Prikryl, “Thermal properties of samples prepared from polylactic acid by 3D printing”, *AIP Conf. Proc.*, vol. 2305, n.º 2, 2020, doi: [10.1063/5.0033857](https://doi.org/10.1063/5.0033857).
- [26] M. Malvezzi, Z. Iqbal, M. C. Valigi, M. Pozzi, D. Prattichizzo y G. Salvietti, “Design of Multiple Wearable Robotic Extra Fingers for Human Hand Augmentation”, *Robotics*, vol. 8, n.º 4, dic. 2019, doi: [10.3390/ROBOTICS8040102](https://doi.org/10.3390/ROBOTICS8040102).
- [27] Dielectric Manufacturing. “PETG Characteristics”. dielectricMFG.COM. Accedido: feb. 27, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dielectricmfg.com/resources/knowledge-base/petg/>
- [28] J. Suder, Z. Bobovsky, J. Mlotek, M. Vocetka, Z. Zeman y M. Safar, “Experimental Analysis of Temperature Resistance of 3D Printed PLA Components”, *MM Science Journal*, vol. 2021, n.º 1, pp. 4322-4327, mar. 2021, doi: [10.17973/MMSJ.2021_03_2021004](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_03_2021004).
- [29] Ultimaker. “Technical data sheet ABS”. FARNELL.COM. Accedido: feb. 27, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.farnell.com/datasheets/2310520.pdf>
- [30] “PLA ácido poliláctico”. Plásticos Brello. Accedido: feb. 27, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://plasticos-brello.com/material/pla-acido-polilactico/>
- [31] B. Freeland *et al.*, “A Review of Polylactic Acid as a Replacement Material for Single-Use Laboratory Components”, *Materials*, vol. 15, n.º 9, may. 1, 2022, doi: [10.3390/ma15092989](https://doi.org/10.3390/ma15092989).
- [32] “Convección”. Dassault systems. Accedido: feb. 27, 2024. [En línea]. Disponible en: https://help.solidworks.com/2024/spanish/SolidWorks/cworks/c_Convection.htm?id=5ce0d5420a704d57835a1563bfd658d3#Pg0
- [33] M. Vergara, M. J. Agost y V. Gracia-Ibáñez, “Dorsal and palmar aspect dimensions of hand anthropometry for designing hand tools and protections”, *Hum Factor Ergon Man*, vol. 28, n.º 1, pp. 17-28, en. 2018, doi: [10.1002/hfm.20714](https://doi.org/10.1002/hfm.20714).

- [34] B. Forero, K. Velásquez, R. Hernández y E. Mejía, “Simulation of transradial prosthesis using Virtual Reality Environment and electrooculography (EOG) signals for grip therapy”, *Vis. Electron.*, vol. 16, n.º 2, pp. 17-28, ag. 2022, doi: [10.14483/issn.2248-4728](https://doi.org/10.14483/issn.2248-4728).
- [35] C. Bell, *3D Printing with Delta Printers*. Berkeley, CA: Apress, 2015, doi: [10.1007/978-1-4842-1173-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-1173-1).

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue elaborada con la asistencia técnica del personal del laboratorio Centro Autofinanciable de Prototipos y Arquetipos (CAPA) del Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Edición especial

Aprendizaje Integral de la Física a lo Largo de la Vida

La edición especial “Aprendizaje Integral de la Física a lo Largo de la Vida” reúne una selección de los trabajos presentados en la XVI Reunión Anual de la Asociación Americana de Profesores de Física-Capítulo México (AAPTMX). Esta reunión se centró en la exploración de la educación STEAM (ciencia, tecnología, ingeniería, arte y matemáticas) y el aprendizaje integral de la física, destacando el uso de las tecnologías de la información y comunicación, así como las innovaciones en experiencias de laboratorio. Los retos de la enseñanza en el contexto post-COVID, las experiencias docentes y la divulgación científica también ocuparon un lugar central.

Entre los trabajos incluidos en esta edición, se abordan temas que reflejan la diversidad de las propuestas presentadas. A continuación, se destacan algunos de los más relevantes:

1 Implementación de la metodología STEAM. Este trabajo presenta una estrategia de enseñanza basada en la simulación para diseñar y construir instrumentos ópticos. Los resultados indican mejoras significativas en las habilidades de resolución de problemas y un mayor interés de los estudiantes por los temas tratados.

2 El concepto de espacio-tiempo en el currículo escolar. Un análisis sobre la enseñanza del espacio-tiempo resalta la importancia de incluir conceptos de relatividad especial en el nivel secundaria. Este enfoque busca fortalecer la comprensión conceptual y estimular el pensamiento moderno en física.

3 Pensamiento proporcional y resolución de problemas. Se propone la inclusión del pensamiento proporcional como una herramienta esencial para mejorar las habilidades de resolución de problemas en estudiantes de bachillerato.

4 Metacognición y resolución de problemas numéricos. La comprensión de enunciados y el desarrollo de habilidades metacognitivas se identifican como factores críticos en la resolución de problemas numéricos en física en el nivel medio superior.

5 Microcertificaciones en ciencia de datos e inteligencia artificial. Este artículo destaca los beneficios de

ofrecer microcertificaciones en temas como ciencia de datos, aprendizaje automático e inteligencia artificial, integrándolos al currículo de licenciatura en física.

6 Indagación guiada y simuladores en el aprendizaje de la flotación. Mediante el uso de simuladores interactivos, este estudio muestra cómo la indagación guiada mejora significativamente la comprensión del concepto de flotación y la motivación de los estudiantes.

7 Creación de juguetes didácticos y comunidades interactivas. Un proyecto que fomenta la creatividad y el trabajo en equipo mediante la construcción de juguetes didácticos, destacando la importancia de las comunidades interactivas presenciales y su impacto en la divulgación de la física.

8 Perspectiva de género en la enseñanza de la física. Una rúbrica complementaria al manual del programa STEP UP de la Sociedad Americana de Física evalúa cómo la trayectoria profesional docente puede motivar a los estudiantes, particularmente en un contexto con enfoque de género.

9 Aprendizaje basado en proyectos. En esta propuesta, estudiantes universitarios diseñaron y construyeron armonógrafos para visualizar el movimiento armónico simple bidimensional, demostrando el potencial del aprendizaje aplicado e integral.

Esta edición especial es un reflejo del esfuerzo continuo de la comunidad de la AAPTMX por integrar innovación, relevancia y accesibilidad en la enseñanza de la física. Los trabajos presentados no solo muestran avances en metodologías de enseñanza, sino que también invitan a reflexionar sobre cómo se puede continuar fortaleciendo la educación científica en todos los niveles.

Se espera que esta selección inspire a docentes, investigadores y divulgadores a explorar nuevas estrategias que promuevan el aprendizaje integral y una apreciación profunda por la física en nuestra sociedad.

Dr. Jesús Manuel Sáenz Villela
Editor invitado

Enseñanza de la óptica geométrica con la metodología STEAM en nivel medio superior

Teaching geometric optics with the STEAM methodology at the high school

Angel Farit Pereyra Arguelles^{1a}  , Carina Berenice López González^{1b} , Hiram Escobar Cornelio^{1c} 

¹Universidad Autónoma del Carmen, Escuela Preparatoria Diurna, Unidad Académica del Campus 2, {^aAcademia de Física, ^bAcademia de Humanidades, ^cAcademia de Artística}, Ciudad del Carmen, Campeche, México

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar una estrategia de enseñanza con la metodología STEAM, con el fin de fomentar la comprensión de los principios ópticos básicos e integrando conocimientos de ciencia, tecnología, ingeniería, arte y matemáticas. El estudio se realizó bajo una metodología mixta de investigación, aplicado a 50 estudiantes del último semestre de nivel medio superior de la Escuela Preparatoria Diurna, ubicada en Ciudad del Carmen, Campeche, México, que seleccionaron la asignatura optativa de Temas Selectos de Física, con el objetivo de cumplir con el perfil para estudiar una ingeniería. El enfoque STEAM se aplicó en las tres etapas siguientes: indagación, simulación y diseño y creación de un instrumento óptico. Los resultados muestran que la implementación de la estrategia favoreció el aprendizaje, mejorando la comprensión de los conceptos y su relación con la práctica. Se desarrollaron 8 instrumentos ópticos, 6 clasificados como excelentes en las categorías de conocimientos teóricos, habilidades prácticas y creatividad e innovación. Se concluye que la aplicación de la metodología STEAM ayuda a desarrollar habilidades para la solución de problemas, promueve un desarrollo profundo de los temas de forma que los estudiantes enfrenten desafíos y, por consecuencia, un aumento de interés en los temas propuestos.

PALABRAS CLAVE: STEAM; ciencia; enseñanza; óptica geométrica.

ABSTRACT

This research aims to develop a teaching strategy with the STEAM methodology, in order to promote the understanding of basic optical principles and integrating knowledge of science, technology, engineering, art and mathematics. The study was carried out under a mixed research methodology, applied to 50 students in the last semester of high school at the Escuela Preparatoria Diurna, located in Ciudad del Carmen, Campeche, Mexico, who selected the optional subject of Selected Topics in Physics, with the aim of meeting the profile to study engineering. The STEAM approach was applied in the following three stages: inquiry, simulation and design and creation of an optical instrument. The results show that the implementation of the strategy favored learning, improving the understanding of the concepts and their relationship with practice. Eight optical instruments were developed, 6 classified as excellent in the categories of theoretical knowledge, practical skills and creativity and innovation. It is concluded that the application of the STEAM methodology helps to develop problem-solving skills, promotes a deep development of the topics so that students face challenges and, consequently, an increase in interest in the proposed topics.

KEYWORDS: STEAM; science; teaching; geometric optics.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Angel Farit Pereyra Arguelles
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma del Carmen / Escuela Preparatoria Diurna / Unidad Académica del Campus II
DIRECCIÓN: Av. de los Deportes (por Av. Concordia y Av. Corregidora), col. Santa Rosalía, C. P. 24180, Ciudad del Carmen, Campeche, México.
CORREO ELECTRÓNICO: apereyra@pampano.unacar.mx

Fecha de recepción: 11 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:** 27 de agosto de 2024. **Fecha de publicación:** 17 de septiembre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

El enfoque STEAM hace referencia a Science, Technology, Engineering, Arts y Mathematics, es decir, Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Arte y las Matemáticas, que enfatiza la educación interdisciplinar entre estos campos del saber ^[1]. De acuerdo con diversos autores, el enfoque STEAM puede definirse como una metodología activa de aprendizaje que promueve la integración y el desarrollo de las materias científico-técnicas y artísticas en un único marco interdisciplinar ^[2].

El término STEAM se introdujo por primera vez en la década de los años noventa por la Fundación Nacional para la Ciencia en Estados Unidos (NFS), surgiendo de la necesidad de preparar a las nuevas generaciones para el mundo tecnológico, la vida laboral, personal y social ^[3].

El principal objetivo y reto de la educación STEAM es despertar el interés por la ciencia y tecnología, así como también desarrollar nuevas destrezas y la implementación de soluciones creativas a problemáticas identificadas, la efectividad e innovación de estas soluciones y generar innovación, además de asociar el pensamiento lógico con la creatividad y, en esta perspectiva, hacer más atractivas a las ciencias en el entorno educativo. Estas son las razones del porqué el modelo o enfoque STEAM se ha popularizado en diversos países del mundo ^[4].

Suárez ^[5] menciona que los cambios sociales, económicos, culturales y tecnológicos plantean nuevas exigencias a las sociedades y, por ende, los sistemas educativos deben responder a ellas de manera que sus egresados desarrollen las competencias para enfrentar los retos que se les presenten.

En un estudio realizado por Vázquez y Manassero ^[6] se determinó que existe un declive de las actitudes hacia la ciencia por parte de los jóvenes: en torno a los 12 años resultan ser positivas y al aumentar la edad van disminuyendo. El interés comienza a transformarse en desinterés por lo que trae como consecuencia el abandono de la ciencia y carreras científicas en las primeras elecciones de estudios y programas educativos.

Martínez ^[7] menciona que la metodología STEAM consiste en el aprendizaje basado en proyectos que incorporen áreas de conocimiento de manera transversal e

integradora en el aula, y estos proyectos STEAM permiten “error” como parte básica del aprendizaje, obteniendo como beneficio la motivación y el aumento del interés por la experiencia práctica. Los proyectos educativos STEAM deben diseñarse cumpliendo algunas premisas, como las siguientes:

- Incorporar el método científico, la creación artística y el razonamiento matemático.
- Conectarse con retos reales y con impacto social.
- Incluir el trabajo colaborativo.
- Utilizar las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) como medio para aprender y crear.
- Dotar el proyecto con una identidad motivadora que provoque el interés por participar.

Existen situaciones en las que pareciera ser que se trata de una competencia para ver quién tiene los más altos índices de reprobación al evaluar asignaturas de ciencias experimentales y exactas. Como consecuencia, los estudiantes pierden el interés y no relacionan la clase con sus aplicaciones en la vida cotidiana.

El desarrollo de proyectos bajo la metodología STEAM puede llegar a favorecer el desarrollo de habilidades prácticas y teóricas en los estudiantes. Esto se debe a que existe una integración de diversas disciplinas, dotando al aprendiz de un pensamiento crítico y brindando la oportunidad de toma de decisiones para la solución de un problema.

La evaluación formativa tiene un rol importante en la revisión de proyectos bajo la metodología que se propone porque involucra a los estudiantes de manera activa en la generación de preguntas y de explicaciones. Esta práctica incluye el prestar atención de manera crítica a las explicaciones y comentarios de los estudiantes, develar conocimientos previos, hacer públicas las diferentes ideas de los estudiantes y utilizarlas para construir nuevos conocimientos de manera colectiva ^[8].

De acuerdo con lo anterior, el objetivo de este proyecto de investigación es desarrollar una estrategia de enseñanza teniendo como base la metodología STEAM, con el fin de fomentar la comprensión de los principios ópticos, integrando conocimientos de ciencia, tecnología, ingeniería, arte y matemáticas.

II. METODOLOGÍA

El estudio se realizó bajo una metodología mixta de investigación en una muestra no probabilística.

La muestra estuvo conformada por 50 estudiantes de la Escuela Preparatoria Diurna, Unidad Académica de educación media superior de la Universidad Autónoma del Carmen, ubicada en Ciudad del Carmen, Campeche, México, según el género 22% femenino y 78% masculino. La edad promedio de los participantes fue de 17 años. Son estudiantes que cursaban el último semestre del nivel medio superior y que habían seleccionado la asignatura optativa de Temas Selectos de Física con el objetivo de cumplir con el perfil para estudiar una ingeniería o carrera afín. Cabe mencionar que, históricamente, la población predominante en esta asignatura optativa es masculina. Sin embargo, en este trabajo no se consideró el sesgo por género, aunque se reconoce su importancia y se considerará en trabajos a futuro.

El enfoque STEAM se aplicó en diversas etapas que se describen a continuación:

1. ETAPA DE INDAGACIÓN

En esta etapa se asignó que investigaran individualmente en diversas fuentes confiables acerca de los conceptos de lentes, espejos, ojos, problemas oculares, combinación de lentes e instrumentos ópticos. Se solicitó que adjuntaran la investigación en un archivo portable en una asignación de clase de *classroom*.

Posteriormente a la investigación, se conformaron equipos y se evaluaron de forma oral los conceptos establecidos, donde los integrantes trabajaron de forma colaborativa para dar una explicación gráfica y oral.

2. ETAPA DE SIMULACIÓN

Se creó una nueva asignación en la clase de *classroom* con las siguientes indicaciones:

- Acceder al simulador PhET: Óptica geométrica <https://phet.colorado.edu/es/simulations/geometric-optics>
- Realizar la simulación de un objeto colocado después del centro, en el centro, entre el centro y el foco, en el foco y después del foco. Describir la naturaleza de las imágenes que se forman.

- Adjuntar las simulaciones y descripciones como captura de pantalla en diapositivas y entregar en la asignación de *classroom*.

3. ETAPA DE DISEÑO Y CREACIÓN

Conformados los equipos, los estudiantes seleccionaron un instrumento óptico para diseñarlo y elaborarlo. Se utilizó una lista de cotejo, que se muestra en la [Tabla 1](#), para la evaluación del prototipo teniendo las bases del modelo STEAM.

TABLA 1
LISTA DE COTEJO PARA LA EVALUACIÓN DE UN INSTRUMENTO ÓPTICO

CRITERIO	NIVEL				
Conocimiento teórico					
Los estudiantes demuestran la comprensión de los principios ópticos básicos.	1	2	3	4	5
Los estudiantes muestran las bases matemáticas usadas para el diseño y elaboración del instrumento óptico.	1	2	3	4	5
Los estudiantes utilizan correctamente la terminología científica relacionada con los instrumentos ópticos.	1	2	3	4	5
Habilidad práctica					
El instrumento óptico es funcional.	1	2	3	4	5
Los estudiantes demuestran habilidad para solucionar problemas y superar obstáculos durante el proceso de construcción del instrumento óptico.	1	2	3	4	5
Creatividad e innovación					
El instrumento óptico es funcional.	1	2	3	4	5
Los estudiantes demuestran habilidad para solucionar problemas y superar obstáculos durante el proceso de construcción del instrumento óptico.	1	2	3	4	5

Descripción de nivel: 1 insuficiente, 2 deficiente, 3 regular, 4 bueno, 5 excelente.

Tres profesores evaluaron los proyectos de forma transdisciplinaria de las áreas de ciencias experimentales, sociales y artes. Además de los criterios evaluados, a los estudiantes se les preguntó ¿cuáles fueron las mayores dificultades que se presentaron al realizar el proyecto?, ¿cómo solucionaron el problema? y ¿qué aprendizajes obtuvieron durante las diferentes etapas del proyecto?

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los 50 estudiantes fueron divididos en 8 equipos. Al evaluar la comprensión de los principios ópticos básicos necesarios en el tema de aprendizaje, solo 13% de

estudiantes mostró un nivel insuficiente. Esto equivale a 1 equipo colaborativo, mientras que un 87% mostró niveles bueno y excelente, como se muestra en la **Figura 1**. Coincidiendo con Elizondo [9], en Física, el motivo y lo que está en juego en la argumentación son las restricciones propias del problema a resolver y relacionarlo con el lenguaje matemático.

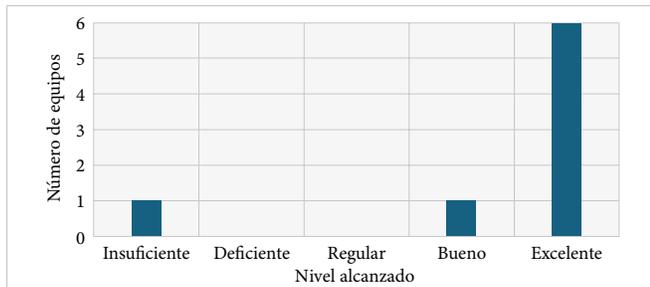


Figura 1. Comprensión de los principios ópticos.

En la **Figura 2** se observa que el 75% (6 equipos) utilizaron y señalaron las bases matemáticas para el diseño y elaboración de su instrumento óptico, mientras que un 25% (2 equipos) no mostraron las bases matemáticas, aunque sus instrumentos fueron funcionales.

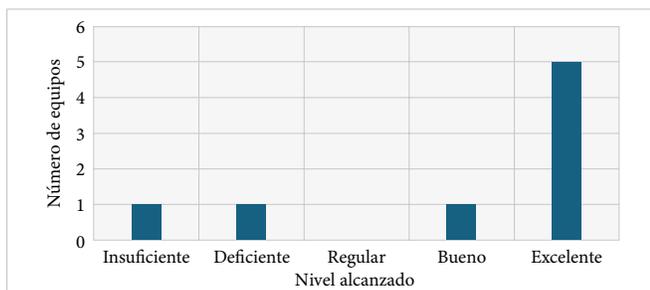


Figura 2. Bases matemáticas para el diseño y elaboración del instrumento.

Al explicar y poner a prueba el instrumento óptico, el 75% de estudiantes utilizaron la terminología científica, y el 25% no contó con las bases teóricas y la terminología correcta (**Figura 3**).

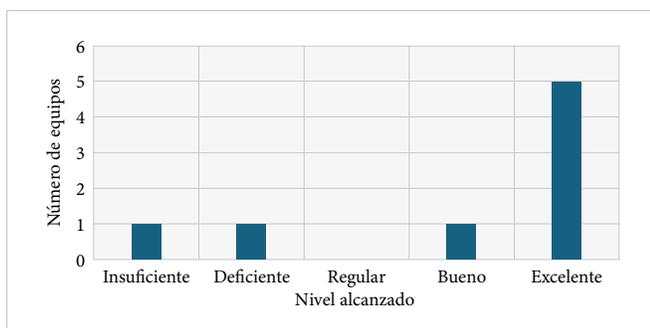


Figura 3. Uso correcto de la terminología científica.

En la **Figura 4** se muestra que 6 instrumentos ópticos cumplieron con la funcionalidad para los cuales fueron diseñados, solo 2 equipos tuvieron un funcionamiento regular, esto debido a que presentaron fallas en algunas de sus partes o se desajustaban al utilizarlos.

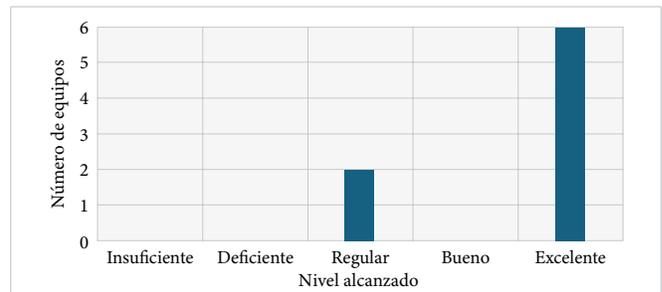


Figura 4. Funcionalidad del instrumento óptico.

De acuerdo con las habilidades para solucionar problemas y superar obstáculos durante el proceso de construcción del instrumento óptico (**Figura 5**), el 75% de estudiantes lograron superarlo, mientras que el 25% mostró deficiencia al hacerlo.

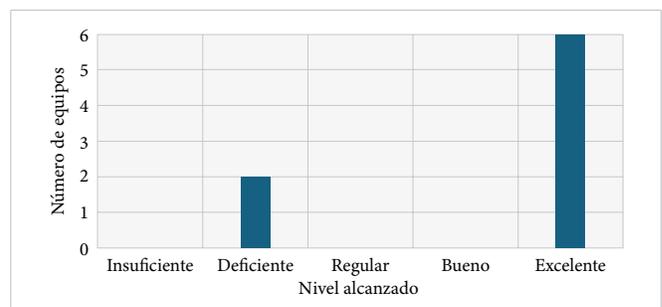


Figura 5. Habilidad para solucionar problemas.

De acuerdo con Nuria y Lara [10], en los proyectos STEAM la creatividad confiere una mayor habilidad para encontrar soluciones a problemas inesperados. En la **Figura 6** se observa que un 88% de los proyectos mostraron un diseño original y creativo y solo un 12% mostraron un nivel insuficiente.

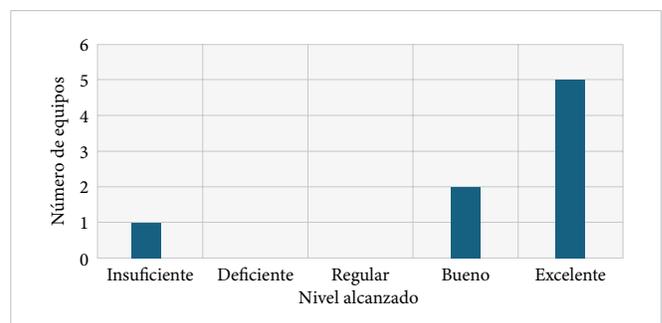


Figura 6. Diseño original y creativo.

Los estudiantes deben implementar innovaciones y aprender mediante la experimentación en primera persona. La enseñanza STEAM facilita el aprendizaje y que crea el ambiente idóneo para que los estudiantes aprendan. En la **Figura 7** se puede observar que un 75% de estudiantes lograron tener niveles altos de originalidad, innovación y aplicación del instrumento. Esto significa que la metodología STEAM favorece el aprendizaje de los estudiantes en lo teórico y práctico.

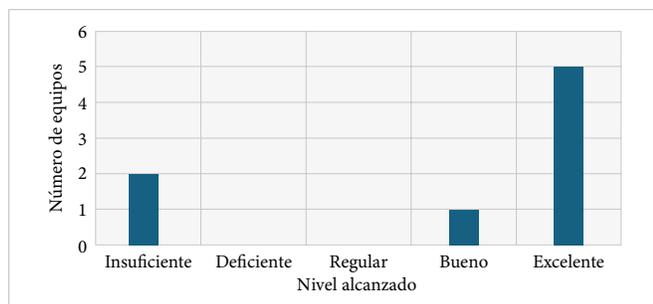


Figura 7. Innovación en el uso y aplicación.

En las **Figuras 8 y 9** se visualizan dos telescopios realizados por los estudiantes.



Figura 8. Telescopio elaborado por estudiantes.



Figura 9. Telescopio 2 elaborado por estudiantes.

IV. CONCLUSIONES

La integración de la ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas favorece el aprendizaje profundo de la física. En los resultados obtenidos se observa que los estudiantes, de forma colaborativa, en un gran porcentaje superaron los desafíos al desarrollar un proyecto funcional y con las bases teóricas científicas requeridas.

La aplicación de la metodología STEAM ayuda a desarrollar habilidades para la solución de problemas, promueve un desarrollo profundo de los temas de forma que los estudiantes enfrenten desafíos y, por consecuencia, que exista un aumento de interés en los temas propuestos.

Por último, el trabajo transdisciplinar por parte de los docentes tiene un rol importante para el desarrollo de proyectos STEAM, impulsando habilidades como el pensamiento crítico y la colaboración, y permitiendo abordar los problemas desde distintas perspectivas brindando soluciones efectivas.

REFERENCIAS

- [1] D. Y. Pineda, “Enfoque STEAM: Retos y oportunidades para los docentes”, *RIPIE*, vol. 3, n.º 1, pp. 229-244, dic. 2022, doi: [10.51660/ripie.v3i1.115](https://doi.org/10.51660/ripie.v3i1.115).
- [2] J. Santillán, E. Jaramillo, R. Santos y V. Cadena, “STEAM como metodología activa de aprendizaje en la educación superior”, *Pol. Con.*, vol. 5, n.º 8, pp. 467-492, 2020.
- [3] E. Asinc y S. Alvarado, “Steam como enfoque interdisciplinario e inclusivo para desarrollar las potencialidades y competencias actuales”, presentado en el 5to Congreso Internacional de Ciencias Pedagógicas de Ecuador, Guayaquil, Ecuador, 2019, pp. 1504-1514.
- [4] L. A. Monroy, L.-E. Mendoza y H. Alarcón-Acosta, “Educación STEAM en preparatoria”, *prepa1*, vol. 4, n.º 7, pp. 12-15, 2021.
- [5] C. E. Mora, C. del P. Suárez y J. Felix, coords., *La enseñanza de la física y el modelo STEM*. Ediciones Comunicación Científica, 2022, doi: [10.52501/cc.037](https://doi.org/10.52501/cc.037).
- [6] Á. Vázquez y M. A. Manassero, “El declive de las actitudes hacia la ciencia de los estudiantes: un indicador inquietante para la educación científica”, *Rev Eureka Ensen*

- Divulg Cienc*, vol. 8, n.º 3, pp. 274-292, 2008, doi: [10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2008.v5.i3.03](https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2008.v5.i3.03).
- [7] F. Martínez, “Proyectos STEAM: Las matemáticas y el turismo espacial”, presentado en el Congreso Internacional de Centros Innovadores, Andalucía, may. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/DIM/article/view/402817/496519>
- [8] V. Talanquer, “La importancia de la evaluación formativa”, *Educación Química*, vol. 26, n.º 3, pp. 177-179, jul. 2015, doi: [10.1016/j.eq.2015.05.001](https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.05.001).
- [9] Ma. del S. Elizondo Treviño, “Dificultades en el proceso de enseñanza aprendizaje de la Física”, *Presencia Universitaria*, vol. 3, n.º 5, pp. 70-77, 2013.
- [10] A. Nuria y O. Lara, “La robótica educativa: Competencia STEAM y Creatividad”, en *Libro de Resúmenes: 2.ª Conferencia Virtual en Investigación Educativa e Innovación*, Ed., Adaya Press, 2018, p. 99.

El espacio-tiempo en la enseñanza de la física

Space-time in the teaching of physics

Erick Rodolfo Ortiz Ibáñez¹ , Rosa Nidia Tuay Sigua¹ 

¹Universidad Pedagógica Nacional, Doctorado Interinstitucional en Educación. Grupo de Investigación Educación en Ciencias, Ambiente y Diversidad (EduCADiverso), Bogotá, Colombia

RESUMEN

Más de cien años han transcurrido desde la formulación de la Teoría de la Relatividad, sin embargo, esta y otras temáticas de la física moderna, como el constructo del espacio-tiempo aún no están incluidas en los lineamientos escolares de secundaria, p. ej., en Colombia. Los currículos escolares deben estar actualizados a la vanguardia científica dado que desde ahí se incentiva a las nuevas generaciones de científicos, de modo que es importante incluir la interpretación del espacio-tiempo porque es esencial para la comprensión de la teoría de la relatividad. Por lo anterior, el presente artículo pretende generar un análisis reflexivo de la comprensión y construcción del espacio-tiempo en la física y su vinculación a la educación secundaria, detallando su importancia en la enseñanza de la ciencia. Se realizó una revisión documental entre 2012 a 2024 en las bases de datos de Scopus y Google Académico y finalmente se revisaron 20 documentos que aportan directa e indirectamente a la enseñanza del espacio-tiempo en la educación secundaria. Asimismo, esta revisión permite entrever el esfuerzo que ha realizado la comunidad académica en abordar las temáticas actuales de la física, reconociendo así que el pensamiento moderno debe estar presente en la formación científica del estudiante.

PALABRAS CLAVE: espacio-tiempo; enseñanza de la física; teoría de la relatividad; educación secundaria.

ABSTRACT

More than a hundred years since the formulation of the Theory of Relativity has passed. However, this and other topics of modern physics, such as the construct of space-time are still not included in school guidelines, e. g., in Colombia. School curricula must be updated to the forefront of science since, from there, new generations of scientists can be encouraged, so it is important to consider the teaching of science in secondary school classrooms for scientific education, hence the need to include updated physics at these educational levels since the interpretation of space-time is essential for understanding the theory of relativity. Therefore, this article aims to generate a reflective analysis of the understanding and construction of space-time in physics and its link to secondary education, detailing its importance in teaching science. To this end, a documentary review was carried out between 2012 and 2024 in the Scopus and Google Scholar databases, where finally, 20 documents were reviewed that directly and indirectly contribute to teaching space-time in secondary education. Likewise, this review allows us to glimpse the effort that the academic community has made in addressing current topics in physics, thus recognizing that modern thinking must be present in the student's scientific training.

KEYWORDS: space-time; teaching of physics; theory of relativity; secondary education.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Erick Rodolfo Ortiz Ibáñez
INSTITUCIÓN: Universidad Pedagógica Nacional / Doctorado Interinstitucional en Educación
DIRECCIÓN: Calle 72 núm. 11-86, Bogotá, Colombia. Código postal 110221
CORREO ELECTRÓNICO: erortizi@upn.edu.co

Fecha de recepción: 31 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:** 18 de septiembre de 2024. **Fecha de publicación:** 3 de octubre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

En las primeras décadas del siglo XX, la Teoría de la Relatividad (TR) y la Mecánica Cuántica (MC) se conformaban como las nuevas teorías de la física, produciendo así un campo amplio en investigaciones y discusiones para las nuevas generaciones de científicos y propiciando una nueva revolución en las ciencias, dado que, y desde la perspectiva de Kuhn, “una revolución modifica el campo y cambia el lenguaje mismo con el que nos referimos a algún aspecto de la naturaleza” [1, p. 46]. De ahí que estas teorías no solo brindaron un camino diferente para la comprensión de la naturaleza, sino que además aportaron claridad a problemáticas a las que hasta finales del siglo XIX la física aún no generaba soluciones coherentes.

Estas nuevas teorías propulsaron avances científicos y tecnológicos significativos para el desarrollo sociocultural y económico del siglo XX, modificaron la manera de ver la física y el mundo. Sin duda alguna, los cambios y progresos del conocimiento científico se han presentado a lo largo de la historia de las ciencias, en siglos anteriores, p. ej., durante el siglo XIX, los avances del electromagnetismo no solo dieron un progreso científico, sino que también fueron aprovechados por la industria [2]. Asimismo, en el siglo XVII, con la publicación de *Los Principios Matemáticos de la Filosofía Natural* de Isaac Newton, permitió dar una nueva comprensión a los fenómenos de la naturaleza y, desde luego, cuando Galileo Galilei observó a través de su telescopio más allá de la esfera terrestre, sentando las bases de una nueva astronomía [3]. Cada evento de las ciencias y, en este caso, la física, que ha trascendió en la historia desde la antigüedad hasta la época actual, ha cambiado la percepción del conocimiento científico y del mundo natural.

Ahora bien, estos acontecimientos que se han presentado a lo largo de la historia de las ciencias hasta la actualidad no son ajenos al campo educativo y en especial a la enseñanza de las ciencias en las aulas de la educación secundaria, es decir, las teorías y leyes científicas han tenido un proceso de desarrollo y comprensión que ha durado años, décadas y hasta siglos, por lo que comprimir todo este conocimiento científico en unas pocas horas a la semana, en clases de ciencias, resulta ser un reto bastante complejo y más aún cuando el conocimiento científico sigue avanzando constantemente, Ugo Besson argumenta que

el problema de incluir la llamada “física moderna” en la escuela secundaria ha sido objeto de largos y cuidadosos debates y estudios. Se trata de evaluar que temas conviene incluir, en qué momentos del currículo, en qué nivel de análisis de profundidad y con que métodos y objetivos [4, p. 249].

Por consiguiente, la enseñanza de la física debe ir más allá de los contenidos conceptuales y de los montajes experimentales que solo quieren evidenciar la formulación de una teoría o la comprobación de una ley física. Moreira considera que “los contenidos físicos no deben ser enseñados como verdades inmutables, sino como construcciones, creaciones del hombre” [5, p. 51], a lo que Izquierdo *et al.* [6] postulan la actividad científico escolar como la configuración de un contexto, donde el estudiante interviene constantemente con los docentes y unos saberes dados, introduciendo la formación de pensamiento científico que se transformará a uno complejo y a un lenguaje en el que pueda expresarlo, así que la ciencia escolar es la construcción de nuevas maneras de pensar, hablar, sentir y actuar frente a los aspectos propios de la actividad científica y de la explicación del mundo.

Aun así, y aunque las nuevas teorías científicas son de bastante importancia para los avances del conocimiento científico, cada una de ellas contiene una inmensa cantidad de elementos que hay que analizar de manera individual. La relevancia particular que tienen estos aspectos para la comprensión de la denominada física moderna es fundamental, por lo que la enseñanza de las ciencias se convierte en un papel esencial en el aula con el fin de lograr la comprensión de los alcances de la ciencia.

Por lo anteriormente descrito, se puede identificar o más bien desglosar algunos elementos para construir un debate que permita generar la comprensión de una teoría y, asimismo, conlleve a proponer un avance en la enseñanza de las ciencias. Por tanto, el presente artículo muestra una discusión acerca de la concepción del espacio-tiempo para así reflexionar y evidenciar su importancia de este para iniciar con la comprensión de la Teoría de la Relatividad en la educación secundaria.

Por último, cabe resaltar que este análisis reflexivo surge como aporte investigativo para la tesis doctoral del primer autor del presente artículo.

SOBRE EL ESPACIO-TIEMPO (ET)

El año de 1905 es considerado como el año milagroso de la física del siglo XX y cabe resaltar que bajo esta expresión también se contempla el año 1666 gracias a los trabajos de Isaac Newton que revolucionaron la ciencia. Albert Einstein publicó cinco artículos en *Annalen der Physik*, entre los que se encontraba *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento. Allí “logró resolver mediante un análisis crítico los fundamentos cinemáticos de la física, la teoría del espacio y del tiempo, que subyace a la mecánica, la electrodinámica y en realidad cualquier otra teoría dinámica” [7, p. 78].

Además, Einstein revolucionó por completo las concepciones de espacio-tiempo unificándolos y estableciendo que las medidas variaban al considerar el sistema de referencia inercial del observador [8], por lo que

basado en una cuidadosa definición de simultaneidad de sucesos distantes, demostraba que el concepto de un tiempo universal o absoluto, sobre el que se basa la cinemática newtoniana, tenía que ser abandonado... (esto conllevó a que) la teoría de la relatividad especial (TER) proporcionó también a los filósofos abundante material para reflexionar sobre las nuevas ideas de espacio y tiempo [7, p. 145].

Este análisis proyectado por Einstein se originó dado las problemáticas que se encontraban en la electrodinámica y que la mecánica newtoniana no lograba esclarecer, por lo que él formuló una nueva teoría de movimiento teniendo en cuenta la velocidad de la luz y los sistemas inerciales.

Entonces, para ello planteó que:

La luz en el espacio vacío siempre se propaga con cierta velocidad V que no depende del estado de movimiento del emisor ... La introducción de un “éter” resultará ser superflua puesto que de acuerdo con los conceptos a desarrollar no es necesario introducir un espacio en reposo absoluto [9].

Posteriormente, esto se divulgó como los postulados de la TER, que se resumen en que todas las leyes de la física son las mismas en un sistema inercial y que es necesario considerar la velocidad de la luz finita, que es la misma en todos estos sistemas inerciales y además que nada será más veloz que esta [10].

Ahora bien, la discusión acerca de ¿qué es el espacio? y ¿qué es el tiempo? ha estado presente a lo largo de la historia tanto desde la perspectiva filosófica como científica; p. ej., Kant tiene la intención de comprobar “que el espacio absoluto, independientemente de la existencia de toda materia, y, asimismo, como razón primera de la posibilidad de su composición, tiene una realidad propia” [11, p. 14]. Esta postura kantiana se basa en la intuición. Por otro lado, Newton los consideraba como absolutos, iguales e inmóviles [12], sin embargo, algunos intelectuales no estaban acordes a las ideas de absolutismo de Newton, como Leibniz, quien fue uno de los mayores opositores de Newton; según ha evidenciado la historia y filosofía de la ciencia, él exponía al “espacio como orden de coexistencia y del tiempo como orden de sucesión” [13, p. 40].

Leibniz exhibía que algunos filósofos “sostenían que el espacio es un ser real absoluto ... parece que esta entidad debe ser eterna e infinita ... era el mismo Dios” [13, p. 67], pero, así como existían opositores de Newton, también se encontraba seguidores, entre ellos Clarke, quien le refutaba a Leibniz que “el espacio no es un ser, un ser eterno e infinito, sino una propiedad, o una consecuencia de la existencia de un ser infinito y eterno. Ese espacio infinito es la inmensidad, pero la inmensidad no es Dios” [13, p. 73].

El querer demostrar una interpretación del espacio-tiempo data de hace varios siglos atrás y se ha convertido en una investigación histórica y filosófica de las ciencias, Schlick expresa que:

Desde tiempos muy tempranos fue librada por los filósofos una controversia inconcluyente en relación con si el espacio vacío era real o meramente idéntico con la nada ... Nadie en efecto, ve el espacio y al tiempo como real en el mismo sentido en el que lo es la silla en la que estoy sentado o el aire que respiro. No puedo tratar con el espacio como con los objetos materiales o con la energía, que puedo transportar de un lugar a otro, manipular a voluntad, comprar y vender. Todo el mundo siente que hay alguna diferencia entre ellos; el espacio y el tiempo son, en un sentido u otro, menos *independientes* que las cosas que existen entre ellos ... no podemos hablar del espacio sino hubiera cuerpos materiales; y la concepción del tiempo sería, así mismo, vacía de significado sin ningún evento o cambio tomara lugar en el mundo. Pero aun en la mente popular, el espacio y el tiempo no son meramente nada” [14, p. 181].

Todo lo antedicho evidencia claramente una discusión acerca del ET, tanto así que al hablar respecto al espacio y al tiempo coloquialmente se puede deducir que el espacio es un lugar donde se puede almacenar un objeto y el tiempo es una medida entre sucesos, así no exista un cambio de posición o movimiento, es decir, en una habitación puede haber un grupo de personas y ese será el espacio para ellos y el tiempo será el mismo, puesto que en sus relojes estará el mismo mecanismo que hará que el reloj mueva su minutero cada sesenta segundos, y la hora cada sesenta minutos y así funcionara para todos, esto es el espacio y el tiempo absoluto igual para todos, estén en reposo o en movimiento.

