



# Ingeniantes®

Año 12, No.1, Vol.1

Revista de Investigación . Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Latindex

ISSN 2395-9452



Tierra, Energía, Biológicos,  
Bioquímica, Medio Ambiente,  
Gestión Educativa, Mecánica de Materiales,  
Ciencias de la Computación, Calidad  
y Sistemas de Manufactura

# Ingeniantes

Año 12 / No. 1 / Vol. 1

## Información Legal

**Ingeniantes**, Año 12, No. 1, Vol 1. - junio 2025 - diciembre 2025 - es una publicación semestral editada y publicada por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, teléfono 01 (235) 323 60 18, página web [citt.itsm.edu.mx](http://citt.itsm.edu.mx). Editor responsable: Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-062512501200-203, ISSN 2395-9452, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología del ITSM, Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, fecha de última modificación, 16 de junio de 2025.

Actualmente indexada en la base de datos del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal LATINDEX, con número de registro 22843.

Se autoriza cualquier reproducción parcial de los contenidos o imágenes de la publicación siempre y cuando sea sin fines de lucro y para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente dando los créditos a los autores del artículo.

El contenido de los artículos publicados es responsabilidad de los autores y no representa el punto de vista del editor de la Revista Ingeniantes.

## Cuerpo Editorial

Editor General  
Instituto Tecnológico Superior de Misantla  
Editor  
L.M. Jorge Obdulio Gerón Borjas  
Coeditor  
Lic. Erik Balderas González

## Administración

M.I.I. Mayra Lizeth Méndez Oloarte

## Propiedad Intelectual

Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología  
L.M. Jorge Obdulio Gerón Borjas

## Sistemas

Administrador de Sistemas  
M.S.C. Fernando Alberto Hernández Guevara  
Webmaster  
L.I. Ana Marcela Gutiérrez Romero

## Distribución

Publicación electrónica disponible en  
[citt.itsm.edu.mx/ingeniantes](http://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes)  
Correo electrónico:  
[revista.ingeniantes@itsm.edu.mx](mailto:revista.ingeniantes@itsm.edu.mx)  
<https://www.latindex.org/latindex/ficha/22843>

## Directorio

**Dra. Sacsí Xhanat Cervantes Herrera**

Directora General, ITSM, Veracruz, México

**Mtro. Saúl Reyes Barajas**

Director Académico, ITSM, Veracruz, México

**Mtra. Lidia Herrera Domínguez**

Directora de Planeación y Vinculación, ITSM, Veracruz, México

**Mtra. Aracely Romano García**

Subdirectora Académica, ITSM, Veracruz, México

**Dr. José Edgar Soto Meneses**

Subdirector de Planeación, ITSM, Veracruz, México

**Dra. María Cristina López Méndez**

Subdirectora de Posgrado e Investigación, ITSM, Veracruz, México

**Ing. Jovita Arroyo Mendoza**

Subdirectora de Vinculación, ITSM, Veracruz, México

**Lic. Dulce María Nabor Arriaga**

Subdirectora de Servicios Administrativos, ITSM, Veracruz, México

## Comité de Revisión

|   |      |  |
|---|------|--|
| Dr. Luis Alberto Morales Rosales, UMSNH     | SNII | Dra. María Victoria Carreras Cruz, UP            |
| Dr. David Lara Alabazares, ITSM             | SNII | Dr. Ramón Álvarez López, UDG                     |
| Dr. Gregorio Fernández Lambert, ITSM        | SNII | Dr. Gustavo Martínez Castellanos, ITSM           |
| Dr. Javier Esquer Peralta, UNISON           | SNII | Dr. Arturo Cabrera Hernández, ITSM               |
| Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT         | SNII | Dr. Saúl Santiago Cruz, ITSM                     |
| Dr. Eduardo Mael Sánchez Coronado, ITCV     | SNII | Dr. Joel Pozos Osorio, HUB2i                     |
| Dr. Jesús Antonio Álvarez Cedillo, IPN      | SNII | Dra. Ana Lilia Sosa y Durán, ITSM                |
| Dr. Roberto Ángel Meléndez Armenta, ITSM    | SNII | Dr. Guillermo Alfredo Arriola Carrera, UX        |
| Dr. Adolfo Preciado Quiroz, ITSDZ           | SNII | Dr. Modesto Raygosa Bello, ITO                   |
| Dr. José Luis Marín Muñiz, CV               | SNII | Dr. Luis Alberto Nava Ordoñez, UPAEP             |
| Dr. Julio César Chacón Hernández, UAT       | SNII | Dr. Irahán Otoniel José Guzmán, ITSM             |
| Dr. Eddy Sánchez de la Cruz, ITSM           | SNII | Dr. Humberto Raymundo González Moreno, ITSM      |
| Dra. María Cristina López Méndez, ITSM      | SNII | Dra. María Guadalupe Montes de Oca, ITSM         |
| Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo, ITSM       | SNII | M.C. Clovis Nchikou, ITNL                        |
| Dr. José de Jesús Ibarra Montalvo, ITSDZ    | SNII | M.I. Fernando Jurado Pérez, ITESI                |
| Dr. Andrés Blanco Ortega, CENIDET           | SNII | M.I.I. Aarón Montiel Rosales, ITSPR              |
| Dr. Juan Carlos González Hernández, ITM     | SNII | M.I.I. Nayeli Montalvo Romero, ITSPR             |
| Dr. Heriberto Esteban Benito, ITSNA         | SNII | M.I.I. Gema del Carmen Jiménez Gómez, ITSAV      |
| Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV   | SNII | M.I.I. Mario Pérez Acosta, ITSM                  |
| Dr. Sergio Aurelio Zamora Castro, UV        | SNII | M.I.I. Leonardo Martínez Lara, ITSAV             |
| Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, CENIDET | SNII | M.S.C. Arnulfo Gamaliel Hernández González, ITSM |
| Dr. Daniel Martínez Navarrete, ITSAV        | SNII | M.I.M. Jorge Roa Díaz, ITSM                      |
| Dra. Laura Celina Ruelas Monjardín, UV      | SNII | M.C. Vladimir Zagoya Juárez, ITSM                |
| Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV   | SNII | M.G.C. Eduardo Gutierrez Almaraz, ITSM           |
| Dr. Sergio Fabian Ruiz Paz, UNPA            | SNII | M.I.I. Giovanni Luna Chontal, ITSM               |
| Dr. Arturo Pacheco Espejel, IPN             | SNII | M.A. Luz del Carmen Muñoz Palacios, UTCV         |
| Dr. Cuauhtémoc Guerrero Dávalos, UMSNH      | SNII | M.C. Joel Maurilio Morales García, ITSM          |
| Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT         | SNII | M.S.C. Cecilia Irene Loeza Mejía                 |
| Dr. José Pastor Rodríguez Jarquín, ITO      | SNII | M.S.C. Galdino Martínez Flores                   |
| Dr. Luis Enrique García Santamaría, ITSM    | SNII |  |
| Dr. Alan Rico Barragán, ITSM                | SNII |  |
| Dra. Alicia Martínez Rebollar, CENIDET      | SNII |  |
| Dr. Luis Mejía Macario, ITSM                | SNII |  |
| Dr. Alfredo Alberto Morales Tapia, UV       | SNII |  |

# Ingeniantes



03

13

20

32

38

47

54

## Contenido

Sistema de producción sostenible de hojas ecológicas a base de (*Ficus benjamina* L.) y residuos forestales \_\_\_\_\_ 03

María Alicia Rodríguez Lagunes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Xalapa; Denisse Ivvet Varela Pérez, Universidad Autónoma Chapingo; Ana Gabriela González Carrera, Universidad Euro Hispanoamericana; Blanca Yesenia Ortiz Galván; Saúl Santiago Cruz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Optimización de la producción de playeras tipo polo mediante la metodología Kaizen \_\_ 13

Elsa Carolina Ávila Salomón; Jesús Abraham Ramírez Alvarado; Víctor Daniel Salas Cervantes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de San Pedro de las Colonias

Optimización del Servicio de Taxis Colectivos mediante Simulación en ProModel: Un enfoque para reducir tiempos de espera y mejorar la eficiencia operativa \_\_\_\_\_ 20

Ángel Sánchez Sánchez; Juan José García Rodríguez; Eva Mercedes Alvarado Brady; Edgar Ossiel Ramírez Leal, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica

La relación entre las horas prácticas y la calificación obtenida en clase de maquinados industriales \_\_\_\_\_ 32

Jorge Rivera Flores; Luis Juárez Ramiro; Alfredo Carrasco Aráoz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán

Desarrollo de una carta antropométrica integral para el diseño óptimo de una cabina ergonómica en el TECNM Campus Irapuato \_\_\_\_\_ 38

Norma Elizabeth Rodríguez Bustos; Adrián Agustín Ríos Barreto; Mónica Mendoza Khors, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Análisis de efectividad de las estrategias de marketing institucional en la captación de alumnos de nuevo ingreso del ITSCH \_\_\_\_\_ 47

Marisol López Mendoza; Yesenia González Cruz; Elda Jacinto Martínez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Las Choapas

Desarrollo de prácticas de fabricación en CNC y pruebas de tensión en probetas de acero, aluminio y cobre en Máquina Universal \_\_\_\_\_ 54

Carlos Alberto González Jiménez; María de los Ángeles Balderas Cid; Raúl Eusebio Grande, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Atlixco

# Ingeniantes



62



69



77



86



92



101



110

Análisis de la calidad de pellets de biomasa de *Agave durangensis*, para su posible uso como biocombustible sólido \_\_\_\_\_ 62

Pedro Rubén Reyes Corral; Manuel Ismael Mata Escobedo; Karla María Ortega Valdez, Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Guadiana; Artemio Carrillo Parra; Universidad Juárez del Estado de Durango; Jazmín Ramírez Ayala, Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Guadiana

Análisis de deformaciones mecánicas en herrajes para la estimación de la confiabilidad en líneas de transmisión \_\_\_\_\_ 69

Miguel Ángel Esquivel Sánchez; Julio Cesar Méndez Gutiérrez; Fernando Jurado Pérez; José Roberto Razo Hernández; Gerardo Daniel Pérez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Modelado de Circuitos RLC: del Método Matemático a la Aproximación Impulsada por Datos \_\_\_\_\_ 77

Ramón Daniel Rodríguez Soto; Emilio Barocio Espejo; Universidad de Guadalajara; Oswaldo Cortes Robles; Universidad Tecnológica de Jalisco, Dunstano del Puerto Flores; Pavel Zuñiga Haro, Universidad de Guadalajara

Algoritmo para el cálculo de fallas trifásicas en líneas de transmisión de sistemas de potencia \_\_\_\_\_ 86

José Miguel García Guzmán; Roberto Alejandro Vargas González; Ángel Antonio Soria Salazar; Miroslava Cano Lara; Juan Pablo Razón González, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Diseño y construcción del sistema mecánico para un agitador de movimiento orbital \_\_\_\_ 92

José Jonathan Barreto Gutiérrez; Merit Cisneros González, Jaime Herrera Gamboa; Darío Cisneros Arreola, Manuel Ismael Mata Escobedo, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Valle del Guadiana

Análisis Cinemático y de Esfuerzos en Brazo Manipulador para la Recolección de la Cereza del Café \_\_\_\_\_ 101

Alfredo Carrasco Aráoz; Mario Andrés Paredes Valverde; Luis Manuel García Martínez; Gabriel Ángel Ramírez Vicente; Jorge Rivera Flores, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán

Diseño de un Controlador de Temperatura basado en Lógica Difusa para una Incubadora de Huevos de Aves de Corral \_\_\_\_\_ 110

Jaime Castañeda Delgado; María del Refugio Molina Wong; Abraham Esquivel Salas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte



Multidisciplinario  
e  
ingenierías

---

Ingeniantes

# Sistema de producción sostenible de hojas ecológicas a base de (*Ficus benjamina* L.) y residuos forestales

**RESUMEN:** Independientemente al impacto ambiental asociado a la fabricación convencional de papel se evidencia el sustento de los alcances del proyecto al justificar la elaboración de papel ecológico a partir de desechos de papel y residuos forestales del árbol (*Ficus benjamina* L.), vinculada a los ODS 9, 12, 13 de la Agenda 2030. Refiere el diseño del proceso al proponer el cumplimiento de los alcances contemplados en la investigación.

El presente trabajo representa la vinculación del CIIDE y Cuerpo Académico ITESMIS-CA-12, Estudiantes del PMII del ITSM y Estudiantes de Ingeniería Industrial del ITSX. Se caracteriza la producción, incluyendo la formación de hojas con bastidores y prensas, contemplando secado controlado en cámaras térmicas, regulando la humedad y la temperatura para garantizar la calidad del producto final. Posteriormente el papel producido fue evaluado en términos de resistencia, flexibilidad, durabilidad y tiempo de degradación. Se sugieren trabajos futuros vinculados a líneas de investigación de ingeniería de procesos y análisis económico que fortalezcan la cadena de valor mejorando el índice actual de la rentabilidad donde la producción anual de hojas ecológicas alcanzó 306,000 unidades, estructuradas en 1020 lotes de 300 hojas, confirmando la viabilidad económica y la rentabilidad del proyecto.

#### PALABRAS CLAVE:

Papel ecológico, Residuos forestales, objetivo sostenible 09, cámaras térmicas.