No obstante, toda la categorización del espacio y del tiempo puede desenfundarse desde un análisis histórico y filosófico. ¿Qué es el espacio?, ¿qué es el tiempo? Aristóteles mencionaba que solo era posible percibir el tiempo al cambiar de estado. Si bien, la comprensión del ET abarca un problema en las ciencias, en especial en la física, dado que Einstein dio una perspectiva acerca de ellos lo cual le permitió formular su teoría de la relatividad y, aunque el reloj tenga el mismo mecanismo, la percepción del tiempo es diferente para cada uno, es decir, para cada sistema de coordenada puede variar y este depende de su velocidad.

Ahora bien, antes de la formulación de la TER, algunos científicos se oponían a la idea absolutista pretendiendo analizar un poco más al espacio-tiempo. Stadler describe que:

Mach expresa su rechazo tanto de cualquier concepción metafísica y unilateralmente mecanicista de la física, como de las categorías sintético *a priori* del movimiento absoluto, del espacio absoluto y del tiempo absoluto en tanto que conceptos sustanciales del todo superfluos [15, p. 113].

Ernest Mach, en su texto *Die Mechanik* de 1883, expone que

el tiempo es más bien una abstracción a la que llegamos a través del cambio de las cosas ... no podemos hablar de un tiempo absoluto (independiente de cualquier cambio). Este tiempo absoluto no puede ser medido por ningún movimiento, por lo que no tiene valor práctico ni científico alguno ... nadie puede decir nada sobre el espacio y el movimiento absolutos; son simplemente cosas de pensamiento que no pueden demostrarse en la experiencia [16, pp. 209-213].

Por otro lado, en la conferencia pronunciada en la 80.^a reunión de científicos naturales en Colonia en septiembre de 1908, Herman Minkowski iniciaba su locución acerca del espacio y del tiempo, planteando que:

Las ideas sobre el Espacio y el Tiempo, ... han crecido en terrenos de la física experimental. En ella reside su fuerza. A partir de ahora, el Espacio por sí mismo y el Tiempo por sí mismo, deberán de hundirse completamente en las sombras, y solamente una especie de unión de ambos podrá preservar su independencia [17].

Ahora, la discusión anteriormente descrita entre el espacio y el tiempo en la física es primordial agregarla al contexto educativo, puesto que ello permite comprender la evolución del conocimiento científico y de las teorías que revolucionaron la ciencia, como la teoría de la relatividad. Por consiguiente, el presente artículo expone la importancia de incluir las temáticas de la física moderna, en especial el espacio-tiempo en el aula de secundaria; para ello inicia con una revisión en las bases de datos en Scopus y Google Académico con una ventana de observación de 2012 a 2024 y posteriormente se describe los resultados mostrando el diálogo de la incursión de esta temática en el aula.

II. METODOLOGÍA

En primer lugar, para presentar el análisis y reflexión acerca del espacio-tiempo en la enseñanza de la física en las aulas de la educación secundaria, se realizó una búsqueda de literatura en las bases de Scopus y Google Académico entre los años 2012 a 2024 con las siguientes ecuaciones de búsqueda (Tabla 1). Los documentos seleccionados proceden de autores con afiliación institucional en Argentina, Australia, Colombia, Estados Unidos, Grecia, Israel, Noruega, Países Bajos y Reino Unido, los cuales muestran un interés investigativo en introducir directa o indirectamente el constructo del espacio-tiempo en este nivel educativo. Posteriormente, se muestra el análisis de datos de los resultados encontrados.

TABLA 1
ECUACIONES DE BÚSQUEDA

CATEGORÍA	SCOPUS	GOOGLE ACADÉMICO
Espacio-tiempo	"Space time" OR "spacetime" OR "space and time" AND "science education" AND "science teaching" AND "theory of relativity"	"espacio tiempo" + "educación científica" + "enseñanza de las ciencias" + "teoría de la relatividad"

Los resultados obtenidos se relacionan en la Figura 1, que corresponde al diagrama de flujo adaptado de la declaración PRISMA [18].

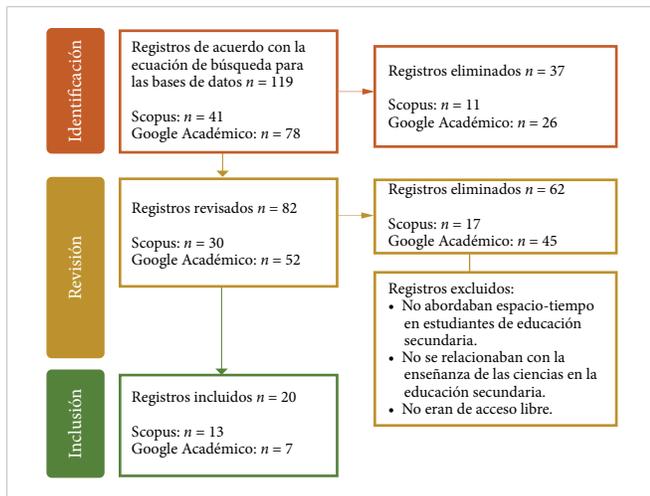


Figura 1. Diagrama de flujo de la revisión documental.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revisión de literatura en las bases de datos de Scopus y Google Académico, de acuerdo con las ecuaciones de búsqueda anteriormente descritas frente al espacio-tiempo en la física encaminada a la educación secundaria, permite observar categorías de análisis, como el tipo de documento investigativo (Tabla 2), y la cantidad de investigaciones realizadas por año (Figura 2).

TABLA 2
TIPO DE INVESTIGACIÓN

BASE DE DATOS	SCOPUS	GOOGLE ACADÉMICO
Artículos	12	1
Conferencias/ponencias	1	3
Trabajo de pregrado	-	1
Tesis de maestría	-	1
Tesis doctoral	-	1

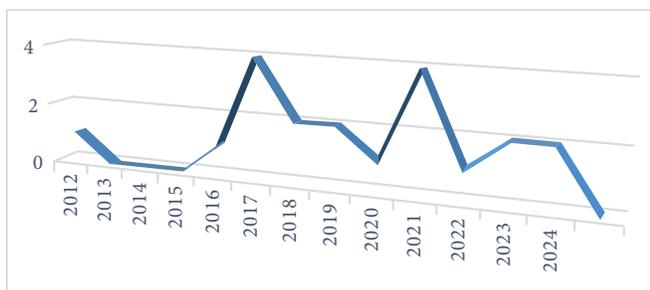


Figura 2. Investigaciones por año.

Los documentos revisados se encuentran en inglés y español y han sido presentados en revistas, memorias y repositorios (Tabla 3).

TABLA 3
PUBLICACIONES

MEMORIAS/REVISTAS/REPOSITORIO	DOCUMENTOS
ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings	1
Cognition and Instruction	1
Enseñanza de las Ciencias Investigaciones Didácticas	1
European Journal of Science and Mathematics Education	1
International Journal of Science Education	1
Physical Review Physics Education Research	2
Physics Education	1
Research in Science Education	1
Revista de Enseñanza de la Física	3
Revista Tecné. Episteme y Didaxis TED	1
Science & Education	4
Universidad de Antioquia - Colombia	1
Universidad Metropolitana de Educación, Ciencia y Tecnología - Panamá	1
Universidad Pedagógica Nacional - Colombia	1

Ahora, bien en la Figura 2 se puede observar la producción por año al investigar la posible incursión del espacio-tiempo en la educación desde 2012 a junio de 2024.

Esta revisión muestra que en los años 2017 y 2021 se realizó una producción investigativa de 4 documentos que abordó el espacio-tiempo en la educación secundaria, sin embargo, estos resultados revelan la limitada indagación que existe frente al abordaje de estas temáticas en el nivel educativo de la educación secundaria.

ABORDAJE DEL ESPACIO-TIEMPO

De los 20 documentos revisados, algunos acogen el espacio-tiempo de una manera directa o indirecta, considerando la primera como el enfoque central al abarcamiento y comprensión del espacio-tiempo y la segunda como un complemento para abordar la comprensión de diferentes conceptos que envuelve la Teoría de la Relatividad, como gravedad, energía, masa, velocidad y observador, entre otros.

Por consiguiente, 6 documentos analizados [19], [20], [21], [22], [23], [24] abordan las temáticas del espacio-tiempo de una manera indirecta, dado que se enfocan en querer explicar las diferentes propuestas que abordan la teoría de la relatividad, entre ellas la teoría de gravedad de Einstein y, asimismo, en querer interpretar y dar a conocer el concepto de observador en la física. Otras propuestas [21] plantean la realidad virtual para la comprensión del espacio-tiempo curvo cuando hay presencia de una masa, si bien esta hace referencia al espacio-tiempo, es llevada a un público de nivel educativo superior a la educación secundaria. Por otro lado, se encuentran revisiones de literatura enfocados a evidenciar las problemáticas de aprendizaje en todos los niveles educativos entorno a marcos de referencia, postulados y los posibles efectos relativistas [22], así como también a representar la naturaleza de la ciencia en diversos libros de texto que abordan la Teoría de la General de la Relatividad (TGR) [23].

En cambio, 14 documentos analizados [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], los cuales corresponde a 2 ponencias o conferencias, 9 artículos, 1 trabajo de grado, 1 tesis de maestría y 1 tesis doctoral, evidencian la importancia del constructo del espacio-tiempo para la comprensión de la teoría de la relatividad y, asimismo, la pertinencia de introducir estas temáticas en currículos escolares de la educación secundaria, demostrando la viabilidad de sumergir a estudiantes de este nivel educativo en teorías de física actualizadas para así promover la comprensión de las ciencias.

EL ESPACIO-TIEMPO EN LA ENSEÑANZA

El espacio-tiempo en la física ha estado en discusiones filosóficas, epistémicas e históricas, entre otros [39]; sus interpretaciones han sido indagadas para la comprensión de la Teoría de la Relatividad (TR), sin embargo, estas no se han llevado con relevancia hacia los contextos escolares, por lo que se hace necesario contribuir a “más investigaciones para explorar cómo las cuestiones clave de la filosofía del espacio y tiempo y de la Teoría Especial de la Relatividad (TER) en la historia de la física puede ser implementado en una secuencia de enseñanza” [22]. Por este motivo, hay que repensar cómo incluir temáticas de la física moderna en el aula, teniendo en cuenta que son teorías científicas que han proporcionado tanto en avances significativos en el pensamiento y conocimiento científico como en avan-

ces tecnológicos, por lo que es necesario ir replanteando la manera cómo se enseña física en la escuela [32] y, asimismo, integrar en los contextos cotidianos con la física actual contribuyendo a nuevas estrategias pedagógicas que cultiven el interés de la ciencia por parte de los estudiantes desde niveles educativos anteriores a los universitarios [19].

Aun así, las investigaciones frente a la enseñanza e interpretación del espacio-tiempo de la física encaminadas a la educación secundaria son muy escasas. Algunos autores han abordado estas temáticas en sus trabajos al querer aproximar la enseñanza de la teoría de la relatividad (TR) al aula escolar [22], [40], [24].

Kaur *et al.* [26] sostienen que la concepción del espacio, del tiempo y de otras variables que inciden en la Teoría Especial de la Relatividad genera un cambio sustancial comparado con la física clásica. En consecuencia, es necesario que la educación escolar o secundaria integre las temáticas de la física moderna, puesto que al incluir estas enseñanzas al aula puede conllevar a que los estudiantes tengan una mayor comprensión e interpretación de las problemáticas que han permitido y permite evolucionar a la ciencia y, por ende, a la física.

Además, Kersting *et al.* [28] manifiestan que a los estudiantes les cautiva las interpretaciones de espacio-tiempo e intentan explicarlo y relacionarlo mediante la geometría y sus contextos. Adicionalmente, señalan que el material pedagógico para la escuela en torno a la enseñanza y aprendizaje de la Teoría de la Relatividad es limitado y aun así consideran que al proporcionar correctamente los constructos teóricos de una manera efectiva a través del diálogo docente-estudiante, contribuirá en la comprensión de las teorías científicas por parte de ellos.

Por su parte, Cayul y Arriasecq [38] proponen secuencias de enseñanza y aprendizaje (SEA) a través de los diagramas de Minkowski o espacio-tiempo para la enseñanza de la TER en educación secundaria. En esta misma línea, Arriasecq *et al.* [31] sugieren que en las SEA existan las cinco partes siguientes para el abordaje de la TER: 1) analizar cuestiones histórico-epistemológicas, 2) revisión de conceptos de la mecánica clásica necesarios para la TER, 3) los conceptos en conflicto del electromagnetismo y la mecánica clásica, 4) discusión de los aspectos fundamentales de la TER y 5) que los estudiantes conozcan los aspectos de la vida de Albert Einstein.

Además, en el momento de analizar cuál es la fundamentación y definición del espacio y del tiempo, en especial en la enseñanza de la física en educación secundaria, lo primero que se establece es la concepción absolutista de Newton y el relativismo de Einstein [36]. No obstante, las ideas o concepciones del espacio y del tiempo y sus primeras interpretaciones datan de la época griega, principalmente desde Aristóteles.

Por tanto, la configuración espacio-tiempo en la física moderna permite al estudiante iniciar un proceso de análisis y razonamiento en el que se desarrolle el pensamiento crítico en la ciencia, basándose en las anomalías que presentaban las dos teorías, es decir, la física clásica y la física moderna, puesto que en la primera el espacio y el tiempo eran absolutos y a ambos corrían de la misma manera sin importar el sistema de referencia, algo contrario a lo que sucede cuando estos, están sujetos a la velocidad de la luz.

PROPONIENDO LA ENSEÑANZA DEL ESPACIO-TIEMPO EN EL AULA

Desde la política educativa de Colombia, el Ministerio de Educación Nacional (MEN) [41] expone unos Estándares Básicos de Competencias de los niveles académicos de primer grado hasta grado undécimo, es decir, la educación básica y básica secundaria. En este documento se encuentra las ciencias (sociales y naturales) y allí describen lo que los estudiantes básicamente deben conocer y qué pueden hacer con ese conocimiento.

Ahora, desde estos lineamientos las ciencias naturales (física, química y biología), se componen en el entorno vivo, un entorno físico y la relación de la ciencia con la tecnología y si bien allí se describe lo que los estudiantes deben saber ser y hacer para aproximarse al conocimiento científico [41], solo se muestra un manejo de conocimientos de las ciencias que datan hasta el siglo XIX, dejando de un lado el conocimiento que se desarrolló desde el siglo XX, escenario a lo que hoy se conoce como la física moderna.

Ostermann y Moreira [42] destacan que es necesaria la actualización de los currículos de lo que se enseña en física en la secundaria, partiendo de la idea que “es un error pensar que ellos no tienen capacidad (de abstracción, por ejemplo) de aprender tópicos” de la física moderna. Por ende, es procedente introducir la enseñanza del espacio-tiempo en la escuela secundaria y así iniciar

con la comprensión de las teorías de la física moderna, como la TER, dado que “la teoría de la relatividad se halla íntimamente vinculada a la teoría del espacio y del tiempo” [43, p. 51].

Por consiguiente, nacen estas preguntas: ¿cómo abordar el espacio-tiempo en el aula?, ¿cómo introducir el espacio-tiempo en el campo de la enseñanza de las ciencias?, partiendo que es un constructo que ha sido evaluado y discutido a lo largo de la historia de las ciencias por físicos y filósofos, por lo que una de las apuestas que se propone para ello es llevarla desde la Historia y Filosofía de la Ciencias (HFC).

En su análisis de los aportes de Michael Matthews en la enseñanza de las ciencias a través de HFC, Nathan Willig [44] enfatiza que “la historia y la filosofía son herramientas y medios importantes para mejorar educación científica, haciéndola coherente con los objetivos de una educación liberal”, por lo tanto, en la enseñanza de la ciencia es significativo el uso de la HFC para una educación científica contextualizada. Arriassecq y Rivarosa consideran que la enseñanza de las ciencias debe ser de

una manera que permita a los estudiantes realizar un análisis crítico del hecho de que los aspectos sociales, históricos, filosóficos, éticos y contexto tecnológico está estrechamente vinculado al desarrollo, validación y aplicación del conocimiento científico [por lo que es necesario] considerar con mayor profundidad la reformulación de proyectos curriculares en los diferentes niveles educativos [45].

Lo anterior rescata la importancia de traer la historia y filosofía de la ciencia al aula a nuestros currículos escolares, visto que “la filosofía de la ciencia determina como hacer que los conceptos científicos sean significativos y se relacionen con la estructura científica ... (y) la historia de la ciencia da los medios para justificar afirmaciones científicas” [46].

Por lo tanto, la interpretación del espacio-tiempo en la educación secundaria, mediante la historia y filosofía de la ciencia, desarrolla en el estudiante un pensamiento cognitivo y crítico para la comprensión tanto de la evolución del conocimiento científico y de las teorías de la física moderna. Esto se plantea desde el mapa de diseño curricular (MDC) [47] (Figura 3).

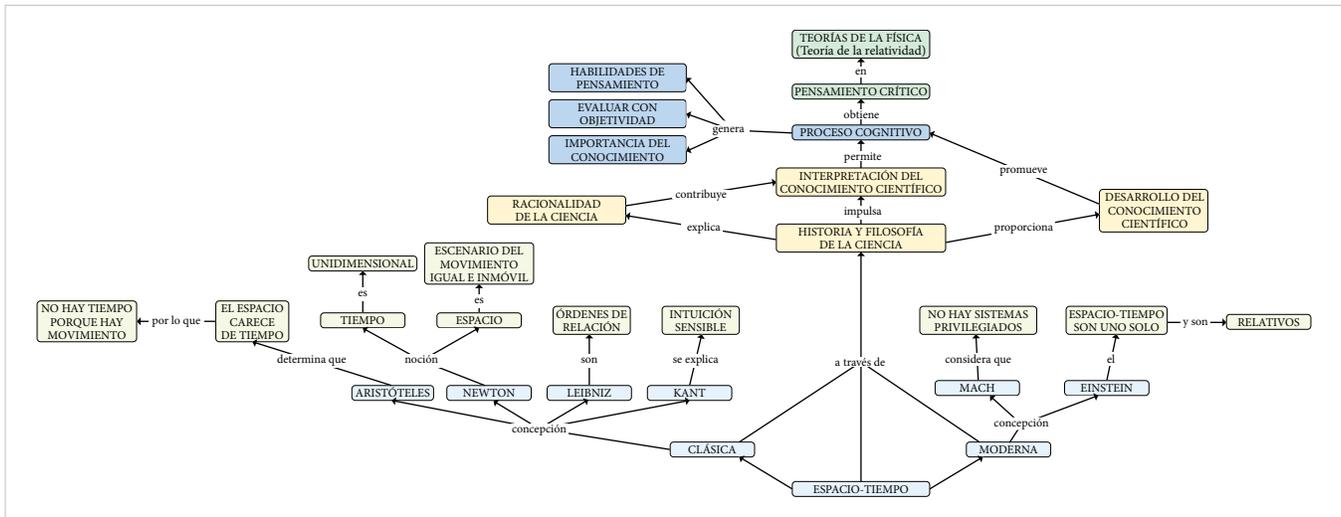


Figura 3. MDC de espacio-tiempo.

Este Mapa de Diseño Curricular es un modelo que permite comprender desde dónde iniciar y a dónde se pretende llegar. Aunque cada nivel tiene su contexto, su investigación, análisis e interpretación, no deja de ser significativo para lograr cumplir con el objetivo de introducir las temáticas de la física moderna en las aulas de la educación secundaria y, en este caso particular, en la construcción del entendimiento del espacio-tiempo para la formulación de la Teoría de la Relatividad.

Es fundamental tener en cuenta que la “ciencia es más que un cuerpo de conocimiento, es una manera de pensar” [48, p. 35], por consiguiente, aprender sobre una teoría científica, en este caso particular sobre la física y el espacio-tiempo, es asequible a todo público siempre y cuando esté motivado a ir más allá de su propio saber, tanto así “la ciencia nos acompaña en tal medida que todos tenemos una gran cantidad de intuiciones sobre lo que ésta involucra” [49]. No obstante, Wartofsky [50], citado por Ayala *et al.*, “considera que el conocimiento científico no se trata simplemente de tener conocimientos de los hechos sino de razonar a partir de ellos y asimismo razonar en dirección de ellos” [51]. Esto demuestra que la relatividad y en particular el espacio-tiempo puede ser abordada por todo aquel que desea aprenderla y enseñarla, no únicamente por aquellos que hayan deseado inclinarse por estudios sobre el campo de la física.

REFLEXIONES FINALES

No existe una única ruta para la enseñanza de las ciencias que contemple la física moderna para la educación secundaria. Llevar al aula temáticas como el espa-

cio-tiempo, que permitan la comprensión del desarrollo del conocimiento científico y por ende la Teoría de la Relatividad, son arduos trabajos y extensas investigaciones las cuales permitirán transformar tanto las prácticas educativas como los currículos escolares.

Siempre estarán presentes las preguntas de ¿cómo abordar las diferentes temáticas de la física moderna en el aula de secundaria?, ¿cómo abordar el espacio-tiempo en el aula secundaria? Por ende, este artículo se presenta para reflexionar sobre la importancia de la enseñanza de las ciencias en cuanto a temáticas que se encuentran inmersas en la física moderna y si son necesarias abordarlas desde niveles educativos básicos, como en la educación secundaria.

La discusión presentada acá sobre el constructo del espacio-tiempo evidencia que el conocimiento científico ha tenido que pasar por razonamientos que han permitido modificar las teorías y así plantear otras para lograr la comprensión de la naturaleza y del Universo mismo. Por ende, considerarlas desde la escuela secundaria permite mostrar en los estudiantes la relevancia de la ciencia, generando una motivación para comprender la utilidad de ella en el entorno cotidiano.

Asimismo, da pie para repensar cuál fue la necesidad de la física, para establecer que, en primer lugar, el espacio y el tiempo no son ni deben ser considerados por separados, sino que son un solo “espacio-tiempo” y esto fue lo fundamental para que Albert Einstein lograra sentar las bases de su Teoría de la Relatividad y, en segundo lugar, que el espacio-tiempo no se debe facultar como

un concepto exacto y absoluto, sino que es una entidad que se constituye principalmente de un sistema de referencia.

Finalmente, es importante considerar la importancia de la historia y filosofía de la ciencia en los procesos de enseñanza de las ciencias, ya que estas permiten generar este tipo de análisis y discusiones en la comprensión del conocimiento científico actual y adicionalmente permite proyectar modos de actuar para el abordaje de la ciencia moderna en las aulas de la escuela secundaria. Por tanto, la enseñanza de la física debe tener una profundidad histórica, filosófica y cultural para que se incorpore en lo cotidiano y se muestre interesante para los estudiantes y no referirse a una enseñanza donde no se interprete y que se lleve a cabo un aprendizaje de teorías porque simplemente funcionan [52].

Es clave señalar que las nuevas generaciones tienen una mayor accesibilidad a las tecnologías modernas y hoy en día a la inteligencia artificial (IA), por lo que los docentes deben ir a la vanguardia en los procesos de enseñanza-aprendizaje para así lograr la captación de sus estudiantes y lograr atraerlos hacia las ciencias. La investigación desarrollada por Montoya y Tuay muestran que “estudiantes de secundaria evidencian una clara tendencia positiva hacia la ciencia y que, a partir del análisis de la taxonomía COCTS (Cuestionario de Opiniones sobre ciencia, tecnología y sociedad), son de relevancia temas referentes a sus vivencias... (junto a) la ciencia aplicada en contextos específicos” [53]. Sin embargo, es importante establecer en el aula un proceso de razonamiento en la construcción del conocimiento científico mediante la historia y filosofía de la ciencia, que aporta en la construcción de un pensamiento crítico en los estudiantes de secundaria, Adúriz-Bravo exalta la “importancia que hoy en día se otorga a una enseñanza de las ciencias “informada” por la filosofía y la historia de la ciencia, enseñanza que apunta a la preparación de ciudadanos críticos que puedan tomar decisiones “socio-científicas” bien argumentadas” [54].

Para abordar la relatividad en la escuela secundaria es necesario incluir la entidad del espacio-tiempo, ya que es el objeto de conocimiento de esta, como lo expresa Sánchez Ron:

Como sucede en cualquier cambio profundo, para comprenderlo es preciso conocer lo que había antes ... para comprender la génesis de la teoría de la relatividad espe-

cial, que modificó radicalmente conceptos, como los de espacio tiempo absolutos, sobre los que asentó Newton su dinámica [55, p. IX].

Esto muestra que el espacio-tiempo es un pilar en la construcción y comprensión de la teoría de la relatividad, dado que estos son afectados por el movimiento a velocidades cercanas a la luz y, asimismo, contribuye en la abstracción y el entendimiento de la curvatura espaciotemporal en presencia de una masa, por lo que su abordaje es fundamental para ir más allá y captar toda la esencia de esta teoría relativista y sus aplicaciones apoyados en tecnologías como es el caso de los dispositivos de localización GPS (Global Positioning System).

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo investigativo permite evidenciar la importancia y alcance que puede tener en la enseñanza de la física al introducir temáticas de la física moderna o actual en las aulas de la educación secundaria.

Y aunque la Teoría de la Relatividad fue propuesta hace más de cien años, aún causa controversia su comprensión e indagación, por lo que es primordial considerar su enseñanza conceptual desde las aulas de la educación secundaria, iniciando claramente desde el entendimiento del espacio-tiempo, dado que esta teoría fue la que revolucionó la interpretación del espacio y del tiempo para dar pie a nuevas indagaciones de la física.

Finalmente, un pequeño aporte de la enseñanza de la física en la interpretación del espacio-tiempo en los estudiantes de secundaria constituye un avance significativo en lograr un interés hacia las ciencias y, asimismo, a conocer la construcción del conocimiento a lo largo de la historia.

REFERENCIAS

- [1] T. S. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas: ensayo preliminar de Ian Hacking*, México: Fondo de Cultura Económica, 2013, pp. 9-51.
- [2] J. M. Sánchez, *Espacio-Tiempo y Átomos. Relatividad y Mecánica Cuántica*, Madrid: Ediciones Akal, S. A., 1992.
- [3] J. M. Sánchez, “Usos y Abusos de la Historia de la Física en la Enseñanza”, *Enseñanza de las ciencias*, vol. 6, n.º 2, pp. 179-188, 1988.

- [4] U. Besson, *Didattica della fisica*, Carocci editore Studi Superiori, 2015.
- [5] M. Moreira, “Enseñanza de la física: aprendizaje significativo, aprendizaje mecánico y criticidad”, *Revista de Enseñanza de la Física*, vol. 26, n.º 1, pp. 45-52, 2014.
- [6] M. Izquierdo, M. Espinet, J. Bonil y R. Pujol, “Ciencia escolar y complejidad”, *Investigación en la escuela*, n.º 53, pp. 21-29, 2004.
- [7] J. Stachel, *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, Barcelona: Crítica, S. L., 2011.
- [8] J. M. Sánchez, “Albert Einstein”, en *Las matemáticas del siglo XX una mirada en 101 artículos*, A. Martinon, coord. España: Universidad de La Laguna, Sociedad Canaria Isaac Newton de Profesores de Matemáticas, Nivola, 2000, pp. 109-114.
- [9] A. Einstein, “Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento”, *Annalen der Physik*, vol. 17 pp. 891-921, 1905 (trad. por H. Quevedo, abr. 2005).
- [10] J. Ordoñez, V. Navarro y J. Sánchez, *Historia de la ciencia*, Barcelona: Austral, 2013.
- [11] K. Immanuel, *La ‘Dissertatio’ de 1770. Sobre la forma y los principios del mundo sensible y del inteligible*, Madrid: Ediciones Encuentro, S. A., 2014.
- [12] N. Isaac, *Principios Matemáticos de Filosofía Natural*, Madrid: Alianza Editorial, 2013.
- [13] E. Rada, *La polémica Leibniz-Clark*, Madrid: Taurus Ediciones S. A., 1980.
- [14] M. Schlick, “El espacio y el tiempo en la física contemporánea. Una introducción a la teoría de la relatividad y la gravitación (1917)”, en *El empirismo lógico. Textos básicos*, T. Mormann y Á Peláez, comps. Bogotá, Universidad del Rosario, 2016, pp. 163-231.
- [15] F. Stadler, “Ernst Mach: el paradigma antimetafísico positivista”, en *El círculo de Viena. Empirismo lógico, ciencia, cultura y política*, S. Friedrich, coord. México D. F., Fondo de Cultura Económica, 2011, pp. 107-136.
- [16] E. Mach, *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung Historisch-Kritisch dargestellt*, Leipzig: F. A. Brockhaus, 1883.
- [17] H. Minkowski, “Raum und zeit”, conferencia presentada en la 80.ª reunión de científicos naturales en Colonia, B. G. Teubner, 1908.
- [18] M. J. Page *et al.*, “Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas”, *Rev Esp Cardiol*, vol. 74, pp. 790-799, 2021.
- [19] G. Vakarou, G. Stylos y K. T. Georgios, “Effect of didactic intervention in Einsteinian physics on students’ interest in physics”, *Eur. J. Sci. Math. Educ.*, vol. 12, n.º 2, pp. 200-210, 2024.
- [20] I. Galili, “The Observer Concept in Science as a Basis for Its Further Curricular Application Within the Discipline Culture Paradigm”, *Science & Education*, pp. 1-31, 2024.
- [21] K. Schumacher *et al.*, “GR in VR: Using Immersive Virtual Reality as a Learning Tool for General Relativity”, presentado en la ASEE Annual Conference and Exposition, 2023.
- [22] P. Alstein, L. K. Krijtenburg y W. R. van Joolingen, “Teaching and learning special relativity theory in secondary and lower undergraduate education: A literature review”, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, vol. 17, art. 023101, 2021.
- [23] W. Park, S. Yang y J. Song, “When Modern Physics Meets Nature of Science”, *Sci & Educ*, vol. 28, pp. 1055-1083, 2019, doi: [1007/s11191-019-00075-9](https://doi.org/10.1007/s11191-019-00075-9).
- [24] R. R. Addad, A. Rosolio y R. Cassan, “Reflexiones sobre la enseñanza actual en física. Base conceptual”, *Revista de enseñanza de la física*, vol. 34, n.º extra, pp. 9-14, 2022.
- [25] C. McInerney y P. Sutton, “Einsteinian gravitational concepts throughout secondary school”, *Phys. Educ.*, vol. 53, n.º 1, art. 015001, 2023.
- [26] T. Kaur *et al.*, “Determining the Intelligibility of Einsteinian Concepts with Middle School Students”, *Res Sci Educ*, vol. 50, pp. 2505-2532, 2020.
- [27] R. Steier y M. Kersting, “Metaimagining and Embodied Conceptions of Spacetime”, *Cognition and Instruction*, vol. 37, no. 2, pp. 145-168, 2019, doi: [10.1080/07370008.2019.1580711](https://doi.org/10.1080/07370008.2019.1580711).
- [28] M. Kersting y R. Steier, “Understanding Curved Spacetime. The Role of the Rubber Sheet Analogy in

- Learning General Relativity”, *Sci & Educ*, vol. 27, n.º 7-8 27, pp. 593-623, 2018, doi: [10.1007/s11191-018-9997-4](https://doi.org/10.1007/s11191-018-9997-4).
- [29] M. Kersting, E. K. Henriksen, M. V. Bøe y C. Angell, “General relativity in upper secondary school: Design and evaluation of an online learning environment using the model of educational reconstruction”, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, vol. 14, n.º 1, art. 010130, 2018. doi: [10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010130](https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010130).
- [30] I. Rizos, A. Patronis y D. Lappas, “‘There is One Geometry and in Each Case There is a Different Formula’ Students’ Conceptions and Strategies in an Attempt of Producing a Minkowskian Metric on Space-Time”, *Sci & Educ*, vol. 26, n.º 6, pp. 691-710, 2017, doi: [10.1007/s11191-017-9915-1](https://doi.org/10.1007/s11191-017-9915-1).
- [31] I. Arriassecq, E. E. Cayul y I. M. Greca, “Secuencias de enseñanza y aprendizaje basadas en resultados de investigación: propuesta de un marco teórico para el abordaje de la teoría especial de la relatividad”, *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 35, n.º 1, pp. 133-155, 2017.
- [32] K. Dimitriadi y K. Halkia, “Secondary Students’ Understanding of Basic Ideas of Special Relativity”, *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 34, n.º 16, pp. 2565-2582, 2012, doi: [10.1080/09500693.2012.705048](https://doi.org/10.1080/09500693.2012.705048).
- [33] L. M. D. González, R. C. A. Martínez y R. E. Solís, “La investigación didáctica sobre los libros de texto, el espacio en física y el conocimiento escolar”, *Tecné. Episteme. Didaxis: TED*, n.º extraordinario, pp. 2557-2565, nov. 2021.
- [34] V. M. d. R. Pantoja, “Los experimentos mentales en la enseñanza: una manera de construir conocimiento de los conceptos de espacio y tiempo”, tesis doctoral, Universidad Metropolitana de Educación, Ciencia y Tecnología (UMECIT), Panamá, 2021.
- [35] E. J. Arboleda, “El perspectivismo en el espacio tiempo de Einstein: Una alternativa para articular la formación en ciencias y la formación ciudadana por medio de reflexiones filosófico-epistemológicas”, trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2021.
- [36] I. E. R. Ortiz, “Los conceptos del espacio-tiempo entre Newton y Einstein para la enseñanza de la física”, tesis de maestría, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia, 2017.
- [37] I. Arriassecq, E. Cayul y I. M. Greca, “Enseñanza de la teoría general de la relatividad en la escuela secundaria: por qué, qué y cómo”, *Revista de Enseñanza de la Física*, vol. 29, n.º 2, pp. 33-44, 2017, doi: [10.55767/2451.6007.v29.n2.18802](https://doi.org/10.55767/2451.6007.v29.n2.18802).
- [38] E. E. Cayul y I. Arriassecq, “Utilización de los diagramas de Minkowski para la enseñanza de la Teoría Especial de la Relatividad en la escuela secundaria”, *Revista Enseñanza de la Física*, vol. 27, n.º extra, pp. 323-331, 2015.
- [39] C. E. Guarín, “Diversidad conceptual y epistémica de los conceptos de espacio y tiempo”, tesis de maestría, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia, 2013.
- [40] B. Stein, H. Stein y I. Galili, “The Concept of Observer in Science Teaching in Middle School: Pre-Instructional Knowledge as a Lever for Learning rather than an Obstacle”, *Educ. Sci.*, vol. 13, n.º 1, pp. 2-25, 2023, doi: [10.3390/educsci13010095](https://doi.org/10.3390/educsci13010095).
- [41] *Estándares Básicos de Competencias en Lenguaje, Matemáticas, Ciencias y Ciudadanas*, Ministerio de Educación Nacional, Bogotá, Colombia, sept. 20, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.mineducacion.gov.co/portal/men/Publicaciones/Guias/116042:Estandares-Basicos-de-Competencias-en-Lenguaje-Matematicas-Ciencias-y-Ciudadanas>
- [42] F. Ostermann y M. A. Moreira, “Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores”, *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 18, n.º 3, pp. 391-404, 2000.
- [43] A. Einstein, *El significado de la relatividad*, Barcelona: Planeta-Deagostini, 1986.
- [44] L. N. Willig, “Michael Matthews and the development of History, Philosophy and Science Teaching: thirty years after ‘the present rapprochement’”, *Rev. Sci. Math. ICT Educ.*, vol. 15, n.º 2, pp. 101-121, 2021, doi: [10.26220/rev.3824](https://doi.org/10.26220/rev.3824).
- [45] I. Arriassecq y A. Rivarosa, “Science Teaching and Research in Argentina: The Contribution of History and Philosophy of Science”, en *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, M. R. Matthews, ed. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013, pp. 2301-2326.

- [46] Y. Lehavi y B.-S. Eylon, “Integrating Science Education Research and History and Philosophy of Science in Developing an Energy Curriculum”, en *History, Philosophy and Science Teaching, Science: Philosophy, History and Education*, M. Matthews, ed. Springer International Publishing AG 2018, 2018, pp. 235-260.
- [47] Á. García-Martínez, R. Hernández-Barbosa y L. Abella-Peña, “Diseño del trabajo de aula: un proceso fundamental hacia la profesionalización de la acción docente”, *Revista Científica*, vol. 33, n.º 3, pp. 316-331, 2018.
- [48] C. Sagan, *El Mundo y sus Demonios. La Ciencia como una luz en la Oscuridad*, Barcelona: Planeta, 2000.
- [49] K. Lambert y G. Brittan, *Introducción a la Filosofía de la Ciencia*, Madrid: Ed. Guadarrama Punto Omega, 1975.
- [50] M. W. Wartofsky, *Introducción a la Filosofía de la Ciencia*, Madrid: Alianza Universidad, 1983.
- [51] M. M. Ayala, M. Garzón y F. Malagón, “Consideraciones sobre la Formalización y Matematización de los Fenómenos Físicos”, *Praxis Filosófica*, n.º 25, pp. 39-54, 2007, doi: [10.25100/pfilosofica.v0i25.3111](https://doi.org/10.25100/pfilosofica.v0i25.3111).
- [52] O. Levrini, “Relatività ristretta e concezioni di spazio”, *Gironale di fisica*, vol. XL, n.º 4, pp. 205-220, 1999.
- [53] P. A. Montoya-Ramírez y R. N. Tuay-Sigua, “Actitudes de estudiantes de Secundaria hacia las Ciencias Naturales: estudio preliminar datos ROSES”, *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, n.º 55, pp. 172-189, 2024, doi: [10.17227/ted.num55-18845](https://doi.org/10.17227/ted.num55-18845).
- [54] A. Adúriz-Bravo, “Hacia una didáctica de la filosofía de la ciencia para el profesorado de ciencias en formación”, en *Indagaciones cognoscitivas acerca de la enseñanza de la filosofía y de la ciencia*, Z. Monroy, R. León-Sánchez y G. Alvarez, eds. México: UNAM, 2021, cap. 1, pp. 1-24.
- [55] J. M. Sánchez, *Albert Einstein: su vida, su obra y su mundo*, Barcelona: Editorial Crítica, 2015.

Estrategias de enseñanza de la física en el bachillerato basadas en la didáctica del razonamiento proporcional

Physics Teaching Strategies Supported on the Didactics of Proportional Reasoning

Ulises Solís Hernández^{1a} ✉ , Beatriz Oropeza Villalobos^{1b} 

¹Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México, {^aPlantel Benito Juárez, ^bPlantel Ricardo Flores Magón}, Ciudad de México, México

RESUMEN

El pensamiento proporcional no ha sido suficientemente aprovechado en la enseñanza de la física a pesar de que esta habilidad es una característica más del pensamiento científico. En este trabajo se muestra cómo la didáctica específica de la proporcionalidad puede aplicarse a los procesos de enseñanza-aprendizaje de las asignaturas de física de nivel bachillerato. Esta didáctica desarrolla el pensamiento proporcional en los estudiantes, al mismo tiempo que se utiliza para introducir conceptos físicos, estudiar la relación matemática entre variables físicas y desarrollar habilidades en la resolución de problemas. Como ejemplo de esta propuesta didáctica, se presentan dos estrategias educativas aplicadas a grupos del Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México (IEMS) para introducir conceptos de física apoyadas en el razonamiento proporcional. Con las estrategias se consigue que los estudiantes, guiados por el docente, comprendan la dependencia variacional entre los conceptos físicos y ocupen nuevos métodos para resolver problemas basados en la razón unitaria.

PALABRAS CLAVE: razonamiento proporcional; didáctica específica de la física; estrategias didácticas, enseñanza de la ciencia.

ABSTRACT

Proportional reasoning has not been sufficiently exploited in physics education, although this ability is a characteristic of scientific thinking. In this work, we show how the specific didactics of proportionality can be applied to the teaching-learning processes of physics subjects in high school-level courses. This didactic develops proportional thinking in students, and at the same time, it is useful for introducing physical concepts and better understanding the mathematical relationship between physical variables and problem-solving. As an example of this didactic proposal, we present two educational strategies applied to Instituto de Educación Media Superior (IEMS) groups to introduce physics concepts supported by proportional reasoning, in which students, guided by the teacher, understand the variational dependence between physical concepts and use new methods to solve problems based on the unitary ratio.

KEYWORDS: proportional reasoning; specific physics didactics; teaching strategies, science teaching.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Ulises Solís Hernández
INSTITUCIÓN: Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México, plantel Benito Juárez
DIRECCIÓN: Calle Zacatlán esq. Cempazuchitl s/n, col. Pueblo San Lorenzo, Alcaldía Iztapalapa, C. P. 09790, Ciudad de México
CORREO ELECTRÓNICO: ulises.solis@iems.edu.mx

Fecha de recepción: 31 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:** 30 de septiembre de 2024. **Fecha de publicación:** 9 de octubre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con diversos autores, el concepto de *razonamiento proporcional* en física escolar se considera un vehículo que permite una liga racional entre los conceptos físicos, las leyes que los describen y la resolución de problemas numéricos [1], [2]. Sin embargo, a pesar del beneficio que aporta al proceso de aprendizaje en esta asignatura, se observa que en el material escrito usado para apoyo de las clases, en particular los libros de texto a nivel medio superior, este tema no ha sido abordado con la importancia y formalidad que es requerida, o que simplemente se encuentra ausente.

Por ejemplo, en [3] se emplea constantemente en los diferentes capítulos el concepto de razonamiento proporcional en la descripción de las relaciones entre las variables que describen un fenómeno físico, tal como muestra el siguiente enunciado: “Decimos que la aceleración producida es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él...” [3, p. 58], pero omite las explicaciones previas del concepto de relaciones de proporcionalidad y solamente se presenta una breve viñeta alusiva a ello, que indica que “Cuando dos cantidades son directamente proporcionales entre sí, cuando una aumenta, la otra también lo hace. Sin embargo, cuando las dos son inversamente proporcionales entre sí, cuando una aumenta, la otra disminuye” [3, p. 63].

Esta situación se repite en otro material frecuentemente empleado como libro de texto [4], dentro del cual se omite la descripción explícita. Una situación interesante es un texto [5] en el que se aborda el tema cuando se describe la construcción de gráficas de movimiento.

Este breve análisis permite suponer que en los libros de texto de física de nivel bachillerato se considera que los estudiantes en este nivel académico han incorporado el aprendizaje de las relaciones de proporcionalidad en el nivel escolar previo, o incluso que este tema corresponde exclusivamente al ámbito de las matemáticas escolares. También, es plausible que al considerarse a la proporcionalidad una herramienta matemática, solo se aborda cuando es necesaria en temas específicos, tales como la graficación de la relación entre variables y la transformación entre unidades.

Un ejemplo de texto que sí considera específicamente el tema de interés es el denominado “Proporción Directa e Inversa” [6], en el cual se explica el concepto de relacio-

nes directas e inversas, se muestran las representaciones gráficas de ellas y se presentan ejemplos relacionados con fenómenos físicos. El siguiente párrafo es extraído de este texto:

“Existen casos de variables relacionadas de manera directa donde el aumento de una variable ocasiona un aumento proporcional en otra variable, o la disminución de una variable ocasiona una disminución proporcional de otra variable. A esto se le llama proporción directa” [6, p. 12].

Esta situación genera la necesidad de que los docentes de nivel medio superior reestructuren las estrategias en relación a la enseñanza de las relaciones de proporcionalidad a través de la innovación didáctica con la intención de potenciar los procesos de enseñanza aprendizaje, que permitan, por una parte, ligarlos a la comprensión de los fenómenos físicos y, por otra, facilitar el aprendizaje de la resolución de problemas numéricos que permita trascender la aplicación mecánica de la regla de tres o el factor de conversión [7].

En este trabajo se presenta una didáctica para la enseñanza de la física basada en la proporcionalidad y adaptada a cursos del primer ciclo del Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México (IEMS). En esta institución, los dos cursos obligatorios de física se imparten a estudiantes de nuevo ingreso; el primer semestre, el temario corresponde a estructura y propiedades de la materia y elementos de termodinámica; después, en el segundo semestre se aborda mecánica y electromagnetismo. Dado este contexto escolar, las estrategias presentadas en este trabajo han sido diseñadas para estudiantes que recientemente terminaron la escuela secundaria y que, en su mayoría, no cuentan con las suficientes habilidades matemáticas.

II. RAZONAMIENTO PROPORCIONAL EN LA DIDÁCTICA DE LA FÍSICA

Se propone aquí un enfoque en el que la enseñanza de algunos temas de física se haga empleando estrategias didácticas que utilizan el concepto de proporcionalidad. Esto implica que al mismo tiempo que se consiguen objetivos de aprendizaje propios de las asignaturas, también se desarrolla el *pensamiento* o *razonamiento proporcional* (RP) en los estudiantes, entendido como la capacidad de identificar patrones en los cambios de magnitudes, de encontrar relaciones de dependencia proporcional entre variables y de modelar estas covaria-

ciones con expresiones algebraicas y representaciones visuales [8].

Con una metodología que se detalla más adelante, a través de la guía del docente los estudiantes van encontrando sentido a las magnitudes físicas, a sus unidades, a los nuevos conceptos que las relacionan y a la dependencia entre las variables físicas. Esto es posible al usar la proporcionalidad en las estrategias de enseñanza no solo como una herramienta matemática más para resolver problemas, sino también para introducir nuevos conceptos de física, encontrar la relación matemática entre las variables físicas y en algunos casos, para que los mismos estudiantes propongan fórmulas o expresiones matemáticas que resuman estas dependencias.

Hay diferentes dominios o habilidades del RP que se pueden desarrollar de manera paralela a los objetivos de aprendizaje de las asignaturas de física y, por lo mismo, pueden trabajarse en la mayoría de los contenidos de los cursos de nivel bachillerato. A continuación se detalla estas habilidades que se pueden encontrar en la didáctica de las matemáticas [9], [10] y se muestra cómo se pueden aplicar a la didáctica de la física.

A. COMPARACIÓN DE MAGNITUDES A TRAVÉS DE LA RAZÓN

Cuando se comparan dos cantidades es posible realizarlo con la razón geométrica entre ellas. Si se desea saber cuántas veces es más grande la masa de un auto comparado con la de una persona, la razón es el resultado de comparar estas dos magnitudes A y B a través de una división representada por A/B . Una razón así planteada puede entenderse en el sentido de cuántas veces una cantidad es más grande que la otra. Es fácil proponer este tipo de ejercicios a los estudiantes en los cursos de física y tiene varias utilidades para el aprendizaje dependiendo del tipo de razón (o comparación) que se esté realizando [11, p. 72].

Se puede iniciar estas comparaciones con razones homogéneas, es decir, aquellas en las que las cantidades son del mismo tipo. La razón interpretada de esta forma ejercita la habilidad de identificar diferentes magnitudes en los objetos. Por ejemplo, si se solicita a los estudiantes que comparen el tamaño de un pizarrón con el de una hoja de cuaderno, primero van a tener que identificar las magnitudes que pueden comparar y posteriormente aprenden que en estos casos solo tiene sentido comparar magnitudes del mismo tipo, o sea,

el largo del pizarrón con el largo de la hoja, o el área del pizarrón con el área de la hoja, no tiene significado comparar la superficie del pizarrón con el largo de la hoja.

Aunque el ejercicio anterior parece muy básico, es necesario discutirlo, ya que muchas de estas magnitudes no tienen significado para la mayoría de los estudiantes. De hecho, frecuentemente los docentes deben repasar o trabajar por primera vez con ellos conceptos como longitud, área y volumen.

Por ejemplo: *dibuja en el piso exactamente 1 m^2 y calcula su perímetro. Después, dibuja también en el piso un contorno cerrado que encierre la superficie de un departamento de 70 m^2 y también calcula su perímetro. Ahora compara las áreas y los perímetros de ambas superficies.*

Esta actividad práctica permite que los estudiantes conozcan el tamaño real de 1 m^2 y también que al comparar los perímetros se percaten que la razón entre áreas no es necesariamente la misma que la razón entre perímetros.

Otro ejemplo con superficies y longitudes es el siguiente: *¿Qué es mayor, un círculo con un radio de 6 cm o un cuadrado con una superficie de 100 cm^2 ?*

Aunque el anterior problema los estudiantes pueden solucionarlo usando fórmulas de geometría, se recomienda proponerles que dibujen ambas figuras en su cuaderno, con el propósito es discutir con los estudiantes cuáles son las magnitudes del mismo tipo que se pueden comparar del círculo y del cuadrado, llegando a la conclusión de que no tiene sentido comparar una longitud (el radio de un círculo) con una superficie (el área de un cuadrado).

En el siguiente ejercicio es sencillo calcular dos volúmenes y compararlos, pero lo más importante, es que para resolverlo los estudiantes deben comparar las magnitudes adecuadas. Es común que al responder muchos estudiantes comparen las dimensiones de ambos objetos (el doble de las dimensiones de la caja grande con respecto a las de la caja pequeña) y no sus volúmenes.

¿Cuántas pelotas iguales caben en una caja de $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, si 12 de las pelotas llenan una caja de $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$?

Aplicar la razón geométrica en problemas de comparación proporciona a los estudiantes el hábito y la habilidad de identificar las magnitudes físicas, a la vez que adquieren conciencia de su significado y del sentido de escribir las unidades de medida. Una vez que se comienza a realizar este tipo de comparaciones, para los estudiantes se vuelve habitual tratar de resolver así los problemas de física y es posible comenzar a plantear ejercicios del tipo siguiente:

¿Qué tiene más masa, tu profesor o todo el aire que ocupa el volumen del aula?

¿Cabén 4500 litros de combustible diésel en un tanque de $2.5\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m}$?

¿Cabén 4500 kg de combustible diésel en un tanque de $2.5\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m}$?

Estos problemas también son de comparación en los cuales ahora es importante conocer antes la relación entre dos magnitudes de diferente tipo (masa y volumen), que en proporcionalidad se conoce como razón heterogénea.

B. RAZONES HETEROGÉNEAS Y LA CONSTANTE DE PROPORCIONALIDAD

La razón geométrica también se puede emplear para conocer la covariación entre dos magnitudes heterogéneas, es decir que pertenecen a diferente clase. Dado que en física muchas magnitudes están relacionadas entre sí, una razón entre ellas puede tener un significado nuevo. Cuando la proporción entre dos magnitudes que varían siempre se cumple, se puede introducir una nueva magnitud k , llamada *constante de proporcionalidad*.

La constante de proporcionalidad generalmente tiene un significado físico expresado a través de sus unidades [12, p. 35]. Por ejemplo, en una actividad para abordar el concepto de densidad, en lugar de introducir este concepto de forma tradicional con la fórmula $\text{densidad} = \text{masa} / \text{volumen}$, mejor se propone a los estudiantes hacer mediciones de masa y volumen para una misma sustancia, por ejemplo, café soluble, y registrarlos como en la Tabla 1. Con estos datos los estudiantes observan que hay una relación de proporcionalidad entre la masa y volumen de la sustancia, lo cual manifiesta que hay una íntima relación matemática entre ellas. Después, se les pide que dividan estas dos variables físicas y es en este

paso en el que los estudiantes descubren un valor que se repite para cualquier par de datos. Al final de la actividad, el docente comenta que a partir de ese momento, es posible identificar a ese material únicamente con esa constante y que por eso merece un nuevo nombre, al que se denomina densidad.

TABLA 1
RELACIÓN MASA-VOLUMEN PARA UN CAFÉ SOLUBLE

MASA (g)	VOLUMEN (cm ³)
0.21	0.294
0.35	0.515
0.50	0.738
0.69	1.031
0.91	1.322

Después se realiza el refuerzo de esta actividad que consiste en repetir con sustancias diferentes como azúcar, sal, tierra, alcohol o aceite. Al encontrar con el mismo método una constante de proporcionalidad para cada una de las sustancias, para los estudiantes está claro que la densidad es una propiedad que toda materia tiene y comprenden que esta propiedad indica la relación de proporcionalidad entre masa y volumen, relación en la que al conocer cómo varía una de ellas, es posible determinar cómo la otra se modifica.

La constante de proporcionalidad que compara y relaciona dos magnitudes de diferente tipo, en muchos casos tiene un significado propio, que puede interpretarse como una nueva constante física o como una nueva magnitud con unidades que reflejan el tipo de proporcionalidad que hay entre ellas, directa o inversa. Es posible aprovechar esta característica de la proporcionalidad para introducir otros conceptos de la misma forma en que se presentó a la densidad, por ejemplo, con la misma metodología se puede introducir a la constante elástica, a la presión en sólidos, a la velocidad, a la potencia o a la ley de Ohm.

Introducir conceptos físicos vía la constante de proporcionalidad también destaca los conceptos de cambio (intervalo) y covariación. Por ejemplo, la aceleración. El cambio de la rapidez Δv de un objeto cada cierto intervalo de tiempo Δt se puede presentar a través de una razón $\Delta v / \Delta t$ que es constante si la covariación es proporcional. Esta constante que se denomina aceleración a , es una nueva magnitud física que, una vez conocida, puede servir para encontrar los cambios de rapidez en

la forma $\Delta v = a\Delta t$. Cuando se discute este tema en clase, es necesario destacar que la unidad de esta magnitud es (metros/segundo) / segundo la cual indica la relación entre las magnitudes de rapidez y tiempo, es decir, el cambio de rapidez (medida en m/s) cada cierto tiempo (1 s).

Un enfoque de enseñanza basado en la proporcionalidad ayuda a los estudiantes a familiarizarse con el estilo científico en el que están enunciadas las leyes de la física. Incluso, históricamente varias de estas leyes son expresadas así porque provienen de experimentos que han revelado esta relación matemática, como la ley de Coulomb. En las actividades prácticas propuestas en este trabajo priorizamos observar la relación de proporcionalidad que hay entre magnitudes físicas en lugar de presentar primero una fórmula.

C. SOLUCIÓN DE PROBLEMAS CON LA RAZÓN UNITARIA

Regularmente, los estudiantes piensan que para resolver un problema de física basta con conocer una fórmula y saber manipularla algebraicamente. Pero hay casos en los que comprendiendo la relación proporcional entre las variables físicas involucradas en un problema, ayuda a comprender nuevos conceptos e ideas físicas. Para este fin es útil el pensamiento proporcional y su característica de encontrar la covariación entre dos o más magnitudes físicas.

Para los problemas en los que es necesario hacer un cálculo numérico, en la didáctica que se propone en este trabajo se recurre a estrategias de solución propias del razonamiento proporcional. Sin embargo, cabe aclarar que no se recomienda usar la regla de tres, pues los estudiantes terminan entendiendo este método como una receta que permite resolver cierto tipo de problemas siguiendo memorística y mecánicamente de una serie de pasos [13].

Usar métodos mecánicos para resolver un problema tiene el riesgo de que los estudiantes ignoren la física involucrada. Por ejemplo, si se les propone este ejercicio: *un resorte sostiene una masa con un peso de 60 N y se estira 3 cm. ¿Cuánta fuerza es necesaria para estirarlo 4.2 cm?* Un estudiante puede resolver el problema con regla de tres o despejando a la fuerza de una fórmula, pero sin tener idea de la relación proporcional entre fuerza y estiramiento, que es clave en el concepto de elasticidad. Es posible resolver este problema del resorte encontrando

primero la fuerza necesaria para estirarlo 1 cm, y luego presentar esta relación como 20 N/cm, la cual permite encontrar fácilmente la operación para determinar la fuerza para estirarlo 4.2 cm. Aunque al encontrar la razón 20 N/cm parece un paso extra, este valor ilustra la relación entre fuerza y estiramiento y además, revela que hay una constante de proporcionalidad cuyo valor se interpreta como una propiedad del resorte.

En el RP es básico desarrollar la noción de *razón unitaria* o de “tanto por uno”, que se refiere a interpretar a una razón como el valor de una magnitud por la unidad de otra magnitud. Es interesante encontrar que la mayoría de los estudiantes no conocen este concepto y mucho menos su utilidad para resolver problemas. Para que los estudiantes comprendan mejor su significado se recomienda mostrar ejemplos de razones unitarias que estén relacionados con su cotidianidad, por ejemplo, el precio unitario de un producto o la rapidez de internet (Figura 1).



Figura 1. El precio unitario como razón unitaria. En física, algunas razones unitarias adquieren la categoría de propiedades físicas, como la densidad o elasticidad.

Al resolver problemas con la razón unitaria, es importante no comenzar usando fórmulas, sino comprendiendo los conceptos que relacionan dos o más magnitudes físicas. Por ejemplo, la densidad es uno de estos conceptos expresados como razón unitaria y debemos hacer notar que las unidades de este concepto expresan la relación entre masa y volumen. De esta manera, cuando se dice que la densidad de la gasolina es 0.68 g/cm^3 , también es necesario que los estudiantes expresen esta información como la relación unitaria entre las dos magnitudes: cada 1 cm^3 de gasolina tiene una masa de 0.68 g. Estudiando así este concepto se puede formular problemas como el siguiente o incluso realizarlo experimentalmente:

Cuando dejamos caer un tornillo de hierro en una probeta con agua, el nivel del líquido aumenta de 49 mL a 52 mL. Calcula la masa del tornillo.

Para resolver el problema siguiendo esta didáctica, primero se repasa con los estudiantes que masa y volumen están relacionados entre sí por una constante física que para el hierro es de 7.87 g/cm^3 . ¿Qué significado físico tiene este dato? Expresado como una razón unitaria significa que por cada 1 cm^3 de hierro se tiene una masa de 7.87 g, lo que también destaca la importancia de las unidades, si el volumen se presenta en m^3 o litros, se debe convertir a cm^3 . Con esta forma verbal de expresar la densidad, a continuación se analiza la covariación de las dos magnitudes; cuando el volumen del material se duplica también se duplica su masa, si tenemos el triple de su volumen tenemos el triple de masa y así sucesivamente: por 3 mL de hierro hay una masa de 23.61 g. Este planteamiento hace que surja de manera natural la idea de hacer una multiplicación para calcular la masa, llegando a la solución sin recurrir a una fórmula ni realizar ningún despeje. Por supuesto, en el laboratorio se pueden proponer con esta metodología no solo prácticas, sino problemas que impliquen la necesidad de hacer mediciones y conseguir estas propiedades físicas que son a su vez razones unitarias. Esto reafirma un enfoque en el que la indagación y experimentación es básica para obtener conocimiento científico.

El siguiente es un ejemplo de aplicación del pensamiento proporcional en la enseñanza de la física que se recomienda realizar con los estudiantes en una clase entera:

A las 3 p. m., un autobús sale de un punto A con destino a un punto B, situado a 500 km de distancia, con una rapidez constante de 100 km/h. Una hora más tarde, una persona en una camioneta parte del mismo punto A, siguiendo el mismo camino hasta el punto B con una rapidez constante de 140 km/h.

- ¿Cuánto tiempo tarda el autobús en llegar al punto B?*
- ¿A qué hora la camioneta alcanza al autobús?, ¿lo alcanza antes de que el autobús llegue al punto B?*
- ¿A qué distancia del punto de inicio de su recorrido la camioneta alcanza al autobús?*

La solución a los tres incisos del problema puede llevarse a cabo desde el punto de vista de la razón unitaria. Si se interpreta el significado de la rapidez del autobús como la distancia que recorre (100 km) cada hora, entonces es sencillo pensar en la operación que responde

al inciso a). Para los incisos b) y c), si no se ha trabajado con la proporcionalidad, regularmente se resuelven planteando un sistema de ecuaciones lineales; desafortunadamente, esta álgebra es complicada de seguir por la mayoría de los estudiantes porque apenas dominan la aritmética básica. Pero si se parte de expresar la rapidez de los vehículos como razón unitaria, es posible determinar la distancia avanzada por los vehículos conforme pasan las horas. Una vez realizado lo anterior, solo observando los datos en una tabla los estudiantes pueden encontrar las respuestas a los incisos b) y c) inmediatamente. Como complemento a este problema se solicita a los estudiantes que grafiquen los datos mostrando la relación lineal entre intervalos de distancia y tiempo, la mayoría de ellos se sorprende al notar que cuando las dos líneas que representan el movimiento de cada vehículo se intersectan, ahí se tienen también las respuestas de los incisos.

La didáctica basada en el RP puede ligarse al contenido que se esté abordando en un momento particular de los cursos de física, se recomienda a los docentes utilizarla en sus estrategias didácticas de los cursos de física de nivel bachillerato y en particular se sugiere para cuando se aborden los temas como, elasticidad, hidrostática, calores latente y específico, dilatación lineal térmica, ley de Coulomb, ley de Ohm, potencia eléctrica, rapidez, aceleración uniforme y segunda ley de Newton.

En las siguientes secciones se mostrarán como ejemplos dos estrategias aplicadas en cursos de física de nivel bachillerato. En ambas actividades se busca que los estudiantes alcancen los objetivos de aprendizajes propios de la asignatura, pero al mismo tiempo, se destaca cómo la proporcionalidad es una herramienta en estos procesos de enseñanza-aprendizaje.

III. DE TACOS Y RESORTES

Como se ha comentado, la comprensión de los fenómenos físicos requiere evitar la presentación descontextualizada de los modelos matemáticos o fórmulas sin análisis previo de la relación entre variables. Para apuntalar el análisis de las relaciones de proporcionalidades, es conveniente iniciar con ejemplos de situaciones de la vida cotidiana. En este caso, para el tema de elasticidad y Ley de Hooke el análisis de la proporcionalidad entre variables se antecede por un ejercicio relacionado con la compra de tacos, situación que es conocida y común para la mayoría de los estudiantes y que representa un

ejemplo de la aplicación de habilidades matemáticas empíricas.

Se muestra una tabla cuyo encabezado de las columnas es cierta cantidad de dinero disponible y en los renglones se anota el precio de cada taco, tal como se muestra un ejemplo en la [Tabla 2](#). A continuación se solicita a cada estudiante que indique el valor de tacos que se puede comprar correspondiente a alguna de las celdas. Los valores numéricos están considerados para que las operaciones se realicen mediante cálculo mental, pero también es posible el uso de calculadora.

TABLA 2
RELACIÓN DE PROPORCIONALIDAD PARA TACOS

PRECIO DEL TACO	DINERO DISPONIBLE			
	\$ 100	\$ 200	\$ 400	\$ 500
\$ 10				
\$ 20				
\$ 50				

Al concluir el llenado se establece y verbaliza la relación directamente proporcional entre el dinero disponible y el número de tacos que es posible adquirir y la relación inversamente proporcional entre el precio y el número de tacos.

Posteriormente se aborda el análisis de las cuestiones teórico-conceptuales de elasticidad y de las variables involucradas (fuerza, deformación y constante elástica). La explicación y descripción de esta última variable puede realizarse con la presentación física y manipulable de tres materiales elásticos con diferentes constantes de proporcionalidad, que pueden mostrarse como “duros” o “suaves”. En el caso de los primeros, se requiere mayor fuerza para provocar cierta deformación, mientras que en los segundos la aplicación de la fuerza es menor para provocar la misma deformación.

Lo anterior se describe a través de ejemplos numéricos que permite que los estudiantes construyan un esquema mental de la variable. Por ejemplo, para el primer material elástico es necesario aplicar 10 N de fuerza para deformar 1 cm, mientras que para el segundo solo se requieren 5 N para provocar la misma deformación. Se verbaliza que precisamente eso significa la constante elástica: la cantidad de fuerza requerida para provocar cierta deformación. Se sugiere también mencionar que este parámetro a su vez depende de ciertas característi-

cas (material del que está fabricado, longitud, temperatura, etc.).

Conformado el escenario teórico, ahora es posible realizar la transferencia del aprendizaje de las relaciones de proporcionalidad obtenida en la actividad de tacos al caso de materiales elásticos. Se propone una tabla en la cual el encabezado de las columnas corresponde a cierto valor de fuerza aplicado, mientras que en las filas se asignan diferentes valores de constantes elásticas, tal como muestra la [Tabla 3](#). El número de columnas y de filas, así como la asignación de los datos quedan a consideración del docente, considerando el contexto académico del grupo en particular y el tiempo disponible. En este caso, las unidades de deformación usadas (cm) corresponden a ejemplos de materiales elásticos, tales como ligas o resortes de ropa, que es posible usar en una sesión demostrativa.

TABLA 3
RELACIÓN DE PROPORCIONALIDAD PARA MATERIALES ELÁSTICOS

CONSTANTE ELÁSTICA K	FUERZA EJERCIDA F			
	10 N	20 N	50 N	100 N
2 N/cm				
5 N/cm				
10 N/cm				

Nuevamente se solicita la participación de los estudiantes para el llenado de las diferentes celdas, con preguntas formalmente estructuradas, tal como “Si la constante del material elástico es 2 N/cm, lo que significa que es necesario aplicar 2 N de fuerza para deformar su longitud en 1 cm, lo que significa que por cada 2 N se deforma 1 cm ¿cuánto se deforma si se aplican 10 N?”. De esta manera procede de la misma manera hasta lograr la construcción de todas las celdas.

En el caso de que con alguno de los estudiantes se detecte una falta de comprensión cabal de las relaciones, se puede apoyar con la manipulación del material elástico, aplicando cada vez mayor fuerza para provocar mayor deformación. De manera simultánea se puede realizar la construcción de una que muestre valores para ese material elástico en particular.

A continuación se verbaliza la relación entre las variables del fenómeno: Entre mayor es la Fuerza F , mayor es la deformación x lo que indica una relación directamen-

te proporcional. Mientras que entre mayor es la constante elástica k , menor es la deformación, lo que significa una relación inversamente proporcional. Finalmente se enuncia formalmente este comportamiento: “la deformación que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza ejercida F e inversamente proporcional a la constante elástica k ”.

El establecimiento del modelo matemático formal de la Ley de Hooke puede construirse conjuntamente con los estudiantes a partir del conocimiento anterior, o puede ser presentado por el docente, enfatizando la representación matemática de lo descrito.

IV. LAS CALORÍAS QUEMADAS

Esta estrategia didáctica se aplica cuando los estudiantes ya tienen alguna experiencia con actividades en las que se ha trabajado con el RP. El tema a estudiar es el de potencia, desde su introducción como concepto hasta su aplicación al gasto calórico; previamente se debe haber discutido el concepto de energía y su conservación. La estrategia puede aplicarse en diferentes unidades temáticas, en los cursos impartidos por los autores se ha trabajado posteriormente al tema de calor, pero también se ha utilizado en otro curso después de abordar mecánica. Toma al menos dos clases o sesiones de trabajo que pueden realizarse en un espacio de la escuela en donde se cuente con proyector y una computadora.

El gasto calórico es el eje temático de esta estrategia, un concepto utilizado en otras disciplinas como nutrición o educación física, que lo hace muy útil para proponer a los estudiantes ejercicios que tienen sentido para ellos en su cotidianidad. Por ejemplo, al final de la estrategia los estudiantes pueden calcular cuántas horas de baile necesitan para “quemar” todas las calorías contenidas en una rebanada de pizza o en un tamal. La estrategia se puede aprovechar para tener discusiones sobre nutrición, hábitos de consumo de alimentos, alimentos procesados, etiquetados, etc.

En la primera sesión de esta estrategia, se muestra la idea o concepto de contenido calórico en los alimentos, aquí necesariamente se habla de esta energía química como una forma de energía almacenada en los alimentos y que puede cuantificarse. Se repasan las unidades de energía, como la caloría y su definición, lo cual lleva a recordar al calor específico como una razón unitaria

con unidades $\text{cal}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$ y se muestra la diferencia entre calorías con c minúscula y Caloría con c mayúscula.

En este momento se realizan ejercicios en los que los estudiantes determinan cuánto es el contenido calórico de ciertos alimentos procesados que se suele consumir. Estos cálculos no son tan inmediatos como parece, pues generalmente la información en los empaques de los productos no está presentada directamente, dado que es común encontrar el contenido calórico por porción aunque el contenido total esté en gramos.

Por ejemplo, al preguntarles, *¿cuántas calorías aportas a tu cuerpo si consumes una bolsa de galletas de cierta marca?* Para realizar este cálculo disponen de la siguiente información del producto: contenido total 147 g, contenido calórico por porción (3 galletas) 142.3 kcal o 593 kJ, cantidad de galletas: 8.

La discusión sobre el contenido de los alimentos es muy reveladora. Los estudiantes se sorprenden al conocer la cantidad de calorías que hay en una bolsa de papas o en un refresco pequeño y se inicia la toma de conciencia sobre la necesidad de revisar esta información de un producto o alimento. Como comparación, y para futuros ejercicios, es útil mostrarles datos sobre el contenido calórico de algunos alimentos comunes en una dieta mexicana. En la Figura 2 se muestra ejemplos de estos datos [14] que también son útiles para iniciar con los estudiantes una discusión sobre el valor nutricional de los platillos mexicanos en comparación con los alimentos procesados.



Figura 2. Energía en calorías para platillos mexicanos típicos.

En la misma primera sesión se aborda el tema del gasto calórico o gasto energético en los seres humanos y en cómo se emplea la energía obtenida de los alimentos. También aquí es muy importante mencionar que el

cuerpo humano usa de diferentes maneras el contenido calórico de los alimentos, en particular para el metabolismo basal y que los estudiantes conozcan que aun cuando no hay movimiento, el cuerpo realiza funciones que requieren energía cada cierto tiempo.

Del tema del metabolismo basal se puede continuar inmediatamente al consumo energético cuando se realiza una actividad física. En este punto los estudiantes comienzan a notar la relación entre la energía para una actividad física y el tiempo transcurrido. Se recomienda reforzar esta idea con el uso de la simulación PhET Formas y Cambios de Energía [15], la cual ilustra las diferentes transformaciones de energía que ocurren al realizar una actividad física. Esta simulación es muy recomendable para extender esta discusión a concepciones previas sobre energía, especialmente cuando se trata de temas de nutrición, se puede analizar si algunos dichos o comentarios de uso común tienen sentido desde el punto de vista científico, por ejemplo, cuando alguien dice que está “quemando” calorías, es común que la gente piense que de alguna forma se calienta la grasa y así desaparece, pero con una simulación como en la figura **Figura 3** es posible enseñar a los estudiantes que al “quemar calorías” lo que realmente ocurre es una transformación de la energía.



Figura 3. ¿Qué ocurre cuando “quemamos” calorías? Uso de la simulación, Transformación de la Energía [15].

Este es el momento de mostrar a los estudiantes que la energía ocupada en una actividad física depende del tiempo transcurrido y por eso es posible considerar al gasto energético (GE) de una persona como un ejemplo más del concepto de potencia. Aunque el gasto energético diario para cada persona se puede determinar con calculadoras en internet, para esta actividad es muy importante resaltar a los estudiantes que la energía gastada depende del tipo de actividad física realizada y del

tiempo ocupado, por eso se puede escribir al gasto energético por actividad (*GEA*) como sigue:

$$GEA = \frac{\text{energía transformada}}{\text{intervalo de tiempo}} \quad (1)$$

Pero el GE no solo representa una potencia, sino también una razón de cambio unitaria. Generalmente se encuentra información sobre el gasto energético expresado como las calorías gastadas cada cierto tiempo. Es valioso percatarse que esto es una potencia en la cual siempre es posible reescribir esta información como una razón unitaria que facilita resolver problemas. Por ejemplo, es común encontrar datos de este tipo: al correr, una mujer de 55 kg y un hombre de 70 kg gastan 606 kcal y 702 kcal respectivamente. Si se desea responder a la pregunta, ¿cuántas kcal gasta el profesor de 70 kg si corre durante 81 minutos? Este tipo de problemas es difícil de responder para la mayoría de los estudiantes porque no hay fórmulas para resolverlo. Pero si ya han trabajado el pensamiento proporcional y abordado ejemplos de razones unitarias, para ellos es fácil darse cuenta que la información anterior se puede reescribir como una razón unitaria de la forma siguiente:

$$\frac{702 \text{ kcal}}{60 \text{ min}} = \frac{12.87 \text{ kcal}}{1 \text{ min}} = 12.87 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} \quad (2)$$

Una vez que se tiene la misma información expresada como una razón unitaria es inmediato para los estudiantes proponer las operaciones necesarias para resolver el problema planteado o algunos otros, por ejemplo: ¿Cuánto tiempo debe correr una mujer de 55 kg para quemar las calorías de una rebanada de pizza de 437 kcal?

El último paso en la ecuación (2) parece obvio pero es importante realizarlo porque se ha encontrado que muchos estudiantes desconocen que una fracción de la forma 12.87 kcal/1 min también se puede expresar como 12.87 kcal/min.

En la segunda sesión de esta estrategia se profundiza en la información encontrada de *GEA* al analizar que estos datos son presentados para personas con una masa particular. Pero todas las personas tienen diferente masa y, por lo tanto, el gasto energético para dos personas distintas puede ser diferente aunque realicen la misma actividad física durante el mismo tiempo.

Para repasar la metodología propuesta es posible iniciar esta segunda sesión resolviendo un ejercicio como los de la primera sesión pero inmediatamente se hace notar a los estudiantes que el GEA es diferente para cada uno de ellos y que lo van a calcular en la clase. Esta parte de la estrategia es trascendente para los estudiantes porque observan cómo los temas de física se aplican directamente en ellos.

Se propone a los estudiantes problemas más complejos del tipo siguiente: *¿Cuántas calorías “quemamos” si juegas 45 minutos de fútbol?* Este problema es interesante pues depende de la masa de cada estudiante, por lo que dos estudiantes pueden no tener la misma respuesta.

Para resolver estos problemas más elaborados sobre gasto energético sin que se presenten fórmulas, se usa otra vez el RP y la razón unitaria. Es satisfactorio observar que los estudiantes encuentran la operación adecuada para resolver los problemas analizando los datos publicados en diversas fuentes de difusión científica. Los estudiantes resuelven los dos problemas anteriores consultando un artículo en una publicación que se les proporciona [16] y extrayendo datos presentados como en la [Tabla 4](#).

TABLA 4
GASTO ENERGÉTICO POR ACTIVIDAD FÍSICA POR kg

ACTIVIDAD FÍSICA	kcal/(kg min)
Dormir	0.017
Ducharse	0.029
Caminar lento	0.051
Bailar intenso	0.101
Jugar fútbol	0.137

Esta información está expresada como una doble razón unitaria pues su unidad en el denominador tiene kg y min, lo cual puede ser difícil de interpretar por los estudiantes, pero en este caso, ya han conocido por lo menos otro ejemplo de razón unitaria doble, el calor específico, que tiene unidades del tipo kcal/(kg °C), esto facilita la comprensión y uso de estos datos.

Como ya se explicó en la sección II, es necesario que los estudiantes incorporen estos conceptos expresándolos verbalmente o de manera escrita, por ejemplo, ¿qué significa 0.101 kcal/(kg min)? y para responderlo a los grupos se les solicita que completen la siguiente frase: *Por cada 1 ____ de una persona, al bailar intensamen-*

te gasta ____ kcal de energía cada 1 ____. Este simple ejercicio desarrolla la habilidad de identificar la dependencia proporcional que hay entre las variables involucradas, en este caso la relación proporcional entre la energía con la masa y el tiempo.

Para responder la pregunta: *¿cuántas calorías “quemamos” si juegas 45 minutos de fútbol?*, los estudiantes revisan el dato correspondiente en la [Tabla 4](#) y, como esta pregunta es personal, cada estudiante se pregunta a sí mismo *¿cuántas calorías gasto cada minuto al jugar fútbol?* Si la masa de la estudiante es 60 kg con la idea de la razón unitaria, es fácil para ellos encontrar que $60 \text{ kg} \times 0.137 \text{ kcal}/(\text{kg min}) = 8.22 \text{ kcal/min}$ es una primera respuesta que les ayudará a resolver el problema completo. Finalmente, es fácil darse cuenta que para responder la pregunta original basta con realizar la operación $45 \text{ min} \times 8.22 \text{ kcal/min} = 369.9 \text{ kcal}$.

En esta segunda y última parte de la estrategia se proponen más problemas a los estudiantes en los que partiendo de los datos de GEA puedan encontrar las soluciones sin recurrir a una fórmula o calculadora por internet. Se pueden plantear preguntas directas en las que la respuesta depende del estudiante: *¿cuánto tiempo necesitas de baile intenso para gastar las 240 kcal de un plato mediano de pozole? o si realizas una hora de caminata lenta y juegas un partido de fútbol, ¿podrás gastar las 273 kcal de dos tacos al pastor?*

Esta estrategia tiene la característica de que en cualquier momento se puede hablar con los estudiantes de temas de vida saludable, nutrición y funcionamiento del cuerpo humano. Además, promueve el pensamiento crítico de los estudiantes al dar elementos para debatir sobre la alimentación y para comparar los alimentos procesados con una dieta mexicana que puede ser más saludable.

V. CONCLUSIONES

Las relaciones de proporcionalidad son un elemento importante que ofrece un andamiaje para favorecer una mejor comprensión de los conceptos físicos al entender cuáles son las variables intervinientes en un fenómeno físico y cómo se relacionan matemáticamente entre sí. Lo anterior permite que los estudiantes posean los elementos necesarios para la resolución de problemas de índole numérica sin necesidad del empleo irreflexivo de una fórmula y, en el caso de emplearla, subyace la comprensión cabal de la estructura de ella.

A pesar de la relevancia mencionada del razonamiento proporcional, es frecuente que los estudiantes carezcan de esta habilidad, por lo que es importante diseñar, estructurar y elaborar secuencias didácticas con ejes temáticos definidos que integren este recurso. Las secuencias aquí presentadas son ejemplos que dan cuenta de dos conceptos físicos diferentes, además de que el empleo de las relaciones de proporcionalidad difiere en el dominio usado y en la profundidad alcanzada. De esta manera, se muestra que las oportunidades de integrar este recurso son muy amplias y pueden integrarse en los variados contenidos de los cursos de física.

La experiencia profesional y el conocimiento del contexto en el que se ejerce la práctica educativa permitirá que cada docente pueda diseñar las secuencias didácticas que incluyan razonamiento proporcional más convenientes a los temas elegidos, dado que el uso recurrente estrategias como las mostradas, permitirá a los estudiantes que vayan desarrollando más el pensamiento matemático y la habilidad de resolver problemas no solo en el ámbito de esta disciplina, sino también aplicable a otras áreas del conocimiento y a su vida cotidiana.

REFERENCIAS

- [1] U. Solís, “Razonamiento Proporcional en la enseñanza de la física en nivel bachillerato”, *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, vol. 16, n.º 1, pp. 1306-1-1306-8, mar. 2022.
- [2] PISA, “Programa para la Evaluación Internacional de Alumnos (PISA). PISA 2018 - Resultados”, Programme for International Student Assessment, vols. I-III, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/about/programmes/edu/pisa/publications/national-reports/pisa-2018/featured-country-specific-overviews/PISA2018_CN_MEX_Spanish.pdf
- [3] P. Hewitt, *Física Conceptual*, 10.^a ed., México: Pearson Education, 2007.
- [4] H. Pérez Montiel, *Física General*, 5.^a ed., México: Editorial Patria, 2015.
- [5] P. E. Tippens, *Física, Conceptos y Aplicaciones*, 7.^a ed., México: McGraw Hill, 2011.
- [6] J. Guzmán y C. H. Juárez Martínez, *Física 1*, libro no publicado.
- [7] S. Mochón, “Enseñanza del razonamiento proporcional y alternativas para el manejo de la regla de tres”, *Educación Matemática*, vol. 24, n.º 1, abr. 2012.
- [8] G. Obando, C. E. Vasco y L. C. Arboleda, “Enseñanza y aprendizaje de la razón, la proporción y la proporcionalidad: un estado del arte”, *RLIME*, vol. 17, n.º 1, pp. 59-81, 2014, doi: [10.12802/relime.13.1713](https://doi.org/10.12802/relime.13.1713).
- [9] C. J. Aroza, J. D. Godino y P. Beltrán-Pellicer, “Iniciación a la innovación e investigación educativa mediante el análisis de la idoneidad didáctica de una experiencia de enseñanza sobre proporcionalidad”, *AIRES*, vol. 6, n.º 6 (1), 2016.
- [10] S. Palmas, *La Proporcionalidad: dos Maneras de Enseñar y Aprender las Matemáticas*, Ciudad de México: Secretaría de Educación Pública, 2016.
- [11] A. M. Oller, “Proporcionalidad aritmética: una propuesta didáctica para alumnos de secundaria”, tesis doctoral, Depto. de Didáctica de las CCSS y de las CCEE, Universidad de Valladolid, 2012.
- [12] D. Block, T. Mendoza y M. Ramírez, *¿Al doble le toca el doble? La enseñanza de la proporcionalidad en la educación básica*, México: CINVESTAV, 2010.
- [13] S. Martínez-Juste, A. M. Oller-Marcén, J. M. Muñoz-Escolano y P. Beltrán-Pellicer, “Sobre la regla de tres y la proporcionalidad aritmética”, *La Gaceta de la RSME*, Vol. 25, n.º 2, pp. 353-371, 2022.
- [14] Secretaría de Salud. *Guía de alimentos para la población mexicana*, México, 2010. [En línea]. Accedido: mar. 10, 2022. Disponible en: <https://www.imss.gob.mx/sites/all/statics/salud/guia-alimentos.pdf>
- [15] Universidad de Colorado, “Formas y Cambios de Energía”. PhET.colorado.edu. Accedido: jul. 27, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://phet.colorado.edu/es/simulations/energy-forms-and-changes>
- [16] Carmen Sánchez Mora. “Las dietas, mitos y realidades”. ¿Cómo ves? DGDC-UNAM”. ¿cómoves? Accedido: jul. 27, 2024. Disponible en: <https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/18/las-dietas-mitos-y-realidades>

Gestión docente para el desarrollo de habilidades de resolución de problemas numéricos en física

Teaching management for the development of numerical problem-solving skills in physics

Dra. Beatriz Oropeza Villalobos¹  

¹Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México, Plantel "Ricardo Flores Magón", Ciudad de México, México

RESUMEN

La resolución de problemas numéricos en física escolar es un proceso sumamente complejo, en el cual son esenciales las acciones docentes que promueven que los estudiantes mexicanos desarrollen procesos cognitivos y metacognitivos que los apoyen en el proceso de aprender a aprender y convertirse en estudiantes autónomos. Debido a la gran cantidad de factores intervinientes en el desarrollo de la habilidad para la resolución de problemas numéricos, se han elegido dos que se consideran de mayor relevancia y en los que existe un claro ámbito de influencia docente: la comprensión lectora del enunciado y la metacognición del proceso. A partir de la justificación teórica basada en resultados de investigaciones educativas, estos se transforman de lo abstracto a lo concreto y se pone el acento en una orientación en la práctica docente cotidiana mediante acciones concretas y ejemplos. Si bien las acciones aquí esbozadas no solucionan todos los obstáculos que enfrentan los estudiantes ante la tarea de resolver problemas numéricos en física, sí constituyen un elemento que promueve un mejor desempeño metacognitivo y cognitivo. El trabajo descrito en este artículo está orientado a estudiantes de nivel medio superior, sin embargo, las estrategias aquí mencionadas pueden ser útiles para estudiantes de diversos niveles escolares en México.