#### Colaboración

María Alicia Rodríguez Lagunes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Xalapa; Denisse Ivvet Varela Pérez, Universidad Autónoma Chapingo; Ana Gabriela González Carrera, Universidad Euro Hispanoamericana; Blanca Yesenia Ortiz Galván; Saúl Santiago Cruz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 21 de marzo de 2025

Fecha de aceptación: 23 de mayo de 2025

**ABSTRACT:** Regardless of the environmental impact associated with conventional papermaking, the scope of the project is evident in its justification of the production of ecological paper from paper waste and forest residues from the tree (*Ficus benjamina* L.), linked to SDGs 9, 12, 13 of the 2030 Agenda. It refers to the design of the process when proposing compliance with the scopes contemplated in the research.

The present work represents the link between CIIDE and the ITESMIS-CA-12 Academic Body, ITSM PMII Students and ITSX Industrial Engineering Students. The production is characterized, including the formation of sheets with frames and presses, contemplating controlled drying in thermal chambers, regulating humidity and temperature to guarantee the quality of the final product. Subsequently, the paper produced was evaluated in terms of resistance, flexibility, durability and degradation time. Future work is suggested linked to lines of research into process engineering and economic analysis that strengthen the value chain by improving the current profitability index where the annual production of ecological sheets reached 306,000 units, structured in 1020 batches of 300 sheets, confirming the economic viability and profitability of the project.

**KEYWORDS:** Ecological paper, forest residues, sustainable objective 09, thermal chambers.

## INTRODUCCIÓN

La deforestación se define como la remoción o pérdida permanente de cobertura arbórea en áreas forestales, generalmente provocada por actividades antrópicas como la expansión agrícola, la ganadería extensiva, el crecimiento urbano y la explotación forestal con fines comerciales tales como la obtención de madera y la producción de papel, lo cual conlleva una drástica alteración de los ecosistemas debido a la degradación de hábitats, la reducción de la biodiversidad, la perturbación del ciclo hidrológico y una mayor emisión de gases de efecto invernadero que en conjunto contribuyen significativamente al cambio climático global [1]. En México en el periodo 2001- 2023 se perdió en promedio 207,665 ha / año [2].

La celulosa, considerada la materia prima esencial en la fabricación de papel, se obtiene en un 90% a partir de fibras naturales provenientes de los árboles, mientras que el 10% restante proviene de otras fuentes vegetales como pastos, bambú y cáñamo. Para producir una sola tonelada de papel se requieren, en promedio, 2,400 kilogramos de madera, lo que equivale a la tala de aproximadamente 17 árboles, lo que pone en evidencia el elevado impacto ambiental que conlleva este proceso productivo [3]. En este contexto, la elaboración de productos ecológicos resulta fundamental, ya que se distinguen por sistemas de producción que respetan y protegen el medio ambiente en todas sus etapas mediante la integración de enfoques ecológicos y orgánicos en la fabricación de papel, lo cual promueve una industria limpia, segura y sostenible, considerando además que la obtención de un producto orgánico implica el uso exclusivo de sustancias y elementos naturales sin la incorporación de compuestos químicos [4].

De acuerdo con la CCA [5], los residuos orgánicos son materiales de origen biológico susceptibles de descomposición por microorganismos. En este marco, iniciativas internacionales como Green Growth de la OCDE y Bio Trade de la UNCTAD han sido promovidas en América Latina –particularmente en Colombia, Chile y Costa Rica– para fomentar el desarrollo tecnológico ambiental y el aprovechamiento sostenible de estos residuos [6].

La búsqueda de insumos alternativos para la producción de papel ha llevado a explorar el uso de fibras vegetales no leñosas como una solución viable y sostenible frente a la explotación forestal convencional [7]. Realizaron un estudio sobre diversas especies herbáceas y arbustivas no leñosas presentes en la provincia de Loja, Ecuador, concluyendo que materiales como hojas, tallos y cáscaras pueden ser aprovechados eficazmente en la elaboración de papel artesanal sin recurrir a procesos químicos agresivos. Dado que el papel es un producto

esencial para el ser humano, su alta demanda en el mercado lo convierte en un componente fundamental del desarrollo cotidiano [8]. Con la finalidad de satisfacer las necesidades básicas del ser humano y al mismo tiempo preservar el medio ambiente.

En coherencia con esta perspectiva, el presente estudio propone la utilización de residuos del árbol (*Ficus benjamina* L.), en combinación con papel reciclado, como base para la elaboración de papel ecológico, aportando una alternativa de bajo impacto ambiental, técnicamente viable y con potencial de replicabilidad en contextos comunitarios o educativos. De este modo, se plantea desarrollar hojas ecológicas a partir de dichos materiales, evaluando sus propiedades físico-mecánicas tales como: gramaje, espesor, textura, color, resistencia e índice de degradación, bajo condiciones controladas de laboratorio, con el propósito de validar su funcionalidad como sustituto sostenible del papel convencional bajo condiciones controladas de laboratorio, con el propósito de validar su funcionalidad como sustituto sostenible del papel convencional.

## MATERIAL Y MÉTODOS

La alternativa de producción del papel ecológico se dividió en dos fases. La primera consistió en una investigación documental enfocada en los métodos y aplicaciones del papel reciclado, así como en los procesos de fabricación del papel. Aunque se justifica el uso de diferentes técnicas de solución como el uso de heurística se declina está en base a la indagación de incertidumbre dado que no aporta sustento en el diseño de hojas. De igual forma la técnica de TOPSIS, aunque es una técnica para considerar se desiste de su uso por requerir la selección de la mejor alternativa para producción de hojas [9]. En base a lo mencionado se decide el uso de DOE dado que nos garantiza una propuesta robusta de la producción de hojas.

La segunda fase fue una investigación descriptiva sobre el destino de las hojas desechadas en las oficinas del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa (ITSX) y del Instituto Tecnológico Superior de Miantla (ITSM). Con base en SERVQUAL se constituyó un cuestionario y una encuesta estructurada con preguntas cerradas de opción múltiple.

### Primera fase

Dado a ello se llevaron a cabo las diversas etapas con base a la siguiente metodología [10], mismo que se utilizó para llevar a cabo el proceso de elaboración de las hojas a base de desechos de papel y residuos forestales [6].

En la Figura 1, se muestra el proceso de fabricación de una hoja ecológica utilizando desechos de papel y el fruto del (*Ficus benjamina* L.).

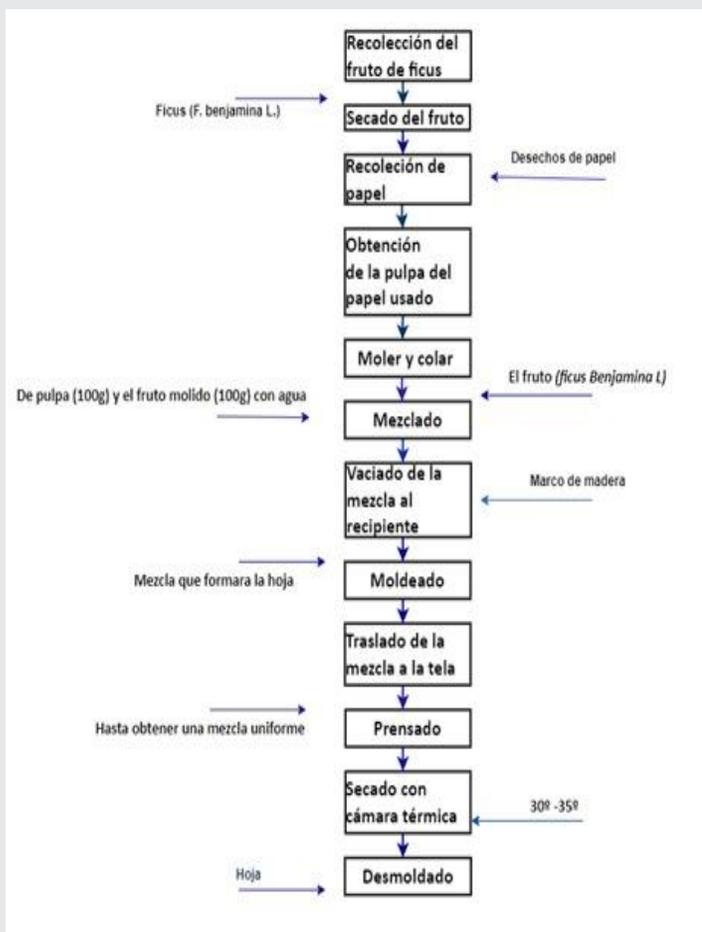


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de fabricación de hojas ecológicas.

Fuente: Elaboración propia.

### Proceso de la producción de hojas de papel

**Recolección del fruto:** El primer paso que se llevó a cabo fue la recolección del fruto proveniente del árbol ficus (*Ficus benjamina L.*) que se encuentra en una de las jardineras del ITSX.

**Secado del fruto:** Posteriormente, el fruto se extendió en una superficie plana para que se secase a temperatura ambiente y directamente al sol. Este proceso duró aproximadamente entre 1 y 2 semanas.

**Recolección de papel reciclado:** Mientras se realizaba el proceso de secado del fruto, se hizo la recolección de hojas de papel desechadas por un grupo de estudiantes y personal del ITSX.

**Obtención de la pulpa:** Se pesaron 100 g de hojas desechadas, las cuales fueron cortadas en fragmentos pequeños y sumergidas en una bandeja con agua. Este proceso se mantuvo durante un intervalo de 1 a 2 días.

**Molido y colación del fruto:** Los 100 g del fruto fueron triturados en un mortero de piedra con el fin de obtener partículas más finas, lo que facilitó su integración y mejora en el proceso de mezcla con la pulpa de papel.

**Mezcla de la pulpa y el fruto molido con agua:** Después de moler los 100 g del fruto y obtener la pulpa de las hojas, ambos componentes se mezclaron con

6 litros de agua en una licuadora para conseguir una mezcla homogénea.

**Vaciado de la mezcla al recipiente:** Se realizó el vaciado de la mezcla en un recipiente.

**Moldeado:** Una vez obtenida una mezcla homogénea en el recipiente, se sumergió el marco en ella para capturar de manera uniforme la mezcla, lo que permitiría la formación de la hoja.

**Traslado de la mezcla a tela:** Luego de tener la mezcla necesaria en el marco, se colocó sobre ella un lienzo pequeño de tela para quitar el exceso de agua con ayuda de una esponja. Acto seguido, se dio la vuelta al marco de manera que la tela quedó debajo de este, sobre una superficie plana. Para terminar, se despegó el marco de la tela con la mezcla y se obtuvo la mezcla sobre la tela.

**Prensado:** Una vez que la mezcla se encontraba sobre el lienzo de tela, se colocó otro lienzo encima y se procedió a prensarla, lo que permitió que la mezcla se compactara de manera uniforme, garantizando una distribución homogénea en toda su superficie.

**Secado:** Después del prensado, se retiró el lienzo superior, dejando el lienzo con la mezcla sobre una superficie plana. El secado se realizó de dos formas: una mediante exposición directa al sol o a temperatura ambiente, y la otra, utilizando una cámara térmica de laboratorio.

**Desmolde:** Una vez que la mezcla alcanzó el nivel de secado adecuado, se procedió a desmoldar la hoja con cuidado.

**Obtención del producto final:** Tras desmoldar la hoja de la tela, se recortaron los excesos de material para ajustarla a la medida requerida de tamaño carta (21.59 x 27.94 cm). Al respecto la Figura 2, refleja las hojas obtenidas.



Figura 2. Hojas elaboradas a base de desechos de papel y residuos forestales (*Ficus benjamina L.*)

Fuente: Elaboración propia.

### Segunda fase:

El diseño descriptivo de esta investigación se clasificó en dos tipos: simple y comparativo. Se realizó una encuesta a estudiantes de diferentes niveles académicos para conocer su opinión sobre las diferencias entre las hojas ecológicas y las hojas convencionales.

Asimismo, la importancia del uso de este material redundaba en el uso de un diseño explicativo, ya que su objetivo principal fue experimentar con la elaboración de las hojas ecológicas y realizar pruebas con ellas, evaluando su uso por diferentes usuarios, como estudiantes de nivel básico, medio superior y superior.

## Diseño muestral y determinación del tamaño de muestra

La presente investigación adoptó un diseño de muestreo probabilístico simple. El muestreo probabilístico simple garantiza que todos los elementos de la población tengan las mismas posibilidades de ser incluidos, lo cual fortalece la objetividad y precisión de los resultados obtenidos [11].

La población objeto de estudio estuvo conformada por 246 estudiantes pertenecientes al sistema educativo de nivel básico, medio superior y superior. Para asegurar la precisión de los resultados, se calculó el tamaño óptimo de muestra utilizando la fórmula de la Ec. (1) de muestreo para poblaciones finitas:

$$n = \frac{Z^2 \cdot \sigma^2 \cdot N}{e^2(N - 1) + Z^2 \cdot \sigma^2} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde:

$n$ =tamaño de la muestra.

$Z$ =valor obtenido mediante nivel de confianza.

$\sigma$ =desviación estándar de la población.

$e$ =límite aceptable de error muestral.

$N$ =tamaño de la población total.