PALABRAS CLAVE: resolución de problemas numéricos; comprensión del enunciado; estrategias metacognitivas; intervención docente.

ABSTRACT

Solving numerical physics problems in school is an extremely complex process in which teaching actions that promote the development of cognitive and metacognitive processes in Mexican students that support them in the process of learning how to learn and becoming autonomous students are essential. Due to the large number of factors involved in developing the ability to solve numerical problems, two have been chosen that are considered most relevant and where there is a clear scope of teacher influence: sentence reading comprehension and metacognition of the process. Starting on the theoretical justification based on the results of educational research, these are transformed from the abstract to the concrete and the emphasis is placed on an orientation in daily teaching practice through concrete actions and examples. Although the actions outlined here do not solve all the obstacles students face when solving numerical problems in physics, they constitute an element that promotes better metacognitive and cognitive performance. The work discussed in this article is aimed at high school students, however, the strategies mentioned here may be useful to students at various school levels in Mexico.

KEYWORDS: numerical problem solving; understanding of the statement; metacognitive strategies; teacher intervention.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Beatriz Oropeza Villalobos
INSTITUCIÓN: Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México / Plantel "Ricardo Flores Magón"
DIRECCIÓN: Calzada de Tlalpan 3463 y 3465, col. Viejo Ejido de Santa Úrsula, Alcaldía Coyoacán, C. P. 04910, Ciudad de México, México
CORREO ELECTRÓNICO: beatriz.oropeza@iems.edu.mx

Fecha de recepción: 31 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:** 3 de noviembre de 2024. **Fecha de publicación:** 20 de noviembre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las habilidades para la resolución de problemas numéricos es uno de los temas más importantes en física escolar y la gestión que corresponde realizar a los docentes para lograr tal desarrollo representa un reto importante.

Existen varias razones para tal afirmación. La primera consiste en que la resolución de problemas numéricos es una actividad compleja [1], en la cual intervienen una gran cantidad de factores de tipo cognitivo, metacognitivo, elementos del ámbito psicológico (creencias, motivaciones, experiencias previas), relacionados con el ámbito institucional y procesos de enseñanza aprendizaje (currículo, enfoques didácticos, estilos de enseñanza, etc.). De esta manera, los factores que requiere gestionar un docente para desarrollar la habilidad de resolución de problemas numéricos en los estudiantes son variados y, en algunos casos, muchos elementos ni siquiera se encuentran en el ámbito de su intervención.

Otro de los factores es la percepción por parte de los alumnos de que la resolución de problemas es una actividad rutinaria, aburrida y difícil [2], lo que provoca que los estudiantes muestren de inicio poco interés en desarrollar estrategias y gestionar su aprendizaje sobre el tema.

Finalmente, la resolución de problemas numéricos está ligada fuertemente a la didáctica de las matemáticas y esta es un área de conocimiento en la cual los estudiantes de México que han sido evaluados en pruebas internacionales estandarizadas (PISA) han mostrado niveles no satisfactorios [3]. En general, la relación entre escasas habilidades matemáticas y resolución de problemas numéricos ha generado situaciones de rezago y deserción de asignaturas científicas escolares [4].

Es posible encontrar en la literatura una clasificación de estrategias didácticas para la resolución de problemas numéricos en física que en general presentan tres orientaciones [5]: la algorítmica, como un conjunto de acciones sistematizadas y secuencia de operaciones; el enfoque de experto/novato, en la cual se analizan las acciones realizadas por los buenos solucionadores de problemas y se pretende que los novatos las emulen en una práctica guiada; y desarrollo de investigaciones guiadas, en las cuales se emula la actividad científica real y los retos y obstáculos que esta representa.

II. DOS ELEMENTOS RELEVANTES

Como en muchas situaciones del proceso de enseñanza aprendizaje, varios autores han manifestado que resulta poco conveniente adherirse a un solo enfoque y es necesario incluir los elementos valiosos de cada uno de ellos y combinarlos en un estilo personal docente, integrado por la capacitación, la experiencia y el conocimiento del contexto escolar.

En ese sentido, el desarrollo de habilidades para la resolución de problemas numéricos en física escolar requiere de un apoyo docente intencionado y dirigido [6]. El profesor frente a grupo requiere atender estos factores y gestionar el aprendizaje efectivo de los estudiantes, dotándolos de las herramientas y estrategias necesarias para lograr la consecución de las metas educativas [7].

Sin embargo, a pesar de que el reto es muy amplio dado el carácter integral de esta actividad, es necesario enfocarse en elementos puntuales que el docente considere más relevantes y prioritarios de abordar como gestión docente para el desarrollo de habilidades de resolución de problemas numéricos en física escolar, por lo cual esta propuesta se centra en dos elementos puntuales: la *comprensión del enunciado* y la *metacognición del proceso*.

LA COMPRENSIÓN DEL ENUNCIADO

En general, al enfrentarse a la tarea de resolver un problema numérico, los estudiantes realizan una lectura rápida y superficial, extraen los datos numéricos y tratan de aplicarlos a un modelo matemático disponible. Frecuentemente no reflexionan sobre la relación entre las variables, los datos y la información no explícita en el texto. En muchas ocasiones, debido a la aparente simplicidad de un problema, los estudiantes suponen que la solución es inmediata y no se detienen a realizar la reflexión sobre la formulación necesaria previa al inicio del proceso de solución [8].

La incomprensión del enunciado es uno de los factores que más impactan y dificultan la posibilidad de la resolución de un problema, por lo que este paso reviste de una importancia relevante [9], que implica un esfuerzo cognitivo significativo para la cabal interpretación del texto, la traducción entre diferentes lenguajes y el análisis de ello. De hecho, Pólya [10] enunció una frase contundente: “es tonto contestar a una pregunta que no se comprende”.

El inicio del proceso de resolución de problemas debería ser un cuidadoso análisis de la situación que implique un modelo y esquema mental de la situación enunciada. Además, una clara representación cognitiva de los elementos que integran el problema en el texto que conduciría a la determinación clara de la incógnita del problema (variable del fenómeno) y la demanda (una respuesta cuyo valor depende del resultado de la variable incógnita) en caso de que la hubiera.

En realidad, durante este proceso y de manera no consciente, el estudiante relaciona y traduce entre tres lenguajes diferentes: el cotidiano o natural, el lenguaje técnico científico adecuado al nivel escolar y el lenguaje matemático en el que se expresa el modelo matemático y las variables involucradas [11]. La capacidad y grado de dominio del estudiante de realizar este proceso generará un esquema mental adecuado y completo, o no lo hará, lo que puede determinar el grado de éxito al proceso de resolución del problema. La [Tabla 1](#) resume los elementos relevantes de la comprensión del enunciado.

TABLA 1
ELEMENTOS DE LA COMPRESIÓN DEL ENUNCIADO

COMPRESIÓN DEL ENUNCIADO	
Elementos de la gestión docente	Promover y apoyar el análisis e interpretación del texto
	Verificar la comprensión de los términos empleados
	Verificar la traducción entre lenguaje natural, científico y matemático
	Verificar el establecimiento de la relación entre el marco conceptual, las variables del fenómeno y el modelo matemático
	Monitorear la identificación de las variables involucradas
	Verificar la determinación de la incógnita y demanda

LA METACOGNICIÓN DEL PROCESO

La metacognición es un proceso complejo que representa un elemento clave para aprender a aprender y permite la formación de estudiantes autónomos al demandar la participación activa de ellos en su proceso de aprendizaje a través del ejercicio de las habilidades metacognitivas que permiten resolver situaciones problemáticas.

Existe una gran variedad de funciones metacognitivas que permiten lograr un aprendizaje de mayor calidad, por ejemplo, la reflexión, la autoconciencia y el autocontrol. De acuerdo con [12], hay un conocimiento metacognitivo (saber qué) que es de naturaleza declarativa y un control metacognitivo (saber cómo) que corresponde a cuestiones procedimentales. El primero se refiere al conocimiento que se tienen de los procesos y productos cognitivos e incluye al autoconocimiento de las características de la persona como aprendiz, al conocimiento de los objetivos y características de la tarea y su grado de dificultad y al conocimiento de las estrategias, las diferentes alternativas y las condiciones y procedimientos de su aplicación. El segundo, el control metacognitivo o autorregulación se refiere a la actividad intencionada de organización, supervisión, control y regulación que ejerce el individuo sobre sus procesos cognitivos y su propio aprendizaje, la cual también supone la planificación y supervisión de la tarea para lograr resolver las dificultades encontradas en ella. Las estrategias metacognitivas se refieren al conjunto de estos dos procesos: el conocimiento y el control.

La mediación metacognitiva docente supone guiar a los estudiantes en un proceso reflexivo sobre su propio aprendizaje que implica la planeación, organización y evaluación de los procesos cognitivos con la intención de apoyar a los estudiantes a lograr el gran reto de aprender a aprender y convertirse en estudiantes autónomos en términos del desarrollo de habilidades metacognitivas.

La intervención docente supone al profesor como guía y modelo [13]. Independientemente de la capacidad intelectual del estudiante, el desarrollo de las habilidades metacognitivas resulta en un incremento en el aprendizaje, por lo cual es necesario entrenarlos en el desarrollo de estas. En las primeras etapas, el profesor orienta de manera muy cercana y dirigida sobre el uso de estrategias metacognitivas y gradualmente va retirando el apoyo, cediendo el control al estudiante. En la [Tabla 2](#) se resumen los elementos metacognitivos que pueden integrarse a la gestión docente.

Las estrategias metacognitivas aplicadas en la resolución de problemas en física han mostrado los beneficios generados [14 p. 520]: “a) Codificar estratégicamente la naturaleza del problema y obtener una representación mental de sus elementos. b) Seleccionar las estrategias adecuadas para la consecución del objetivo. c)

Identificar los obstáculos que impiden y dificultan el progreso”.

TABLA 2
ELEMENTOS DE LA METACOGNICIÓN

METACOGNICIÓN	
<ul style="list-style-type: none"> • Conocimiento metacognitivo: de naturaleza declarativo (saber qué); autoconocimiento • Control metacognitivo: de naturaleza procedimental (sabe cómo); autorregulación 	
Elementos de la gestión docente	Apoyar la generación de un modelo y esquema mental
	Animar la construcción de representaciones alternativas
	Cuestionar sobre el proceso cognitivo
	Fomentar la reflexión metacognitiva a través de preguntas
	Solicitar la autovigilancia de los procesos
	Promover la revisión del procedimiento
	Promover la revisión y reflexión de los resultados

III. DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA

Las investigaciones educativas sobre los temas mencionados anteriormente arrojan información valiosa factible de ser usada en el ejercicio docente cotidiano a través de la transformación de lo abstracto a lo concreto.

Es importante mencionar que la interpretación de los resultados de tales investigaciones puede dar lugar a una gran cantidad de aportaciones en términos de las acciones docentes para implementar las ideas, considerando que cada profesor configura sus contribuciones de acuerdo con su propio estilo y personalidad, así como también es un factor relevante el contexto del grupo académico que atienda. De esta manera, las iniciativas no son las mismas para grupos y profesores diferentes. En ese sentido, las propuestas enunciadas a continuación parten de la experiencia con el trabajo de estudiantes de nivel bachillerato en escuela pública de México, pero pueden ser aplicadas en términos generales a cualquier nivel escolar realizando las adecuaciones correspondientes.

También es necesario enfatizar que, al ser la resolución de problemas numéricos en física escolar un proceso tan complejo en el que intervienen muchas variables, cualquier aportación e iniciativa docente puede contribuir al desarrollo de habilidades de resolución de pro-

blemas numéricos, pero no se considera una solución definitiva. En términos de procesos educativos, todas las aportaciones constituyen unas aproximaciones sucesivas para el logro de los objetivos académicos.

En el presente trabajo se enuncian aspectos puntuales en los cuales es conveniente realizar la intervención docente intencionada, y en algunos casos se sugieren algunas acciones. Particularmente en la sección correspondiente a la metacognición se proponen acciones inquisitivas que se ligan con la primera cuestión correspondiente a la comprensión del enunciado. Se pretende apuntalar la sugerencia de intervención docente a partir de la presentación de ejemplos comunes en este nivel educativo. Por supuesto, que para otros niveles académicos los ejemplos pueden no ser pertinentes a ellos, pero seguramente el docente dispondrá dentro de su bagaje de recursos, ejemplos más adecuados a su práctica.

Las acciones parten de la premisa que el anclaje teórico conceptual del tema o fenómeno a abordar se ha trabajado previamente y ha generado aprendizajes sólidos en los estudiantes. De esta manera, las propuestas de intervención docente mencionadas a continuación están estructuradas y tienen sentido.

Inicialmente es importante garantizar que el aprendizaje teórico conceptual es adecuado, sin el cual la tarea de resolver problemas numéricos del tema deja de tener sentido y se convierte en un mero ejercicio matemático y algorítmico.

Es deseable que la cuestión teórica conceptual incluya la descripción de contexto histórico y filosófico, además de mencionar las aplicaciones en la vida cotidiana relacionadas al fenómeno, pero es de gran relevancia la cuestión de la descripción de las variables, las relaciones de proporcionalidad entre ellas y las relaciones matemáticas que describen este comportamiento.

LEER Y LEER NUEVAMENTE

La comprensión del enunciado de un texto que describe un problema depende del bagaje cultural y de la formación académica del lector. En ese sentido, es necesario que el docente reconozca el contexto de los estudiantes para diseñar los reactivos empleando el lenguaje y los términos pertinentes en el enunciado del problema que tenga certeza que los estudiantes reconocen.

Además, representa una excelente oportunidad para incrementar el vocabulario al incluir nuevos términos y no solo explicarlos sino aprovechar la coyuntura para realizar una narrativa sobre él que dé sentido al enunciado. El siguiente problema ejemplifica lo anterior:

 *Un espeleólogo requiere cuerda para descender a una cueva desconocida. Para ello deja caer una roca y escucha que impacta en el suelo 1.6 segundos después. ¿Qué cantidad de cuerda requiere?*

En este ejemplo de caída libre, probablemente los estudiantes desconocen el término espeleólogo. En tal caso, es importante describir esta profesión y en qué actividades de recreación o de investigación suelen involucrarse e, incluso, si las circunstancias lo permiten, narrar algún evento actual que se relacione con tal actividad.

Dado que la comprensión lectora del enunciado de un problema numérico requiere de un proceso de traducción entre lenguajes cotidiano, científico y matemático y que tal proceso puede adolecer de construcciones erróneas si se desconocen los términos ahí incluidos o si la situación no remite a una situación conocida, es importante el empleo de recursos adicionales que favorezcan la construcción de una representación mental de la situación, en la cual el resto de la información del enunciado cobra sentido.

Este proceso se puede apuntalar con el uso de representaciones alternativas, por ejemplo, la elaboración de dibujos, esquemas o gráficas que permitan la mejor comprensión del enunciado y las variables que lo conforman. El enunciado a continuación sería factible de requerir tales recursos:

 *Dos ciclistas parten de la línea de salida en un circuito de 15 kilómetros. Si el segundo ciclista llega en primer lugar en un tiempo de 22 minutos, ¿a qué distancia de la meta se encuentra en ese momento el primer ciclista si su rapidez promedio fue 38.5 km/h?*

La cantidad de información vertida en el texto puede generar confusiones, por lo cual una representación gráfica que muestre a los dos ciclistas, el circuito y los datos asociados a cada uno de ellos facilitará esbozar una estrategia para la resolución.

También en el sentido de la traducción entre lenguajes, se hace necesario establecer las relaciones equivalentes entre términos usados.

 *Un tren que parte del reposo, acelera de forma constante y al cabo de 5 segundos lleva una rapidez de 12 km/h. ¿Cuál fue el valor de la aceleración en este tramo?*

Este ejemplo de enunciado, que podría ser de uso común en textos de física y en clase por los docentes, implica varias traducciones de lenguaje que es necesario asegurar que los estudiantes pueden realizar.

En primer lugar, el término *reposo* del lenguaje natural, quizá es desconocido por los estudiantes o solo lo reconozcan en función de su sinónimo *descanso*, en cuyo caso el enunciado carece de sentido (Un tren parte del descanso...). En términos científicos, en este caso correspondiente a cinemática, el lenguaje natural *reposo* remite a que está detenido, es decir, que la velocidad inicial es cero; en términos matemáticos lo anterior se puede traducir a una expresión simple como $v_i = 0$. Todo este proceso requiere un andamiaje cognitivo que es necesario desarrollar previamente para que el enunciado adquiera sentido para el estudiante.

El concepto *aceleración* posee un significado formalmente definido dentro del bagaje de la disciplina de física, por lo cual el correspondiente aprendizaje teórico conceptual debería ser establecido previamente de forma sólida.

Correspondiente a los términos empleados, también se menciona frases como *al cabo*, que si bien son empleadas de manera correcta, pueden ser sustituida por el término *después*, que es de uso más cotidiano para los estudiantes.

En los enunciados de los problemas se presenta una situación que requiere la determinación y resolución de una variable que es la incógnita y en algunas ocasiones también se solicita responder a la demanda, la cual es una pregunta cuya respuesta requiere resolver la incógnita.

La determinación de la incógnita es uno de los pasos más relevantes para resolver un problema, por lo cual la orientación docente es en el sentido de que los estudiantes comprendan el enunciado e identifiquen la

incógnita a través del reconocimiento de las variables asociadas al fenómeno físico, lo cual, nuevamente, requiere de un sólido aprendizaje conceptual.

Dado que la incógnita puede expresarse de manera explícita o implícita, la intervención docente podría apoyar y orientar a los estudiantes en el sentido de identificarla. Por ejemplo, en expresiones explícitas se puede mostrar que en muchas ocasiones el nombre de la variable incógnita va a continuación de un verbo del tipo *Determinar, Encontrar, Calcular* y sus respectivas conjugaciones. Por ejemplo, el siguiente enunciado en el cual se indica clara y directamente que la variable *trabajo* es la incógnita:

 *Calcula el trabajo requerido para elevar un piano de 340 kg desde el nivel del suelo hasta el tercer piso a 10.45 m de altura.*

En otras ocasiones existen enunciados que aunque no contienen de forma explícita la mención de la variable que es la incógnita, sí incorporan algún elemento que permite su identificación, tal como las unidades. Por ejemplo:

 *¿Cuántos segundos se tarda en caer una roca desde un edificio de 14 m?*

Al detectar que la pregunta implica las unidades *segundos*, se reconoce que la variable a determinar es el *tiempo*.

Un ejemplo de reconocimiento de una demanda asociada al problema es el siguiente. En ese caso, la intervención docente es en el sentido de que reconozcan qué variable es la incógnita que puede ayudar a responder la pregunta planteada:

 *Una persona compró un cazo para cocinar carnitas que se anunciaba que estaba fabricado en cobre. Al medir su masa era de 340 g y su volumen de 55 cm³. ¿Realmente es de cobre?*

En este ejemplo no hay una pregunta que explícita o implícitamente enuncie cuál es la variable incógnita, sino que determinarla implica que el estudiante comprenda con claridad y certeza la pregunta para que esta lo oriente para conocer cuál es la incógnita que permita responder a la demanda. En este problema, la incógnita es la *densidad* del cazo, y para responder a la demanda,

se compara la densidad del cazo con la densidad del cobre reportada en una tabla de densidades y si coinciden, la respuesta es que el cazo sí es de cobre. En caso contrario, se puede responder que no es de cobre o que es de otro material.

Por otra parte, otra consecuencia de la comprensión lectora del texto es la identificación adecuada de la información y su asignación a las variables del problema, conocida también como los datos.

Al igual que con la incógnita, puede darse de manera explícita o implícita, por ejemplo:

 *Un resorte cuya constante elástica 5 N/cm sufre una deformación 3 cm. ¿Cuál es la fuerza que se le aplicó?*

En este ejemplo que corresponde a la Ley de Hooke, los datos se pueden identificar y aparear directamente con las variables correspondientes dado que el nombre de ellas se enuncia directamente y a continuación se indica el dato, por lo cual no supone una dificultad en la interpretación de la información.

Si el enunciado se modificara como en el siguiente ejemplo, los datos ya no se podrían identificar directamente porque no está presente el nombre de la variable y por lo tanto sería necesario usar otro recurso para identificar la información.

 *Un resorte de 5 N/cm se estira 3 cm cuando se jala. ¿Cuál es la fuerza que se le aplicó?*

En este caso, se podría recurrir a analizar las unidades en que se expresan las variables del fenómeno físico en cuestión y a partir de ahí realizar la identificación y aparearlas. La deformación se expresa en unidades de longitud y la constante elástica en unidades de fuerza entre longitud. Al emplear esta estrategia, los datos quedan conformados de forma adecuada a las variables correspondientes.

EXPLICITAR PROCESOS MENTALES

La intervención docente para el uso de estrategias metacognitivas utilizadas en la solución de problemas numéricos permite transitar de un proceso mental abstracto a una acción concreta y explícita en la actuación del sujeto que resuelve el problema y puede instruirse y guiarse

a través del planteamiento de preguntas sobre el proceso cognitivo [14]. La reflexión lograda en ese sentido es una actividad que el profesor debe promover de forma constante y permanente para lograr el desarrollo de habilidades, en este caso sobre la resolución de problemas numéricos en física.

Relacionado con el tema de comprensión lectora del enunciado del problema, el docente puede fomentar la reflexión metacognitiva a través de realizar preguntas pertinentes. En un inicio, es el profesor quien las realiza al estudiante de forma constante siempre que el sujeto se enfrente a la tarea de resolver un problema. Sin embargo, como se mencionó previamente, es esencial ir cediendo la gestión metacognitiva de manera gradual de tal manera que el propio estudiante quien se las realice a sí mismo de manera cotidiana. Las preguntas iniciales se relacionan con el andamiaje teórico conceptual, sin el cual la resolución de problemas numéricos carece de sentido.

¿Poseo un aprendizaje adecuado sobre la teoría y conceptos relacionados con el tema? ¿Conozco las variables que intervienen y la forma en que se relacionan para la descripción del fenómeno físico? ¿Reconozco las condiciones de aplicación de las variables?

Como parte del autocontrol y autogestión, el estudiante mismo puede sugerir una línea de acción si la respuesta a alguna de las preguntas anteriores es negativa.

¿Qué puedo realizar para lograr el aprendizaje adecuado para abordar el problema? ¿De qué recursos dispongo para lograrlo? ¿Debo repasar el tema? ¿Puedo consultar un texto, a un compañero o al profesor?

Un ejemplo de control metacognitivo es analizar las condiciones de existencia de una situación física. El siguiente enunciado es un ejemplo de un problema que precisa de esta reflexión previa.

 Convertir -23 K a $^{\circ}\text{C}$.

Un estudiante que no posea un control metacognitivo puede proceder a solucionar de manera inmediata con la aplicación del modelo matemático de conversión de escalas de temperatura, sin reflexionar que el valor de temperatura mencionado es inexistente de acuerdo a la teoría cinética de la materia. De forma contraria, el ejercicio del control metacognitivo permitirá que el

estudiante detecte esta situación y cuestione sobre la exactitud y validez del enunciado.

Como se ha mencionado previamente, la comprensión lectora del enunciado de un problema es una cuestión elemental en el inicio del proceso de resolución de problemas, por lo cual es esencial poner el acento en comprender cabalmente el texto, los términos y la información allí plasmada a través de preguntas.

¿Reconozco todos los términos escritos? ¿Hay alguna palabra o concepto que me sea desconocido o que no comprenda?

¿Tengo claridad en cuál es la incógnita del problema? ¿Hay una demanda asociada? ¿Cuál es la variable que me permite responder esa pregunta?

Es importante solicitar a los estudiantes que estas preguntas sean respondidas de forma afirmativa antes de continuar con la resolución. Generalmente, un enunciado no entendido conduce a una resolución incorrecta.

Como parte de las estrategias metacognitivas empleadas en la comprensión de enunciados complejos, el estudiante puede decidir el uso de recursos adicionales, tales como realizar un esquema escrito, una representación gráfica o una lista de pasos a seguir que le permita clarificar la situación enunciada en el texto. De nuevo, inicialmente el docente sugiere alguna de estas acciones si la situación lo amerita. Sin embargo, la intención para el logro de estudiantes autorregulados es que sean ellos mismos quienes decidan la necesidad del uso de un recurso adicional.

La autovigilancia de realizar de forma completa, adecuada y correcta los procedimientos planteados para la resolución de problemas también corresponde al ámbito metacognitivo. Generalmente, los docentes solicitan a los estudiantes la revisión del procedimiento, pero se pretende que sea una práctica constante autogestionada por ellos mismos.

También como parte del final del proceso, la revisión de los resultados es necesaria. Asegurar que se ha respondido a la incógnita o demanda, que los resultados numéricos obtenidos tienen sentido en el contexto del problema o que es factible, que las unidades sean las adecuadas pueden orientarse con las preguntas correspondientes:

¿He respondido a lo solicitado en el enunciado? ¿El resultado obtenido es posible y tiene sentido? ¿Las unidades corresponden a la variable?

 *Un buzo se sumerge en el mar a una profundidad de 26 m. Si el reloj que lleva indica que soporta máximo una presión hidrostática de 2 atmósferas. ¿Se daña el reloj?*

En este ejemplo, si el estudiante determina la presión que ejerce el agua del mar sobre el reloj sumergido es un procedimiento correcto, sin embargo, ese aun no es el resultado, porque existe una demanda que requiere necesariamente contestar a una pregunta, por lo cual la resolución no está concluida.

Por otra parte, si el resultado sobre la temperatura que adquiere el agua líquida al colocarla en una fuente de calor en condiciones normales de presión, resulta en 450 °C, el estudiante en ejercicio de estrategias metacognitivas puede considerar que el resultado obtenido no parece corresponder con sus conocimientos sobre los estados de agregación de la materia y, por lo tanto, no es un valor factible, lo que le lleve a decidir la revisión del procedimiento realizado para detectar algún error u omisión.

V. CONCLUSIONES

La formación de estudiantes autónomos y con habilidades para la resolución de problemas numéricos en física requiere necesariamente de una guía y acompañamiento docente que promueva en ellos, además de aprendizajes conceptuales y teóricos sólidos, control y autorregulación de los procesos de solución.

De los muchos factores intervinientes del proceso de solución de problemas numéricos de física, varios se encuentran dentro del ámbito de influencia institucional y docente, por lo que es importante enfocar los esfuerzos en ese sentido.

Múltiples investigaciones educativas han propuesto que la comprensión del enunciado y la metacognición sobre el proceso son dos elementos de gran relevancia e importancia que favorecen el aprendizaje y el desarrollo de esta habilidad. Sin embargo, el traslado de los resultados de las investigaciones educativas a la práctica docente cotidiana puede significar un proceso complicado, que requiere concebir acciones concretas aplica-

bles dentro del marco de las sesiones reales de clase, por lo cual la sugerencias aquí realizadas en ese sentido pueden significar un apoyo para el ejercicio de los docentes en activo.

Los elementos enunciado anteriormente, plasmados en la propuesta de gestión docente, pueden favorecer el desarrollo de la habilidad de resolución de problemas numéricos en física. Es importante, sin embargo, que esto se vea apuntalado por la intervención en otros factores que se encuentren dentro del ámbito de influencia docente y que todos los esfuerzos en ese sentido puedan repercutir favorablemente como un proceso de aproximaciones sucesivas.

La presente propuesta de gestión docente ha sido aplicada y valorada de forma explícita e intencional para fomentar el desarrollo de habilidades numéricas en estudiantes de bachillerato público, específicamente en el Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México, a lo largo de dos semestres. Los resultados obtenidos han sido alentadores, en el sentido que los estudiantes muestran mejores habilidades procedimentales, tales como determinar de forma más acertada la incógnita y la relación de la información contenida en el enunciado con las variables del modelo, el reconocimiento de la existencia de una demanda y han ejercido de manera constante los procesos metacognitivos, tal como revisión del procedimiento realizado, determinar la factibilidad de los resultados obtenidos y el uso de representaciones alternativas, entre otros.

La apreciación del impacto ha sido subjetiva, por lo cual se ha propuesto un análisis que permita determinar formalmente la ganancia de aprendizaje. De esta manera, una meta planteada para un futuro próximo es cuantificar de forma objetiva, estructurada y formal el impacto que tiene esta propuesta en una población de estudiantes de nivel medio superior.

REFERENCIAS

- [1] A. García-Díaz, I. García-Alonso y M. Camacho-Machín, “Análisis de la fase de comprensión en la resolución de problemas de matemáticas en el desarrollo de una sesión de clase”, *FPIEM*, n.º 13, pp. 75-92, 2021.
- [2] M. L. Meneses y D. Y. Peñaloza, “Método de Pólya como estrategia pedagógica para fortalecer la competencia en la resolución de problemas matemáticos con operacio-

- nes básicas”, *Zona Próxima*, n.º 31, pp. 8-25, 2019. doi: [10.14482/zp.31.372.7](https://doi.org/10.14482/zp.31.372.7).
- [3] OCDE. “PISA 2022 Results (Volume I and II) - Country Notes: Mexico”. OCDE.org. Accedido: jun. 18, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.oecd.org/publication/pisa-2022-results/country-notes/mexico-519eaf88#chapter-D1e11>
- [4] M. A. Arana, E. Gómez y C. G. Pérez, “Evaluación de una estrategia para disminuir la deserción escolar por reprobación y rezago en un centro escolar de Educación media superior”, *Debates en Evaluación y Currículum*, vol. 4, n.º 4, pp. 1-11, 2018.
- [5] M. Ceberio, J. Guisasaola y J. M. Almudí, “¿Cuáles son las innovaciones didácticas que propone la investigación en resolución de problemas y qué resultados alcanzan?”, *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 26, n.º 4 3, pp. 419-430, 2008.
- [6] L. Buteler, “La resolución de problemas en física y su relación con el enunciado”, *Revista de Enseñanza de la Física*, vol. 16, n.º 1, pp. 5-15, 2003.
- [7] B. Bravo, M. Montero, M. Juárez y F. Solari, “Desarrollo de la competencia de resolución de problemas ingenieriles en clases de Física”. *REIEC*, vol. 16, n.º 2, pp. 1-17, 2021, doi: [10.54343/reiec.v16i2.304](https://doi.org/10.54343/reiec.v16i2.304).
- [8] M. H. Ramírez y J. G. Castrejón, “Identification and Classification of Misconceptions in Solving a Variant for the Two-Body Problem”, *Transylv Rev*, vol. 27, n.º 40, 2019.
- [9] M. R. Berraondo, M. Pekolj, N. H. Pérez y R. Cognini, “Leo pero no comprendo. Una experiencia con ingresantes universitarios”, *Acta Latinoamericana de Matemática Educativa*, vol. 17, pp. 428-434, 2004.
- [10] G. Pólya, *Cómo plantear y resolver problemas* (Serie Matemáticas). México: Editorial Trillas, 1965.
- [11] J. Barojas, “Problem solving and writing I: The point of view of physics”, *Am. J. Phys. Educ.*, vol. 1, n.º 1, sept. 2007.
- [12] S. Osses y S. Jaramillo, “Metacognición: Un camino para aprender a aprender”, *Estud. Pedagóg.*, vol. 34, n.º 1, pp. 187-197, 2008, doi: [10.4067/S0718-07052008000100011](https://doi.org/10.4067/S0718-07052008000100011).
- [13] M. A. Queiruga, C. Sáiz y E. Montero, *Estudio sobre el entrenamiento autorregulatorio en resolución de problemas de física en Secundaria Obligatoria*. Cádiz, España: Formación IB, 2018.
- [14] M. R. Suárez y L. Cudmani, “Una estrategia metacognitiva y de autorregulación en la resolución de problemas en Física”, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 26, n.º 3, 2009. doi: [10.5007/2175-7941.2009v26n3p514](https://doi.org/10.5007/2175-7941.2009v26n3p514).

Microcredential for Physics Majors

Microcredencial para estudiantes de física

Jorge A. López¹ , Jorge A. Muñoz¹ 

¹ Department of Physics, University of Texas at El Paso

ABSTRACT

This article describes the benefits of using microcertifications to complement undergraduate physics courses. A microcertification program developed for the physics undergraduate program at University of Texas at El Paso is described, including modules created by the Data Science Community of Practice (DSCOP) group, part of the American Physical Society Data Science Group, on topics of data science, machine learning and artificial intelligence applied to physics topics.

KEYWORDS: microcertification; Physics degree plan; Data science; Machine learning; Artificial intelligence.

RESUMEN

Este artículo describe los beneficios del uso de microcertificaciones para complementar los cursos de licenciatura en física. Se describe un programa de microcertificación desarrollado para el programa de licenciatura en física en la Universidad de Texas en El Paso, incluyendo módulos creados por el grupo Data Science Community of Practice (DSCOP), parte del grupo de Ciencia de Datos de la American Physical Society, sobre temas de ciencia de datos, aprendizaje de máquina e inteligencia artificial aplicados a temas de física.

PALABRAS CLAVE: microcertificación; plan de estudios de física; ciencia de datos; aprendizaje de máquina; inteligencia artificial.

Corresponding author: Jorge A. López
Institution: Department of Physics, University of Texas at El Paso
Address: 500 W. University Ave., El Paso, TX 79968-0515, USA
E-mail: jorgelopez@utep.edu

Manuscript received: June 23, 2024; accepted: November 14, 2024. Date of publication: November 22, 2024.



I. INTRODUCTION

In an age where technology evolves at the speed of light, how can physics majors stay ahead, ensuring their education directly translates into career readiness and success? This seemingly innocuous question carries profound implications for the future of physics education. As the world around us becomes increasingly data-driven, a paradigm shift demands a re-evaluation of the traditional paths we have forged for aspiring physicists.

The author vividly recalls a conversation with a brilliant student who excelled in her physics coursework yet found herself at a crossroads upon graduation. Despite her passion for the subject and the countless hours dedicated to mastering its intricacies, she felt ill-equipped to navigate the modern job market, lacking the specialized skills, such as Python programming, data science, machine learning, and artificial intelligence, that could set her apart in an increasingly competitive landscape. Her experience is far from unique. In fact, it serves as a microcosm of a larger issue that has been brewing within the realm of physics education: the omission of crucial contemporary skills in standard curricula, leaving many graduates feeling underprepared for the demands of today's data-centric world.

For too long, physics educators have relied on the assumption that a solid foundation in physics principles alone will suffice. They have failed to recognize the rapidly evolving needs of industries that now prize specialized competencies in areas such as data science, Python programming, machine learning, and artificial intelligence. This oversight risks rendering graduates less competitive in a job market that demands a mastery of foundational knowledge and the ability to integrate and apply emerging technologies seamlessly.

Enter *microcredentials*—compact, focused certifications that empower students to acquire the highly sought-after skills that traditional physics programs often overlook. These versatile tools offer a novel solution to bridge the gap between theory and practice, equipping future physicists with the interdisciplinary problem-solving abilities that will set them apart in an increasingly data-driven world.

In 2021, recognizing the growing demand for short-term credentials among employers and education consumers,

the University of Texas (UT) System launched its Texas Credentials for the Future initiative [1] to expand offerings across UT's academic institutions. Microcredentials embedded into bachelor's degree programs and undergraduate experiences at UT institutions help college graduates distinguish their education and talent with in-demand, industry-recognized skills. Similarly, these credentials are helping alumni and working adult professionals stay relevant in the workforce.

In the following pages, the transformative potential of microcredentials within the realm of physics education is explored, along with the benefits they offer, the practical implementation strategies, and real-world case studies that illuminate their tangible impact.

II. METHODOLOGY

A firm grasp of key terminology is crucial in the rapidly transforming world of education and career readiness. A microcredential is a compact, focused certification that recognizes an individual's proficiency in a specific skill or set of competencies. Unlike traditional degrees, which encompass a broad range of subjects, microcredentials offer a targeted, specialized pathway to acquire and validate expertise in areas of high demand.

Microcredentials matter because, for centuries, academia has been structured around rigid degree programs. Nowadays, the rapid proliferation of new technologies and industries has given rise to a pressing need for highly specialized skills that traditional degree programs often struggle to keep pace with. In this landscape of accelerated change, the one-size-fits-all approach to education has revealed its limitations. Broad-based degrees, while invaluable in cultivating critical thinking and foundational knowledge, often fail to equip individuals with the targeted, market-ready skills that employers demand. This disconnect between academia and industry has left many graduates ill-prepared for the modern workforce while employers struggle to find candidates with the expertise to tackle emerging challenges [2].

Microcredentials—bite-sized, skill-specific certifications—offer a flexible alternative to traditional degrees, empowering learners to acquire highly targeted expertise that aligns with the specific demands of their chosen field or industry. The potential of microcredentials is exemplified by their successful implemen-

tation in companies like Google, IBM, and Amazon, which have embraced microcredentials as a means of upskilling their workforce, enabling employees to rapidly acquire and validate new competencies in areas such as cloud computing, data analytics, and artificial intelligence [3].

Critics may argue that microcredentials lack the depth and rigor of traditional degrees, dismissing them as mere certifications with limited value. However, this perspective overlooks the teaching of skills demanded by the industry. Furthermore, the credibility of microcredentials is bolstered by their alignment with industry standards and the endorsement of respected institutions and professional organizations.

To facilitate this transition, educational institutions must adapt their offerings, integrating microcredentials into their curricula and fostering partnerships with industry leaders to ensure the relevance and quality of these specialized certifications. Employers, too, must recognize the value of microcredentials and create incentives for their workforce to embrace continuous upskilling, thereby cultivating a culture of innovation and adaptability. In the realm of physics, the embrace of microcredentials holds immense potential to bridge the gap between physics and fields like data analysis, machine learning, or AI. These focused learning pathways can equip physics graduates with the specialized skills and industry-aligned expertise to thrive in a rapidly evolving job market.

A. BLUEPRINT FOR INTEGRATION

This section provides a comprehensive blueprint for integrating microcredentials into existing physics curricula, bridging the gap between academic knowledge and industry-relevant skills. The result will be a curriculum that aligns with market needs, enhances student employability, and fosters a culture of continuous learning and professional development. The necessary knowledge is understanding an institution's existing physics curriculum, including program structure, course offerings, and learning outcomes. Also needed are insights into current industry trends, market demands, and emerging skills needed in physics-related fields; this can be obtained by establishing relationships with industry partners and professional organizations. It is useful to have access to microcredential platforms as well as support from faculty and administrators within the institution.

The steps involved are: first, to identify areas where students may need additional training or expertise; and second, to evaluate microcredential platforms and design a program to complement the existing curriculum, integrating microcredential pathways into degree programs, with proper monitoring of student engagement and learning outcomes.

B. POTENTIAL PITFALLS AND HOW TO AVOID THEM

Implementation may face obstacles such as a lack of buy-in or faculty or academic leadership resistance, which can impede progress. These challenges should be addressed through open dialogue, supported by data-driven evidence, and clear communication of the benefits involved. Additionally, ensuring alignment with industry needs is crucial to prevent microcredentials from becoming irrelevant or undervalued. Continuous engagement with industry partners and monitoring of market trends are essential strategies here. Moreover, to combat student disengagement or low completion rates, it's vital to integrate microcredentials into degree programs and emphasize their career benefits. Furthermore, careful attention must be paid to accreditation and compliance issues, ensuring proper integration and documentation of microcredentials with involvement from accreditation bodies and adherence to established guidelines.

C. POTENTIAL PROBLEMS AND SOLUTIONS

- Limited resources or funding for microcredential development and implementation: Explore partnerships with industry or external providers, leverage existing institutional resources, or seek grant opportunities.
- Faculty resistance or lack of incentives for participating in microcredential programs: Provide professional development opportunities, recognize contributions to microcredential efforts in promotion and tenure processes, and clearly communicate the benefits to students and the institution.
- Difficulty in integrating microcredentials into existing degree programs due to curricular constraints or accreditation requirements: Work closely with curriculum committees to develop creative solutions, such as modular or stackable microcredential pathways, hybrid delivery models, or interdisciplinary collaborations.

- Limited awareness or recognition of microcredentials among students or employers: Implement marketing and communication campaigns to promote the value and benefits of microcredentials, leverage industry partnerships and endorsements, and actively engage in advocacy efforts to raise awareness and recognition.

D. CHECKING FOR SUCCESSFUL COMPLETION

- Analyze student enrollment, completion rates, and learning outcomes for microcredential programs to evaluate their effectiveness and impact.
- Seek feedback from industry partners and employers regarding the relevance and value of the microcredentials offered by your institution.
- Monitor graduate employment rates, career trajectories, and alumni feedback to assess the impact of microcredentials on employability and career advancement.
- Regularly review and update microcredential offerings based on evolving industry needs, emerging trends, and stakeholder feedback to ensure continued alignment and success.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The University of Texas at El Paso (UTEP), located along the U.S.-Mexico, has long been at the forefront of innovative educational practices. With a student population that is predominantly Hispanic and first-generation, UTEP recognized the need to bridge the gap between academic knowledge and industry-relevant skills, positioning its graduates for success in the evolving job market.

UTEP faced the challenge of ensuring that its physics graduates were equipped with not only theoretical knowledge, but also practical skills and competencies valued by employers. The traditional curriculum, while rigorous in academic content, often fell short in addressing the industry's specific needs, leaving graduates ill-prepared for the challenges of the workforce.

The background of the effort was, first, the creation of the UTEP Microcertification program headed by UTEP's Vice Provost for Curriculum Effectiveness and

Improvement, and second, the author's participation in the first meeting of the Data Science Community of Practice (DSCOP) [4], part of the Group of Data Science of the American Physical Society, at the University of Maryland in College Park in August 2022.

A program was developed to integrate microcredentials into the physics curriculum, collaborating closely with fellow faculty members, administrators, and industry partners. A team of UTEP physics faculty embarked on a comprehensive effort to incorporate microcredentials into the physics curriculum by conducting a skill gap analysis to identify areas where students needed additional training or expertise. Through the participation of industry partners (Intel, Raytheon, Oak Ridge National Laboratory) and professional organizations (American Physical Society, Society of Hispanic Professional Engineers, MAES: Latinos in Science and Engineering, National Society of Hispanic Physicists), faculty gained insights into the specific skills and competencies sought after by employers.

One key strategy was the development of microcredential programs tailored to address these identified skill gaps. These programs focused on areas such as data analysis, Python programming, machine learning, and artificial intelligence, which complemented the core physics curriculum. The microcredentials were designed to be modular and stackable, allowing students to build upon their knowledge and skills incrementally during their studies.

A certification program was proposed at the University of Texas at El Paso to upskill physics majors in data science, Python, machine learning, and artificial intelligence. The constraints at UTEP are i) a rigid degree plan and ii) the need for low-cost solutions, which translates into the impossibility of adding extra courses to the degree plan or charging extra tuition for a possible certification program. The plan proposed thus partitioned the topics into small modules that were to be incorporated into the existing physics courses during the nine semesters of the career.

A. THE PLAN

The prospective learners for this microcredential are physics majors at all levels, ranging from freshmen to graduate students; their participation will be voluntary. The microcredential program was designed to help stu-

dents demonstrate their skills in data science, Python, machine learning, and artificial intelligence as applied to physics, providing a valuable asset for prospective employers. Prerequisite knowledge includes the standard mathematics and physics competencies expected of physics majors at different levels.

The microcredential program focused on developing proficiency with Anaconda, Jupyter, Python, data cleaning, mathematical calculations, plotting, fitting, various models of machine learning, and AI through OpenAI.

Partnerships with companies such as Intel, Microsoft, and Raytheon, and national laboratories, such as Oak Ridge National Laboratory, were initiated. Additionally, an existing small grant from Microsoft supported the initial effort.

To ensure transparency, the program was designed to have a web page detailing benefits, requirements, and prerequisites. Similarly, such information will be disseminated through printed and emailed infographics.

Each participant will be given a personal web page on the UTEP website, accessible via password, where details of the modules taken and a portfolio of their activities will be documented and can be shared with potential employers.

To earn the microcredential, students must complete all modules throughout their undergraduate years. The participant's web page will show evidence of completion, displaying the completed modules and activities.

The micro certification coordinator will grade each module as it is finished, assessing knowledge, skills, and achievements. Planning assessments to be developed or utilized will also validate learner skills and competencies. Subsequently, the micro certification coordinator will grade modules.

End-of-module surveys will be utilized to gather student feedback and iterate on the module designs.

A microcredential team will include selected physics faculty, an administrator, and an industry representative. The physics faculty members will support the scientific content, while the remaining university staff will assist with program approval at the university level. The industry representative will ensure the program's relevance.

The course delivery methods include several options, such as online, face-to-face, or a hybrid approach, where modules are primarily delivered online.

The microcredential will be awarded upon completing all modules, with assessment criteria based on each participant's progress. The issuer of the badge/credential will be the micro-certification office established by the Dean of Extended University in conjunction with the office of the Vice Provost for Curriculum Effectiveness & Improvement.

B. MODULES

The microcredential program will integrate elements of cohort-based learning, self-paced instruction with instructor support, and self-paced learning without direct instructor involvement. The program structure includes 15 modules, detailed in [Table 1](#). These modules, some adapted from the DSECOP modules [5], align with course content, and are intended to be completed throughout the semester, separate from classroom and instructor interaction. The microcertification coordinator will conduct module assessment, with results recorded on the students' web profiles.

TABLE 1
MODULES AND CORRESPONDING CLASSES

PHYSICS CLASS	MODULES AND TENTATIVE TOPICS
Introduction to Mechanics	1: Introduction to Data Science [6] 2: Newton's Laws 3: Simple Harmonic Motion
Introduction to Electromagnetisms	4: Coulomb Forces 5: Circuits [7] 6: Magnetism
Modern Physics	7: Photoelectric Effect 8: Schrödinger Equation 9: Hydrogen Atom
Electromagnetics	10: Optics [8] 11: Antennas 12: Magnetisms-Ising Lattice [9]
Quantum Mechanics	13: Schrödinger Equation [10] 14: Spectroscopy [11] 15: Schrödinger Equation [12]

C. MODULES FOR INTRODUCTION TO MECHANICS COURSE

At present, a version of the physics microcredential program is being implemented. Modules for Introduction to Mechanics activities were developed and deployed into a class with 120 students in the Fall 2022 semester

at UTEP, consisting of engineering and science majors. The students did not receive any microcredentials at this time and were required to work on the activities as part of their grades. In particular, the students had 1-hour weekly workshops led by teaching assistants in which they were provided code in a Jupyter Notebook and asked to run or manipulate it to answer relevant physics questions. Coding was not a prerequisite for the class, so students did not have to write their own code, just reason about the operations being performed.

The weekly workshops kept up with concepts being introduced in lectures and leveraged code from previous sessions that the students were already familiar with. The first few weeks introduced concepts from kinematics, which eventually resulted in the implementation of simple molecular dynamics. When Newton's Laws were covered, the acceleration could then be computed from a physical event such as a spring or friction. When the concepts of work and energy were covered, the acceleration was computed from the potential energy curve. The molecular dynamics code investigated systems of interest, such as the harmonic, damped harmonic, and quartic oscillators. The students were also exposed to code that performed Monte Carlo integration, numerical differentiation, and integration, and their numerical answers were compared to analytical solutions. The modules are freely available online [13]. Figure 1 shows a sample problem, including a brief Jupyter notebook example.

The students provided feedback on the individual exercises, which were incorporated into a second and third iteration in Spring 2023 and Fall 2023. A teaching assistant was hired in Spring 2023 to work on clarifying the assignments and the code.

Sample homework problems (traditional vs computational)

6. A truck with a heavy load has a total mass of 7500 kg. It is climbing up a 15° incline at steady 15 m/s when the poorly secured load falls off. Immediately after losing the load, the truck begins to accelerate at 1.5 m/s². What was the mass of the load? (Problem 6.47) **(2800 kg)**

11. Consider the following code used to compute the net force along the horizontal axis:

```
def net_force_x(vectors):
    net_force = 0
    for vector in vectors:
        magnitude = vector[0]
        angle = vector[1]
        net_force = net_force + magnitude * np.cos(np.deg2rad(angle))
    return net_force
```

"vectors" is a list of tuples, and a tuple is a pair of values. Write down the list of tuples needed to compute the friction force on a truck with a mass of 4000 kg parked on a 15° slope if the coefficient of static friction between the tires and the road is 0.90?

Figure 1. Sample problem.

The students provided feedback on the individual exercises, which were incorporated into a second and third iteration in Spring 2023 and Fall 2023. A teaching assistant was hired in Spring 2023 to work on clarifying the assignments and the code.

In addition, to quantify the impact the exercises have on the students, the Colorado Learning Attitudes Toward Science Survey (CLASS) [14] was administered in pre- and post-tests to measure the students' interest in the general topic of physics interest and learning.

Table 2 shows the questions administered in pre- and post-tests. For each concept, the students had to agree or disagree with the various statements; the number of students agreeing or disagreeing with each would then be averaged with respect to the total number of students and the percentage used as the pre- and post-test grade. In general, the statements were ranked as "Novice" or "expert"; the lower the percentage, the more novice the class' beliefs about physics, although for questions about what is useful in learning, there is not a defined expert belief.

TABLE 2
SURVEY CATEGORIES AND STATEMENTS

PERSONAL INTEREST
3. I think about the physics I experience in everyday life.
11. I am not satisfied until I understand why something works the way it does.
14. I study physics to learn knowledge that will be useful in my life outside of school.
25. I enjoy solving physics problems.
28. Learning physics changes my ideas about how the world works.
30. Reasoning skills used to understand physics can be helpful to me in my everyday life.
REAL WORLD CONNECTION
28. Learning physics changes my ideas about how the world works.
30. Reasoning skills used to understand physics can be helpful to me in my everyday life.
35. The subject of physics has little relation to what I experience in the real world.
37. To understand physics, I sometimes think about my personal experiences and relate them to the topic being analyzed.

TABLE 2 (CONTINUED)
SURVEY CATEGORIES AND STATEMENTS

PROBLEM SOLVING (PS) GENERAL
13. I do not expect physics equations to help my understanding of the ideas; they are just for doing calculations.
15. If I get stuck on a physics problem on my first try, I usually try to figure out a different way that works.
16. Nearly everyone is capable of understanding physics if they work at it.
25. I enjoy solving physics problems.
26. In physics, mathematical formulas express meaningful relationships among measurable quantities.
34. I can usually figure out a way to solve physics problems.
40. If I get stuck on a physics problem, there is no chance I'll figure it out on my own.
42. When studying physics, I relate the important information to what I already know rather than just memorizing it the way it is presented.
PS CONFIDENCE
15. If I get stuck on a physics problem on my first try, I usually try to figure out a different way that works.
16. Nearly everyone is capable of understanding physics if they work at it.
34. I can usually figure out a way to solve physics problems.
40. If I get stuck on a physics problem, there is no chance I'll figure it out on my own.
PS SOPHISTICATION
5. After I study a topic in physics and feel that I understand it, I have difficulty solving problems on the same topic.
21. If I don't remember a particular equation needed to solve a problem on an exam, there's nothing much I can do (legally!) to come up with it.
22. If I want to apply a method used for solving one physics problem to another problem, the problems must involve very similar situations.
25. I enjoy solving physics problems.
34. I can usually figure out a way to solve physics problems.
40. If I get stuck on a physics problem, there is no chance I'll figure it out on my own.
CONCEPTUAL UNDERSTANDING
1. A significant problem in learning physics is being able to memorize all the information I need to know.
5. After I study a topic in physics and feel that I understand it, I have difficulty solving problems on the same topic.
6. Knowledge in physics consists of many disconnected topics.
13. I do not expect physics equations to help my understanding of the ideas; they are just for doing calculations.
21. If I don't remember a particular equation needed to solve a problem on an exam, there's nothing much I can do (legally!) to come up with it.
32. Spending a lot of time understanding where formulas come from is a waste of time.
APPLIED CONCEPTUAL UNDERSTANDING
1. A significant problem in learning physics is being able to memorize all the information I need to know.
5. After I study a topic in physics and feel that I understand it, I have difficulty solving problems on the same topic.
6. Knowledge in physics consists of many disconnected topics.
8. When I solve a physics problem, I locate an equation that uses the variables given in the problem and plug in the values.
21. If I don't remember a particular equation needed to solve a problem on an exam, there's nothing much I can do (legally!) to come up with it.
22. If I want to apply a method used for solving one physics problem to another problem, the problems must involve very similar situations.
40. If I get stuck on a physics problem, there is no chance I'll figure it out on my own.

Figure 2 shows the averages obtained for each category based on responses from 28 students. The symbols in blue show the pre-project attitudes, and the ones in red the post-project feelings. It is clear that there were gains of several percentages in all rubrics, with an average

gain in all topics of 3.8% and a maximum gain of 9.5% in personal interest on the subject of applying computation, data science, etc., to homework problems. These results were subdivided by gender, resulting in similar gains.

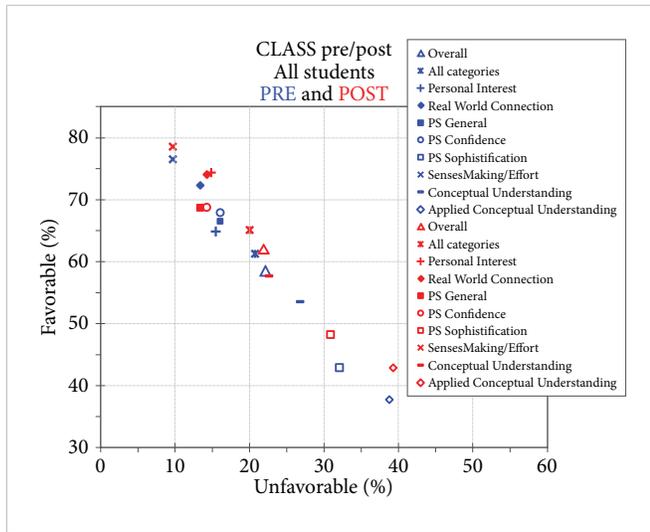


Figure 2. Pre- and post-tests were used to quantify how favorable or unfavorable the students' attitude was to a series of concepts related to the projects implemented.

Figure 3 shows the changes in attitude from pre- to post-test results. In general, the net displacement is toward the expert-like side.

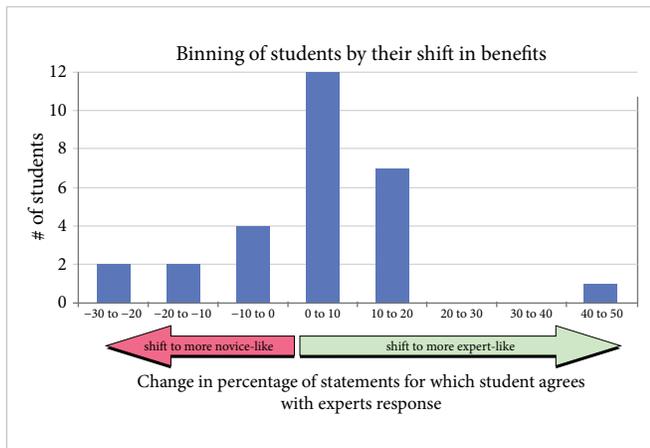


Figure 3. Changes of attitude from pre- to post-test results. The net displacement is toward the expert-like side.

Student feedback on the workshop and the lecture was positive every semester, ranging from “discovering that physics and computation are closely related” to not liking coding but still feeling that understanding it was very relevant to their future careers. Figure 4 shows the student evaluations from Fall 2019, before the modifications were implemented, Fall 2022, when the modifications began to be implemented, and Spring 2023, when the modifications were in place; it is easy to see an increase in the positive attitude of the students as the changes were implemented.

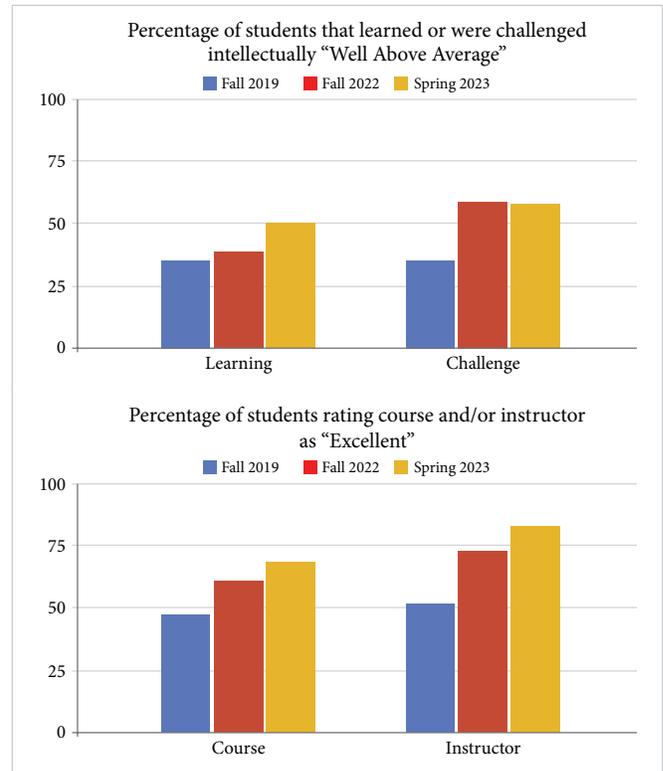


Figure 4. Student evaluations.

IV. CONCLUSIONS

In the evolving landscape of education and career readiness, understanding microcredentials is crucial. Microcredentials are compact, specialized certifications that validate proficiency in specific skills, contrasting with traditional broad-based degrees.

As technological advancements and industry needs rapidly change, traditional degree programs often fail to equip individuals with targeted, market-ready skills. Microcredentials offer a flexible alternative, enabling learners to acquire expertise tailored to their chosen fields, which has been successfully implemented by companies like Google and Amazon for upskilling in areas such as cloud computing and data analytics.

Despite criticisms of lacking depth, microcredentials align with industry standards and are endorsed by respected institutions, making them valuable for bridging the skills gap.

Educational institutions must integrate microcredentials into their curricula and collaborate with industries, while employers should recognize their worth and encourage continuous upskilling to foster innovation and

adaptability. For physics graduates, microcredentials provide focused learning pathways that align with the demands of a rapidly evolving job market.

The program designed for the Physics undergraduate degree has not been fully implemented as proposed, but it has been partially implemented in some courses with promising results.

As the demand for specialized skills continues to grow, the integration of microcredentials into higher education curricula becomes increasingly crucial. The UTEP case study will serve as a testament to the power of innovation and collaboration, demonstrating how institutions can adapt to meet the changing needs of students, industry, and society as a whole.

REFERENCES

- [1] “Texas credentials for the future.” The University of Texas System. Accessed: Jul. 23, 2024 [Online]. Available: <https://www.utsystem.edu/sites/texas-microcredentials>
- [2] C. Sullivan. “Microcredentials Unleashed: Pioneering the Next Frontier.” The evolution. Accessed: Oct. 12, 2024. [Online]. Available: <https://evollution.com/microcredentials-unleashed-pioneering-the-next-frontier>
- [3] V. Agarwal. “How Companies Like Meta, IBM, AWS & Netflix Are Using Microcredentials To Bridge Talent Gaps.” LinkedIn. Accessed: Oct. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/how-companies-like-meta-ibm-aws-netflix-using-bridge-talent-agarwal>
- [4] “Data Science Community of Practice.” DSECOP.org. Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: <https://dsecop.org/>
- [5] “GDS Education Community of Practice.” Github.com. Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: <https://github.com/GDS-Education-Community-of-Practice/DSECOP>
- [6] “Exploratory Data Analysis.” Github.com. Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: https://github.com/GDS-Education-Community-of-Practice/DSECOP/tree/main/Exploratory_Data_Analysis
- [7] “DSECOP Github: Parameter Estimation of RLC Circuit Model with Automatic Differentiation and Gradient Descent”. Github.com. Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: https://github.com/GDS-Education-Community-of-Practice/DSECOP/tree/main/Automatic_Differentiation
- [8] “Introduction to Classification Algorithms”. Github.com. Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: https://github.com/GDS-Education-Community-of-Practice/DSECOP/tree/main/Intro_to_Classification_Algorithms
- [9] “Connecting MonteCarlo to ModernAI.” Github.com. Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: https://github.com/GDS-Education-Community-of-Practice/DSECOP/tree/main/Connecting_MonteCarlo_to_ModernAI
- [10] K. Shah. “Learning the Schrödinger Equation.” Github.com. Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: https://github.com/GDS-Education-Community-of-Practice/DSECOP/tree/main/Learning_the_Schrodinger_Equation
- [11] “Deep Learning Applications in NMR Spectroscopy.” Github.com. Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: https://github.com/GDS-Education-Community-of-Practice/DSECOP/tree/main/NMR_Deep_Learning
- [12] K. Shah. “Gaussian Processes and the Schrödinger Equation.” Github.com. Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: https://github.com/GDS-Education-Community-of-Practice/DSECOP/tree/main/Gaussian_Processes_and_Schrodinger_Equation
- [13] J. A Muñoz *et al.* “Mechanics: projects and exercises in Python.” Github.com. Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: https://github.com/jamunozlab/introductory_mechanics_spring_2023
- [14] “CLASS (Colorado Learning Attitudes about Science Survey).” Colorado.edu. Accessed: Oct. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.colorado.edu/sei/class>

ACKNOWLEDGMENTS

We acknowledge and greatly appreciate the support from the Research Corporation for Science Advancement and the UTEP Office of the Vice Provost for Curriculum Effectiveness and Improvement.

Implementación de indagación guiada con simulaciones PhET sobre flotación en el nivel medio superior

Implementation of Guided Inquiry with PhET Simulations on flotation at the high school level

Pedro Oliver Cabanillas-García¹ ✉ , José Alberto Alvarado-Lemus¹ , Levy Noé Inzunza-Camacho¹ 

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Dirección General de Escuelas Preparatorias, Culiacán Rosales, Sinaloa, México

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar las percepciones de los estudiantes en la adquisición de conocimientos sobre el concepto de *flotación* mediante la implementación de la indagación guiada utilizando simulaciones PhET. La implementación se llevó a cabo a través del diseño de Hojas de Trabajo aplicadas a tres grupos de bachillerato tecnológico ubicado en Sinaloa, México. Se realizó el análisis de las percepciones de los estudiantes hacia la indagación guiada con simulaciones PhET a través de la observación participante y la entrevista semiestructurada a través de cinco categorías propuestas. Los resultados muestran un incremento de apropiación del concepto de flotación y fomentan el trabajo colaborativo entre los estudiantes. Las conclusiones muestran que la indagación guiada con simulaciones PhET mejora significativamente la comprensión y motivación de los estudiantes, promoviendo la colaboración y el aprendizaje activo. Se identificaron desafíos en la familiarización y aplicación de las simulaciones. Los beneficios de la investigación muestran que la indagación guiada y las simulaciones PhET proporcionan una experiencia de aprendizaje interactiva y segura, que permite una comprensión más profunda de conceptos y su aplicación en situaciones de la vida real.

PALABRAS CLAVE: enseñanza de la física; flotación; indagación guiada; PhET.

ABSTRACT

This study aims to analyze students' perceptions in the acquisition of knowledge about the concept of *flotation* through the implementation of guided inquiry using PhET simulations. The implementation was carried out through the design of Worksheets applied to three groups of technological high school students located in Sinaloa, Mexico. The analysis of students' perceptions towards guided inquiry with PhET simulations was carried out through participant observation and semi-structured interviews through five proposed categories. The results show an increased appropriation of the concept of flotation and promote collaborative work among students. The conclusions show that guided inquiry with PhET simulations significantly improves students' understanding and motivation, promoting collaboration and active learning. Challenges were identified in the familiarization and application of the simulations. The benefits of the research show that guided inquiry and PhET simulations provide an interactive and safe learning experience, allowing for a deeper understanding of concepts and their application in real-life situations.

KEYWORDS: physics teaching; flotation; guided inquiry; PhET.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Pedro Oliver Cabanillas García
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Sinaloa / Dirección General de Escuelas Preparatorias
DIRECCIÓN: Circuito Interior Oriente s/n, Ciudad Universitaria, Privada del Real, C. P. 80040, Culiacán Rosales, Sinaloa, México
CORREO ELECTRÓNICO: oliver_cabanillas@uas.edu.mx

Fecha de recepción: 29 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:** 29 de octubre de 2024. **Fecha de publicación:** 26 de noviembre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

La enseñanza de la física en el nivel medio superior en el noroeste de México enfrenta desafíos significativos, puesto que sigue siendo una asignatura que en su mayoría se aborda de manera tradicional. Dentro de los principales desafíos se encuentran la complejidad inherente de los conceptos físicos, las limitaciones de los métodos tradicionales y la falta de experiencias prácticas significativas [1]. Estas dificultades se agravaron con la pandemia de COVID-19, la cual agregó limitaciones, como las restricciones para utilizar los laboratorios escolares, la complejidad de realizar experimentos en casa, y el uso de software y aplicaciones de gestión del aprendizaje [2], [3], [4].

En este nivel educativo se requiere que los estudiantes desarrollen una comprensión profunda de principios y leyes fundamentales de la física, lo que a menudo implica la capacidad de visualizar y manipular conceptos abstractos. Los enfoques tradicionales de enseñanza, que suelen basarse en clases donde el docente brinda toda la información y se enfoca en la resolución de problemas matemáticos, pueden no ser suficientes para ayudar a los estudiantes a desarrollar esta comprensión conceptual [5].

Diversos estudios han identificado barreras para la enseñanza efectiva de la física. Por ejemplo, en [6] se destaca la falta de material educativo, la insuficiente capacitación de los docentes y un entorno de aprendizaje deficiente. Además, en [7] se comenta la influencia de la actitud en el bajo rendimiento de los estudiantes hacia el aprendizaje de la física, mientras que en [8] se sostiene que la falta de recursos tecnológicos adecuados y la interacción limitada impide una comunicación efectiva en el desarrollo del aprendizaje de la física.

En las escuelas adscritas a la Subsecretaría de Educación Media Superior (SEMS), de la Secretaría de Educación Pública (SEP), los temas que se abordan en las asignaturas de física son mecánica, fluidos y propiedades de la materia, termodinámica, óptica y electromagnetismo. En estudio de fluidos se aborda el tema de *flotación*, un fenómeno en el que un objeto permanece suspendido en un fluido sin hundirse o elevarse debido a la acción de fuerzas opuestas [9].

Existen investigaciones que han abordado la enseñanza de la flotación basados en propuestas didácticas innovadoras. En [10] se analiza la planeación didáctica que

incluye actividades y preguntas dirigidas a corregir concepciones erróneas sobre este fenómeno. Otros estudios analizan las fortalezas de los recursos audiovisuales y actividades prácticas, como apoyo al aprendizaje del comportamiento de los objetos en fluidos [11], [12]. También se hace uso de situaciones u objetos de la vida cotidiana: en [13] se usa el iceberg como objeto colocado en un fluido y en [14] se mide diversas variables relacionadas con la flotación.

Los simuladores virtuales se presentan como una herramienta digital innovadora que se integran fácilmente dentro de diversas metodologías para la enseñanza de la física, puesto que permiten recrear algunas situaciones que difícilmente se pueden reproducir en el aula o en un laboratorio escolar. Las simulaciones de PhET Interactive Simulations son entornos que usan animación en forma de juego donde los estudiantes pueden interactuar y aprender mediante la exploración [15], [16]. Estos ofrecen una solución eficaz para la enseñanza de la física, debido a las diversas opciones disponibles tanto en la página web como en la aplicación de teléfonos inteligentes.

Existen estudios donde analizan la eficacia de utilizar los simuladores de PhET para la enseñanza de la física en múltiples temas [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25].

También existe trabajo donde se analiza el apoyo que brindan las simulaciones PhET para la enseñanza de la física. En [26] se argumenta que el uso de simulaciones PhET mejoró significativamente las actitudes de los estudiantes hacia la física en comparación con métodos tradicionales. Por otra parte, en [27] se argumenta que el uso de PhET en las hojas de trabajo de los estudiantes resultó en una mejora considerable en los resultados de aprendizaje, además estas facilitan la comunicación entre los estudiantes y docentes facilitando la instrucción [28]. Sin embargo, las actividades propuestas con las simulaciones PhET deben de estar basadas en la investigación y apoyarse en el acompañamiento docente para lograr los resultados de aprendizaje deseados [29].

Dentro de las diversas propuestas de estrategias educativas que existen para implementar las simulaciones de PhET en física se encuentra la Indagación Guiada (IG), en la que los estudiantes tienen la oportunidad de involucrarse en un proceso de indagación, que incluye discusiones grupales donde ellos mismos manipulan la simulación. Esto permite que todos participen mediante las hojas de trabajo que contienen instrucciones,

desafíos y preguntas, en las que registran sus observaciones y resultados [30], [31].

La implementación de IG ha sido estudiada en diversas investigaciones donde ha sido implementada con PhET para la enseñanza de la física. En general, muestra resultados positivos cuando son combinados tanto las simulaciones como los experimentos demostrativos [30]. Basado en la revisión de las investigaciones que utilizan IG con PhET, se identificaron estudios dirigidos tanto a clases presenciales [32] como a clases virtuales [33]. También, en [34] se concluye que los docentes tienen actitudes positivas hacia la implementación de IG con simuladores virtuales. Además, se encontraron estudios donde se aplica la IG para la enseñanza de la física en diversos grados educativos [35], [36].

Por lo anterior, esta investigación se basa en la implementación de la IG en un bachillerato tecnológico ubicado en Sinaloa, México, en el cual se muestran dificultades para adquirir el concepto de flotación por prevalecer la enseñanza tradicional guiada por los ejercicios operativos que enfatizan la aplicación de cálculos matemáticos. El objetivo es analizar la percepción de los estudiantes en la adquisición de conocimientos sobre el concepto de flotación mediante la implementación de la IG utilizando simulaciones PhET.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación tiene como marco de referencia la metodología cualitativa a través de la etnografía particularista, puesto que se explora y comprende las experiencias de estudiantes al utilizar la IG con simuladores PhET para el aprendizaje del concepto de flotación [37], [38]. Por lo tanto, se utiliza la observación participante y la entrevista semiestructurada para profundizar en las percepciones de los estudiantes sobre el aprendizaje obtenido en la sesión.

Los participantes de este estudio son 69 estudiantes de tercer grado del nivel medio superior del Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 224 (CBTIS 224) ubicado en Culiacán, Sinaloa, México, de los cuales 31 son hombres y 38 son mujeres. La propuesta de la IG sobre flotación se hizo en una sesión de 1.5 horas.

La propuesta de trabajo fue diseñada en la especialización denominada Aprendizaje Activo STEM con Simulaciones Interactivas PhET, ofertada por la

Universidad de Colorado Boulder. En esta se diseñaron dos hojas de trabajo que corresponden al Pre-Laboratorio y Hoja de Clase (URL hojas de trabajo: <https://phet.colorado.edu/es/contributions/view/7418>). Además, el simulador PhET seleccionado fue Densidad (URL simulador Densidad: https://phet.colorado.edu/es_PE/simulations/density).

La hoja de Pre-Laboratorio de la actividad Flotación de los cuerpos tiene como objetivo describir cómo influye el volumen y la masa de un objeto en su flotación. En ella se muestran tres configuraciones del simulador donde las opciones de modificación de material, masa y volumen presentan situaciones donde el estudiante debe predecir qué sucede en la simulación previo a la validación mediante la manipulación de las variables.

En el caso de la Hoja de Clase, esta tiene como objetivo identificar los materiales que pueden y los que no pueden flotar en un fluido. Se inicia con un tiempo de juego abierto donde el estudiante puede manipular todas las variables que se encuentran en la simulación con el objetivo de que se familiarice con las configuraciones que se pueden generar en el simulador. Después, debe colocar tres observaciones que tenga sobre lo que descubre en el juego abierto.

La segunda actividad consiste en que, basado en su experiencia previa en el juego abierto, puedan generar tres configuraciones donde se presenten objetos que floten en agua, que no floten y que permanezcan inertes. También, se debe analizar las características de cada situación en función de la masa y volumen del objeto propuesto.

Para la tercera actividad se proponen tres situaciones donde el estudiante debe realizar una configuración previa para después responder la pregunta: *¿Siguen flotando los bloques?* En este caso, el estudiante responde y explica su respuesta. A manera de consolidación, los estudiantes utilizan objetos reales para configurar situaciones donde puedan flotar, no puedan flotar y quedar inerte en el aire.

Para obtener las percepciones de los estudiantes sobre el aprendizaje del concepto de flotación mediante IG y PhET, se utilizó una bitácora orientada de preguntas abiertas para la observación participante, y la guía de preguntas abiertas para la entrevista semiestructurada, en las cuales se basan en 5 categorías temáticas desarrolladas para la investigación, mismas que se explican en la [Tabla 1](#).

TABLA 1
 CATEGORÍAS TEMÁTICAS PARA EL ANÁLISIS

CATEGORÍAS	DESCRIPCIÓN
Comprensión del concepto físico	Evalúa cómo los estudiantes perciben y entienden los conceptos físicos mediante el uso de simulaciones virtuales
Colaboración y trabajo en equipo	Analiza cómo los estudiantes se organizan, enfrentan desafíos y utilizan estrategias colaborativas durante las actividades grupales
Vinculación con la vida cotidiana	Examina cómo los estudiantes pueden transferir y aplicar los conceptos físicos aprendidos en situaciones reales y cotidianas
Retroalimentación basada en el aprendizaje	Recopila la retroalimentación de los estudiantes sobre la estructura y organización de las actividades
Desafíos y dificultades en la comprensión	Identifica los conceptos físicos que los estudiantes encontraron más difíciles de entender durante la sesión

La bitácora orientada de preguntas abiertas para la observación participante al momento de la implementación de IG con PhET brinda al docente la capacidad de recolectar información en el contexto [39]. Con respecto a la guía de preguntas abiertas de la entrevista semiestructurada, esta cuenta con diez preguntas donde se distribuyen las categorías propuestas que se realizan después de la sesión de clase.

Los instrumentos de investigación fueron validados por expertos en el área de la enseñanza de la física mediante intercotejo. Las preguntas utilizadas para orientar la observación participante y la guía de preguntas abiertas de la entrevista semiestructurada se muestran en la [Tabla 2](#).

TABLA 2
 CATEGORÍAS TEMÁTICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN

CATEGORÍAS	PREGUNTAS DE OBSERVACIÓN PARTICIPANTE	PREGUNTAS DE ENTREVISTA SEMIESTRUCTURADA
Comprensión del concepto físico	1. ¿Cómo interactúan los estudiantes con las simulaciones para manipular variables como la masa y el volumen en tiempo real? 2. ¿Cómo afecta el uso de simulaciones PhET el nivel de interés y motivación de los estudiantes en el aprendizaje del concepto de flotación?	1. ¿Cómo fue su experiencia al utilizar la simulación virtual para entender el concepto físico propuesto? 2. ¿Qué aprendió sobre la temática que plantea el simulador virtual con respecto a la clase presencial que previamente se impartió?
Colaboración y trabajo en equipo	3. ¿Cómo se organizan los estudiantes durante las actividades de simulación para resolver los problemas propuestos? 4. ¿Qué interacciones específicas entre los estudiantes facilitan la comprensión del concepto de flotación?	3. ¿Qué desafíos enfrentó al trabajar en equipo durante la actividad? 4. ¿Cómo se organizó como equipo para llevar a cabo las actividades? 5. ¿Qué estrategias utilizaron para solucionar las actividades que se presentaron con el simulador virtual?
Vinculación con la vida cotidiana	5. ¿De qué manera los estudiantes logran establecer conexiones entre las simulaciones PhET y situaciones cotidianas asociadas al concepto de flotación? 6. ¿Qué dificultades enfrentan los estudiantes al intentar vincular los conceptos de la simulación con situaciones de la vida real?	6. ¿Cómo vinculó el concepto físico reforzado con el simulador virtual al realizar la actividad final con objetos reales? 8. ¿Cómo pueden aplicar los conceptos aprendidos en su vida cotidiana?
Retroalimentación basada en el aprendizaje	7. ¿Qué obstáculos encuentran los estudiantes al manipular las variables del simulador PhET para predecir y explicar el fenómeno de flotación? 8. ¿Cómo afecta la falta de familiarización con las herramientas digitales al rendimiento de los estudiantes durante las actividades de simulación?	9. ¿Qué retroalimentación tienen para el docente sobre la estructura y organización de la actividad? 10. ¿Qué herramientas tecnológicas adicionales consideran que podrían mejorar su aprendizaje en este tema?
Desafíos y dificultades en la comprensión	9. ¿Qué conceptos teóricos sobre la flotación generan mayor confusión en los estudiantes durante la indagación guiada con PhET? 10. ¿Cómo enfrentan los estudiantes las dificultades al aplicar el conocimiento sobre flotación para resolver los problemas presentados en las Hojas de Trabajo?	7. ¿Qué conceptos de la sesión le resultaron más difíciles de entender?

Para el análisis de los resultados se utilizó Voyant Tools, que es un entorno web para lectura y análisis de texto que ofrece diversas funcionalidades para la minería de texto y las visualizaciones interactivas [40], [41], [42]. Destaca la capacidad interactiva de Voyant Tools para

utilizar las diversas herramientas de manera simultánea en el análisis de las categorías temáticas, mostrando las características del texto que se proporciona. Además, cuenta con la capacidad de depurar términos que no se alinean con lo solicitado [43], [44].

Para interpretar las respuestas de los participantes, se utilizó un sistema de codificación que asigna un identificador único a cada respuesta para encontrar patrones y temas emergentes. El campo ID representan el identificador de los participantes, ID_Preg# representa el número de pregunta y Resp representa la respuesta generada por el participante. La configuración final del identificador es ID+ID_Preg#: Resp. Finalmente, en la Figura 1 se muestra la metodología propuesta en esta investigación.

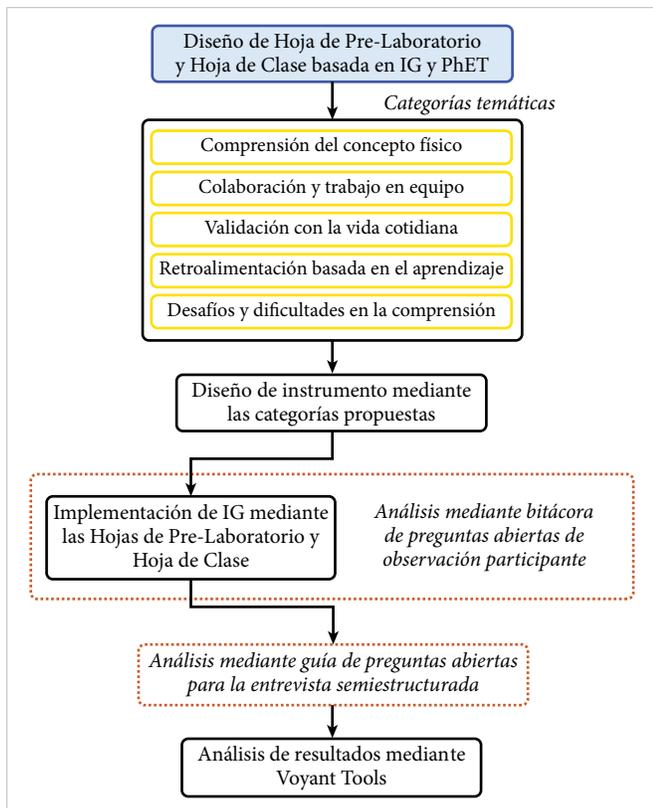


Figura 1. Metodología propuesta de investigación.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados del análisis basado en las respuestas de la observación participante en clase presencial al aplicar IG con simuladores PhET mediante las hojas de trabajo y la entrevista semiestructurada realizada después de la implementación. En la Figura 2 se muestra la implementación en el laboratorio de la IG.