Posteriormente se sustituyeron valores correspondientes a la ecuación y obtenemos un resultado de 150. Por lo tanto el tamaño óptimo de muestra fue de 150 estudiantes. La aplicación de esta fórmula permitió establecer el número mínimo de participantes necesarios para lograr estimaciones confiables, con un margen de error del 5% y un nivel de confianza estadístico del 95%.

## Análisis de las propiedades físicas y funcionales de las hojas ecológicas

Las hojas elaboradas a partir de desechos de papel y residuos forestales fueron evaluadas considerando seis propiedades fundamentales: gramaje, espesor, textura, color, resistencia e índice de degradación.

### Gramaje

El gramaje, entendido como el peso del papel por unidad de área, se determinó de forma empírica tras la elaboración de cada lote de hojas, utilizando básculas digitales. Los valores obtenidos permitieron comparar la densidad del papel ecológico con la de papeles comerciales, observándose gramajes más elevados, lo que confería a las hojas mayor cuerpo, similar al papel tipo cartulina.

### Espesor

El espesor, correspondiente al grosor de cada hoja, fue medido con reglas milimétricas de precisión. Esta propiedad complementó el análisis del gramaje, permitiendo evaluar la consistencia estructural del papel ecológico en relación con su peso y su aplicabilidad práctica.

### Textura

La textura fue evaluada mediante observación directa y percepción táctil, valorando su aceptabilidad para el uso escolar. Se observó que esta propiedad varió en función del tipo de malla empleada en el molde (plástica o metálica), así como del método de prensado aplicado durante el proceso de fabricación.

### Color

El color también fue evaluado sensorialmente, presentando tonalidades naturales que iban del beige claro al marrón, debido a la ausencia de agentes blanqueadores. Estas variaciones cromáticas estuvieron directamente relacionadas con la proporción de fruto de (*Ficus benjamina* L.) incorporado en la mezcla.

### Resistencia

La resistencia de las hojas ecológicas fue evaluada de manera cualitativa mediante una encuesta de satisfacción aplicada a 150 estudiantes de distintos niveles educativos, quienes valoraron su desempeño en contextos escolares. Esta evaluación se basó en la percepción subjetiva de los usuarios, ya que no se realizaron pruebas físicas estandarizadas.

### Índice de degradación

Se llevó a cabo un experimento controlado con ocho muestras de hojas ecológicas, las cuales fueron sumergidas en agua durante 72 horas para simular un proceso natural de biodegradación. Con base en los registros de peso inicial y final de cada muestra, se calculó el porcentaje de degradación como un indicador cuantitativo de sostenibilidad, permitiendo estimar la pérdida de masa del material bajo condiciones controladas y evaluar su desempeño ambiental.

El cálculo del porcentaje de degradación se realizó aplicando la siguiente fórmula de la Ec (2).

$$\% \text{ de degradación} = (PF / PI) \times 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

donde:

$PF$ = corresponde al peso final tras el tratamiento de inmersión (en gramos).

$PI$ = representa el peso inicial de la hoja ecológica antes del ensayo (en gramos).

Cada una de las ocho hojas ecológicas elaboradas a base de desechos de papel y residuos del árbol *Ficus benjamina* L. fue pesada antes y después del

ensayo utilizando una balanza digital de precisión. Posteriormente, se aplicó la fórmula para calcular el porcentaje de degradación individual por muestra Ec. (2).

A fin de interpretar los resultados obtenidos, se aplicó un análisis estadístico descriptivo e inferencial. El análisis descriptivo incluyó el cálculo de medidas de tendencia central (media, mediana), dispersión (desviación estándar y rango), así como los valores extremos (mínimo y máximo) del conjunto de datos.

Posteriormente, se realizó un análisis inferencial mediante una prueba *t* de una muestra, con el objetivo de contrastar la hipótesis de que el porcentaje de degradación de las hojas ecológicas es significativamente mayor al del papel bond convencional, cuyo valor de referencia fue fijado en 5% (0.05).

Se utilizó la fórmula de la Ec. (3), para el cálculo del estadístico *t* fue:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \quad \text{Ec. (3)}$$

donde:

$\bar{x}$ = la media del porcentaje de degradación observado,

$\mu_0$ = es el valor de referencia (0.05).

*s*= es la desviación estándar.

*n*= es el tamaño de la muestra (*n* = 8).

El análisis estadístico fue realizado utilizando Microsoft Excel y calculadora científica, considerando un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ) y comparando los resultados con los valores críticos de la distribución *t* de Student con 7 grados de libertad. Este tratamiento permitió determinar si el comportamiento de degradación de las hojas ecológicas representaba una diferencia estadísticamente significativa respecto al material convencional, validando su potencial como alternativa ecológica viable desde una perspectiva ambiental.

### Análisis de ciclo de vida

El modelo de ciclo de vida (ACV), basado en la norma ISO 14040, comparó el papel ecológico con el papel convencional.

### Análisis de rentabilidad

Por último, se realizó un análisis de rentabilidad del proyecto de producción de hojas ecológicas donde se evaluaron los costos de materiales, mano de obra, depreciación y gastos operativos, el cual asegura la viabilidad del proyecto, ajustando los precios de venta en función de los costos incrementales, destacando la rentabilidad a largo plazo.

## RESULTADOS

### Proceso de la producción de hojas de papel

En la Figura 3, se pueden apreciar los separadores

y sobres elaborados a base de desechos de papel y residuos forestales (*Ficus benjamín L.*).



Figura 3. Separadores y sobres elaborados a base de desechos de papel y residuos forestales (*Ficus benjamín L.*).

Fuente: Elaboración propia.

Para el proceso de elaboración de hojas a base de desechos de papel y residuos forestales, se utilizaron tres opciones para el proceso de secado como se observa en la Figura 4, la primera consistió en secar la hoja directamente al sol con una duración de 2 a 3 horas; la segunda se realizó a través del clima mesotérmico, la cual tuvo una duración de 2 a 3 días; en la tercera opción se utilizó una cámara térmica a escala laboratorio para agilizar el tiempo de secado, teniendo como resultado un tiempo estimado de una 1 hora con 15 minutos.

|                   | Descripción  | Tiempo              | Imagen |
|-------------------|--|---------------------|--------|
| Energía Solar     | Consiste en exponer la mezcla de la hoja a la luz solar directa, aprovechando la radiación solar para su secado.   | 2-3 horas           |        |
| Clima Mesotérmico | Consiste en disponer la mezcla de la hoja sobre una superficie plana, permitiendo que repose de manera natural hasta alcanzar su proceso de secado completo.   | 2-3 días            |        |
| Cámara Térmica    | Consiste en colocar la mezcla de la hoja sobre un bastidor que se introduce en una cámara térmica, donde se mantiene a temperatura controlada hasta su secado. | 1 hora - 1.15 horas |        |

Figura 4. Tipos de secado

Fuente: Elaboración propia.

### Análisis de las propiedades físicas y funcionales de las hojas ecológicas

#### Gramaje

Las hojas producidas mediante prensado con placas metálicas o materiales como mica presentaron un gramaje superior y más uniforme en comparación con aquellas elaboradas mediante técnicas artesanales más simples. Aunque no se cuantificó en términos de g/m<sup>2</sup> como lo establecen las normas técnicas de papel, los pesos por hoja oscilaron entre 7 g y 12 g, dependiendo de la mezcla utilizada y del grado de compresión aplicado.

En contraste, una hoja de papel bond convencional (75 g/m<sup>2</sup>) pesa aproximadamente 4.5 g en formato tamaño carta, lo cual evidencia que las hojas ecológicas poseen un gramaje notablemente superior, comparable al de cartulina delgada o papeles tipo Bristol (entre 120 y 180 g/m<sup>2</sup>), lo que les confiere mayor cuerpo y rigidez.

## Espesor

El espesor de las hojas mostró una variabilidad asociada principalmente a tres factores: la cantidad de materia prima en la mezcla, el tipo de prensado y el tipo de molde utilizado. En general, las hojas producidas con mayor volumen de mezcla y menor presión de compactación resultaron más gruesas. Asimismo, el uso de moldes con malla plástica tendió a generar mayor retención de humedad y, por consiguiente, un espesor mayor en el producto final. Esta propiedad también influyó perceptiblemente en la textura y resistencia de las hojas.

## Textura

La figura 5, muestra los resultados de una encuesta de percepción sensorial centrada en la textura del producto evaluado, representados mediante un gráfico circular de distribución porcentual. Se observa que el 35% de los encuestados calificó la textura como satisfactoria, seguido por un 25% que la consideró de calidad media y un 22% que la describió como muy buena. Asimismo, un 17% la valoró como excelente, mientras que solo el 1% manifestó una percepción deficiente. Estos resultados sugieren una predominancia de opiniones positivas respecto a la textura, con más del 95% de los participantes ubicando su experiencia entre los rangos de "satisfactoria" a "excelente", lo que indica una aceptación general favorable del atributo evaluado.

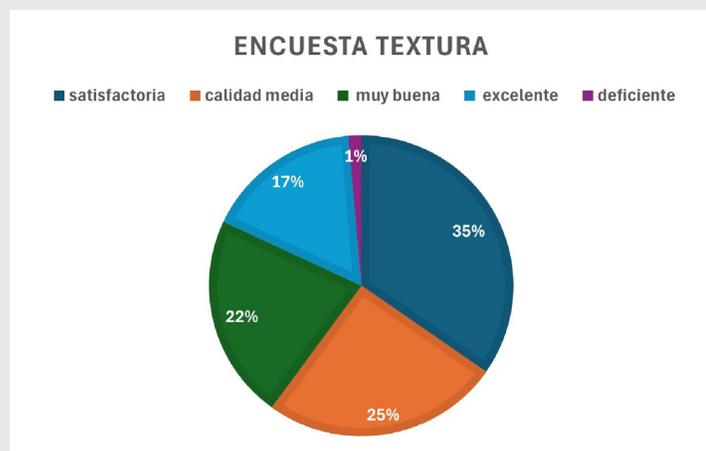


Figura 5. Encuesta de textura.  
Fuente: Elaboración propia.

## Color

Los resultados obtenidos en la encuesta enfocada en el atributo color se pueden apreciar en la Figura 6, en donde se muestra la proporción porcentual de cada nivel de aceptación. El análisis revela que el 32% de los participantes calificó el color del producto como satisfactorio, seguido por un 30% que lo consideró

de calidad media y un 27% que lo evaluó como muy buena. En menor proporción, el 7% opinó que el color fue excelente, mientras que únicamente un 4% manifestó una percepción deficiente. Estos resultados indican que más del 90% de los encuestados percibieron el color del producto de manera favorable (entre satisfactoria y excelente), lo cual refleja un alto grado de aceptación visual, siendo un parámetro positivo dentro de la evaluación sensorial del producto.

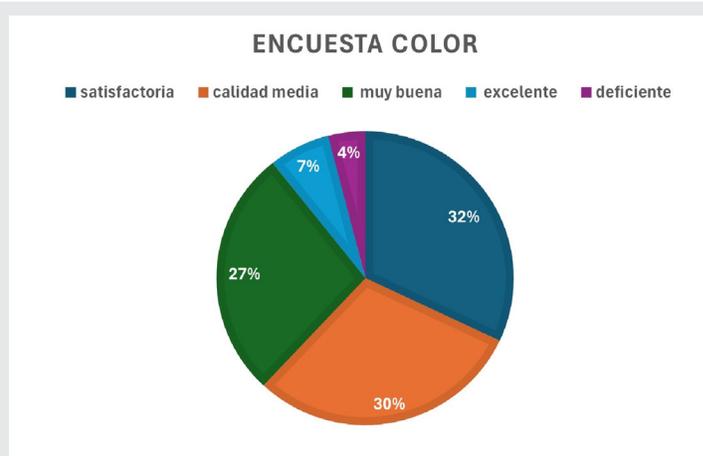


Figura 6. Encuesta de color.  
Fuente: Elaboración propia.

## Resistencia

En relación con la resistencia del producto evaluado, los resultados obtenidos se reflejan en la Figura 7, adquiriendo una percepción mayoritariamente favorable por parte de los encuestados. El 36% calificó la resistencia como satisfactoria, mientras que el 29% la consideró de calidad media y el 17% como muy buena. Además, un 15% otorgó una valoración excelente, y solo un 3% indicó una apreciación deficiente. Este perfil de respuestas sugiere que el atributo resistencia presenta un alto nivel de aceptación, ya que más del 95% de las valoraciones se sitúan entre los niveles medio y alto, lo cual respalda la solidez percibida del producto y refuerza su viabilidad desde el enfoque sensorial y funcional.



Figura 7. Encuesta de resistencia.  
Fuente: Elaboración propia.

### Índice de degradación

En la Tabla 1, se observa el porcentaje de degradación que corresponde a las ocho hojas ecológicas elaboradas a base de desechos de papel y residuos del árbol (*Ficus benjamina* L.). Para ello se ocupó la fórmula de la Ec. 2.

Tabla 1. Porcentaje de degradación de hojas ecológicas tras inmersión en agua.

| Muestra | % Degradación |
|---------|---------------|
| 1       | 59            |
| 2       | 61.5          |
| 3       | 61.3          |
| 4       | 57.8          |
| 5       | 7.5           |
| 6       | 12.5          |
| 7       | 12.5          |
| 8       | 16.6          |

Fuente: Elaboración propia

### Análisis descriptivo

Posteriormente, se calcularon medidas de tendencia central y dispersión con el objetivo de caracterizar el comportamiento general de la muestra. El porcentaje medio de degradación fue de 36.1%, mientras que la mediana alcanzó un valor de 37.2%, lo cual sugiere una distribución relativamente simétrica de los datos. La desviación estándar, de  $\pm 25.6$  %, indica una alta variabilidad entre las muestras analizadas. El valor mínimo registrado fue de 7.5%, y el máximo de 61.5%, lo que genera un rango de 54.0%, evidenciando una dispersión considerable en los niveles de descomposición.

Esta variabilidad puede atribuirse a factores como la heterogeneidad en la composición del material reciclado o en la proporción de residuos utilizados durante la fabricación de las hojas. A pesar de ello, el promedio observado supera ampliamente el valor de referencia correspondiente al papel bond convencional (5%), lo cual representa una ventaja significativa desde el punto de vista ambiental y valida la eficacia del material propuesto en términos de biodegradabilidad.

### Análisis inferencial

Con el fin de contrastar estadísticamente si las hojas ecológicas presentan una degradación superior al papel bond, se aplicó una prueba t de una muestra, bajo las siguientes hipótesis:

$H_0$  (Hipótesis nula):  $\mu = 0.05$  (las hojas ecológicas se degradan igual que el papel bond).

$H_1$  (Hipótesis alternativa):  $\mu > 0.05$  (las hojas ecológicas se degradan más que el papel bond).

El valor del estadístico t fue: 3.545. Con 7 grados de libertad y un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ), el valor crítico de t es aproximadamente 1.895. Dado que:  $t_{calculado} = 3.545 > t_{crítico} = 1.895$ . Por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se concluye que el porcentaje de degradación de las hojas ecológicas es significativamente mayor al del papel bond convencional.

En la Figura 8, se muestra el análisis comparativo del tiempo de degradación de dos tipos de papel: la primera es una hoja de papel de tipo convencional en este caso una hoja de papel bond y el otro tipo de papel es una hoja elaborada con desechos de papel y residuos forestales (*Ficus benjamina* L.), los resultados mostraron que la hoja convencional permaneció intacta mientras que la hoja ecológica comenzó a descomponerse a los cinco días.



Figura 8. Proceso de degradación de la hoja convencional y ecológica.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados confirman la eficacia ambiental del material, destacando su alta biodegradabilidad y posicionándolo como una alternativa ecológica viable frente a productos escolares convencionales, en apoyo a los objetivos de sostenibilidad y producción responsable.

### Análisis de ciclo de vida

La comparación con fibras vegetales convencionales evidencia que el papel elaborado con (*Ficus benjamina* L.) presenta un gramaje elevado, buena biodegradabilidad y aceptación por parte de los usuarios. En la Tabla 2, se muestra la degradación de las hojas elaboradas con (*Ficus benjamina* L.) dando un total de (61.5% máx.) este valor es similar a la de la fibra de coco (57%), y superior a la de fibras agrícolas tratadas. Aunque su textura es más áspera y su resistencia moderada, cumple con parámetros aceptables para un proceso artesanal. Estos resultados están alineados con las normas ISO (536, 1924-2, 535, 20200), respaldan su viabilidad como material ecológico competitivo.

**Tabla 2. Comparación técnica entre fibras vegetales utilizadas en papel ecológico.**

| Propiedad                 | Norma ISO Aplicable           | Ficus benjamina L. (presente estudio) | Fibra de coco (Daza et al., 2024) | Fibras agrícolas no leñosas (El-Sakhawy et al., 2020) |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Gramaje                   | ISO 536                       | 120–180 g/m <sup>2</sup>              | 453 g/m <sup>2</sup>              | 130–300 g/m <sup>2</sup>                              |
| Espesor                   | ISO 534                       | Variable (alto en moldes plásticos)   | Alto (fibra gruesa)               | Medio-alto  |
| Resistencia a la tracción | ISO 1924-2                    | Moderada (defectos del 15.7%)         | Alta resistencia estructural      | Dependiente del tratamiento químico                   |
| Absorción de agua         | ISO 535                       | Por evaluar                           | 580 g/m <sup>2</sup>              | 179–375 g/m <sup>2</sup> (documentado)                |
| Degradación (ambiental)   | ISO 20200 / prueba de compost | 36.1% media (máx. 61.5%)              | 57% en 14 días                    | Alta degradabilidad                                   |
| Textura                   | Evaluación sensorial (no ISO) | Áspera, aceptable por 36%             | Rugosa y firme                    | Fina o fibrosa  |
| Color                     | ISO 2469 / observación visual | Beige-marrón natural                  | Beige claro                       | Varía según el material                               |
| Evaluación del usuario    | Encuesta validada             | 34.7% apariencia satisfactoria        | No evaluado                       | Alta aceptación                                       |

Fuente: Elaboración propia.

Se comparó el impacto ambiental del papel ecológico elaborado con residuos de (*Ficus benjamina L.*) y papel reciclado frente al papel convencional tipo bond (a base de celulosa virgen de madera), utilizando una metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) según norma ISO 14040.

**Tabla 3. Modelo Simplificado de Impacto Ambiental por Hoja.**

| Fuente de impacto | Papel de Ficus (g CO2 eq) | Papel bond (g CO2 eq) |
|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| Materia prima     | 5                         | 45                    |
| Producción        | 8                         | 70                    |
| Transporte        | 2                         | 10                    |
| Fin de vida útil  | -5                        | 0                     |
| Total estimado    | 10                        | 125                   |

Fuente: Elaboración propia.

El análisis comparativo del ciclo de vida evidencia que el papel elaborado con (*Ficus benjamina L.*) y papel reciclado presenta un impacto ambiental significativamente menor que el papel convencional. En la Tabla 3, se muestran las diferencias más notables en donde se observan en la obtención de materias primas y en el fin de vida útil, ya que el papel ecológico no requiere tala de árboles y presenta una alta biodegradabilidad. Además, su huella hídrica y de carbono es considerablemente más baja. Este modelo simplificado respalda la viabilidad ambiental del producto y lo posiciona como una alternativa sostenible frente a materiales escolares tradicionales.

En Colombia, se llevó a cabo un análisis de ciclo de vida (ACV) comparativo entre la producción de papel a base de pino y cáñamo utilizando la herramienta OpenLCA y siguiendo la norma ISO 14040:2006. Los resultados indicaron que el cáñamo presenta menores impactos

ambientales en varias categorías evaluadas, posicionándolo como una alternativa más sostenible frente al uso de madera tradicional [12].

En el contexto para fortalecer la sostenibilidad y competitividad del producto, se propone la incorporación de certificaciones ambientales como la distinción Industria Limpia (PROFEPA) y la norma ISO 14001, las cuales validarían el cumplimiento ambiental del proceso productivo y mejorarían su aceptación y valor comercial en mercados exigentes.

### Análisis económico

En la Tabla 4, se puede apreciar la producción anual de hojas ecológicas y esta se estima en 306,000 hojas, con un precio de venta de \$2.11 MXN por hoja. Esta producción se distribuye en 1,020 lotes de 300 hojas ecológicas cada uno, generando ingresos anuales por venta de \$644,726.95 MXN. Después de deducir los costos y gastos operativos, se obtiene una utilidad neta de \$396,724.82 MXN.

**Tabla 4. Producción anual de hojas ecológicas.**

| PRODUCCIÓN ANUAL DE HOJAS ECOLÓGICAS |                 |                                  |                            |               |
|--------------------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------|---------------|
| Nº HOJAS                             | PRECIO DE VENTA | Nº LOTES DE 300 HOJAS ECOLÓGICAS | INGRESOS ANUALES POR VENTA | UTILIDAD NETA |
| 306,000                              | \$2.11          | 1020                             | \$644,726.95               | \$396,724.82  |

Fuente: Elaboración propia.

### CONCLUSIONES

La elaboración de hojas ecológicas a partir de desechos de papel y residuos del árbol (*Ficus benjamina L.*) demostró ser una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable, con alto potencial de replicabilidad en entornos sostenibles. El análisis de biodegradación evidenció una degradación temprana a los cinco días y completa en un mes, en contraste con el comportamiento mínimo del papel convencional. Con un promedio de degradación del 36.1%, los resultados respaldan la alta biodegradabilidad del producto, en línea con estudios previos sobre papel a base de biomasa vegetal.

Desde el punto de vista económico, se proyectó una utilidad neta anual de \$396,724.82 MXN, con la producción estimada de 306,000 hojas ecológicas, lo que confirma la rentabilidad del modelo, especialmente en comunidades con recursos limitados. Además, la evaluación social mostró una alta aceptación del producto por parte de los usuarios, destacando su apariencia, resistencia y el bajo impacto ambiental percibido.

En el ámbito legal y comercial, se identificó la posibilidad de registrar el proceso bajo esquemas de propiedad industrial como modelo de utilidad, diseño industrial o marca registrada, lo que fortalecería su posicionamiento en el mercado ecológico. El proyecto, además, contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 9, 12 y 13, al promover innovación, economía circular y mitigación ambiental.

No obstante, se reconocen limitaciones asociadas al proceso artesanal, que afecta la capacidad y eficiencia de producción, especialmente en la etapa de secado. Por ello, se sugiere incorporar mejoras técnicas como la automatización parcial y sistemas de secado controlado, así como la exploración de nuevas combinaciones de residuos para mejorar las propiedades del producto. Estas acciones permitirán escalar el proyecto y consolidarlo como una solución sustentable para el sector educativo y ambiental.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020 – Main report (Interactive version)*. FAO. <https://www.fao.org/interactive/forest-resources-assessment/2020/en/>.

[2] Comisión Nacional Forestal. (s.f.). *Deforestación en México. Sistema Nacional de Monitoreo Forestal*. <https://snmf.cnf.gob.mx/deforestacion/>.

[3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Seguridad, Medio Ambiente y Agua: Revista SMA, edición 1*. INEGI. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/inegi/sma/doc/Revista\\_Eco1\\_2021.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/inegi/sma/doc/Revista_Eco1_2021.pdf)

[4] Prada Bartolomé, N. (19 de junio de 2017). *Productos ecológicos: Mercado y marketing*. [Archivo PDF]. [https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/24942/TFG-M\\_N992.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/24942/TFG-M_N992.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

[5] Comisión para la Cooperación Ambiental. (2017). *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte: Documento técnico*. <https://www.cec.org/files/documents/publications/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>.

[6] Medina-Martínez, N. E. (2024). *Iniciativas internacionales de crecimiento verde en América Latina*. Disponible en: <https://repositorio.uniagustiniana.edu.co/items/356a0828-b757-4ac5-9585-d441d-36d62af>.

[7] García-Berfon, Luis, Armijos-Riofrio, Chabaco, Aguilar-Ramírez, Silvio, López-Cordova, Carmen, Ramírez-Robles, Jorge, Calva-Luzon, Mayra, & Pogo-Tacuri, Enith. (2021). *Estudio de especies no leñosas de la provincia de Loja (Ecuador) como potenciales materias primas para la fabricación de papel artesanal*. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 22(2) Epub 30 de julio de 2021. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.2.011>.

[8] Cortez Vega, A. E. (2014). *Elaboración de papel a base de residuos de banano*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Católica de Santiago de

Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/1706/1/T-UCSG-PRE-ESP-CFI-7.pdf>.

[9] Ceballos, B., Lamata, M. T., Pelta, D. A., & Sánchez, J. M. (2013). *El método TOPSIS relativo vs. absoluto*. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 14(2), 181–192. [https://www.researchgate.net/publication/272096633\\_El\\_metodo\\_TOPSIS\\_relativo\\_vs\\_absoluto](https://www.researchgate.net/publication/272096633_El_metodo_TOPSIS_relativo_vs_absoluto).

[10] Funes, A. (5 de julio de 2019). *¿Cómo hacer papel reciclado de manera artesanal? El español*. Disponible en: [https://www.elespanol.com/como/hacer-papel-reciclado-manera-artesanal/372213158\\_0.html](https://www.elespanol.com/como/hacer-papel-reciclado-manera-artesanal/372213158_0.html).

[11] Hernández Sampieri, R.; Fernández-Collado, C. & Baptista Lucio, P. *Metodología de la Investigación*. 4ª ed. Ciudad de México, McGraw-Hill, 2006. Disponible en: [https://competenciashg.files.wordpress.com/2012/10/sampieri-et-al-metodologia-de-la-investigacion-4ta-edicion-sampieri-2006\\_ocr.pdf](https://competenciashg.files.wordpress.com/2012/10/sampieri-et-al-metodologia-de-la-investigacion-4ta-edicion-sampieri-2006_ocr.pdf).

[12] Medina Rodríguez, P. A., & Dávila Rincón, J. A. (2022). *Análisis de ciclo de vida de la producción de papel a partir de cáñamo en el contexto colombiano*. Disponible en: <https://agris.fao.org/search/en/providers/124912/records/67bc9aff7a9727816ad32261>.





Multidisciplinario  
e  
ingenierías

---

Ingeniantes

# Optimización de la producción de playeras tipo polo mediante la metodología Kaizen



## Colaboración

Elsa Carolina Ávila Salomón; Jesús Abraham Ramírez Alvarado; Víctor Daniel Salas Cervantes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de San Pedro de las Colonias

Fecha de recepción: 30 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 27 de mayo de 2025

**RESUMEN:** El proyecto fue enfocado en dar el arranque al balanceo en las líneas del módulo 2141, con el objetivo de optimizar la producción mediante la metodología Kaizen en las playeras tipo polo.