CATEGORÍA COMPREENSIÓN DEL CONCEPTO FÍSICO

La observación participante demostró que el uso de los simuladores PhET mejora significativamente el aprendizaje de flotación. Los estudiantes pueden manipu-

lar variables como *masa* y *volumen* en tiempo real, lo que refuerza su comprensión conceptual. En la Figura 3 se muestra las evidencias de la Hoja de Trabajo Pre-Laboratorio.



Figura 2. Implementación de IG con simulaciones PhET sobre flotación.

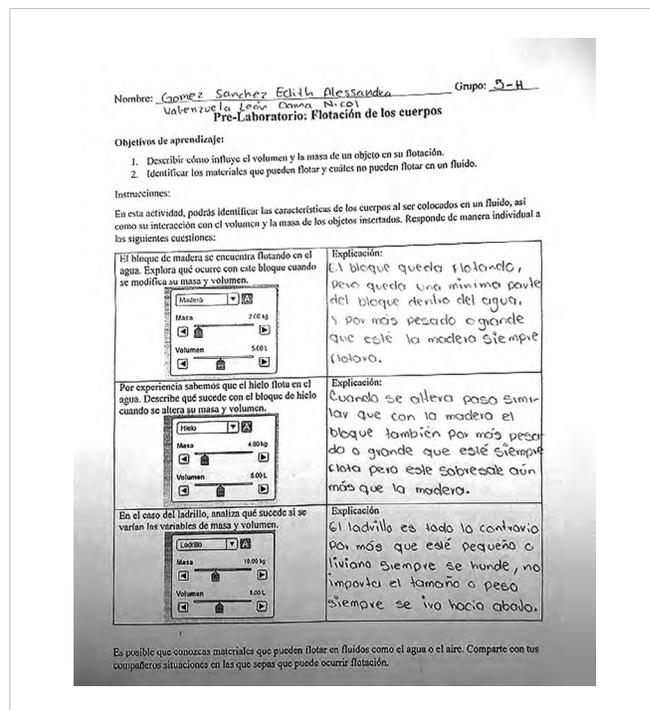


Figura 3. Ejemplo de respuesta de los estudiantes a la Hoja de Trabajo Pre-Laboratorio.

La IG ha fomentado el aprendizaje activo y participativo, incrementando el interés y motivación de los estudiantes hacia el aprendizaje de la asignatura de física a través de la experimentación.

En la entrevista semiestructurada se encontró patrones y segmentos de párrafo que validan la comprensión del

denotan que los estudiantes se desarrollaron en un ambiente de aprendizaje cooperativo, en el cual interactuaron con sus compañeros de otros equipos, compartieron materiales y se apoyaron para relacionar los conceptos de flotación con la simulación.

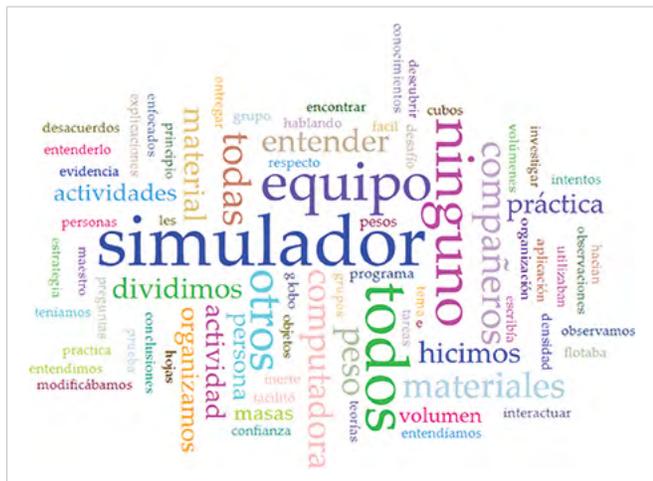


Figura 6. Nube de frecuencia de términos de la categoría *colaboración y trabajo en equipo*.

Los estudiantes presentaron respuestas positivas sobre trabajar en equipo mediante IG con simulaciones PhET. Sobre este tema, A18P02 comentó que “no comprendíamos totalmente bien, pero después de varios intentos con el equipo, lo entendimos con facilidad y fue de bastante ayuda”. También, A16P04 argumentó que “cada persona tuvo su rol asignado en cada actividad para poder trabajar sin problemas”. El participante A12P05 sostuvo que “... seguimos las instrucciones y fue la manera más fácil de llegar al resultado de lo que se nos pedía”. Las respuestas evidencian la colaboración y trabajo en equipo a través del esfuerzo conjunto y la interacción entre compañeros para facilitar la comprensión del concepto de flotación, también se refuerza la influencia que tienen las Hojas de Trabajo en la actividad, ya que estas guían al estudiante para que indague en la adquisición de conocimientos de flotación. Las simulaciones interactivas refuerzan la comprensión conceptual, también crean oportunidades para que los estudiantes colaboren para resolver problemas a través de actividades basadas en indagación [20].

CATEGORÍA APLICACIÓN DE CONCEPTOS EN LA VIDA COTIDIANA

En la observación participante surgieron dificultades para vincular las simulaciones PhET con situaciones

de la vida real donde se aplique el concepto de flotación. Aunque algunos estudiantes lograron relacionar intuitivamente los principios físicos con situaciones cotidianas, como la flotabilidad de un balón en una alberca, otros tuvieron dificultades para establecer estas conexiones de manera independiente. En la Figura 7 se muestra la etapa de las Hojas de Trabajo donde se vincula el conocimiento de flotación con situaciones con materiales de la vida cotidiana.

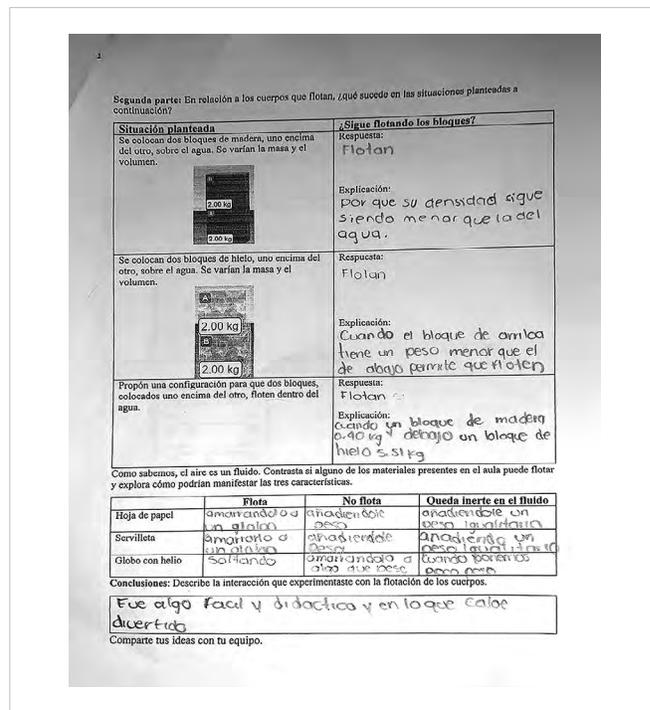


Figura 7. Actividad de las hojas de trabajo de flotación de los cuerpos donde se vincula el aprendizaje con materiales de la vida cotidiana.

Los términos predominantes en esta categoría son *objetos* (FP = 22), *ver* (FP = 13) y *simulador* (FP = 12), lo cual destaca que los estudiantes encuentran relaciones para vincular la simulación de PhET con aplicaciones de la vida real sobre el concepto de flotación. También brinda una referencia para que el concepto de flotación pueda ser de mayor visibilidad en el entorno en el que interactúa el estudiante.

También se encontraron los términos de *ejemplos* (FP = 10), *materiales* (FP = 9) y *globo* (FP = 9) (Figura 8). Estos muestran que los estudiantes intentan establecer conexiones directas entre los conceptos aprendidos y aplicaciones de la vida real. Destaca que aparece el término *globo*, puesto que es un material que se requiere para la propuesta de las Hojas de Trabajo de la IG.

de los conceptos relacionados con la flotación. Algunos experimentaron dificultades en los conceptos teóricos y en otros casos había ideas erróneas sobre cómo deben de reaccionar los materiales del simulador con las configuraciones propuestas en las Hojas de Trabajo. La utilización de las simulaciones PhET pueden presentar tanto beneficios como desafíos en la comprensión de conceptos teóricos de física. Aunque las simulaciones PhET facilitan el aprendizaje interactivo, es relevante contar con la orientación del docente para que los estudiantes puedan superar los obstáculos en la interpretación de los fenómenos estudiados [15], [16].

IV. CONCLUSIONES

Este estudio detalla la implementación de la IG utilizando simulaciones PhET para el tema de flotación en el nivel medio superior. Los resultados mostraron beneficios considerables al integrar las simulaciones PhET dentro del enfoque de IG, contribuyendo de manera significativa al proceso de aprendizaje de los estudiantes.

Basado en los resultados obtenidos de la entrevista semiestructurada y los registros de observación del docente, se identificó que la mayoría de los estudiantes lograron una comprensión significativa y profunda de los conceptos relacionados con la flotación. Los estudiantes pudieron visualizar y manipular variables clave como la masa y el volumen, permitiendo una experimentación directa en un entorno seguro y controlado. El avance conceptual es manifestado en las respuestas de los estudiantes, los cuales argumentan que el uso de los simuladores PhET facilitó la comprensión de cómo el volumen y la densidad afectan la flotación de un cuerpo (A18P03 y A08P03).

La motivación y el interés de los estudiantes por las simulaciones PhET se incrementaron notablemente, esto principalmente por la naturaleza interactiva y visual que proponen los simuladores virtuales. Las simulaciones virtuales de PhET permite a los estudiantes observar los efectos de la flotación al modificar ciertas variables. Esta característica captó la atención de los estudiantes e incentivó un mayor compromiso en las actividades planteadas en las Hojas de Trabajo.

La IG promueve la colaboración y el aprendizaje en grupo de manera efectiva. Las actividades basadas en simulaciones PhET estimularon la lluvia de ideas y el diálogo entre los estudiantes, permitiéndoles resolver

colectivamente las actividades planteadas y fortalecer habilidades de trabajo en equipo y comunicación entre ellos. La interactividad que propone PhET combinada con IG resultó en una mayor participación de los estudiantes, mejorando el rendimiento y la comprensión de los conceptos de flotación.

No obstante, la implementación de las simulaciones PhET también presentó algunos desafíos, principalmente en la familiarización con estas herramientas ya que algunos no experimentaron inconvenientes, mientras que otros necesitaron tiempo para asimilar su funcionamiento y características, pues era una herramienta completamente nueva. Además, algunos estudiantes enfrentaron dificultades conceptuales, esto, adicionado con la dificultad de utilizar la simulación, causaron que se desfasaran en el ritmo de trabajo respecto a sus compañeros.

A pesar de estos desafíos, los beneficios de la IG con simulaciones PhET son evidentes. La capacidad de proporcionar una experiencia activa, interactiva y visualmente atractiva supera significativamente a los métodos tradicionales de enseñanza. Las simulaciones PhET permiten al estudiante indagar, experimenta y explorar de manera segura, lo que facilita la comprensión más profunda y duradera de los conceptos, permitiéndoles aplicarlos en situaciones de la vida real.

Los hallazgos indican que la IG con el uso de simulaciones PhET constituyen un complemento significativo en la adquisición de conocimiento sobre flotación. Esta propuesta educativa ofrece a los estudiantes una experiencia de aprendizaje activa, interactiva y centrada en el estudiante, que facilita la comprensión de conceptos, promueve la formación integral a través del desarrollo de habilidades que permiten al estudiante aplicar el conocimiento adquirido en contextos variados y en su vida diaria.

REFERENCIAS

- [1] N. D. Finkelstein *et al.*, “When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment”, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, vol. 1, n.º 1, art. 010103, oct. 2005, doi: [10.1103/PhysRevSTPER.1.010103](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.1.010103).
- [2] H. Putranta, H. Kuswanto, M. Hajaroh, S. I. Astuti y Rukiyati, “Strategies of Physics Learning Based on Traditional Games in Senior High Schools during the

- Covid-19 Pandemic”, *Rev. Mex. Fis. E*, vol. 19, n.º 1 en.-jun., nov. 2021, doi: [10.31349/RevMexFisE.19.010207](https://doi.org/10.31349/RevMexFisE.19.010207).
- [3] R. L. Mazzola, P. Gondoni, M. Bozzi, J. E. Raffaghelli y M. Zani, “Exploring Effective Physics Teaching Strategies in High Schools during the COVID-19 Pandemic”, *Educ. Sci.*, vol. 13, n.º 8, art. 799, ag. 2023, doi: [10.3390/educsci13080799](https://doi.org/10.3390/educsci13080799).
- [4] K. Khan, M. I. Majoka, K. Khurshid y M. H. Shah, “Impact of Active Learning Method on Students Academic Achievement in Physics at Secondary School Level in Pakistan”, *Journal of Education & Social Sciences*, vol. 5, n.º 2, pp. 127-144, oct. 2017, doi: [10.20547/jess0521705204](https://doi.org/10.20547/jess0521705204).
- [5] C. E. Mora Ley, R. Sánchez Sánchez y I. B. Culaba, *Aprendizaje activo de la física. Clases demostrativas interactivas*. Ediciones Comunicación Científica, 2021, doi: [10.52501/cc.007](https://doi.org/10.52501/cc.007).
- [6] N. Ullah y A. S. Almani, “Factors Affecting Students’ Academic Performance: A Case Study Of Secondary Schools Of Makran Division Balochistan, Pakistan”, *Webology*, vol. 19, n.º 2, pp. 2749-2764, 2022.
- [7] H. D. Assem, L. Nartey, E. Appiah y J. K. Aidoo, “A Review of Students’ Academic Performance in Physics: Attitude, Instructional Methods, Misconceptions and Teachers Qualification”, *EJEDU*, vol. 4, n.º 1, pp. 84-92, en. 2023, doi: [10.24018/ejedu.2023.4.1.551](https://doi.org/10.24018/ejedu.2023.4.1.551).
- [8] M. Ramírez, G. Ávila y F. Escobar, “Discussion forum for the learning of Modern Physics in high school Mexico”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2490, n.º 1, art. 012005, abr. 2023, doi: [10.1088/1742-6596/2490/1/012005](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2490/1/012005).
- [9] D. Halliday, R. Resnick y J. Walker, *Principles of Physics*, 10.ª ed. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2014.
- [10] U. Dorji, “Misconception on floating and sinking”, *IJELS*, vol. 6, n.º 5, pp. 243-249, 2021, doi: [10.22161/ijels.65.37](https://doi.org/10.22161/ijels.65.37).
- [11] C. Hattan y P. A. Alexander, “The effects of knowledge activation training on rural middle-school students’ expository text comprehension: A mixed-methods study”, *J Educ Psychol*, vol. 113, n.º 5, pp. 879-897, jul. 2021, doi: [10.1037/edu0000623](https://doi.org/10.1037/edu0000623).
- [12] S. Ünal, “Changing Students’ Misconceptions of Floating and Sinking Using Hands-On Activities”, *J. Balt. Sci. Educ.*, vol. 7, n.º 3, pp. 134-146, 2008.
- [13] R. Marshall, “Capsizing icebergs: an exercise in the application of the principle of the conservation of energy with a very surprising result”, *Phys. Educ.*, vol. 50, n.º 3, pp. 299-304, may. 2015, doi: [10.1088/0031-9120/50/3/299](https://doi.org/10.1088/0031-9120/50/3/299).
- [14] A. M. Roberts, “Dynamics of free-floating gas-filled rubber balloons”, *Phys. Educ.*, vol. 30, n.º 2, pp. 109-113, Mar. 1995, doi: [10.1088/0031-9120/30/2/011](https://doi.org/10.1088/0031-9120/30/2/011).
- [15] C. E. Wieman, W. K. Adams y K. K. Perkins, “PhET: Simulations That Enhance Learning”, *Science*, vol. 322, n.º 5902, pp. 682-683, oct. 2008, doi: [10.1126/science.1161948](https://doi.org/10.1126/science.1161948).
- [16] K. Perkins *et al.*, “PhET: Interactive Simulations for Teaching and Learning Physics”, *Phys. Teach.*, vol. 44, n.º 1, pp. 18-23, en. 2006, doi: [10.1119/1.2150754](https://doi.org/10.1119/1.2150754).
- [17] K. Y. Castrejón Parga, J. M. Sáenz Villela, E. S. Lara Pérez y D. B. López Tavares, “Implementación de Hojas de Actividades y Clases Interactivas Demostrativas con Simulaciones PhET en Física Conceptual”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 20, n.º 3, 2023, doi: [10.20983/culcyt.2023.3.2e.3](https://doi.org/10.20983/culcyt.2023.3.2e.3).
- [18] D. B. López y J. Orozco, “Clases Interactivas Demostrativas con el uso de simulaciones PhET para Mecánica en Preparatoria”, *LAJPE*, vol. 11, n.º 2, 2017.
- [19] C. Mora, M. Moreira y J. Meneses-Villagrà, “Aprendizaje Activo de la Física y análisis de Rasch para circuitos eléctricos mediante physlets”, *Revista de Enseñanza de la Física*, vol. 33, n.º 2, pp. 365-378, 2021, doi: [10.55767/2451.6007.v33.n2.35284](https://doi.org/10.55767/2451.6007.v33.n2.35284).
- [20] H. J. Banda y J. Nzabahimana, “The Impact of Physics Education Technology (PhET) Interactive Simulation-Based Learning on Motivation and Academic Achievement Among Malawian Physics Students”, *J Sci Educ Technol*, vol. 32, pp. 127-141, feb. 2023, doi: [10.1007/s10956-022-10010-3](https://doi.org/10.1007/s10956-022-10010-3).
- [21] B. Rayan, W. Daher, H. Diab y N. Issa, “Integrating PhET Simulations into Elementary Science Education: A Qualitative Analysis”, *Educ. Sci.*, vol. 13, n.º 9, art. 884, ag. 2023, doi: [10.3390/educsci13090884](https://doi.org/10.3390/educsci13090884).

- [22] J. R. Mera-Menéndez y W. O. López-González, “Simuladores PHET: una herramienta didáctica para el mejoramiento del rendimiento académico de estudiantes en Energía Mecánica”, *MQRInvestigar*, vol. 7, n.º 4, pp. 112-130, sept. 2023, doi: [10.56048/MQR20225.7.4.2023.112-130](https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.4.2023.112-130).
- [23] S. Uwambajimana, E. Minani, A. D. Mollel y P. Nyirahabimana, “The impact of using PhET simulation on conceptual understanding of electrostatics within selected secondary schools of Muhanga District, Rwanda”, *Journal of Mathematics and Science Teacher*, vol. 3, n.º 2, art. em045, ag. 2023, doi: [10.29333/mathsciteacher/13595](https://doi.org/10.29333/mathsciteacher/13595).
- [24] M. R. Otero y M. F. Arlego, “Teaching and Learning Optics in High School: From Fermat to Feynman”, *Educ. Sci.*, vol. 13, n.º 5, art. 503, may. 2023, doi: [10.3390/educsci13050503](https://doi.org/10.3390/educsci13050503).
- [25] P. O. Cabanillas-García, J. A. Alvarado-Lemus, L. N. Inzunza-Camacho, J. M. Mendoza-Román y J. A. Félix-Madrugal, “El uso de simuladores virtuales para las prácticas de laboratorio de física en tiempo de Covid-19”, *Lat. Americ. J. of Develop.*, vol. 4, n.º 4, pp. 1359-1369, 2022, doi: [10.46814/lajdv4n4-002](https://doi.org/10.46814/lajdv4n4-002).
- [26] F. T. Ayasrah, K. Alarabi, M. k. Al mansouri, H. A. Abdel y K. Al-Said, “Enhancing secondary school students’ attitudes toward physics by using computer simulations”, *Int. J. Data Netw. Sci.*, vol. 8, n.º 1, pp. 369-380, 2024, doi: [10.5267/j.ijdns.2023.9.017](https://doi.org/10.5267/j.ijdns.2023.9.017).
- [27] C. Chotimah y Festiyed, “A meta-analysis of the effects of using PhET interactive simulations on student’s worksheets toward senior high school students learning result of physics”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1481, n.º 1, art. 012093, mar. 2020, doi: [10.1088/1742-6596/1481/1/012093](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1481/1/012093).
- [28] C. E. Wieman, W. K. Adams, P. Loeblein y K. K. Perkins, “Teaching Physics Using PhET Simulations”, *Phys. Teach.*, vol. 48, n.º 4, pp. 225-227, abr. 2010, doi: [10.1119/1.3361987](https://doi.org/10.1119/1.3361987).
- [29] L. Kaldaras *et al.*, “Employing technology-enhanced feedback and scaffolding to support the development of deep science understanding using computer simulations”, *Int J STEM Educ*, vol. 11, n.º 30, jul. 2024, doi: [10.1186/s40594-024-00490-7](https://doi.org/10.1186/s40594-024-00490-7).
- [30] D. B. López, “Estrategias didácticas para el uso eficaz de simulaciones interactivas en el aula”, *Lat. Am. J. Sci. Educ.*, vol. 7, art. 12019, 2020.
- [31] C. I. Palma. “Indagación con la clase entera: Ley de Beer & Lambert”. PhET Interactive Simulations. Accedido: jul. 20, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://phet.colorado.edu/vi/activities/6890>
- [32] E. Yulianti, N. N. Zhafirah y N. Hidayat, “Exploring Guided Inquiry Learning with PhET Simulation to Train Junior High School Students Think Critically”, *Berkala Ilmiah Pendidikan Fisika*, vol. 9, n.º 1, mar. 2021, doi: [10.20527/bipf.v9i1.9617](https://doi.org/10.20527/bipf.v9i1.9617).
- [33] A. S. Budi *et al.*, “PhET-assisted electronic student worksheets of physics (eSWoP) on heat for inquiry learning during covid”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2104, n.º 1, art. 012030, nov. 2021, doi: [10.1088/1742-6596/2104/1/012030](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2104/1/012030).
- [34] N. Rutten, J. T. van der Veen y W. R. van Joolingen, “Inquiry-Based Whole-Class Teaching with Computer Simulations in Physics”, *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 37, n.º 8, pp. 1225-1245, may. 2015, doi: [10.1080/09500693.2015.1029033](https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1029033).
- [35] I. Ardisa, N. N. S. P. Verawati, G. Gunawan y S. Ayub, “Effect of PhET Simulation-Assisted Guided Inquiry Learning Model on Students’ Critical Thinking Ability in Elasticity Material”, *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi*, vol. 8, n.º 2, pp. 262-269, dic. 2022, doi: [10.29303/jpft.v8i2.4391](https://doi.org/10.29303/jpft.v8i2.4391).
- [36] O. D. Pranata, “Enhancing Conceptual Understanding and Concept Acquisition of Gravitational Force through Guided Inquiry Utilizing PhET Simulation”, *Sainstek : Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 15, n.º 1, jun. 2023, doi: [10.31958/js.v15i1.9191](https://doi.org/10.31958/js.v15i1.9191).
- [37] N. K. Denzin *et al.*, *The SAGE Handbook of Qualitative Research*, 6.ª ed. SAGE Publications, 2023.
- [38] J. P. Goetz y M. D. LeCompte, *Etnografía y diseño cualitativo en investigación educativa*. Madrid: Ediciones Morata, S. A, 1988.
- [39] M. Q. Patton, *Qualitative Research & Evaluation Methods: Integrating Theory and Practice*, 4.ª ed. SAGE Publications, 2015.

- [40] K. Gregory, L. Geiger y P. Salisbury, “Voyant Tools and Descriptive Metadata: A Case Study in How Automation Can Compliment Expertise Knowledge”, *J Libr Metadata*, vol. 22, n.º 1-2, pp. 1-16, abr. 2022, doi: [10.1080/19386389.2022.2030635](https://doi.org/10.1080/19386389.2022.2030635).
- [41] M. Dabrowska, “Análisis semántico y cuantitativo de *La casa de Bernarda Alba* en el aula con Voyant Tools. Una aproximación didáctica al análisis literario”, *RIPIE*, vol. 2, n.º 2, dic. 2022.
- [42] G. Hetenyi, A. Lengyel y M. Szilasi, “Quantitative analysis of qualitative data: Using Voyant Tools to investigate the sales-marketing interface”, *J. Indust. Engin. Manag.*, vol. 12, n.º 3, nov. 2019, doi: [10.3926/jiem.2929](https://doi.org/10.3926/jiem.2929).
- [43] A. Miller, “Text Mining Digital Humanities Projects: Assessing Content Analysis Capabilities of Voyant Tools”, *J. Web Librariansh.*, vol. 12, n.º 3, pp. 169-197, jul. 2018, doi: [10.1080/19322909.2018.1479673](https://doi.org/10.1080/19322909.2018.1479673).
- [44] H. Hendrigan, “Mixing digital humanities and applied science librarianship: Using Voyant Tools to reveal word patterns in faculty research”, *ISTL*, n.º 91, jun. 2019.
- [45] N. Rutten, W. R. van Joolingen y J. T. van der Veen, “The learning effects of computer simulations in science education”, *Comput Educ.*, vol. 58, n.º 1, pp. 136-153, en. 2012, doi: [10.1016/j.compedu.2011.07.017](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.017).
- [46] D. J. Nicol y D. Macfarlane-Dick, “Formative assessment and self-regulated learning: a model and seven principles of good feedback practice”, *Stud. High. Educ.*, vol. 31, n.º 2, pp. 199-218, abr. 2006, doi: [10.1080/03075070600572090](https://doi.org/10.1080/03075070600572090).

Comunidades interactivas presenciales para la divulgación de la física

In-person interactive communities for the dissemination of physics

Juan Crisóstomo Tapia Mercado¹ , Alma Rocío Cabazos Marín¹ , Jesús Ramón Lerma Aragón¹,
José Manuel López Rodríguez¹  

¹Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias, Ensenada, Baja California, México

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo describir la experiencia de la realización de talleres y demostraciones experimentales llevadas a cabo por el cuerpo académico de Enseñanza y Divulgación de las Ciencias como parte del Programa Nacional de Divulgación de la Física en Baja California, México. A través de la fabricación de un juguete científico y la participación en actividades interactivas, se busca que los estudiantes adquieran nuevas habilidades de pensamiento, mayor creatividad, capacidad para resolver problemas, así como habilidades de trabajo en equipo. Los resultados relacionan los conceptos utilizados en la construcción de un periscopio, y juguetes equilibristas con fenómenos de la vida diaria, fomentando así comunidades interactivas presenciales en sectores educativos de nuevas áreas de desarrollo urbano en Baja California.

PALABRAS CLAVE: comunidades interactivas; ciencia en la escuela; demostraciones experimentales y aparatos; física de juguetes.

ABSTRACT

This work aims to describe the experience of conducting workshops and experimental demonstrations carried out by the academic body of Science Teaching and Dissemination in the National Physics Outreach Program in Baja California, Mexico. Through the creation of a scientific toy and participation in interactive activities, the goal is for students to acquire new thinking skills, greater creativity, problem-solving abilities, and teamwork skills. The results relate the concepts used in the construction of a periscope and balancing toys to everyday phenomena, thus fostering face-to-face interactive communities in educational sectors of new urban development areas in Baja California.

KEYWORDS: interactive communities; science in school; experimental demonstrations and apparatus; toy Physics.

Correspondencia:

DESTINATARIO: José Manuel López Rodríguez
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Baja California /
Facultad de Ciencias
DIRECCIÓN: Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana núm.
3917, col. Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México
CORREO ELECTRÓNICO: jllopez49@uabc.edu.mx

Fecha de recepción: 31 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:**
22 de octubre de 2024. **Fecha de publicación:** 20 de diciembre
de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

La divulgación del pensamiento crítico a través de la ciencia en la educación superior es un reto que enfrentan todas las instituciones de México [1]. Ante las demandas de la Cuarta Revolución Industrial, los estudiantes deben adquirir habilidades de pensamiento crítico, creatividad y capacidad para resolver problemas utilizando tecnologías digitales, físicas y biológicas.

Con la premisa de cumplir con la difusión de la ciencia y la tecnología a la sociedad mexicana, la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Baja California ha realizado y participado, por más de 40 años, en importantes eventos de difusión y divulgación de la ciencia, por ejemplo, la Semana de Ciencias, que es un evento anual con duración de una semana, cuyo objetivo principal es comunicar al público en general, de todos los sectores y niveles educativos de la sociedad, la importancia de la labor científica que se realiza en esta institución para formar una cultura científica en la comunidad. Los trabajos presentados muestran a la ciencia como útil y necesaria, armoniosa y responsable del desarrollo tecnológico, enfatizando el uso de los conocimientos para generar bienes y servicios.

En 2022, la Sociedad Mexicana de Física (SMF) invitó a divulgadores, profesores, investigadores y estudiantes a participar en las Jornadas Nacionales de Física (JNF). Esta iniciativa busca promover el acceso universal al conocimiento mediante la comunicación pública de la ciencia y la tecnología [2]. Las actividades pueden ser presenciales o virtuales, permitiendo la implementación de nuevas ideas educativas y facilitando el aprendizaje continuo. Así se forman personas responsables, éticas, conscientes del medio ambiente y solidarias con su comunidad.

El aprendizaje en escenarios presenciales fomenta una sana convivencia. La falta de contacto social y las desigualdades en el uso de TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación) experimentadas durante el confinamiento por la pandemia del COVID-19 resaltan la importancia de trabajar la divulgación de la física en *comunidades interactivas presenciales* [3], las cuales se enmarcan en metodologías de aprendizaje activo [4], [5], específicamente en enfoques como el aprendizaje colaborativo [6] y el aprendizaje basado en proyectos (ABP) [7]. Comunidades interactivas presenciales es un término propuesto por los autores para desarrollar habilidades lúdicas en los estudiantes para

capturar su atención y fomentar la participación activa, el trabajo en equipo y la capacidad de resolver problemas.

Estas comunidades motivan a los estudiantes a acercarse a la ciencia y la tecnología, especialmente a través de la experimentación y el aprendizaje práctico mediante talleres y demostraciones científicas.

Las comunidades interactivas presenciales empoderan a los estudiantes, motivándolos a compartir su conocimiento con otros, fomentan la sociabilidad y fortalecen los vínculos familiares. La ciencia se presenta como una actividad lúdica y de superación con un trasfondo social y familiar. En comunidades interactivas, los estudiantes pueden involucrarse en proyectos científicos que requieren investigación, experimentación y aplicación de conocimientos. Esto no solo motiva a los estudiantes, sino que también les permite ver el impacto real de la ciencia y la tecnología en su entorno.

Este trabajo describe la experiencia de realizar talleres y demostraciones experimentales para estudiantes de primaria y secundaria, enfocándose en los conceptos de *luz* y *equilibrio*. Para ello, se utilizó la construcción de juguetes científicos, periscopios y juguetes equilibristas como herramientas de enseñanza, con la finalidad de que los estudiantes adquieran nuevas habilidades de pensamiento, mayor creatividad, capacidad para resolver problemas y habilidades de trabajo en equipo. Se pretende que los estudiantes relacionen los conceptos utilizados en la construcción de un periscopio y juguetes equilibristas con fenómenos de la vida diaria.

Algunos autores, como Varela [8], han mostrado que la utilización de juguetes científicos en la enseñanza y divulgación de la física es una excelente estrategia para acercar el conocimiento científico a los ciudadanos y a los estudiantes. La utilización de juguetes en la divulgación y enseñanza de la física ofrece numerosas ventajas. En primer lugar, estos estimulan la curiosidad y el interés, haciendo que el aprendizaje sea más atractivo y divertido. Además, transforman conceptos abstractos en experiencias palpables, permitiendo a los estudiantes visualizar y manipular directamente los principios físicos, lo cual facilita una comprensión más profunda y duradera de los temas complejos [9].

En México, la Secretaría de Educación Pública (SEP) busca transformar y modernizar el sistema educati-

vo del país mediante el modelo de la Nueva Escuela Mexicana [10]. Esta propuesta se fundamenta en un conjunto de principios y lineamientos que tienen como objetivo promover una educación integral, incluyente y de calidad para todos los estudiantes. A nivel primaria, en particular en los fenómenos relacionados con la luz, se define la reflexión y refracción de la luz en el libro de segundo grado [11]. El concepto de reflexión se describe como un fenómeno que sucede cuando un rayo de luz llega a una superficie lisa o un medio diferente y pareciera chocar y rebotar contra éste, como ocurriría cuando se patea una pelota contra la pared. Además, se menciona que un ejemplo de este fenómeno ocurre al apuntar la luz de una lámpara a un espejo y se muestra un dibujo de una lámpara y un espejo.

II. METODOLOGÍA

Con la finalidad de reforzar el concepto de *reflexión de la luz*, el Cuerpo Académico Enseñanza y Divulgación de las Ciencias ha diseñado el taller “Construcción de un periscopio”, en el cual los alumnos construyen uno. Este evento se ha presentado en escuelas primarias y secundarias del Estado de Baja California. También, para despertar el interés de la niñez bajacaliforniana por la ciencia y la tecnología, esta actividad se ha llevado a cabo en la Semana de Ciencias, evento de divulgación científica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) [12], en el Programa Caravana Cimarrones en la Ciencia y la Tecnología, Jornadas Nacionales de Física (SMF) y la Noche de las Ciencias (UNAM, CICESE, UABC) [13].

El presente trabajo se centra en el uso de talleres de ciencia y demostraciones experimentales como herramientas pedagógicas para facilitar el aprendizaje de conceptos abstractos de manera efectiva y atractiva para los estudiantes. Estas actividades están diseñadas para captar la atención de los estudiantes y fomentar su participación activa en el proceso de aprendizaje.

Como parte de las actividades de la Semana de Ciencias, el cuerpo académico de Enseñanza y Divulgación de las Ciencias ha impartido talleres como actividades lúdicas desde 1990, con el propósito de acercar a los estudiantes y a la comunidad en general al mundo de la física, combatiendo la percepción de que esta es difícil y aburrida. El objetivo principal es modificar la actitud de los estudiantes y mostrarles, mediante el aprendizaje activo, que es importante, útil y divertida. Se ha

comprobado que los talleres de ciencia y las demostraciones experimentales generan un entorno óptimo para el aprendizaje [14], [15], [16], [17], pues permiten a los estudiantes interactuar de manera directa con los conceptos enseñados. Asimismo, estas actividades se presentan de forma lúdica y amena, lo que facilita la comprensión y la retención de los conocimientos por parte de los alumnos.

En la [Figura 1](#) se muestra una de las actividades realizadas durante el estudio, en la cual los estudiantes son atraídos mediante el uso de juguetes, los cuales se utilizan como herramientas para introducir el concepto de *centro de masa* y para plantear retos que requieren el equilibrio de una figura. Esta estrategia permite una comprensión más profunda de los conceptos científicos involucrados, al tiempo que promueve el desarrollo de habilidades prácticas en los estudiantes.



Figura 1. Actividades recreativas utilizando Jenga para ilustrar el concepto de centro de masa.

Es importante destacar que la idea de utilizar juguetes para ilustrar conceptos científicos no es nueva, y ha sido empleada con éxito durante muchos años, siendo el famoso científico británico Michael Faraday uno de los primeros en utilizar juguetes equilibristas [18]. El uso de estos objetos en el contexto educativo brinda a los estudiantes la oportunidad de aprender de manera activa y participativa, lo que les permite apropiarse del conocimiento de una manera significativa. Además, al compartir sus experiencias con otros, se fortalecen los lazos sociales y familiares, lo que contribuye a un ambiente de aprendizaje enriquecedor [19].

Los juguetes equilibristas son herramientas efectivas para la enseñanza y divulgación de la física, ya que permiten ilustrar de manera visual y práctica principios fundamentales como el equilibrio, el centro de gravedad y el momento de fuerza [20], [21]. Un ejemplo clásico de estos juguetes es el equilibrista de alambre, una figura que se balancea precariamente en un alambre delgado, demostrando cómo la distribución del peso afecta la estabilidad. Otro juguete tradicional es el acróbata equilibrista, una figura que se mantiene en equilibrio sobre un punto fijo gracias a la disposición estratégica de su masa. Estos juguetes no solo capturan la atención de los estudiantes, sino que también facilitan la comprensión de conceptos físicos complejos a través de la observación y la interacción directa [22].

Este taller se desarrolla en un ambiente ameno, dinámico y didáctico. Se imparte en un periodo de 30 a 45 minutos y tiene lugar en tres etapas, la primera de las cuales es la realización de demostraciones simples por parte de los instructores (demostraciones interactivas), tal como se muestra en las Figuras 2 y 3 en donde se presentan diversos juguetes equilibristas con su centro de masa a) coincidiendo con el punto de apoyo y b) por debajo del punto de apoyo. En esta etapa se promueve la indagación, cuestionamiento a los estudiantes sobre lo observado e interpretaciones y predicciones.

En la Figura 2a se muestra una serpiente con su centro de masa, coincidiendo con el punto de apoyo, y en la Figura 2b se aprecia un niño en bicicleta con su centro de masa por debajo del punto de apoyo.

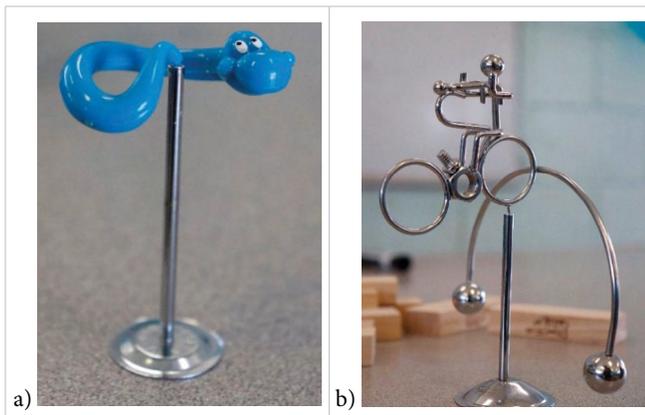


Figura 2. Centro de masa a) que coincide con el punto de apoyo y b) por debajo del punto de apoyo.

La segunda etapa establece una dinámica con los estudiantes para buscar que ellos mismos realicen activida-

des similares a las de la etapa anterior. En la segunda etapa se pretende que los estudiantes dejen de ser un receptor pasivo de información para convertirse en el agente principal de su aprendizaje, se promueve la discusión y el intercambio de ideas mediante el planteamiento de preguntas retadoras. En la Figura 3 se observa a estudiantes realizando la actividad de lograr el reto mostrado en la Figura 1. Esta actividad puede realizarse en forma individual o por equipos y además se proporcionan diversos ejemplos extras de juguetes equilibristas para fortalecer los conceptos discutidos en la demostración.



Figura 3. Estudiantes de secundaria logrando el reto de equilibrar el conjunto de maderas encontrado el centro de masa y experimentando con diversos juguetes equilibristas.

La tercera etapa es la actividad experimental para el desarrollo de propuestas innovadoras. Los estudiantes reciben materiales de bajo costo (Figura 4a) con la finalidad de que construyan un juguete basado en los conceptos discutidos (Figura 4b).



Figura 4. Materiales para la construcción de un astronauta equilibrista: alambre, piedra, figura de papel, lápiz de madera, palo de paleta o agitador, tijeras y pegamento

La construcción de un juguete requiere de destrezas motoras finas, como el ensamblaje de piezas o la manipulación de materiales pequeños. La construcción del astronauta equilibrista fomenta la habilidad manual y la coordinación.

Los estudiantes trabajan en grupo para construir el juguete, aprenden a colaborar, comunicar ideas y respetar diferentes puntos de vista, lo que fomenta habilidades sociales y trabajo en equipo.