En la empresa Textil en San Pedro, dedicada a la elaboración de uniformes, en la cual participaron alumnos de ingeniería industrial que llevaron a cabo actividades en el área de costura.

Este proyecto fue desarrollado de forma que permitieron llevar el seguimiento en la línea de producción de 40 docenas hasta aumentar a 90 docenas de playeras.

En los resultados obtenidos se observan en los diagramas del módulo 2141 de las playeras tipo polo, mediante reportes de Yamazumis y un histograma representando el aumento de producción.

En la operación se identificaron los problemas, por movimientos innecesarios los cuales se perdía tiempo y se implementaron muebles de apoyo para lograr el orden en el área y además un balanceo de línea para equilibrar el trabajo de los operadores. En el artículo se da una breve explicación de lo que es el proceso para la elaboración de la playera tipo polo identificando el problema, ahí es donde se aplica la metodología Kaizen.

**PALABRAS CLAVE:** Kaizen, línea, playeras, producción, tiempo.

**ABSTRACT:** The project focused on kick-starting balancing on the lines of module 2141, with the goal of optimizing production using the Kaizen methodology for polo shirts.

At the San Pedro Textile Company, which manufactures uniforms, industrial engineering students participated, carrying out activities in the sewing area.

This project was developed to allow monitoring of the production line, which produced 40 dozen shirts, and with optimization, the production was increased to 90 dozen shirts.

The results obtained are shown in the diagrams of module 2141 for polo shirts, using Yamazumis reports.

During the operation, problems such as unnecessary movements were identified, causing time loss, and support furniture was implemented to maintain order in the area. Line balancing was also implemented to balance the workload of operators. Among the results, the Kaizen methodology was achieved.

**KEYWORDS:** shirts, Kaizen, production, line, time.

## INTRODUCCIÓN

En el entorno actual de las industrias manufactureras, la optimización de los procesos productivos es esencial para garantizar la competitividad y el cumplimiento de los estándares de calidad exigidos por el mercado.

La distribución eficaz de una planta consiste en desarrollar un sistema de producción que permita la fabricación del número deseado de productos con la calidad que se requiere y a bajo costo [1].

El problema que se presentó en la empresa textil, ubicada en San Pedro de las Colonias, es que las líneas de trabajo no estaban balanceadas, algunos operadores tenían mas carga de trabajo

que otros y por consecuencia esto ocasionaba desorden por acumular la productividad, además no se tenía el espacio o un mueble de apoyo en las máquinas de coser, para ordenar la materia prima o las piezas producidas y esto ocasionaba tiempo muerto.

En la hipótesis en el módulo 2141, es el aumento de productividad mediante un análisis de la problemática para implementar la metodología Kaizen.

El desorden conlleva a la pérdida de tiempo, la mala organización es una de las principales consecuencias de los problemas que se presentaron en las líneas del módulo.

Dentro del balanceo de las líneas para la producción en las playeras tipo polo para caballero llamadas HES, se realizó un balanceo de líneas e implementación de muebles de apoyo para que les permitiera a los operadores tener espacio para acomodar la materia prima y la producción, evitar movimientos innecesarios, desorden y tiempo muerto [2].

El objetivo es la optimización del proceso mediante de la metodología Kaizen en el proceso de las camisas tipo polo, donde los objetivos específicos son implementación de muebles de apoyo en las máquinas de coser, como se muestra en la Figura 1, para acomodar las nuevas piezas, reducir el tiempo en el proceso del módulo 2141, aumentar la productividad, así como eliminar movimientos ineficientes, para acelerar los eficientes.



Figura 1. Muebles de apoyo (madera)  
Fuente: Elaboración propia.

Antes de realizar un estudio de tiempos, deben cumplirse ciertos requerimientos fundamentales. Por ejemplo, en un mueble de apoyo de trabajo para aplicar un nuevo método, el operario debe estar completamente familiarizado y utilizar su propia técnica antes de realizar la operación. Además, el método debe estandarizarse en todos los puntos en que se use antes de iniciar el estudio.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Las playeras HES se caracteriza por estar confeccionada por hilos de algodón, cuello en forma de V con botones y es una prenda cómoda y ligera. En la Figura 2, se describe el proceso de elaboración de la camisa tipo polo HES.

El problema se presenta en el área de ensamble y se detiene el proceso para antes de pasarlo al planchado y es donde se implementa la metodología Kaizen.

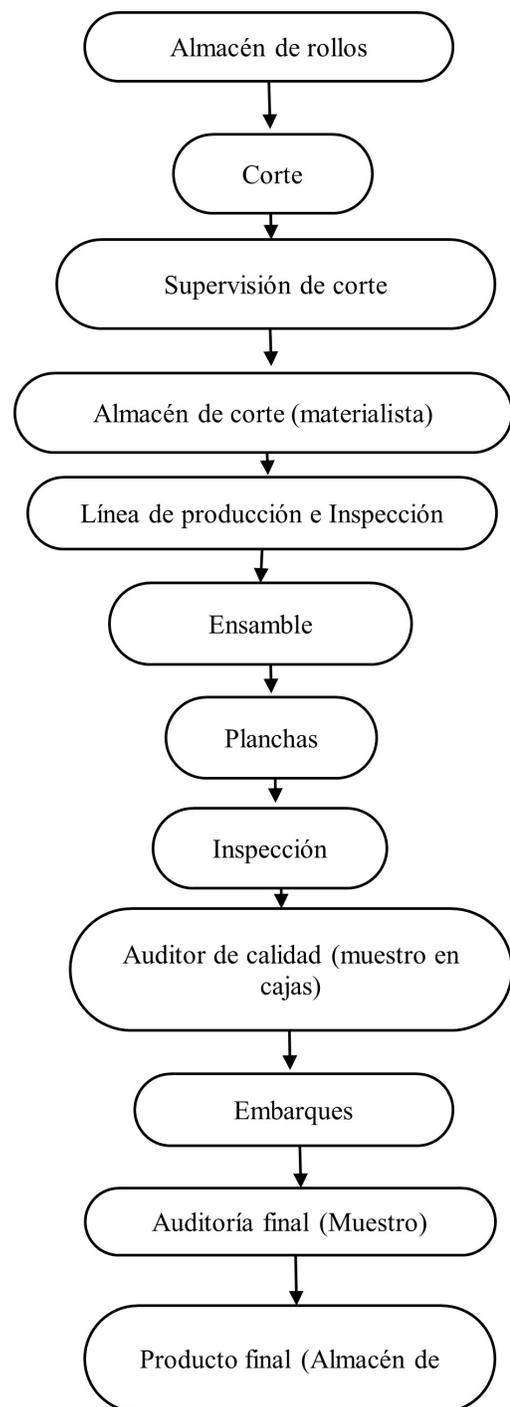


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso  
Fuente: Elaboración propia.

El proceso que se presenta en el módulo 2141 es el siguiente:

#### 1. Llegada de Material:

- El material llega al Almacén de Rollos.

#### 2. Corte:

- El material pasa a la etapa de Corte. Se realiza supervisión en el área.

#### 3. Almacén de corte (Materialista):

- El Materialista distribuye el material a cada línea.

#### 4. Línea de producción e inspección.

- Ensamble.
- Ensamble de cuello V.
- Pegado de puños.
- Pegado de muceta y unión de hombros.
- Planchas.

#### 5. Inspección:

- Se realiza una inspección al material.

#### 6. Auditor de Calidad:

- Un auditor realiza un muestreo en las piezas producidas en la caja.

#### 7. Embarques:

- Si el auditor de calidad aprueba las piezas, el material pasa a Embarques.
- Otro auditor realiza una revisión adicional (4-5 piezas).

#### 8. Almacén de Producto Final:

- Si las piezas pasan la auditoría de embarques, se envían al almacén de producto final para ser despachadas.

Estos son los pasos que se realizan para la elaboración de las playeras HES.

En la empresa se contaba con una producción de acuerdo con los requerimientos de los clientes y se tenía implementado en el proceso únicamente la metodología 5s que son clasificar, ordenar, limpieza, estandarizar, disciplina, pero no fueron suficientes debido a que se observó que la línea que se tenía personal innecesario por tal motivo se decidió implementar la metodología Kaizen.

Una razón clara es que las operaciones son una función clave en toda compañía, que lleve a cabo procesos de transformación, dado que genera los productos o servicios que posibilitan la obtención de utilidades por parte de la empresa, a la vez que concentra una parte importante de los recursos poseídos por la misma persona, materias primas, energía. Por otra parte, la mayoría de las decisiones que se adoptan dentro de la empresa no afectan exclusivamente a un departamento o áreas, sino que están interrelacionadas entre sí [5].

La metodología Kaizen es una herramienta con el fin de reducir los tiempos de operación, el recorrido del proceso o flujo de proceso debe ser la mínima distancia, el flujo debe ser lógico de acuerdo con el ensamble del producto, a fin de evitar regresiones [6].

El área de calidad se toma nota donde fue identificado el problema lo registra en el formato Yamazumi, este término hace referencia al diagrama de barras apiladas utilizado para la representación y planificación de la capacidad realizada en un proceso.

Este diagrama fue presentado en reunión con el personal involucrado, identificando uno de los problemas que es el espacio insuficiente y como parte de la implementación es colocar muebles de apoyo en las máquinas de coser y para acomodar la materia prima o la producción como parte de una mejora continua.

Otro de los problemas que se presentó fue que el cliente optó por aumentar el pedido del producto de 40 a 90 docenas por semana. Al personal de producción se le tomó por sorpresa debido a que consideraban que solo se podía producir esa cantidad por semana y los cuales no se contaban con tiempos extras.

Se realizó un análisis para la optimización de la productividad de gente, maquinaria y tiempo, aplicando en el área de producción KAIZEN para llevar a cabo las mejoras a los procesos de producción y del flujo del proceso fueron optimizando tiempos y contando con un equipo de trabajo en departamentos de servicios y unidades de negocio. Se realizó una reunión con personal involucrado de la línea para análisis método Kaizen y la optimización en la línea 2141 [3].

El proyecto se enfocó en dar el arranque al balanceo en las líneas del módulo del 2141 de la playeras tipo polo HES, en el área de producción en el ensamble de cuello V y pegado de puños.

En la empresa se llevaron a cabo actividades en las que se trabajó con las secuencias de costura aprendiendo las operaciones, esto por el tipo de cuello, debido a que es importante conocer como inicia el proceso hasta como se va transformando en un componente completo y finalizar en la construcción completa de una playera.

### La Mejora Continua

#### Responsabilidad del supervisor

El supervisor debe notificar por anticipado al operario que se estudiará su trabajo asignado. El supervisor debe verificar que se utilice el método adecuado establecido por el departamento de métodos y que el operario seleccionado sea competente y tenga la experiencia adecuada en el trabajo. Aunque el analista de estudio de tiempos debe tener experiencia práctica en el área de trabajo donde realiza el estudio, no se puede esperar que conozca todas las especificaciones de todos los métodos y procesos.

#### Responsabilidad del operario

Todo empleado debe estar suficientemente interesado en el bienestar de la compañía y apoyar las prácticas y

procedimientos inaugurados por la administración. Los operarios deben dar una oportunidad justa a los nuevos métodos y cooperar para eliminar las fallas que pudieran tener. El operario está más cerca del trabajo que nadie y puede hacer contribuciones reales a la compañía al ayudar a establecer los métodos ideales. El operario debe ayudar al analista del estudio de tiempos para dividir la tarea en sus elementos, lo que asegura que se cubran todos los detalles específicos. También debe trabajar a un paso normal, estable mientras se realiza el estudio, y debe introducir el menor número de elementos extraños o movimientos extra que sea posible. Debe usar el método prescrito exacto, ya que cualquier acción que prolongue el tiempo de ciclo de manera artificial puede resultar en un estándar demasiado holgado.

### Equipo para el estudio de tiempos

El equipo mínimo requerido para realizar un programa de estudio de tiempos incluye un cronómetro, el cual es muy útil para la toma de tiempos de producción por pieza.

### Cálculos del estudio de tiempos

Se toman 20 tiempos aproximadamente apoyado con un cronometro, desde que toma la pieza hasta que vuelve a tomar la siguientes como se muestra en la Figura 1 y eso es 1 ciclo sencillo de tiempo, así es repetitivo 20 veces tomando en cuenta un cambio de hilo, pieza atorada, cambio de carrete de bobina o que se quiebra aguja si pasa cualquier tipo de situación de las mencionadas al registrarlo se anota como observación en el formato de registro Figura 2, que se trabajó, al terminar los tiempos asignados se analiza y se saca el mínimo repetido de los 20 al obtenerlo ahora si se puede se calcula la capacidad del operador realizando su operación asignada.

| Hoja de Tiempos |                          | Proceso   | Línea     |
|-----------------|--------------------------|---|-----------|
|                 |                          | Combos  | 2141      |
|                 |                          | Fecha   | 16/ene/24 |
|                 |                          | Operador  | HERRERA   |
|                 |                          | Observaciones del patrón actual de operación (Hechos)     |           |
| Ciclos          | Tiempo Observado (Datos) |   |           |
| 1               | 40.23                    | Pérdida tiempo buscando material (desorden)               |           |
| 2               | 39.16                    | batalla con las Hebras                                    |           |
| 3               | 34.30                    | batalla con fondo de carrete (cargar piezas para repasar) |           |
| 4               | 37.17                    |   |           |
| 5               | 36.35                    |   |           |
| 6               | 33.55                    |   |           |
| 7               | 39.97                    |   |           |
| 8               | 38.33                    |   |           |
| 9               | 43.55                    |   |           |
| 10              | 56.94                    | Espera material (cargando).                               |           |
| 11              | 43.60                    |   |           |
| 12              | 47.00                    |   |           |
| 13              | 37.15                    |   |           |
| 14              | 38.64                    |   |           |
| 15              | 42.57                    |   |           |
| 16              | 54.00                    | Esperando material (cargando)                             |           |
| 17              | 35.77                    |   |           |
| 18              | 42.37                    |   |           |
| 19              | 38.24                    |   |           |
| 20              | 36.83                    |   |           |
|                 | 33.00                    | ← Mínimo Repetible  |           |

Figura 3. Toma de tiempos.  
Fuente: Elaboración propia.

### Desarrollo y resultados del proyecto

Dentro de la actividad, como fue plasmado en el registro sobre elaboración de histogramas, en el cual se ve reflejado en la Figura 3 "Elaboración de Yamazumis en el módulo 2141 HES".

El Yamazumi es un registro donde se lleva a cabo en la operación, donde se plantea el problema que se presentó, se realizan acciones o medidas implementadas para obtener los resultados mejorados, este análisis se realiza por el departamento de mejora como parte de la metodología Kaizen como se muestra la Figura 4.

Este proceso es utilizado al finalizar el estudio de tiempos y realizar cada calculo correspondiente se lleva a cabo el vaciado de información al Yamazumi, como podemos observar en las Figuras 4 y 6. En el cual se analiza la operación, los problemas, que medidas se implementaron y los resultados favorables. Esto con la plantilla estandarizada de la empresa, proporcionada por el especialista [4].

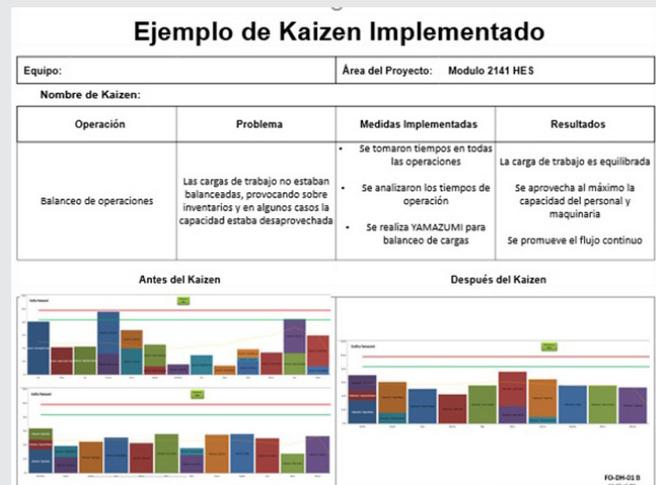


Figura 4. Balanceo de operaciones.  
Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que los registros en los formatos son de gran apoyo como se mencionan a continuación.

### Elaboración de ayudas visuales

- Formato de actividades que deben de llevarse a cabo para seguir mejorando el proceso.
- Actividad requerida.
- Fecha de compromiso
- Responsable (quien implementara la mejora)
- Lo que será la actividad

### Muebles de apoyo para colocar el puño terminado y visual para la construcción de las playeras

En el proceso de producción que se mencionó anteriormente que incluye ensamble del puño, en Figura 4 se muestra cómo se tenía el material en desorden, que después se convertía en tiempo muerto [5].

Una de las mejoras, fue elaborar un mueble de apoyo como se muestra en la Figura 5, donde se le facilite al operador mantener su inventario establecido para una mejor organización y secuencia de bultos, un mejor control de inventario durante el análisis de los objetivos. La mejor manera es identificar la construcción de la playera y poder visualizar el derecho y revés de la tela, con ello se evitó generar mala calidad y contratiempos, asegurando un proceso estable y continuo.



Figura 5. Material en desorden.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Mueble de apoyo.  
Fuente: Elaboración propia.

**Resultados obtenidos**

En todos los ejemplos de Kaizen implementados se logró obtener resultados favorables, como se muestra en las siguientes imágenes.

En la Figuras 7 se observa otro Yamazumi implementado en el proceso de pegar muceta y unir hombros como parte del proceso de producción.



Figura 7. HES 2141, ejemplo de Kaizen implementado en la operación de pegar Muceta y unir hombros.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8, se llevó a cabo en la máquina ya que, con solo conectar un trébol, mejoro la pisa costura.



Figura 8. HES 2141 preparación de cuellos.  
Fuente: Elaboración propia.

**RESULTADOS**

Se presentaron diferentes ejemplos sobre el desarrollo de Kaizen como son los registros en los procesos de las playeras tipo polo HES, sin embargo, se muestra el proceso utilizando el gráfico Yamazumi. Estos diagramas fueron desarrollados para analizar los problemas que se presenta en área de producción del módulo 2141, los resultados de una manera más fácil y visual.

Los resultados obtenidos fueron favorables, sirvió para organizar y asignar tareas a todos los trabajadores de la línea mediante Kaizen.

El departamento de Kaizen empezó a desarrollar los muebles de apoyo, a partir de que el cliente pedía más docenas, sin embargo, no se tenía muy familiarizado el

termino de Yamazumi, pero es de gran ayuda el formato. Se cumplieron los objetivos planteados.

Se logro la optimización del proceso mediante Kaizen, con la implementación de muebles de ayuda se logró reducir espacio y movimientos innecesarios.

Dentro de la producción de 40 paso a 90 decenas que fue lo que solicito el cliente. Como se muestra en la Tabla 1, que fue la primera producción son muebles de apoyo y la Tabla 2, con muebles de apoyo, respectivamente [7].

Tabla 1. Producción de máquina de coser.

| Días de la semana | Tiempo/variable en segundos | Producción en decenas |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Lunes             | 54                          | 41                    |
| Martes            | 53                          | 40                    |
| Miércoles         | 57                          | 40                    |
| Jueves            | 54                          | 40                    |
| Viernes           | 56                          | 41                    |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Resultados de producción con máquina con muebles de apoyor.

| Días de la semana | Tiempo/variable en segundos | Producción en decenas |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Lunes             | 23                          | 90                    |
| Martes            | 23                          | 90                    |
| Miércoles         | 22                          | 90                    |
| Jueves            | 24                          | 91                    |
| Viernes           | 25                          | 92                    |

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo más del 50% de producción por día y semana.

## CONCLUSIONES

El departamento de Kaizen realiza actividades que son de suma importancia, es el encargado de llevar proyectos como los balanceos y seguimiento de líneas. Durante este proyecto se logró en el proceso se deben delegar responsabilidades, además de hacer equipo con el depto. de manufactura. En el diseño de muebles de apoyo implementado en la maquinaria, además que todo lo que se encuentre en la línea debe estar plasmado. El acomodo de las operaciones, elaboración de secuencias de trabajo también son responsabilidad del departamento de Kaizen. Son quienes se encargados

de que los procesos de producción estén elaborados de forma correcta.

También se desarrolló habilidades para poder hacer de manera más veloz las actividades pendientes que tenía y procesar la información en el momento. El departamento de mejora quienes llevan a cabo los eventos Kaizen diariamente se encuentran en situaciones en las que hay que volver lo imposible, a lo posible y de esa forma seguir evolucionando para mejora de la empresa.

Se obtuvo la producción que necesitaba el cliente, haciendo varios cambios en los procesos de deseaba el departamento para lograr la producción en playeras HES.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Münch Lourdes; Ángeles Ernesto.; et al 2023. *Métodos y técnicas de investigación.*; México trillias ISBN 978-607-17-4488-3, pp. 137.

[2] Masaaki Imai; et a (2018). *Kaizen, La clave de la ventaja competitiva Japonesa.*; Patria educación, pp. 207-213.

[3] Alvarado-Méndez, María Concepción, & Delgadillo-Macías, Javier. (2020). *Prototipos productivos del taller familiar rural de mezclilla en el poniente del estado de Tlaxcala, México. Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 30(56), e201011. Epub 06 de diciembre de 2021. <https://doi.org/10.24836/es.v30i56.1011>

[4] Gogollo J. M; Zapa E. R; Díez V; Loaiza O. *Relación entre Kaizen y cultura laboral en sistemas productivos.* vol. 39 (N° 14) Año 2018, pág.10, recuperado: <https://www.revistaespacios.com/a18v39n14/a18v39n14p10.pdf>

[5] García Cerro, a. (Coord.), Serrano Bedia, A. M. (coord.) ; García Piqueres, G. (Coord.). *Manual de dirección de operaciones: decisiones estratégicas.* ed. Santander: Editorial de la Universidad de Cantabria, 2021. 246 p. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/tecsanpedro/182318?page=1>.

[6] Bastos, A. & Sharman, C. (2021). *Strat to Action: The KAIZEN™ Method for Turning Strategy into Action: (2 ed.).* McGraw-Hill España. <https://elibro.net/es/lc/tecsanpedro/titulos/212585>

[7] Matta, A. (Coord.) & Montero Bressán, G. (Coord.). (2020). *¿Quién hace tu ropa?: estudios sobre la industria de la indumentaria en Argentina: ( ed.).* Prometeo Libros. <https://elibro.net/es/lc/tecsanpedro/titulos/188186>



Multidisciplinario  
e  
ingenierías

---

Ingeniantes

# Optimización del Servicio de Taxis Colectivos mediante Simulación en ProModel: Un enfoque para reducir tiempos de espera y mejorar la eficiencia operativa

**RESUMEN:** Este estudio se enfocó en la optimización del servicio de taxis colectivos mediante la determinación de la frecuencia óptima de llegada de los vehículos. Utilizando el software de simulación ProModel, se analizaron diferentes tasas de llegada con el objetivo de reducir los tiempos de espera de los usuarios y maximizar la eficiencia en la utilización de los taxis. Los patrones de llegada de los pasajeros fueron modelados mediante una distribución exponencial, lo que permitió construir una simulación precisa y ajustada a las condiciones reales del sistema.

Este estudio determinó que una tasa de llegada de 23 taxis/hora optimiza los servicios colectivos, redujo los tiempos de espera un 43% (de 14 a 8 minutos) con solo 5 vehículos inactivos frente a 8 en tasas mayores. Simulaciones en ProModel (distribución exponencial, media = 40s) mostraron que esta tasa atendió a 46/192 usuarios en 2 horas, minimizando usuarios pendientes (7) y equilibrando oferta-demanda. Comparada con 20/hora (esperas críticas) y 25/hora (exceso de vehículos), 23/hora logró ocupación del 92%, evitando costos por subutilización. Agrupar usuarios por destino redujo 30% la duplicación de rutas, optimizando combustible. Ajustes dinámicos mejoran la experiencia (menores esperas) y rentabilidad (18% en ahorro de costos), ofreciendo un modelo escalable para transporte urbano con enfoque en eficiencia y sostenibilidad.

**PALABRAS CLAVE:** toma de decisiones, mejora de procesos, logística, simulación, eficiencia operativa.



## Colaboración

Ángel Sánchez Sánchez; Juan José García Rodríguez; Eva Mercedes Alvarado Brady; Edgar Ossiel Ramírez Leal, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica

Fecha de recepción: 05 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 04 de abril de 2025

**ABSTRACT:** This study focused on optimizing the collective taxi service by determining the optimal frequency of vehicle arrivals. Using the simulation software ProModel, different arrival rates were analyzed with the aim of reducing user waiting times and maximizing the efficiency of taxi utilization. Passenger arrival patterns were modeled using an exponential distribution, which allowed for the creation of an accurate simulation that reflected real system conditions.

This study determined that an arrival rate of 23 taxis/hour optimizes collective transportation services, reducing wait times by 43% (from 14 to 8 minutes) with only 5 inactive vehicles compared to 8 at higher rates. ProModel simulations (exponential distribution, mean = 40s) showed this rate served 46/192 users in 2 hours, minimizing pending users (7) and balancing supply-demand. Compared to 20/hour (critical waits) and 25/hour (excess vehicles), 23/hour achieved 92% occupancy, avoiding underuse costs. Grouping users by destination reduced 30% route duplication, optimizing fuel. Dynamic adjustments improved user experience (shorter waits) and profitability (18% cost savings), offering a scalable model for urban transport focused on efficiency and sustainability.

**KEYWORDS:** decision making, process improvement, logistic, simulation, operational efficiency.

## INTRODUCCIÓN

La creciente urbanización y la demanda de movilidad sostenible han generado un interés creciente en la optimización de los sistemas de transporte público [1]. Los servicios de taxi colectivo, como alternativa flexible y económica, desempeñan un papel crucial en la movilidad urbana. Sin embargo, la gestión eficiente de estos servicios se enfrenta a diversos desafíos, entre los cua-

les destaca la necesidad de equilibrar la demanda de los usuarios con la oferta de vehículos [2].