El utilizar materiales de bajo costo y accesibles para todos los estudiantes permite al profesor responsable del grupo reproducir el taller con futuros alumnos.

Para fortalecer el concepto de la *reflexión y refracción de la luz* se utiliza la misma metodología, el uso de juguetes para reforzar los conocimientos vistos en clase. La estrategia en este caso es la impartición del taller de construcción de periscopios llamado “Construcción de un periscopio” [23].

La primera etapa consiste en la construcción de la definición de un periscopio. Se pregunta al estudiante si saben qué es un periscopio, si han utilizado alguno y finalmente, si saben en qué se utiliza o para qué sirve en la vida diaria, preguntas diseñadas para la interpretación de fenómenos ópticos cotidianos [24]. Un periscopio es un aparato óptico que permite ver un objeto aun cuando el observador está en un lugar oculto. El principio físico del periscopio es la reflexión de la luz, que se refleja en dos espejos planos frente a frente e inclinados un ángulo de 45 grados, como se muestra en la Figura 5.

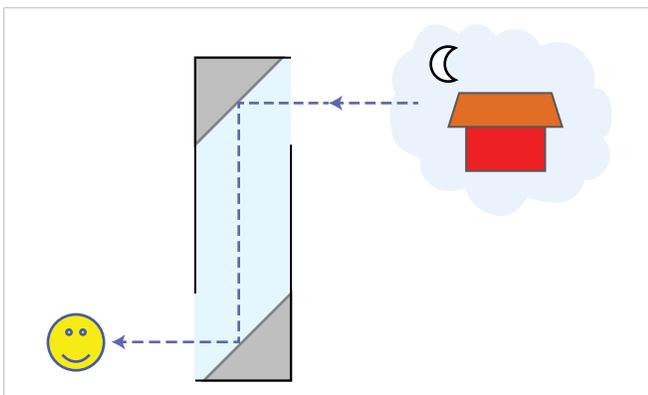


Figura 5. Esquema de un periscopio.

La segunda etapa consiste en demostraciones para comprender la formación de imágenes con espejos planos y curvos. Se llevan a cabo experimentos básicos para

que el estudiante comprenda los cambios en la trayectoria de la luz al interactuar con superficies reflectantes, permitiéndole responder preguntas como qué ocurre cuando un objeto bloquea la trayectoria de la luz y cómo se refleja. Un primer ejemplo consiste en el uso de un espejo plano y un apuntador láser. Posteriormente, se incrementa el número de espejos planos para explicar y hacer la demostración del funcionamiento de un caleidoscopio gigante. La Figura 6 muestra una escena de público de diversas edades observando a través del caleidoscopio gigante. Se utiliza este juguete para explicar la formación de imágenes mediante espejos planos.



Figura 6. Demostración del caleidoscopio.

Los participantes del taller expresan su asombro al observar a través del caleidoscopio y la gran mayoría menciona que es la primera experiencia en la observación de estos fenómenos ópticos. La respuesta inmediata es tomar una fotografía de sus compañeros colocados en el extremo opuesto. La Figura 7 muestra una imagen clásica que se observa a través de un caleidoscopio.

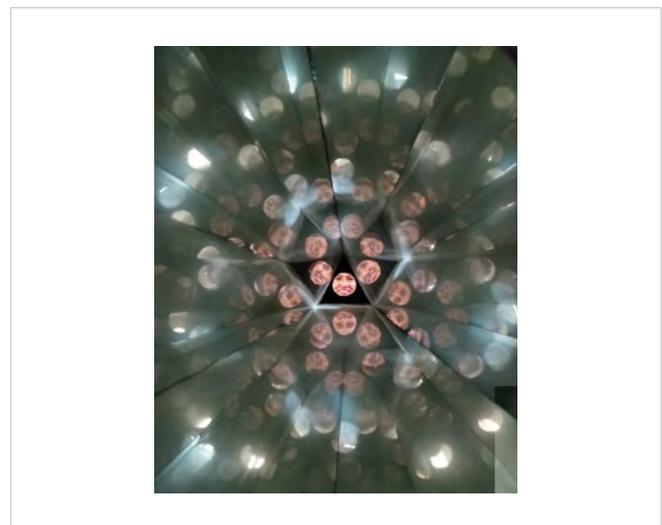


Figura 7. Imagen a través del caleidoscopio.

Para comprender la refracción de la luz se les proporciona unos anteojos con lentes en forma de prisma. El efecto resultante es que cambia la trayectoria de la luz, en este caso el arriba se convierte abajo y viceversa. La [Figura 8](#) muestra un joven utilizando estos objetos, denominados lentes locos.



Figura 8. Lentes locos.

En la tercera etapa se invita a los asistentes a que experimente y utilicen los lentes locos para cruzar un laberinto sin tocar los lados. Es una experiencia divertida para todos debido a que va en contra de la intuición y, lógicamente, surgen las preguntas de cómo funcionan. La [Figura 9](#) muestra una competencia entre dos estudiantes para llegar a la salida del laberinto en la forma más rápida.



Figura 9. Experimentando el fenómeno de refracción de la luz mediante el uso de los lentes locos.

El ensayo y error, así como la necesidad de ajustar y mejorar el trazo dentro del laberinto, les enseña la importancia de ser pacientes y persistir hasta que logran el resultado deseado.

Una vez discutido el fenómeno de la reflexión de la luz, los participantes enfrentan el reto final: la construcción de un periscopio. Todos los estudiantes reciben los materiales: dos espejos planos de vidrio que miden 5 cm x 5 cm, una barra de pegamento o cinta adhesiva transparente y un molde de cartulina de 28 cm x 20 cm para formar una estructura tubular cuadrada.

Dado que los talleres son realizados en escuelas primarias y secundarias con grandes necesidades debido a la falta de recursos, lo que las obliga a hacer mucho con muy poco, es importante diseñar experimentos cuyos materiales utilizados sean accesibles para todos los estudiantes.

El número de estudiantes por grupo es otro factor que considerar, ya que los talleres se realizan para todos los grupos de una escuela, por ejemplo: una secundaria promedio cuenta con 6 grupos de segundo año y cada uno de ellos con 50 estudiantes, lo que implica que para cada visita a una secundaria se deben entregar 600 paquetes de materiales para la realización de un taller.

En la [Figura 10a](#) se muestran los materiales que reciben los estudiantes para elaborar un periscopio y la [Figura 10b](#) muestra el resultado final elaborado por estudiante de primaria, jóvenes y adultos.

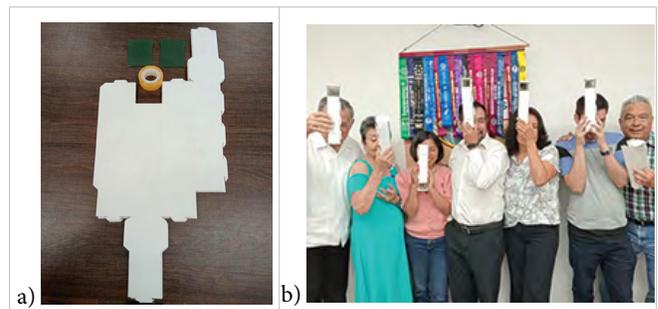


Figura 10. Elaboración de un periscopio. a) Materiales: par de espejos, pegamento, y figura de cartulina para formar la base del periscopio. b) Estudiantes de tres niveles de edades utilizando el juguete construido.

III. RESULTADOS

En los años 2022, 2023 y 2024, el cuerpo académico Enseñanza y Divulgación de las Ciencias ha recibido y visitado alrededor de 30 escuelas de los niveles de preescolar, primaria, secundaria y preparatoria. Los grupos que arriban a las instalaciones de la Facultad de Ciencias de la UABC provienen de los municipios de Ensenada, Rosarito, Mexicali y San Quintín. El tamaño de los gru-

pos varía según la procedencia, en promedio se atienden grupos de 50 estudiantes cuando son de planteles de Ensenada, si provienen de Rosarito o Mexicali el tamaño de los grupos es en promedio de 200 y cuando visitan de San Quintín se atienden hasta 500 estudiantes por visita. Los talleres de ciencia se llevan a cabo con la orientación de los instructores, integrantes del cuerpo académico y estudiantes de la carrera de física que prestan servicio social profesional. Que los estudiantes construyan un juguete científico, periscopio o juguete equilibrista les permite desarrollar habilidades de aprendizaje autónomo.

La experiencia adquirida se transmite, ya que el juguete científico que construyen se lo llevan a casa, fomentando así la participación de toda la familia en el proceso educativo y el reconocimiento del logro académico. Los talleres crean un ambiente propicio para captar la atención de los estudiantes y facilita el aprendizaje a través de actividades entretenidas. Esta metodología ha demostrado ser flexible y se ha adaptado para ser impartida a estudiantes de diferentes grados escolares y en diversos contextos, desde salones de clase hasta ferias científicas, siempre usando materiales económicos y fácilmente accesibles.

La medición de la efectividad de comunidades interactivas en la divulgación de la ciencia se realizó mediante una combinación de métodos cualitativos y cuantitativos. Se hicieron preguntas antes y después de las actividades en la comunidad interactiva para medir cambios en el conocimiento, actitudes y percepciones hacia la ciencia. De manera cualitativa, se observa la interacción entre compañeros y facilitadores, así como el trabajo en equipo durante las actividades.

La **Tabla 1** muestra el resultado cuantitativo de la exploración realizada a un grupo de 21 jóvenes entre 17 y 18 años. Se hacen preguntas antes de iniciar el taller y después de las demostraciones interactivas los estudiantes responden, comparten su razonamiento y lo comprueban con el experimento de construir un juguete científico (periscopio). Se observa que inicialmente un porcentaje bajo menor al 10 % pueden responder preguntas sobre la ley de reflexión de la luz y sobre el principio de funcionamiento de un periscopio, inclusive desconocen qué es un periscopio. Después de la implementación de las actividades interactivas diseñadas para comprender la reflexión de la luz e introducir el lenguaje técnico, los estudiantes responden afirmativamente y logran los objetivos de aprendizaje, explorando, preguntando, prediciendo, experimentando a través

de la construcción de un juguete científico, creando nuevas oportunidades de experiencias de aprendizaje.

TABLE 1
RESPUESTAS A LAS PREGUNTAS RETADORAS

PREGUNTAS SOBRE CONCEPTO	ANTES	DESPUÉS
¿Conoces la ley de reflexión de la luz? ¿Puedes describirla con tus palabras?	Sí. 4 %	Sí. 100 %
¿Puedes dibujar cómo se forma la imagen de un objeto cuando utilizas un objeto plano?	Sí. 62 %	Sí. 100 %
¿Sabes qué es un periscopio? Describe cómo funciona.	Sí. 9 %	Sí. 100 %
Si tienes un espejo inclinado 45 grados e incides un rayo horizontal, ¿hacia dónde se reflejará? Haz un dibujo	Sí. 10 %	Sí. 72 %

A continuación, algunas opiniones de personas adultas: “Esta actividad no solo me dejó una enseñanza sobre el fenómeno de reflexión, sino que a través de un ejercicio práctico pude comprender fácilmente su aplicación en un periscopio”; “Involucrar a los compañeros en la realización de un proyecto de construcción de un juguete basado en conceptos científicos nos ayudó a comprender la importancia del trabajo en equipo y en el desarrollo de las habilidades motrices” y “Si me hubieran enseñado ciencias de esta forma, habría estudiado física”.

Al construir un juguete científico, los participantes de los talleres experimentaron haciendo pruebas, encontrando soluciones cuando algo no funcionaba como esperaban. La construcción de un juguete científico fomenta el pensamiento crítico y la capacidad para resolver problemas de manera creativa. A todos los participantes de los talleres se les hace esta pregunta: ¿Cómo te imaginas a un científico? La respuesta en imágenes se presenta en la **Figura 11**.



Figura 11. Dibujo y representación de la concepción de un científico por parte de los niños de primaria.

IV. CONCLUSIONES

Los talleres de ciencia buscan consolidar la apropiación social de la ciencia, la tecnología y la innovación para acercar el conocimiento a la sociedad bajacaliforniana, en particular la divulgación de estas áreas del conocimiento entre niñas, jóvenes y adultos para propiciar el desarrollo de vocaciones por la ciencia y la tecnología. La utilización de juguetes científicos fomenta la comprensión de conceptos y la creación de experiencias de aprendizaje significativo que contribuyen al trabajo colaborativo, el desarrollo de habilidades motrices, habilidades sociales, el gusto por aprender ciencias. El completar con éxito un proyecto científico, como un juguete, les da a los estudiantes una sensación de logro, lo que fortalece su confianza y autoestima y fomenta la autonomía en el aprendizaje.

La realización de talleres para la construcción de un juguete científico convierte el aprendizaje en algo más divertido y accesible, lo que a su vez genera interés por las ciencias y fomenta una actitud positiva hacia el aprendizaje.

REFERENCIAS

- [1] “Ley General de Educación Superior”. GOB.mx. Accedido: jul. 31, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGES_200421.pdf
- [2] “Sociedad Mexicana de Física”. SMF.mx. Accedido: jul. 31, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://smf.mx/?s=jornadas+nacionales+de+fisica>
- [3] F. R. Aguilar, “Del aprendizaje en escenarios presenciales al aprendizaje virtual en tiempos de pandemia”, *Estud. pedagóg.*, vol. 46, n.º 3, pp. 213-223, jul. 2020, doi: 10.4067/S0718-07052020000300213.
- [4] N. Y. Martínez-Velásquez y S. Y. Riveros-Míguez, “La enseñanza de caída libre bajo la metodología de aprendizaje activo”, *Rev. Fac. Cienc. Tecnol.*, n.º 45, pp. 35-51, 2018.
- [5] G. L. Huber, “Aprendizaje activo y metodologías educativas”, *Revista de Educación*, n.º extra., pp. 59-81, 2008.
- [6] J. L. Serrano y M. P. Prendes, “La enseñanza y el aprendizaje de la física y el trabajo colaborativo con el uso de las TIC”, *Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa*, vol. 11, n.º 1, pp. 95107, 2012.
- [7] M. A. Zambrano, A. Hernández y K. L. Mendoza, “El aprendizaje basado en proyectos como estrategia didáctica”, *Conrado*, vol. 18, n.º 84, pp. 172-182, 2022.
- [8] M. P. Varela y J. L. Martínez, “Jugando a divulgar física con juguetes”, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, vol. 2, n.º 2, pp. 234-240, jul. 2005, doi: 10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2005.v2.i2.09.
- [9] K. Y. Castrejón-Parga y J. M. Sáenz-Villela, “El Circo de la Física: Actividades lúdicas en la divulgación de la física”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 19, n.º 2 (ed. esp.), pp. E23-E37, ag. 2022, doi: 10.20983/culcyt.2022.2.3e.1.
- [10] SEP. “La Nueva Escuela Mexicana”. SEP.gob.mx. Accedido: jul. 31, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dgb.sep.gob.mx/storage/recursos/marco-curricular-comun/YJkGKTHatN-NEMprincipiosorientacionpedagogica.pdf>
- [11] “Libros de texto CONALITEG”. CONALITEG.com. Accedido: jul. 31, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://librosdetextoconaliteg.com/nuestros-saberes-grado-2o/>
- [12] UABC. “Facultad de Ciencias”. CIENCIAS.ens.uabc.mx. Accedido: jul. 31, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ciencias.ens.uabc.mx/semanadeciencias/>
- [13] “La Noche de las Ciencias 2023. NOCHECIENCIAS.mx. Accedido: jul. 31, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://noheciencias.mx/>
- [14] X. Canedo, “Enseñanza de la física mediante el uso de juguetes”, *Revista Boliviana de Física*, vol. 13, n.º 13, pp. 166-167, 2007.
- [15] M. Ateca, “Uso pedagógico de juguetes y objetos cotidianos en la enseñanza de la Física”, tesis de maestría, Máster en Formación del Profesorado de Educación Secundaria, Fac. de Educ., Universidad de Cantabria, 2020.
- [16] O. Matsyshyn, *Toys or Physics? Explaining Physics Through Toys*. WS Education, 2023, doi: 10.1142/13547.
- [17] O. L. Castiblanco, X. P. Salinas, Y. P. León y D. F. Vizcaíno, “Enseñando a construir modelos explicativos de física en torno a juguetes”, *Infancias Imágenes*, vol. 18, n.º 1, pp. 21-35, 2018, doi: 10.14483/16579089.12876.

- [18] R. Turner, “100 years of physics and toys: Balancing toys”, *The Physics Teacher*, vol. 30, n.º 9, pp. 542-543, dic., 1992, doi: [10.1119/1.2343636](https://doi.org/10.1119/1.2343636).
- [19] O. R. Lozano, “La ciencia recreativa como herramienta para motivar y mejorar la adquisición de competencias argumentativas”, tesis doctoral, Departament de Didàctica de les Ciències Experimentals y Socials, Universitat de València, 2012.
- [20] E. Ince, Y. Acar y S. Temur, “Physics Toys Effectiveness of Undergraduates’ Understanding Physics Principles”, *European J of Physics Education*, vol. 6, n.º 4, 2015. doi: [10.20308/ejpe.10951](https://doi.org/10.20308/ejpe.10951).
- [21] J. Güémez y M. Fiolhais, “The physics of articulated toys—a jumping and rotating kangaroo”, *Eur. J. Phys.*, vol. 35, n.º 4, 2014, doi:[10.1088/0143-0807/35/4/045018](https://doi.org/10.1088/0143-0807/35/4/045018).
- [22] J. Tapia-Mercado, J. Lerma y L. Villegas-Vicencio, “Enseñanza del concepto de centro de gravedad utilizando la estrategia de talleres didácticos”, *Tlahuizcalli*, vol. 7, n.º 20, pp. 22-26, may., 2021.
- [23] J. Segura, R. Ochoa y B. A. Martínez “Enseñando óptica a través de experimentos y demostraciones”, *Tlahuizcalli*, vol. 4, n.º 12, pp. 6-12, sept., 2019.
- [24] C. Martínez y S. García, “Interpretando fenómenos ópticos cotidianos”, *Padres y Maestros: Didáctica y Ciencias Experimentales*, n.º 316, pp. 23-27, may., 2008.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a los estudiantes de la Carrera de Física de la Facultad de Ciencias de la UABC que participaron en la realización de los talleres; sin su incondicional apoyo, este trabajo no hubiera sido posible.

Inclusión de la mujer en el aula de física de primer año de ingeniería

Inclusion of women in physics classrooms in first-year engineering programs

Luisa Fernanda Chaparro Sierra¹ , Manuela Ortiz Díaz¹ , Claudia Bautista Flores¹ , Carolina Berenice Rodríguez Garza¹ , Santa Esmeralda Tejeda Torres^{1a}  ✉ 

¹Tecnológico de Monterrey. Departamento de Ciencias, Escuela de Ingeniería y Ciencias, {^aInstituto para el Futuro de la Educación}, Monterrey, N.L., México

RESUMEN

Este trabajo complementa el manual de comunicación con enfoque de género de STEP UP mediante el desarrollo de una rúbrica complementaria. Esta rúbrica continúa el abordaje de los aspectos de comunicación delimitados en el manual y cuantifica a estos mismos mediante niveles de logro. Este enfoque no se ha propuesto en ningún trabajo relacionado con STEP UP anteriormente. Esta rúbrica y el manual de comunicación se recomiendan como herramientas de capacitación de comunicación con enfoque de género en el aula de física.

PALABRAS CLAVE: equidad de género; educación superior; evaluación formativa.

ABSTRACT

This work complements STEP UP's gender-focused communication manual by developing a complementary rubric. This rubric builds on the communication aspects outlined in the manual and quantifies them using achievement levels. This approach had yet to be proposed in any previous work related to STEP UP. The rubric and the communication manual are recommended as training tools for gender-focused communication in the physics classroom.

KEYWORDS: gender equity; higher education; formative evaluation.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Santa Esmeralda Tejeda Torres
INSTITUCIÓN: Tecnológico de Monterrey
DIRECCIÓN: Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, col. Tecnológico,
C. P. 64700, Monterrey, N.L., México
CORREO ELECTRÓNICO: stejeda@tec.mx

Fecha de recepción: 17 de septiembre de 2024. **Fecha de aceptación:** 4 de diciembre de 2024. **Fecha de publicación:** 30 de diciembre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es aportar una herramienta de evaluación formativa para valorar el mensaje de equidad de género que el docente de física transmite a sus estudiantes en el ámbito escolar. Esta herramienta es una rúbrica que categoriza las dimensiones alcanzables de las acciones cotidianas del docente, como el salón de clases, el laboratorio y otros espacios académicos, así como las dimensiones percibidas a través de las interacciones comunicativas entre el docente y la estudiante y el docente y sus pares. De esta manera se pone a disposición de la comunidad educativa y de investigación una rúbrica que permite obtener un perfil de fortalezas y áreas de oportunidad sobre el discurso docente y así coadyuvar al fortalecimiento de la equidad de género en el aula de física y de STEM (siglas en inglés de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas).

Los esfuerzos de las instituciones de los diferentes niveles educativos de incorporar en sus planes de estudio el programa de STEM han sido una medida para incrementar la participación en las áreas de ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas, para cubrir las exigencias de la era de la revolución tecnológica actual. A este esfuerzo se suma el interés particular de incrementar la participación de las niñas y mujeres en la ciencia para disminuir la brecha de género existente. Reportes de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, en la Ciencia y la Cultura (UNESCO) muestran que la participación de las niñas y mujeres en los programas de STEM son menores en comparación con la participación de niños y hombres. Por ejemplo, en el área de ingeniería en México, el 72 % de la matrícula corresponde a hombres mientras el 53 % de las becas otorgadas son para hombres [1]. La Comisión Europea (CE) ha encontrado una brecha de género específicamente en el sector digital donde encontró que por cada mujer hay tres hombres con un título universitario en tecnología e ingeniería [2].

Existen diversos trabajos de investigación sobre los factores que intervienen en la decisión de niñas y mujeres de estudiar alguna rama de STEM. Uno de los factores más mencionados en la literatura es el sociocultural, donde los padres y profesores deben motivar a las niñas a ser autosuficientes e independientes para el desarrollo de habilidades analíticas [3], [4]. El estudio presentado en [5] menciona también a los estereotipos sociales y el entorno inmediato como factores considerados por las mujeres para permanecer en las áreas de STEM. Finalmente,

la UNESCO expone que las niñas no identifican y no cuentan con modelos femeninos a seguir y por ello no encuentran una motivación para estudiar una rama de STEM. Los trabajos [6] y [7] encontraron que no se tenía una clara idea de las actividades que realiza una persona con un título universitario en el área de STEM.

En conclusión, para disminuir el impacto sociocultural en la elección de las niñas y mujeres de participar en áreas de STEM, los padres de familia y tutores deben sumarse en alentarlas y motivarlas a desarrollar las habilidades necesarias. Las y los profesores deben capacitarse en los temas de brechas de género en STEM para de esta manera llevar a las aulas actividades que promuevan la participación activa de las niñas y mujeres.

Marco teórico

Una población de interés para las áreas STEM son las jóvenes estudiantes, quienes a su vez se ven rodeadas de factores que favorecen la elección de carreras profesionales. Dos de estos factores son el ambiente académico y el ambiente social en que las estudiantes se desenvuelven al momento de escoger su carrera. En estos ambientes puede ubicarse el rol del docente como primer o segundo vínculo en el acercamiento de la estudiante al estudio y conocimiento STEM. De ahí la importancia de revisar la perspectiva de comunicación que se desarrolla dentro y fuera del aula, con la finalidad de analizar y fortalecer los matices de perspectiva de género del discurso docente.

En [8] se encontró que el 91 % de las encuestadas concuerdan en que en sus países se requiere mejorar la situación de inclusión de la mujer en física. Por ejemplo, se requieren mejorar las opiniones sociales y familiares hacia las mujeres en la ciencia [8]. Se destaca la importancia de revisar la flexibilidad en los horarios de trabajo, en la visibilización de los modelos a seguir, como mentores o mujeres en puestos de liderazgo, para ayudar a que los más jóvenes (las estudiantes) vean las oportunidades de alcanzar una carrera en área STEM como una posibilidad de logro de vida.

Trabajar en cerrar la brecha de género en las aulas de física y otras áreas STEM es crucial para fomentar la equidad en un ambiente inclusivo y permitir que las mujeres contribuyan plenamente en la ciencia. La falta de recursos, apoyo y reconocimiento puede generar aislamiento y desánimo de las estudiantes de área STEM, es por ello que las figuras femeninas mentoras son vitales para alcanzar

la meta de disminuir la brecha de género. El aumento de la representación de mujeres en los campos STEM aporta perspectivas y enfoques diversos, lo que puede potenciar la creatividad y la innovación en la investigación y la resolución de problemas. Una fuerza laboral más diversa tiende a producir mejores resultados y avances en ciencia y tecnología. Abordar la desigualdad de género promoviendo la participación de mujeres en STEM es esencial para enfrentar las desigualdades sistémicas que han persistido en el ámbito académico, creando un entorno más equitativo que beneficie a todo el cuerpo docente y estudiantil. Además, se ha demostrado que una mayor presencia femenina en STEM mejora los resultados académicos, como mayores tasas de retención y mejor desempeño en investigación y docencia [9]. Es fundamental no dejar de lado la visión y las aportaciones de la mitad de la población, las mujeres en STEM, para asegurar un progreso inclusivo y enriquecedor. Fomentar la participación de mujeres en estos campos no solo es una cuestión de equidad, sino una ventaja estratégica para el avance de la ciencia y la tecnología.

Un esfuerzo institucional para apoyar a la comunicación de la estudiante universitaria es el modelo de acompañamiento que consta de cuatro figuras: director de entrada, director de programa, mentor de éxito estudiantil y mentor entre pares, cuyos roles se describen a continuación.

El *director de entrada* desempeña un rol importante al promover los distintos programas académicos de la Escuela de Ingeniería y Ciencias a estudiantes de preparatoria. Este director guía el desarrollo académico de los estudiantes durante los primeros tres semestres del programa, un periodo crítico en el que es común que los estudiantes consideren abandonar sus estudios en el área de física. Además, es el primer contacto directo con los padres y madres de familia, informándoles sobre la orientación del programa, lo cual es esencial para que la familia respalde la decisión de sus hijos.

A partir del cuarto semestre, la figura que acompaña a los estudiantes es el *director de programa*, el cual se especializa en un área particular, a diferencia de los directores de entrada que atienden a estudiantes de varios programas. En el caso del programa de Ingeniería Física Industrial, el director de programa orienta a los estudiantes sobre los requisitos académicos de cada curso, oportunidades de intercambio, prácticas profesionales y les informa sobre las oportunidades de empleo y/o posgrado, entre otras actividades académicas. Es particularmente importante

en la orientación de las estudiantes que consideran abandonar la carrera por sentirse menos competentes que sus compañeros varones. El director de programa no interactúa con los padres y madres de familia, ya que en esta etapa los estudiantes suelen ser mayores de edad y resuelven los asuntos académicos directamente con sus profesores. Sin embargo, en situaciones extraordinarias, puede establecerse un canal de comunicación.

El *mentor de éxito estudiantil* es un profesional dedicado a acompañar a los estudiantes en sus decisiones de vida y carrera, promoviendo una experiencia memorable durante su estancia en la institución. Gestiona y lidera las comunidades estudiantiles y apoya el proceso de atracción de nuevos estudiantes junto a los directores de entrada. Los estudiantes comparten con él sus inquietudes no solo académicas, sino también personales, como situaciones familiares o de salud mental que puedan afectar su rendimiento académico. En casos importantes, estos mentores pueden contactar a los padres y madres de familia, aunque esto solo ocurre en situaciones excepcionales.

Finalmente, los *mentores entre pares* son estudiantes voluntarios de semestres avanzados que orientan a los alumnos de primer ingreso para facilitar su transición al nivel universitario, especialmente considerando que muchos de ellos dejan sus hogares por primera vez.

Si bien este modelo de acompañamiento es de particular relevancia, toma mayor fuerza al enlazarse con el programa STEP UP, auspiciado por la American Physical Society [10], que es referente sobre comunicación con equidad de género en el contexto de la física, dirigido a el docente, el mentor y el estudiante. Ha desarrollado materiales concretos para comunicarse y motivar a la estudiante de física a vivir un ambiente con equidad de género, tanto desde física como orientación vocacional a la futura profesionalista en física, mismo refleja en encauzar de manera sólida hacia oportunidades profesionales en esta misma área. En este sentido, el programa STEP UP diseñó un manual de comunicación de acciones cotidianas del docente, mismas que impulsan a la estudiante de bachillerato a elegir o mantenerse estudiando física. Estas acciones son: 1) interacción individual docente-estudiante, 2) facilitación de trabajo de equipo en laboratorio, (3) facilitación de trabajo de equipo en el salón de clases, (4) planeación y evaluación docentes y 5) fuera del salón de clases.

Si bien el manual de comunicación de acciones cotidianas para el docente abarca un abanico de interacciones

posibles con el estudiante y un espacio para reflexión del docente era necesario ir más allá de la escritura de acciones recomendadas, por lo que se ofrece al docente una rúbrica para ubicar su nivel de dominio de comunicación con la finalidad de apoyar hacia un dimensionamiento que encauce a mejoras concretas en el discurso docente empoderador de equidad de género.

II. CONTEXTO Y METODOLOGÍA DE DISEÑO

Esta rúbrica (Tabla 1) puede aplicarse tanto en nivel bachillerato como en el primer año de universidad. Está pensada como una herramienta de autoevaluación para el docente de física durante su quehacer tanto dentro como fuera del salón de clase. Se basa en los cinco grandes momentos que presenta el manual de acciones cotidianas elaborado por STEP UP, previamente mencionados.

La rúbrica basa en la autorreflexión inicial, pero permite cuantificar de una mejor manera la escala en la que el profesor se encuentra en cada una de las áreas, proporcionándole criterios subjetivos y una herramienta más objetiva. Esto ocurre cuando se transforma la escala numérica de 0 (nada) a 5 (mucho) a una escala cualitativa, pero con acciones mínimas para situarse en cada nivel de logro.

Cuando se emplea la escala numérica actual del manual, los resultados dependerán de la interpretación de excelencia y cumplimiento que tenga cada persona, haciendo que los números consecutivos en cierto sentido se parezcan, es decir, una autoevaluación de 2 puede parecerse a una de 1, ya que no existen acciones puntuales que permitan establecer qué sería un 1 o un 2 respectivamente, incluso lo que para alguien es un 1, tal vez para otro sujeto sea fácilmente un 3.

La rúbrica surge como una estandarización en la evaluación. Si bien es cierto que, como se verá más adelante, no hay una cuantificación específica para cada logro y criterio, sí hay acciones específicas que permiten una autoevaluación más objetiva.

La rúbrica consta de cuatro niveles de logro, siendo estos Incipiente, Básico, Sólido, Sobresaliente y uno extra denominado Nulo, cada uno de los cuales ubica el trabajo evaluado en un cuartil. Así, se definieron acciones puntuales para diferenciar cada nivel de logro. El Nulo establece para cada criterio la falta absoluta de algún

tipo de acción que encamine al cumplimiento del logro.

El nivel Incipiente (cuarto cuartil) indica en todos los casos solo una exploración al criterio descrito. Aunque sí se desarrollan actividades, estas son muy básicas y el nivel de frecuencia no es el mínimo para tener impacto en su quehacer docente tanto dentro como fuera del salón de clases, no son acciones continuas en el tiempo, sino por el contrario esporádicas y sin profundización.

El nivel Básico (tercer cuartil) apenas logra el objetivo planteado en cada uno de los criterios. Aunque las actividades son más robustas que en el nivel anterior, siguen siendo esporádicas. Al no ser constantes en el tiempo, no tiene fácil recordación.

El nivel Sólido (segundo cuartil) logra el objetivo planteado en cada criterio, sin embargo sigue existiendo la oportunidad de mejora. Las acciones no solo son más robustas, sino que tienen un nivel de ocurrencia más repetitivo, lo que permite un mayor impacto en los estudiantes.

El nivel Sobresaliente (primer cuartil) es el nivel de logro deseado. Este cumple con el objetivo de cada uno de los criterios en su totalidad. Adicionalmente las acciones son más detalladas y con mayor nivel de profundidad, lo que logra un mayor impacto.

En cada nivel de logro, los verbos empleados hacen referencia a la profundidad en las competencias desarrolladas, siguiendo el modelo (revisar cómo se llama la tabla de los verbos para escribir competencias).

A manera de estudio piloto, la rúbrica fue convertida a encuesta a fin de facilitar su difusión entre los participantes y distribuida por medio de formulario de Google a 10 personas, tanto mujeres como hombres, a saber, profesores y directores de carrera de física, de los cuales, a partir de sus respuestas, se diagnosticó su nivel de comunicación de equidad de género en el aula de física antes (pre examen) de la lectura del manual. Después, los participantes leyeron el manual de acciones cotidianas para conocer el enfoque de comunicación, dimensionar los consejos específicos que diagnosticó como área de mejora y posterior implementación en el aula. Finalmente, después de haber aplicado en el aula estos consejos, el docente respondió nuevamente la encuesta (post examen).

TABLA 1
 RÚBRICA DE COMUNICACIÓN CON ENFOQUE DE GÉNERO EN EL AULA

ACCIÓN COTIDIANA	CRITERIO	SOBRESALIENTE	SÓLIDO	BÁSICO	INCIPIENTE	NULO
Interacción Individual Docente-Estudiante:	1) Anima a los estudiantes a aprovechar oportunidades académicas de la física.	Motiva e inspira constantemente a los estudiantes para que busquen oportunidades de aprendizaje en física dentro y fuera del aula, como concursos, conferencias o proyectos de investigación en los primeros niveles, y les proporciona recursos y orientación para ello.	Fomenta activamente la participación de los estudiantes en actividades académicas relacionadas con la física, como grupos de estudio, conferencias en línea o actividades extracurriculares relacionadas con la física.	Proporciona información sobre oportunidades académicas en física, como becas o talleres, pero sin centrarse constantemente en su promoción. No motiva sistemáticamente a los estudiantes para que participen en ellas.	Rara vez menciona las oportunidades académicas disponibles en física y no anima activamente a los estudiantes a aprovecharlas.	No anima a los estudiantes a aprovechar las oportunidades académicas de la física.
	2) Proporciona a los estudiantes retroalimentación, apoyo moral e historias personales de desarrollo profesional.	Proporciona comentarios constructivos, detallados y específicos, transmitiendo seguridad y compartiendo historias personales de desarrollo profesional que inspiren a los estudiantes a seguir su propio camino en la física.	Ofrece comentarios claros y alentadores, tranquilizando en momentos de dificultad y compartiendo ocasionalmente historias personales de desarrollo profesional relacionadas con la física.	Proporciona retroalimentación generalizada sin mucha profundidad y ocasionalmente ofrece consuelo a los estudiantes, pero rara vez comparte historias personales relacionadas con el desarrollo profesional.	Proporciona una retroalimentación limitada y rara vez muestra empatía o comparte historias personales relacionadas con el desarrollo profesional.	No aporta comentarios ni comparte historias personales relevantes.
Facilitar trabajo de equipo en laboratorio	3) Promueve actividades de colaboración antes o durante las actividades iniciales del grupo.	Establece claramente la importancia de la colaboración desde el principio, fomentando la formación de grupos de trabajo cohesionados y facilitando la comunicación y el intercambio de ideas entre los alumnos. Fomenta la participación activa.	Fomenta activamente la colaboración entre los estudiantes, promoviendo la participación equitativa y fomentando la creación de un entorno de apoyo y orientado al trabajo en equipo.	Promueve la colaboración en las actividades de grupo, pero sin centrarse claramente en el establecimiento de funciones y responsabilidades para garantizar que todos los alumnos participen de forma significativa.	Rara vez fomenta la colaboración o proporciona orientación sobre cómo trabajar eficazmente en equipo en actividades de grupo.	No promueve ningún tipo de actividades de colaboración
Facilitar trabajo de equipo en el salón de clase	4) Valora las fortalezas de cada estudiante en los distintos tipos de competencias.	Reconoce y aprecia las habilidades individuales de cada estudiante, ya sea en la resolución de problemas, la comunicación científica, el pensamiento crítico o cualquier otro aspecto relevante de la física.	Identifica y valora los puntos fuertes individuales de los estudiantes en áreas específicas de habilidades relacionadas con la física, proporcionando oportunidades para que desarrollen y apliquen esos puntos fuertes.	Reconoce las aptitudes generales de los estudiantes, pero no las relaciona necesariamente con la física ni ve oportunidades específicas para su desarrollo.	Rara vez reconoce los puntos fuertes individuales de los alumnos en habilidades relacionadas con la física y no los utiliza para fomentar su crecimiento.	No identifica ni valora los puntos fuertes individuales de los alumnos.
	5) Capacita a los estudiantes para plantear preguntas en diferentes debates de grupo sobre física.	Fomenta un entorno en el que los estudiantes se sientan seguros para plantear preguntas desafiantes y participar activamente en los debates de grupo, generando un diálogo enriquecedor y estimulante.	Anima a los alumnos a plantear preguntas y expresar sus ideas en debates de grupo, proporcionando apoyo y validando sus aportaciones.	Permite que los alumnos formulen preguntas, pero no siempre los anima a profundizar en sus razonamientos o a cuestionar las ideas presentadas en los debates de grupo.	Rara vez anima a los estudiantes a hacer preguntas o a participar activamente en discusiones de grupo sobre física	No capacita a los alumnos para cuestionar o participar en debates de grupo.

TABLA 1 (CONT.)
 RÚBRICA DE COMUNICACIÓN CON ENFOQUE DE GÉNERO EN EL AULA

ACCIÓN COTIDIANA	CRITERIO	SOBRESALIENTE	SÓLIDO	BÁSICO	INCIPIENTE	NULO
Planeación y evaluación	6) Conecta la física con otras disciplinas.	Establece conexiones claras y profundas entre la física y otras disciplinas, demostrando cómo los principios físicos se aplican en contextos interdisciplinarios y fomentando la exploración de nuevas perspectivas.	De vez en cuando destaca la interconexión entre la física y otras disciplinas, animando a los estudiantes a considerar cómo los conceptos de la física se entrelazan con otros campos del conocimiento.	Menciona brevemente la relación entre la física y otras disciplinas sin profundizar en sus implicaciones ni aportar ejemplos concretos.	Rara vez hace referencia a la conexión entre la física y otras disciplinas, y no explora cómo se complementan entre sí.	No relaciona en absoluto la física con otras disciplinas.
	7) Genera actividades formativas que permitan la repetición utilizando herramientas tecnológicas avanzadas para apoyar la comprensión y aplicación de conceptos de física, permitiendo a los estudiantes repetirlos y aprender de forma autónoma.	Diseña y facilita actividades formativas interactivas y adaptativas que utilizan herramientas tecnológicas avanzadas para apoyar la comprensión y aplicación de conceptos de física, permitiendo a los estudiantes repetirlos y aprender de forma autónoma.	Incorpora regularmente herramientas tecnológicas como simuladores, software de análisis de datos o plataformas en línea en las actividades formativas para mejorar la comprensión de los conceptos de física y fomentar la práctica repetida.	Ocasionalmente utiliza herramientas tecnológicas activadas informativas para facilitar la comprensión y revisión.	Utiliza las herramientas tecnológicas de forma limitada en las actividades formativas, sin aprovechar plenamente su potencial de repetición y apropiación de conocimientos.	No utiliza herramientas tecnológicas activadas informativas
Fuera del salón de clase	8) Anima a otros colegas a capacitar a las estudiantes de física.	Aboga activa y energicamente por la igualdad de género en la física, fomentando la participación y el liderazgo de las estudiantes y colaborando con otros colegas para promover un entorno integrador.	Promueve la participación de las estudiantes de física, comparte estrategias para empoderarlas y muestra su apoyo a otros colegas que también tratan de promover la igualdad de género en este campo.	Reconoce la importancia de capacitar a las estudiantes de física y fomenta su participación, pero no necesariamente colabora activamente con otros colegas en este sentido.	Rara vez aboga por la capacitación de las estudiantes de física o toma medidas concretas para apoyar su participación.	No fomenta ni promueve la autonomía de las estudiantes de física.
	9) Crea espacios de diálogo con posibles empleadores	Facilita la comunicación y el contacto directo entre estudiantes y posibles empleadores, organizando ferias de empleo, charlas o actos en los que los estudiantes puedan interactuar y establecer conexiones con profesionales de la física y posibles empleadores.	Proporciona información y orientación a los estudiantes sobre posibles empleadores en el campo de la física, y fomenta la participación en actos en los que puedan establecer contactos con profesionales y explorar oportunidades de empleo.	Comparte recursos y referencias de posibles empleadores en física, pero no crea espacios específicos para el diálogo directo entre estudiantes y empleadores.	Rara vez menciona a posibles empleadores o no facilita la comunicación entre los estudiantes y el mundo profesional de la física.	No crea espacios de diálogo con posibles empleadores.