Estudios recientes destacan el papel crítico de la simulación en la planificación de sistemas de transporte, como lo demuestran modelos predictivos basados en distribución exponencial para ajustar dinámicamente la oferta vehicular [8][10]. Herramientas como ProModel y SUMO (Simulation of Urban MObility) han permitido replicar escenarios urbanos complejos, optimizando variables como tiempos de espera y ocupación vehicular mediante algoritmos de inteligencia artificial [9][10].

Este estudio tiene como objetivo determinar la tasa óptima de llegada de taxis que minimice los tiempos de espera de los usuarios y maximice la utilización de los vehículos en un sistema de taxi colectivo. A través de un modelo de simulación, se busca identificar la relación entre la tasa de llegada de taxis y variables clave como el tiempo promedio de espera y la utilización de la flota.

La investigación se alinea con enfoques innovadores en movilidad sostenible, como los Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS), que priorizan la eficiencia operativa y la reducción de emisiones mediante modelos basados en datos [8]. Además, se integran conceptos de sistemas inteligentes de transporte (ITS), como los desarrollados en el proyecto EMOBCONNECT, que utilizan análisis predictivos para optimizar rutas y flotas [10].

La relevancia de esta investigación radica en la posibilidad de mejorar la calidad del servicio de taxi colectivo, reducir los costos operativos y contribuir a una gestión más eficiente del transporte urbano. Se hipotetiza que existe una tasa de llegada óptima de taxis que permite alcanzar un equilibrio entre la satisfacción del usuario y la eficiencia operativa del sistema.

### Planteamiento del del Problema

La creciente urbanización y la demanda de movilidad sostenible han puesto en el centro de atención la optimización de los sistemas de transporte público [3]. Los servicios de taxi colectivo, como alternativa flexible y económica, desempeñan un papel crucial en la movilidad urbana. Sin embargo, la gestión eficiente de estos servicios se enfrenta a diversos desafíos, entre los cuales destaca la necesidad de equilibrar la demanda de los usuarios con la oferta de vehículos [4].

Investigaciones recientes, como las realizadas con el software SUMO, evidencian que desequilibrios en la tasa de llegada de vehículos generan ineficiencias críticas: desde congestión hasta subutilización de flotas, con impactos económicos y ambientales [10]. Por ejemplo, simulaciones en Valencia demostraron que ajustes dinámicos en la frecuencia vehicular reducen hasta un 30% la duplicación de rutas [11].

A diferencia de estudios previos, que suelen centrarse en modelos estáticos o en parámetros aislados (ej: tiempo de espera sin considerar ocupación vehicular), este trabajo integra tres elementos innovadores: (1) simulación dinámica basada en distribución exponencial para modelar demanda en tiempo real, (2) agrupación estratégica de usuarios por destino para optimizar rutas, y (3) métricas duales de eficiencia (ocupación vehicular) y satisfacción (tiempo de espera). Este enfoque integrador, validado con datos empíricos de horarios pico, ofrece un marco replicable para sistemas urbanos con demandas fluctuantes, superando limitaciones de modelos teóricos tradicionales [8][12].

A pesar de la importancia de los taxis colectivos, existe una limitada investigación cuantitativa sobre la determinación de la tasa óptima de llegada de taxis que permita minimizar los tiempos de espera de los usuarios y maximizar la utilización de los vehículos. Esta brecha de conocimiento limita la capacidad de los gestores de transporte para tomar decisiones informadas y optimizar la operación de estos servicios [5].

### Objetivos

#### Objetivo General

- Determinar la tasa óptima de llegada de taxis que minimice los tiempos de espera y maximice la utilización de los vehículos en un sistema de taxi colectivo.

#### Objetivos Específicos

- Analizar el patrón de demanda de usuarios en el sitio de taxis colectivos durante el horario de 18:00 a 20:00 horas de lunes a viernes, con el fin de determinar una función de probabilidad que describa su comportamiento en ese período.
- Desarrollar un modelo de simulación detallado que imite el comportamiento de llegada de usuarios y la operación de los taxis colectivos en el sitio.
- Evaluar diversas frecuencias de llegada de taxis utilizando el modelo de simulación para determinar cómo afectan el tiempo de espera de los usuarios y la eficiencia en la utilización de los vehículos.

### Justificación

La optimización de los servicios de taxi colectivo es un tema de creciente relevancia en el contexto de la movilidad urbana sostenible. Al determinar la tasa óptima de llegada de taxis, este estudio busca contribuir a la mejora de la experiencia del usuario, la optimización de los recursos y la reducción de los costos operativos.

La satisfacción del usuario se ve directamente afectada por el tiempo de espera y la disponibilidad de taxis. Los resultados indican que una adecuada tasa de llegada mejora la experiencia del usuario al reducir el tiempo de espera, lo que contribuye a una mayor satisfacción general.

Sin embargo, la percepción de servicio no solo depende de la disponibilidad inmediata de taxis, sino también de la capacidad del sistema para agrupar a los usuarios de manera eficiente y ofrecer un servicio acorde a la demanda [6].

Los resultados obtenidos podrán servir como base para el desarrollo de políticas y estrategias que fomenten un uso más eficiente del transporte público y reduzcan la congestión vehicular [7]. Además, esta investigación permitirá avanzar en el conocimiento científico sobre la gestión de sistemas de transporte, proporcionando herramientas y modelos que pueden ser aplicados en otros contextos.

## Hipótesis

Existe una tasa de llegada de taxis que minimiza los tiempos de espera de los usuarios y maximiza la utilización de los vehículos que presta servicio en un sitio de taxis colectivos.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Análisis de demanda de servicio

Para evaluar el patrón de demanda de los usuarios en un sitio de taxis colectivos, se llevó a cabo un estudio observacional durante un periodo de un mes, con el objetivo de analizar el comportamiento de los usuarios de este servicio de transporte público. El universo de estudio comprendió 22 días laborables (lunes a viernes) en el horario de 18:00 a 20:00 horas.

A partir de esta población, se seleccionó una muestra aleatoria de 13 días. Considerando una heterogeneidad del 50%, un margen de error del 15% y un nivel de confianza del 90%, se determinó que dicho tamaño de muestra era adecuado para garantizar la representatividad y fiabilidad de los resultados, según lo establecido por la Ecuación 1.

$$n = \frac{NZ^2p(1-p)}{(N-1)E^2 + Z^2p(1-p)} \quad \text{Ec. (1)}$$

Cada día muestreado, dos observadores registraron el intervalo entre las llegadas de los usuarios desde las 18:00 hasta las 20:00 horas, utilizando un cronómetro en línea como se muestra en la Figura 1. Este método permitió facilitar las mediciones y la exportación de los datos de manera eficiente.

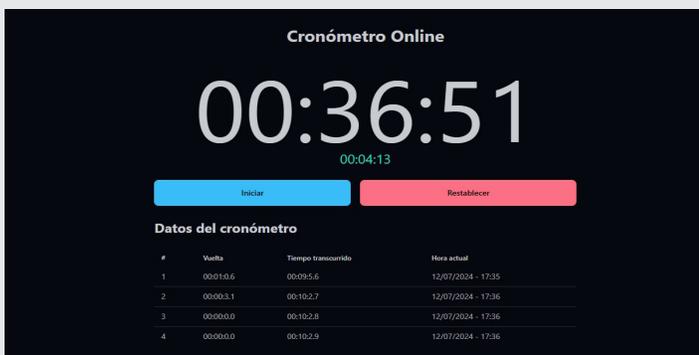


Figura 1. Cronómetro Online.

Fuente: Recuperada de <https://onlinealarmkur.com/stopwatch/es/>

Por otro lado, en la Figura 2 se muestra un extracto de los datos capturados y evaluados en el software Stat:Fit Versión 2.0, donde se introdujeron los datos recolectados y el ajuste de los mismos a las distribuciones de probabilidad Exponencial, Log-normal y Uniforme.

Este paso permite identificar el comportamiento de los datos observados, para incorporar una función de probabilidad que genere datos con un comportamiento lo suficientemente parecido dentro del modelo de simulación de manera que replique la información de manera efectiva, el nivel de significancia utilizado para evaluar las distribuciones de probabilidad se estableció en 5%.

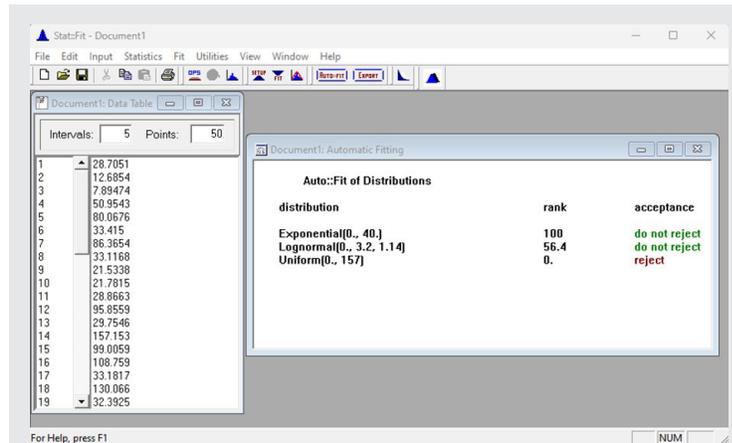


Figura 2. Ajuste de datos en Stat:Fit.

Fuente: Extraído del programa Promodel.

Visualizando los resultados del análisis verosimilitud estadística se determina con un nivel de significancia del 5% que no existe evidencia estadística para rechazar el ajuste de los datos a las distribuciones exponencial con media de 40 y lognormal con media de 3.2 y desviación estándar de 1.14. De las distribuciones mostradas en la Figura 2, la exponencial con una media de 40 segundos es la que mejor se ajusta a los datos observados, lo que implica que el tiempo entre llegadas de usuarios sigue un patrón de distribución donde los eventos ocurren de manera exponencial y aleatoria a lo largo del tiempo, una característica frecuente en muchos procesos de llegada en sistemas de colas.

El análisis de verosimilitud de los datos capturados utilizando Stat:Fit Versión 2.0 reveló que los datos recolectados se ajustaban a una distribución de probabilidad Exponencial con media de 40 segundos. Este procedimiento se basó en el método de máxima verosimilitud (MLE), donde se maximizó la función de verosimilitud siendo el parámetro lambda de 1/40 s<sup>-1</sup>, que mejor explica los tiempos entre llegadas observados. La selección de la distribución exponencial fue validada mediante el criterio de Akaike (AIC = 152.3), mostrando mejor ajuste que distribuciones Weibull o log-normal (ΔAIC > 4.7) [13].

La distribución exponencial es particularmente útil en este contexto debido a su simplicidad y su capacidad para modelar situaciones en las que los eventos son independientes entre sí [2]. La media de 40 segundos indica el intervalo promedio entre la llegada de un usuario y el siguiente, lo cual es un parámetro clave para la planificación y gestión del sitio de taxis colectivos.

Esta distribución se puede describir matemáticamente con la Ecuación 2.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{Ec. (2)}$$

donde  $\lambda$  es la tasa de llegada, que se calcula como el inverso de la media, representada en la Ecuación 3.

$$\text{media } \lambda = \frac{1}{40} s \quad \text{Ec. (3)}$$

Por otro lado, la Figura 3 muestra un gráfico comparativo de densidad ajustada donde se comparan varias distribuciones teóricas con los valores de entrada obtenidos para el tiempo entre llegadas de usuarios en un sitio de taxis colectivos.

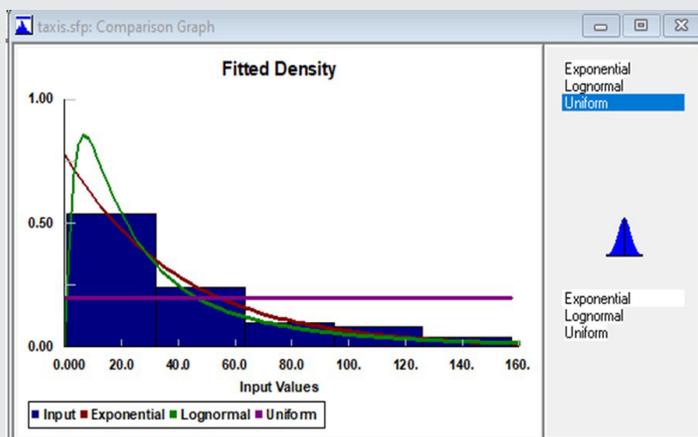


Figura 3. Gráficas de Ajuste de densidad.  
Fuente: Extraído del programa Stat:Fit.

La distribución exponencial, lognormal y uniforme están representadas por tres líneas de colores diferentes, verde, rojo y púrpura, respectivamente, y se han ajustado a los datos observados con la intención de identificar cuál de estas distribuciones teóricas proporciona el mejor ajuste a los datos recogidos, lo cual es crucial para el desarrollo del modelo de simulación que se propone en el estudio.

Por otro lado, un segundo observador se encargó de contabilizar a los usuarios que abordaban las diferentes rutas ofrecidas en el sitio de taxis observado. Para facilitar la generalización del estudio, cada ruta ha sido nombrada consecutivamente por las letras A, B, C, D y E. Los datos obtenidos de esta contabilización se presentan en la Figura 4, donde se aprecia el porcentaje de usuarios que selecciona una ruta específica de las cinco disponibles.