III. CÓMO SE USA LA RÚBRICA

La rúbrica está dividida en cinco momentos que se detallan en la primera columna. Indican la evaluación de las acciones en cada uno de esos espacios/momentos, tanto fuera como dentro del salón de clases. Para cada uno de ellos aparecen hasta dos criterios, esto es la segunda columna, titulada Criterio.

Por cada criterio se tiene una fila con las acciones para cada nivel de logro.

Los niveles de logro son cada una de las columnas (3-6) comenzando por qué primer cuartil. La columna final hace referencia al nivel nulo.

Esto quiere decir que para realizar la evaluación debe aparecer un nivel de logro por cada criterio, es decir debe elegirse una columna por cada fila, dependiendo de las acciones y la profundidad de estas realizadas en cada momento.

La rúbrica debe usarse para realizar una autoevaluación de las acciones que toma el profesor, tutor o mentor, en cada uno de los espacios y permitirle identificar donde tiene oportunidades de mejora. Se sugiere realizarla en diferente momentos, antes y después de su exposición ante los estudiantes. Antes, para crear conciencia de las acciones esperadas y preparar actividades que conduzcan a su logro. Después, para revisar que se logró hacer, y las acciones que se llevaron a cabo en qué nivel de logro posicionan al profesor y así poder generar oportunidades de mejora.

Análisis

Para el análisis de resultados se asignó un puntaje a cada nivel de dominio de la rúbrica, esto fue: al nivel sobresaliente 4 puntos, al nivel sólido 3 puntos, al nivel básico 2 puntos, al nivel incipiente 1 punto y al nivel nulo 0 puntos. Luego se sumaron los puntajes obtenidos por pregunta, tanto antes (pre examen) como después (post examen). Estos resultados se muestran en la Tabla 2.

Tras la asignación de puntos por criterio se estableció como rango de puntos 0-36. En la Tabla 2 puede observarse que los criterios que obtuvieron mayor diferencia de puntaje fueron: “Crea espacios de diálogo con posibles empleadores”, “Proporciona a los estudiantes retroalimentación, apoyo moral e historias personales de desarrollo profesional” y “Anima a los estudiantes

a aprovechar oportunidades académicas de la física”. Estos criterios obtuvieron respectivamente los puntajes 16, 12 y 11. Este hallazgo refleja una tendencia de los participantes a aumentar su panorama de visión fuera del aula, tomando como base el criterio de creación de diálogo con posibles empleadores y de animar a los estudiantes a aprovechar oportunidades académicas de la física. Asimismo, se hizo más evidente el valor de su trayectoria profesional como recurso motivador para los estudiantes.

TABLA 2
RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN DE RÚBRICA DE
COMUNICACIÓN CON ENFOQUE DE GÉNERO EN EL AULA

NÚMERO DE CRITERIO	PRE	POST	DIFERENCIA
1	21	32	11
2	24	36	12
3	25	35	10
4	25	29	4
5	28	31	3
6	28	34	6
7	21	30	9
8	17	27	10
9	10	26	16

Por otro lado, los criterios con menor diferencia de puntaje fueron: “Conecta la física con otras disciplinas”, “Valora las fortalezas de cada estudiante en los distintos tipos de competencias” y “Capacita a los estudiantes para plantear preguntas en diferentes debates de grupo sobre física”. Estos criterios obtuvieron respectivamente los puntajes 6, 4 y 3. Estos resultados podrían implicar que los participantes consideran que de alguna forma u otra ya cumplen con estos criterios, siendo el criterio sobre capacitar a los estudiantes para plantear preguntas el menos preferido en esta implementación.

IV. CONCLUSIONES

El propósito principal de esta rúbrica es ser una herramienta de autoevaluación del profesor, que le permita verificar si toma o no acciones conducentes a cumplir con los ideales en cada uno de los espacios de enseñanza, fuera y dentro del aula.

Sin embargo, la rúbrica permite a las directivas proporcionar espacios para que el profesor pueda ubicarse en el primer cuartil, esto debido a que existen acciones que

requieren de una organización y compromiso institucional, así como de la comunidad educativa involucrada en el empoderamiento de la mujer en el aula física y STEM.

REFERENCIAS

- [1] ANUIES. “Anuarios Estadísticos de Educación Superior”. ANUIES.mx. Accedido: sept. 2, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.anui.es.mx/informacion-y-servicios/informacion-estadistica-de-educacion-superior/anuario-estadistico-de-educacion-superior>
- [2] European Commission. “Women in Digital Scoreboard 2020”. Europa.eu. Accedido: sept. 2, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/women-digital-scoreboard-2020>
- [3] A. S. Rossi, “Women in Science: Why So Few?: Social and psychological influences restrict women’s choice and pursuit of careers in science”, *Science*, vol. 148, n.º 3674, pp. 1196-1202, May 1965, doi: [10.1126/science.148.3674.1196](https://doi.org/10.1126/science.148.3674.1196).
- [4] A. H. Eagly y V. J. Steffen, “Gender stereotypes stem from the distribution of women and men into social roles,” *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 46, n.º 4, pp. 735, 1984, doi: [10.1037/0022-3514.46.4.735](https://doi.org/10.1037/0022-3514.46.4.735).
- [5] N. Olmedo-Torre, F. Sánchez Carracedo, M. N. Salán Ballesteros, D. López, A. Perez-Poch y M. López-Beltrán, “Do Female Motives for Enrolling Vary According to STEM Profile?”, en *IEEE Transactions on Education*, vol. 61, n.º 4, pp. 289-297, nov. 2018, doi: [10.1109/TE.2018.2820643](https://doi.org/10.1109/TE.2018.2820643).
- [6] NU. CEPAL. “Mujeres y energía”. CEPAL.org. Accedido: sept. 2, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45377-mujeres-energia>
- [7] N. Merayo y A. Ayuso, “Analysis of barriers, supports and gender gap in the choice of STEM studies in secondary education”, *Int J Technol Des Educ*, vol. 33, n.º 4, pp. 1471-1498, nov. 2022, doi: [10.1007/s10798-022-09776-9](https://doi.org/10.1007/s10798-022-09776-9).
- [8] R. Ivie y S. Guo, “Women Physicists Speak Again”, AIP Report, Statistical Research Center of the American Institute of Physics, rep. R-441, 2006.
- [9] B. J. Casad *et al.*, “Gender inequality in academia: Problems and solutions for women faculty in STEM”, *J. Neurosci. Res.*, vol. 99, n.º 1, pp. 13-23, 2021, doi: [10.1002/jnr.24631](https://doi.org/10.1002/jnr.24631).
- [10] STEP UP. “About Overview”. [engage.aps.org](https://engage.aps.org/stepup/about/overview). Accedido: sept. 2, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://engage.aps.org/stepup/about/overview>

Aprendizaje basado en proyectos en STEAM: implementación interdisciplinaria aplicada al oscilador armónico simple

Project-based learning in STEAM: interdisciplinary implementation applied to the simple harmonic oscillator

Jesús López Hernández^{1a} , Elizabeth Galindo Linares^{1b}

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, {^aFacultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, ^bRegión Centro}, Culiacán Rosales, Sinaloa, México

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad explorar el comportamiento del oscilador armónico simple en dos dimensiones y la formación de figuras de Lissajous mediante la técnica metodológica de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), que desarrolla habilidades en la resolución de problemas, reforzando el aprendizaje de los conceptos usados en la física y motivando a los estudiantes a ser proactivos. Utilizando herramientas de experimentación, estudiantes universitarios de Sinaloa, México, diseñaron y construyeron armonógrafos, que son dispositivos mecánicos que trazan curvas complejas en función de oscilaciones perpendiculares acopladas. Estas figuras, conocidas como de Lissajous, son fundamentales en la visualización de fenómenos de resonancia y oscilaciones en mecánica. Este proyecto reforzó conceptos de mecánica newtoniana, fomentó habilidades prácticas y analíticas en los estudiantes y promovió la interdisciplinariedad al integrar el conocimiento de distintas áreas, lo que permitió guiarlos por el modelo STEAM (del inglés ciencia, tecnología, ingeniería, arte y matemáticas). Con la experimentación práctica, los estudiantes entendieron de manera más profunda los principios de superposición y la interacción de movimientos armónicos, viviendo una experiencia de aprendizaje integral y aplicada. La técnica ABP permitió enfocarse en el producto final, es decir, en las figuras, mientras que STEAM destacó el proceso de realización del trabajo con la integración de conocimientos de diversas disciplinas.

PALABRAS CLAVE: experimentos; oscilador armónico simple; Lissajous; ABP; STEAM.

ABSTRACT

The purpose of this work is to explore the behavior of the simple harmonic oscillator in two dimensions and the formation of Lissajous figures using the methodological technique of Project-Based Learning (PBL), which develops skills in problem solving, reinforcing the learning of the concepts used in physics and motivating students to be proactive. Using experimental tools, university students from Sinaloa, Mexico, designed and built harmonographs, which are mechanical devices that trace complex curves based on coupled perpendicular oscillations. These figures, known as Lissajous figures, are essential in the visualization of resonance and oscillation phenomena in mechanics. This project reinforced concepts of Newtonian mechanics, fostered practical and analytical skills in students, and promoted interdisciplinarity by integrating knowledge from different areas, which allowed them to be guided by the STEAM model (science, technology, engineering, art, and mathematics). Through hands-on experimentation, students gained a deeper understanding of the principles of superposition and the interaction of harmonic movements, living a comprehensive and applied learning experience. The PBL technique allowed them to focus on the final product, that is, on the figures, while STEAM highlighted the process of carrying out the work with the integration of knowledge from various disciplines.

KEYWORDS: experiments, simple harmonic oscillator, Lissajous, PBL; STEAM.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Jesús López Hernández

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Sinaloa / Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio

DIRECCIÓN: Calle Universitarios Oriente s/n, Ciudad Universitaria, Universitaria, C. P. 80040, Culiacán Rosales, Sinaloa, México

CORREO ELECTRÓNICO: jesus.lopezh@uas.edu.mx

Fecha de recepción: 31 de julio de 2024. **Fecha de aceptación:** 16 de diciembre de 2024. **Fecha de publicación:** 31 de diciembre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

Educación en o usar el modelo STEAM (de las siglas en inglés de ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas) implica la integración de la interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad, de acuerdo con [1], [2], [3]. El modelo educativo interdisciplinario STEAM, permite afrontar problemas y retos complejos. La integración de las cinco áreas que componen al trabajo interdisciplinario promueve el desarrollo de las habilidades: técnicas, creativas y analíticas. Esto impulsa a los estudiantes a ser autónomos y proponer soluciones innovadoras, así como a pensar de manera crítica. El trazo de figuras mediante la construcción de un armonógrafo representa un problema ideal para ser resuelto utilizando STEAM. El estudiante debe ir más allá de la teoría, entrando al terreno práctico, dejando de ser un receptor pasivo de información para convertirse en un ente activo que colabora en equipo y realiza propuestas de solución a la vez que evalúa las de sus compañeros.

La metodología ABP (Aprendizaje Basado en Problemas) es aplicable particularmente en los proyectos desarrollados para la materia de mecánica, en donde los alumnos usan la parte teórica impartida con el proceso enseñanza-aprendizaje tradicional para después buscar la profundización del conocimiento [4], [5]. En esta parte, los alumnos además de emplear su pensamiento crítico también desarrollaron el aprendizaje y trabajo colaborativo.

En este trabajo, a los alumnos se les orientó para desarrollar por equipos un prototipo donde pudieran visualizar las figuras de Lissajous. Esto les permitió usar la imaginación para idear máquinas o experimentos en los que se involucró el conocimiento ingenieril y el posible uso de tecnología. En la creación de prototipos se les animó a considerar el cuidado del planeta, por lo que se les indicó usar materiales reciclados, generando un valor agregado a sus creaciones. Esta estrategia también permitió que los alumnos desarrollaran el aspecto artístico del diseño o la modificación de los aparatos propuestos por otras personas [3]. Una vez creadas y redactadas las propuestas, se les asesoró con el fin de que pudieran construir los prototipos y que iniciaran algunas pruebas de estos para realizar ajustes, modificaciones o mejoras.

En esta fase, se buscó que cada equipo realizara experimentos que, al compararlos con la teoría científica y apoyados en el uso de las matemáticas, pudieran llevar a cabo cálculos que les permitieran verificar la eficacia

de sus aparatos. La mayoría de los alumnos optó por comparar las figuras de Lissajous, descritas en diversos textos de mecánica básica [6], [7], [8], con los resultados experimentales obtenidos a partir de sus prototipos. De este modo, se fomentó una actividad basada en el enfoque STEAM [1], [9], que además motivó a los alumnos trabajar a manera colaborativa, disfrutar del proceso e incluso divertirse al participar en un proyecto que les permitió desarrollar habilidades mentales, críticas, manuales y artísticas.

El objetivo de estas propuestas investigativas es reforzar la comprensión del tema estudiado —el péndulo simple y el oscilador armónico simple— desde una perspectiva práctica y experimental. Esto se logra trabajando en equipos de forma colaborativa y cooperativa, siguiendo las diversas etapas del Aprendizaje Basado en Problemas y familiarizando a los alumnos con la metodología STEAM. Esta técnica y metodología permite a los estudiantes resolver problemas mediante la generación de prototipos, potenciar su creatividad y demostrar mayor independencia, ya que la construcción de su pensamiento crítico les ayuda a realizar mejoras progresivas en proyectos cada vez más complejos.

Después de la revisión teórica en clase sobre el oscilador armónico simple, se planteó a los estudiantes preguntas para reflexionar sobre cómo aplicar el conocimiento adquirido en situaciones de la vida real y su utilidad práctica. Como parte de esta actividad, se les propuso construir un armonógrafo utilizando materiales sencillos y preferentemente reciclados. La primera tarea consistió en investigar sobre armonógrafos existentes y su funcionamiento, para lo cual los estudiantes recurrieron principalmente a vídeos. Posteriormente, se les solicitó presentar una propuesta de construcción basada en alguno de los vídeos investigados.

La creación de los prototipos desde cero ayudó a los estudiantes a fortalecer su autoestima en relación con la comprensión de la teoría. Comenzaron a experimentar con diferentes variables, como los ángulos, la longitud de los hilos, los tipos de materiales y el ajuste de distancias, lo que les permitió explorar diversas configuraciones. En los casos en que los estudiantes mencionaron que la teoría les resultaba confusa o compleja, el enfoque del Aprendizaje Basado en Problemas les permitió aprender de manera práctica sobre las figuras de Lissajous [10] y su relevancia en la astronomía como herramienta para comprender los movimientos oscilatorios.

El estudio del movimiento armónico simple (MAS), al igual que muchos conceptos de la física, puede abordarse de manera tradicional y teórica [6], [7]. No obstante, en programas de estudios de reciente creación, como la Licenciatura en Astronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, el principal desafío en México radica en integrar experiencias empíricas y experimentales generadas directamente en el aula. La enseñanza de conceptos físicos demanda un enfoque multidisciplinario y transdisciplinario. La educación en áreas STEAM permite a los docentes fomentar la innovación mediante técnicas de Aprendizaje Basado en Proyectos, lo que facilita una mejor comprensión de los conceptos por parte de los estudiantes. Además, promueve el desarrollo del pensamiento crítico y habilidades prácticas, como la construcción de maquetas y prototipos, para llevar a cabo experimentos [1], [2], [3], [4], [5], [9], [10].

El movimiento armónico simple (MAS) es un concepto fundamental en la física debido a sus numerosas aplicaciones en diversos campos, incluida la astronomía. En la mecánica celeste, los movimientos oscilatorios describen fenómenos como las vibraciones de las estrellas, las órbitas de los planetas y la dinámica de los sistemas binarios [11, p. 142], [12]. Por ejemplo, el análisis de las oscilaciones en estrellas variables, como las Cefeidas, permite a los astrónomos calcular distancias estelares a través de la relación periodo-luminosidad. Asimismo, variantes del oscilador armónico simple (OAS), como el oscilador armónico amortiguado y el oscilador armónico forzado, son esenciales para comprender sistemas en los que las fuerzas externas y la resistencia desempeñan un papel determinante [13].

Después de implementar un par de programas piloto en la materia de Mecánica Clásica durante el ciclo escolar 2023-2024, se evidenció una mejora significativa en la comprensión de conceptos y habilidades prácticas de los estudiantes [14]. Este enfoque no solo refuerza conceptos de mecánica newtoniana, sino que también fomenta habilidades prácticas y analíticas en los estudiantes, proporcionando una experiencia de aprendizaje integral y aplicada.

El péndulo ha sido objeto de estudio durante siglos y su análisis ha contribuido significativamente al desarrollo de la física y otras disciplinas científicas. Aunque no existe evidencia directa de que los antiguos griegos estudiaran el péndulo tal como lo entendemos hoy, realizaron observaciones sobre movimientos oscilatorios.

Según Mach [15, p. 8], los primeros estudios cualitativos sobre este tipo de movimientos pueden remontarse a la antigua Grecia, donde filósofos como Aristóteles reflexionaron sobre la naturaleza del movimiento [15], [16]. Galileo Galilei (1564-1642) fue el primero en realizar un estudio sistemático del péndulo. En 1583 observó que el periodo de oscilación de un péndulo permanece aproximadamente constante, independientemente de la amplitud, lo que dio origen al principio de isocronismo. Esta observación la realizó mientras contemplaba el balanceo de una lámpara en la Catedral de Pisa [15].

Christiaan Huygens (1629-1695) construyó el primer reloj de péndulo en 1656, basándose en el principio de isocronismo descubierto por Galileo. Su trabajo *Horologium Oscillatorium* (1673) no solo presentó el diseño del reloj de péndulo sino que también formuló la teoría matemática del movimiento del péndulo, incluyendo la derivación de la fórmula del periodo de oscilación [17]. Jules Antoine Lissajous (1822-1880) es conocido por su estudio de las figuras que llevan su nombre, las cuales resultan de la combinación de dos movimientos armónicos simples perpendiculares. En 1857, Lissajous utilizó espejos montados en diapasones para crear figuras de Lissajous, demostrando visualmente la interacción de frecuencias angulares y fases diferentes [7]. Léon Foucault (1819-1868) utilizó un péndulo en 1851 para demostrar la rotación de la Tierra. El péndulo de Foucault, instalado en el Panteón de París, mostró que el plano de oscilación del péndulo rota con el tiempo debido a la rotación de la Tierra, proporcionando una prueba visual impresionante de este fenómeno [18].

El péndulo simple es un sistema físico idealizado que consiste en una masa puntual suspendida de un hilo que es inextensible y carente de masa. La ecuación del movimiento para un péndulo simple, bajo la aproximación de pequeñas oscilaciones, es:

$$\theta(t) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} t\right) \quad (1)$$

donde $\theta(t)$ es el ángulo en función del tiempo, θ_0 es el ángulo inicial, g es la aceleración debida a la gravedad y l es la longitud del péndulo.

El periodo T del péndulo simple se calcula como sigue:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (2)$$

donde T es el periodo, l es la longitud del péndulo y g es la aceleración debida a la gravedad [19]. Para encontrar la frecuencia angular (ω), el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (3)$$

Una de las aplicaciones más exitosas y que sigue siendo tecnológicamente relevante del péndulo simple son los relojes de péndulo, inventados por Huygens en 1656 [17], [18], [20], [21]. Estos relojes revolucionaron la medición del tiempo con una precisión sin precedentes en el siglo XVII. El principio de isocronismo, que garantiza que el periodo de un péndulo es independiente de la amplitud de la oscilación, permitió a los relojeros diseñar mecanismos capaces de mantener un tiempo constante, superando significativamente la precisión de los relojes de peso anteriores [22].

Además de su uso en relojes, el estudio del péndulo ha tenido aplicaciones importantes en campos como la astronomía, la geofísica, la ingeniería y la educación:

- En astronomía, el péndulo ha sido utilizado para la medición de longitudes geográficas y estudios de la gravedad.
- En geofísica, el péndulo de Foucault demostró la rotación terrestre.
- En ingeniería, los péndulos se utilizan para el análisis de vibraciones y el control de estructuras oscilantes.
- En educación, el péndulo es una herramienta pedagógica fundamental para ilustrar principios de la física clásica y la dinámica.

Las ecuaciones (1) y (2) representan relaciones matemáticas obtenidas de manera empírica. Sin embargo, con el desarrollo avanzado de las matemáticas, se logró formular una ecuación diferencial ordinaria para describir el movimiento del péndulo simple de manera cuantitativa. Una de las expresiones más conocidas, que comúnmente se aborda desde una perspectiva teórica en la enseñanza, es la siguiente:

$$\theta'' + \frac{g}{l} \sin(\theta) = 0 \quad (4)$$

La ecuación (4), bajo la suposición de pequeñas oscilaciones, tiene como solución general la ecuación (1), presentada anteriormente.

Una vez conocido el péndulo simple, se trabajó en una generalización de los movimientos oscilatorios, buscando deducir el caso general del movimiento armónico simple.

Newton, quien ya había formulado las leyes de la mecánica, incluyendo la segunda ley en términos de una ecuación diferencial de segundo orden, consideró como una formulación válida a la ecuación que es una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden, cuyas soluciones para el caso de un Oscilador Armónico Simple en dos dimensiones se describen a continuación. El movimiento en cada eje x e y se describe mediante las ecuaciones:

$$x(t) = A_x \sin(\omega_x t + \phi_x) \quad (5)$$

$$y(t) = A_y \sin(\omega_y t + \phi_y) \quad (6)$$

donde A_x y A_y son las amplitudes en los ejes correspondientes, las cuales indican qué tan lejos llega la oscilación respecto al punto de equilibrio y dependen de la energía inicial aplicada al sistema; ω_x y ω_y son las frecuencias angulares en los ejes x e y , respectivamente, como se indica en la ecuación (3), y representan la cantidad de oscilaciones por unidad de tiempo que realiza el sistema; t es el tiempo; y ϕ_x y ϕ_y son las fases iniciales en los ejes x e y , respectivamente, las cuales describen la posición inicial del sistema [16].

II. METODOLOGÍA

La metodología incluyó una combinación de técnicas experimentales y teóricas para asegurar una comprensión integral de los conceptos involucrados en el oscilador armónico simple en 2D.

La construcción de prototipos como una de las etapas intermedias del ABP en general requiere de lo siguiente:

I. Materiales:

- Marcos o soportes.
- Péndulos ajustables en dos ejes perpendiculares.
- Superficie de dibujo y pluma.

II. Principios Físicos: Para conocer el comportamiento del OAS puede construirse un armonógrafo. Este funciona mediante la interacción de dos movimien-

tos armónicos simples en ejes perpendiculares, donde las oscilaciones se generan con frecuencias específicas que determinan la forma de las figuras resultantes, conocidas como figuras de Lissajous, las cuales se usan para estudiar la resonancia y la relación entre las frecuencias angulares de los movimientos. Los componentes clave y las ecuaciones utilizadas son las ecuaciones (5) y (6).

III. Diseño, construcción y adquisición de datos: se utilizó un enfoque cualitativo y cuantitativo para el análisis de datos. Los estudiantes realizaron los siguientes pasos:

- **Diseño experimental:** Los estudiantes diseñaron y construyeron los prototipos siguiendo las especificaciones proporcionadas en clase y otras opciones que investigaron por su cuenta.
- **Recopilación de datos:** Se recopilaron datos observacionales sobre los patrones generados por los prototipos, registrando las variaciones en las figuras de Lissajous con diferentes ajustes que fueron de amplitud, frecuencia angulares y fase.
- **Técnicas de observación:** se implementaron técnicas de medición directa, registro fotográfico y de vídeo para documentar las figuras de Lissajous obtenidas durante los experimentos.
- **Análisis de datos:** los datos fueron analizados para identificar cómo los diferentes parámetros (amplitud, frecuencia y fase) influyen en la formación de las figuras de Lissajous. Se utilizaron técnicas de análisis gráfico y sustitución de parámetros en las ecuaciones del periodo y frecuencia angular o en las ecuaciones (4) y (5), dependiendo del prototipo. Como ejemplo de resultados se muestra la [Tabla 1](#), donde se calculan el periodo y la frecuencia angular en base a la longitud.

TABLA 1
MEDICIÓN DEL PARÁMETRO LONGITUD PARA CALCULAR PERIODO Y FRECUENCIA CON LAS ECUACIONES (2) Y (3)

LONGITUD (m)	PERIODO (s)	FRECUENCIA (Hz)
0.285	1.071	5.863
0.253	1.003	6.269
0.201	0.897	7.000
0.154	0.777	8.082

Cada uno de los tres proyectos presentados se estructuró en dos etapas principales: la construcción del prototipo

po y la observación de las figuras de Lissajous generadas por el dispositivo. Durante el proceso, se llevaron a cabo mediciones de los parámetros que controlan las oscilaciones, con el propósito de resaltar la importancia y validez de aplicar la teoría revisada en clase.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estudiantes lograron construir prototipos funcionales y generar diversas figuras de Lissajous. Al realizar mediciones durante el experimento, lograron conectar la práctica con la teoría y comprendieron la importancia de conocer las ecuaciones del movimiento del péndulo para describir y analizar los resultados experimentales.

Al inicio, se observó que la mayoría de los estudiantes tendía a buscar experimentos realizados por otros autores en plataformas digitales, como resultado de la instrucción de investigar prototipos conocidos para generar figuras de Lissajous. Sin embargo, los estudiantes reconocieron que, en algunos casos, no contaban con los materiales exactos que se mencionaban en las fuentes consultadas o que estas no proporcionaban instrucciones completas para construir los prototipos.

Al solicitarles que, en la medida de lo posible, elaboraran prototipos con materiales reciclables o de bajo costo, además de proponer alguna innovación en su diseño experimental, los estudiantes exploraron diversas opciones para facilitar la construcción, evitando simplemente comprar las piezas. Esto les permitió contrastar sus propuestas con los modelos encontrados, comprobando que sus diseños, incluso con materiales diferentes, funcionaban igual o mejor.

Asimismo, los estudiantes se enfrentaron a retos e implicaciones que no siempre se especifican en vídeos, páginas web, blogs, libros o artículos, pero que lograron resolver de manera creativa. Además, mostraron interés en evitar que los prototipos fueran idénticos entre equipos y algunos comenzaron a plantearse dudas sobre la variación de más parámetros que otros, enriqueciendo aún más su proceso de aprendizaje.

El desarrollo de los proyectos permitió evidenciar la profundidad del aprendizaje de los estudiantes. Fue notable cómo pasaron de un conocimiento teórico, que en ocasiones resultaba poco claro, a un entendimiento más profundo gracias al enfoque de Aprendizaje Basado en Proyectos y a la implementación de la metodología STEAM.

Prototipo I: armonógrafo, péndulo que oscila bajo un modelo mecánico. En la [Figura 1](#) se observa cómo la estructura de madera sostiene un tubo con un plumón que se posiciona por arriba de una placa que se encuentra sostenida con cuatro cuerdas sobre las que actúa la gravedad, sobre la placa se pondrán hojas o placas donde se dibujarán las figuras de Lissajous.



Figura 1. Prototipo de armonógrafo, placa detenida por cuatro cuerdas. A la izquierda se observa el dispositivo que sostiene perpendicularmente un tubo al que se le acopla un plumón. Con el permiso del autor .

En la [Figura 2](#) se presenta uno de los trazos generados por el armonógrafo. Al compararlo visualmente con las figuras de Lissajous ([Figura 12-25](#), en [\[7, p. 366\]](#)), se observa que el patrón es muy similar al obtenido cuando la relación entre las frecuencias angulares en los ejes x e y de la ecuación (3) es de 1:3, y la diferencia de fases es de $3\pi/4$.

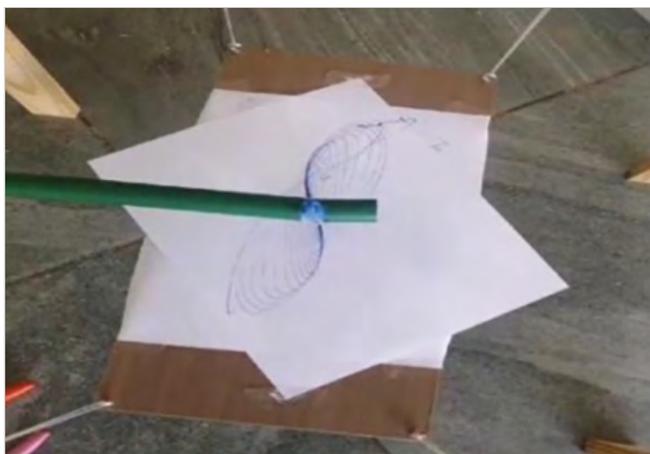


Figura 2. Figura de Lissajous obtenida utilizando el prototipo I. Con permiso del autor.

Conclusión: los alumnos concluyeron que las trazos obtenidos del experimento concuerdan con las figuras de Lissajous encontradas en la literatura, provenientes del uso de un péndulo debido a su comportamiento como OAS.

Prototipo II: oscilador simple. En la [Figura 3](#) se observa cómo dos bancos de plástico sostienen una madera o tubo del cual cuelga, mediante una cuerda, una botella de PET cortada. A esta botella se le vierte pintura o un material que pueda marcar el papel o cartulina que se posicionará debajo. De esta manera, se plasmarán las líneas que forman las figuras de Lissajous, las cuales se generan por el efecto de la gravedad al impulsar el péndulo formado por el hilo y la botella.



Figura 3. Prototipo de oscilador simple, la masa del péndulo está representada por una botella con pintura diluida y que cuelga de un hilo sostenido de un tubo o palo. En el piso se observa un material donde se imprimen las figuras dependiendo del ángulo que se le dé al péndulo. Con el permiso del autor.

En la [Figura 4](#) se presenta uno de los trazos generados por el péndulo simple. Al compararlo con las figuras de Lissajous [\[9\]](#), se observa que el patrón es muy similar al obtenido cuando la relación entre las frecuencias angulares en los ejes x e y es de 1:4, con una diferencia de fases de 0° .

En este prototipo, los alumnos se preguntaron ¿qué pasaría con el periodo y la frecuencia cuando la longitud del cable fuese distinta?

Conclusión: los alumnos reconocieron que entre menor era la longitud de la cuerda, el periodo disminuía, por lo que el movimiento armónico solo dependía de la longitud del péndulo y el valor de la gravedad. También dedujeron que ese modelo les permitió entender mejor

cómo es que la gravedad de los planetas y satélites naturales actúa para establecer sus órbitas, además de notar que dos péndulos de distinta masa pero igual longitud debieran tener un mismo periodo.

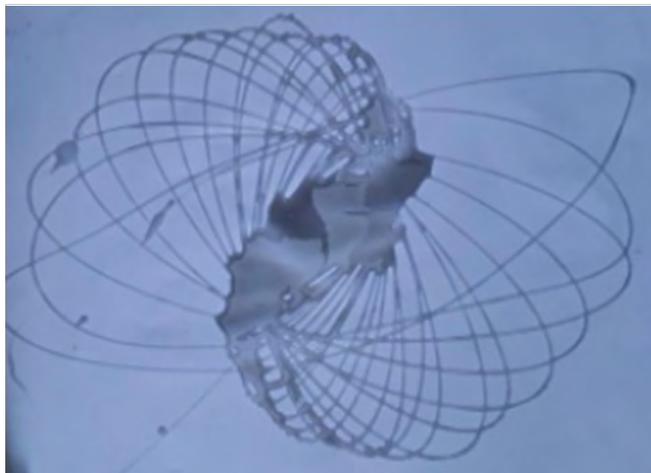


Figura 4. Figura de Lissajous obtenida al usar el prototipo II. Con el permiso del autor.

Prototipo III: armonógrafo, oscilador armónico en 2D. En la Figura 5 se observa cómo dos poleas se unen a brazos de madera y las poleas se unen por una banda. Además, a cada polea se le realizaron tres orificios desde el centro hacia las orillas, ubicados a distancias de 1 cm, 3.5 cm y 6 cm.



Figura 5. Prototipo de armonógrafo: oscilador armónico en 2D, placas giratorias acopladas por una cuerda. En la parte superior se observa el dispositivo que sostiene perpendicularmente un plumón. Con el permiso del autor.

Las poleas se fijaron a un brazo de madera rectangular y a cada polea se le coloca un brazo de madera en alguno de los tres orificios. Los brazos de madera se unieron en

el otro extremo y en esa unión se acoplaron con un tubo de plástico con tinta. Debajo de la unión de los brazos de madera se posicionó una libreta donde se dibujaron las figuras de Lissajous.

En la Figura 6 se muestran tres imágenes obtenidas por el prototipo III. En 6a), el brazo izquierdo se posicionó en el último orificio (nivel 3) y el brazo derecho en el nivel 2, el brazo que se movió fue el de la derecha, la relación fue 3:2 y el tiempo en movimiento fue de 40 s. En 6b) y 6c) se movió el brazo izquierdo: en 6b), este se situó en el nivel 1 y en 6c) en el nivel 3, mientras el brazo derecho se posicionó en el nivel 2. La relación en 6b) fue de 3:1 durante 30 s. En 6c), se mantuvo oscilando durante 40 s.



Figura 6. Tres figuras de Lissajous generadas utilizando el prototipo III. En el inciso a) se detallan las especificaciones de frecuencia y tiempo. Con el permiso del autor.

Conclusión: las jóvenes expresaron principalmente su emoción durante la realización del prototipo, además de mencionar que los armonógrafos de dos dimensiones pueden tener resultados pocos satisfactorios en caso de no tener cuidado con el manejo de las poleas y de la construcción. Además, reconocieron la importancia del tipo de materiales y el diseño para poder replicar las figuras de Lissajous.

Los estudiantes lograron construir prototipos funcionales y generar diversas figuras de Lissajous, aunque en algunos casos tuvieron problemas para ajustar algunas de las secciones o partes de su experimento.

IV. CONCLUSIONES

Los alumnos lograron reforzar sus conocimientos, además de sentirse motivados a explorar una mejora en la comprensión de la teoría física con el uso de las matemáticas y el apoyo de desarrollos tecnológicos y sus aplicaciones.

Se observa que el trabajo colaborativo, implementado mediante la técnica de Aprendizaje Basado en Proyectos, no solo permitió a los estudiantes repasar el concepto de oscilador armónico simple, sino también comprender las variables involucradas en el trazado de los patrones de las figuras de Lissajous.

Los estudiantes ampliaron sus conocimientos y practicaron sus habilidades en el ámbito de STEAM, logrando relacionar la teoría con la práctica y fortaleciendo así su pensamiento crítico. También, integraron conceptos de física, matemáticas e ingeniería durante el desarrollo de los prototipos.

En una primera exposición, en la que cada equipo presentó un avance del 60 % de su prototipo, se generaron oportunidades para que todos los equipos implementaran mejoras y resolvieran problemas en sus diseños.

Además, enfrentaron el desafío de crear prototipos que no solo fueran funcionales, sino también visualmente atractivos. Esto lo lograron al combinar diferentes texturas y colores de los materiales disponibles. También asumieron el reto de realizar presentaciones que mantuvieran limpio el salón de clases y no afectaran a los asistentes durante las demostraciones.

Del prototipo I, los alumnos mejoraron en su asimilación y fusión entre teoría y práctica de conceptos de la mecánica.

En el caso del prototipo II, los alumnos lograron una alta asimilación de los conceptos y se consiguió que relacionaran los conceptos con aplicaciones a la astronomía.

En lo que respecta al prototipo III, las jóvenes mostraron mayor emoción y una participación activa en la apropiación del conocimiento.

Los resultados abren la posibilidad de considerar una siguiente etapa en la que los estudiantes utilicen las Tecnologías de la Información y la Comunicación para

reproducir las figuras de Lissajous. En esta fase se buscará fomentar el uso de lenguajes de programación o software matemático, incentivando a los alumnos a explorar herramientas digitales para complementar su aprendizaje.

Para finalizar, se observó que la implementación de técnicas de ABP a nivel licenciatura permite no solo reforzar los conocimientos previos de los alumnos, sino también los apoya a desarrollar habilidades en materia de STEAM e incrementar sus habilidades blandas como pueden ser exposición y sus expresiones corporales frente a colegas, retroalimentación de grupo, liderazgos, resolución de problemas y trabajo en equipo, entre otras.

Cabe resaltar que un aspecto destacable del proyecto fue la apropiación del conocimiento mostrado en los resultados finales y las figuras generadas por sus prototipos, reflejan que ha logrado un mejor entendimiento de los conceptos planteados en la clase teórica. El nivel de apropiación del conocimiento es un claro indicador del éxito de la estrategia pedagógica implementada.

REFERENCIAS

- [1] J. W. Bequette y M. B. Bequette, "Art Integration and the STEAM Initiative: A Symbiotic Relationship", *Art Education*, vol. 65, n.º 2, pp. 40-44, 2012.
- [2] C. F. Quigley y D. Herro, *An Educator's Guide to STEAM: Engaging Students Using Real-World Problems*. Nueva York, NY, EUA: Teachers College Press, 2019.
- [3] D. C. Sickler-Voigt, *STEAM Teaching and Learning Through the Arts and Design*. Nueva York, NY, EUA: Routledge, 2023.
- [4] J. Barell, *Problem-Based Learning: An Inquiry Approach*, 2.ª ed. Thousand Oaks, CA, EUA: Corwin Press, 2007.
- [5] A. Walker, H. Leary y C. Hmelo-Silver, eds., *Essential Readings in Problem-Based Learning: Exploring and Extending the Legacy of Howard S. Barrows*. West Lafayette, IN, EUA: Purdue University Press, 2015.
- [6] D. Halliday, R. Resnick y J. Walker, *Fundamentals of Physics*, 7.ª ed. Nueva York, NY, EUA: Wiley, 2002.
- [7] M. Alonso y E. Finn, *Physics*, 1.ª ed. Reading, MA, EUA: Addison-Wesley, 1992.

- [8] J. B. Marion y S. T. Thornton, *Classical Dynamics of Particles and Systems*, 5.ª ed. Belmont, CA, EUA: Brooks Cole, 2003.
- [9] G. Yakman, “STEAM Education: An Overview of Creating a Model of Integrative Education”, en *Proceedings of the Pupils’ Attitudes Toward Technology Conference*, Netherlands, 2008.
- [10] J. R. Savery y T. M. Duffy, “Problem-Based Learning: An Instructional Model and Its Constructivist Framework”, *Educational Technology*, vol. 35, n.º 5, pp. 31-38, 1995.
- [11] J. Binney y S. Tremaine, *Galactic Dynamics* (Princeton Series on Astrophysics). Princeton, NJ, EUA: Princeton University Press, 2008.
- [12] J. L. Meriam y L. G. Kraige, *Engineering Mechanics: Dynamics*, 6.ª ed. Nueva York, NY, EUA: Wiley, 2008.
- [13] P. A. Tipler y G. Mosca, *Physics for Scientists and Engineers*, 6.ª ed. Nueva York, NY, EUA: Freeman, 2008.
- [14] R. Stallings, “Harmonographs: Using the build-design process to improve functionality”, en *2017 12th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE)*, 2017, pp. 314-318, doi: [10.1109/ICCSE.2017.8085509](https://doi.org/10.1109/ICCSE.2017.8085509).
- [15] E. Mach, *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*. La Salle, IL, EUA: Open Court Publishing, 1893.
- [16] J. G. Landels, *Engineering in the Ancient World*. Berkeley, CA, EUA: University of California Press, 1978.
- [17] C. Huygens, *Horologium Oscillatorium*. París, Francia: publicación propia, 1673.
- [18] J. B. L. Foucault, *Démonstration physique du mouvement de rotation de la terre au moyen du pendule*. París: Bachelier, 1851.
- [19] H. D. Young y R. A. Freedman, *University Physics with Modern Physics*, 14.ª ed. Boston, MA, EUA: Pearson, 2015.
- [20] A. E. Bell, “The Horologium Oscillatorium of Christian Huygens”, *Nature*, vol. 148, pp. 245-248, 1941, doi: [10.1038/148245a0](https://doi.org/10.1038/148245a0).
- [21] J. A. Lissajous, *Mémoire sur l'étude optique des mouvements vibratoires*. París: Mallet-Bachelier, 1857.
- [22] D. Kleppner y R. Kolenkow, *An Introduction to Mechanics*, 2.ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.