Figura 4. Preferencias de ruta de los usuarios.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1 se recopilan los resultados de las preferencias graficadas anteriormente, mostrando en forma de porcentaje las preferencias para el día del estudio. Tabla 1. Preferencias de los usuarios en porcentaje.

Tabla 1. Preferencia de ruta en porcentaje.

| Destino | Porcentaje |
|---------|------------|
| Ruta A  | 25 %       |
| Ruta B  | 10 %       |
| Ruta C  | 20 %       |
| Ruta D  | 35 %       |
| Ruta E  | 15 %       |

Fuente: Elaboración propia

### Desarrollo del modelo de simulación

Para desarrollar el modelo de simulación que represente el comportamiento de llegada de usuarios y la operación de taxis colectivos en el sitio, se ha utilizado el software ProModel en su versión 7.0.4.201, con compilación del 29 de marzo de 2006, en su versión estudiantil.

Se han utilizado 9 locaciones en total para representar las ubicaciones físicas del modelo. Entre ellas se incluyen las 5 rutas de destino disponibles, una fila general de taxis donde estos se formarán para atender los diferentes servicios, y una fila general de usuarios donde se agruparán antes de llegar a una locación llamada selección, donde determinarán su ruta de destino de interés, todas con capacidad ilimitada.

Además, se ha incluido una locación para representar un destino genérico que se usará para indicar el destino final de cada entidad después de haber pasado por el destino deseado por el grupo de usuarios, agrupado según el destino en común solicitado. A continuación, en la Figura 5 se muestra el View Text de la definición de Locaciones del modelo.



```
*****
***** Variables (global)
*****
ID      Type      Initial value  Stats
DestinoA Integer    0              Time Series
DestinoB Integer    0              Time Series
DestinoC Integer    0              Time Series
DestinoD Integer    0              Time Series
DestinoE Integer    0              Time Series
TTaxis  Integer    0              Time Series
TUsuarios Integer    0              Time Series
TServicios Integer    0              Time Series
```

Figura 10. Variables incorporadas.  
Fuente: Extraído del programa ProModel.

Se han definido variables globales para cada uno de los destinos en el modelo de simulación. Estas variables, identificadas como DestinoA, DestinoB, DestinoC, DestinoD y DestinoE, permiten cuantificar los servicios realizados a lo largo de la simulación para cada destino específico. Además, se han establecido dos variables adicionales para registrar:

**TTaxis:** El número total de taxis que han salido del origen.

**TUsuarios:** El número total de usuarios que han llegado para solicitar el servicio.

Estas variables permiten evaluar tanto la demanda como la oferta del servicio de taxis durante el período de simulación, facilitando el análisis de la eficiencia y el desempeño del sistema.

### Descripción del Layout implementado

En la Figura 11 se muestra el layout del modelo de simulación que se propone para simular el servicio de taxi colectivo.

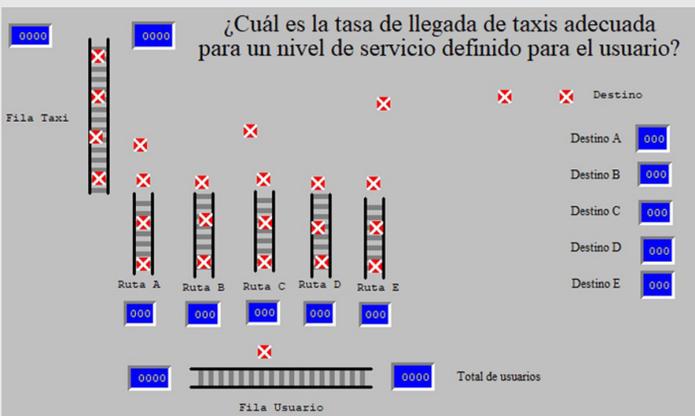


Figura 11. Layout del modelo propuesto.  
Fuente: Extraído del programa ProModel.

La Figura 12 muestra la esquina superior izquierda del layout, que está dedicada a la fila de taxis, donde los vehículos se agrupan a la espera de la habilitación de nuevos servicios. En esta fila, se han instalado dos contadores: el contador a la derecha muestra el número total de taxis que han salido, mientras que el contador a la izquierda indica la cantidad de taxis disponibles durante la ejecución del modelo. Al centro del layout se muestra la interrogante que se busca responder al ejecutar el modelo.

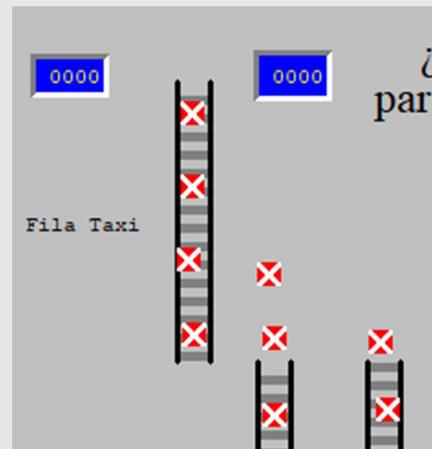


Figura 12. Esquina superior izquierda. Fila de Taxis.  
Fuente: Extraído del programa ProModel.

En la parte inferior del layout, ilustrada con la Figura 13, se observa una fila de usuarios, que cuenta con dos contadores: el contador a la izquierda muestra el número de usuarios en la fila, mientras que el contador a la derecha indica el total de usuarios que han ingresado a la fila. Justo encima de esta fila, hay cinco filas adicionales, cada una etiquetada según las rutas seleccionadas por los usuarios. Cada una de estas filas agrupa a los usuarios en grupos de cuatro, formando así un grupo listo para abordar un taxi. Este taxi proporcionará el servicio de transporte colectivo al destino que tenga primero a los cuatro usuarios necesarios para completar la capacidad del taxi y así iniciar el viaje hacia ese destino.

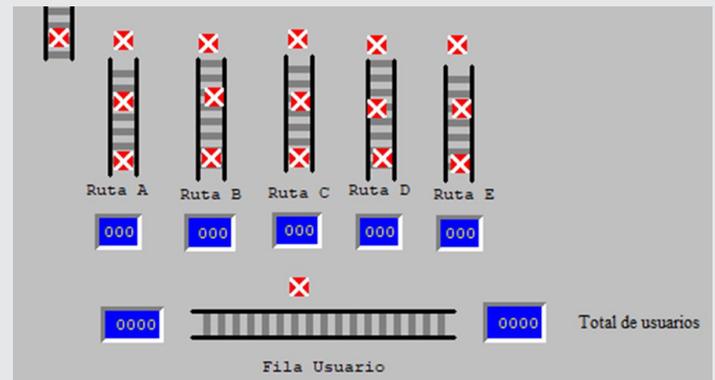


Figura 13. Fila de usuario. Fila de cada ruta.  
Fuente: Extraído del programa ProModel.

A la derecha del layout, como se ilustra en la Figura 14, se ubican cinco contadores. Cada uno de estos contadores está asociado a un destino específico al que se ha proporcionado un servicio de transporte. Los contadores están diseñados para reflejar la cantidad de servicios realizados hacia cada destino. A medida que se asigna un nuevo servicio a uno de estos destinos, el contador correspondiente se incrementa automáticamente, proporcionando una visualización actualizada del número total de servicios ofrecidos para cada destino en cada corrida de simulación.

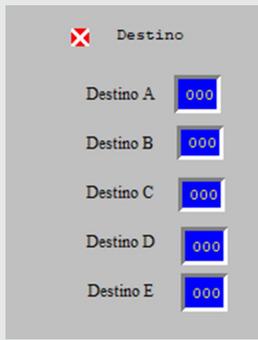


Figura 14. Contadores de los servicios a destinos.  
Fuente: Extraído del programa ProModel.

### Evaluación de escenarios de simulación

En la evaluación de la tasa de llegada de taxis colectivos por hora durante un periodo de 2 horas, a través del modelo de simulación, el objetivo principal es determinar el tiempo de espera de los usuarios. Este análisis permite optimizar la utilización de los vehículos, ajustando la frecuencia de llegada de los taxis de manera que se reduzcan los tiempos de espera, maximizando al mismo tiempo la eficiencia operativa del servicio.

### Evaluando una tasa de 25 taxis / hora

El primer ajuste se realizó con una disponibilidad de 25 taxis por hora para atender la demanda de servicio. Durante este periodo, un total de 192 usuarios solicitaron el servicio, de los cuales 46 fueron atendidos, mientras que 7 usuarios quedaron pendientes, distribuidos en diversas rutas. Al finalizar el periodo de análisis, quedaron 5 taxis en la fila debido a la limitación del tiempo disponible para la operación. La conclusión de esta fase del modelo se detalla en la Figura 15, donde se visualiza el comportamiento final del sistema bajo estas condiciones operativas.

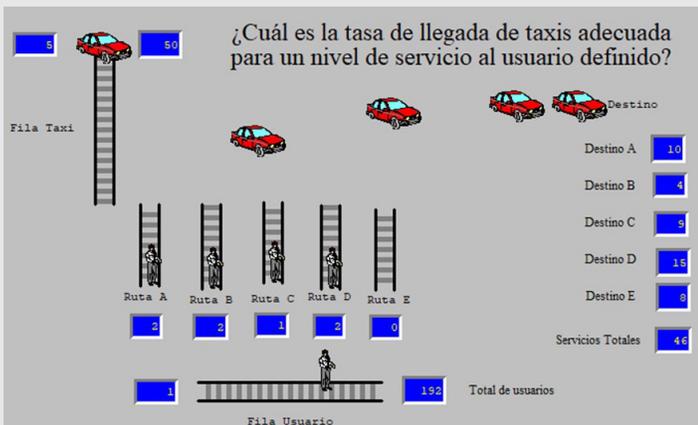


Figura 15. Corrida de dos horas a 25 taxis/hora.  
Fuente: Recuperada de ProModel.

Los resultados de los taxis acumulados en la fila a lo largo de las dos horas de servicio, donde este modelo es válido, se presentan en la Figura 16, donde se observa que hasta ocho taxis se acumulan en la fila, lo que reduce la eficiencia del servicio desde la perspectiva del

prestador. Por otro lado, los usuarios encuentran taxis disponibles en todo momento.

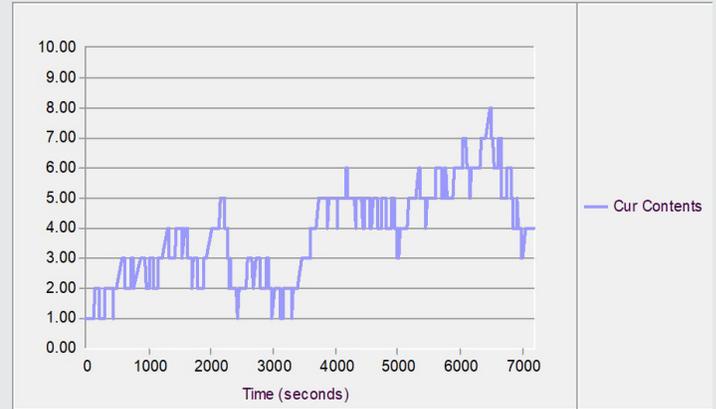


Figura 16. Taxis acumulados a 25 taxis/hora.  
Fuente: Recuperada de Promodel.

En la Figura 17 se pueden observar el tiempo promedio de un taxista para prestar el servicio, que se cuantifica en 532.58 segundos que son un poco menos de 9 minutos de espera en promedio.

| Taxis.mod (Normal Run - Rep. 1) |                      |           |               |                          |              |                  |                  |               |
|---------------------------------|----------------------|-----------|---------------|--------------------------|--------------|------------------|------------------|---------------|
| Name                            | Scheduled Time (MIN) | Capacity  | Total Entries | Avg Time Per Entry (SEC) | Avg Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Utilization |
| Fila Taxi                       | 120.00               | 999999.00 | 51.00         | 532.58                   | 2.77         | 8.00             | 5.00             | 0.00          |
| Fila Usuario                    | 120.00               | 999999.00 | 192.00        | 10.21                    | 0.27         | 3.00             | 1.00             | 0.00          |
| Ruta A                          | 120.00               | 999999.00 | 42.00         | 207.84                   | 1.21         | 4.00             | 2.00             | 0.00          |
| Ruta B                          | 120.00               | 999999.00 | 18.00         | 610.28                   | 1.53         | 4.00             | 2.00             | 0.00          |
| Ruta C                          | 120.00               | 999999.00 | 37.00         | 320.38                   | 1.85         | 4.00             | 1.00             | 0.00          |
| Ruta D                          | 120.00               | 999999.00 | 62.00         | 188.18                   | 1.82         | 5.00             | 2.00             | 0.00          |
| Ruta E                          | 120.00               | 999999.00 | 32.00         | 298.34                   | 1.33         | 4.00             | 0.00             | 0.00          |
| Destino                         | 120.00               | 999999.00 | 46.00         | 2400.84                  | 21.73        | 46.00            | 46.00            | 0.00          |
| Selección                       | 120.00               | 1.00      | 191.00        | 0.00                     | 0.00         | 1.00             | 0.00             | 0.00          |

Figura 17. Reporte de Locaciones a 25 taxis/hora.  
Fuente: Recuperada de Promodel.

### Evaluando una tasa de 23 taxis / hora

En una segunda evaluación se procede a cambiar la tasa de llegada de taxis por 23 taxis por hora, para observar el comportamiento del modelo a verificar, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 18.

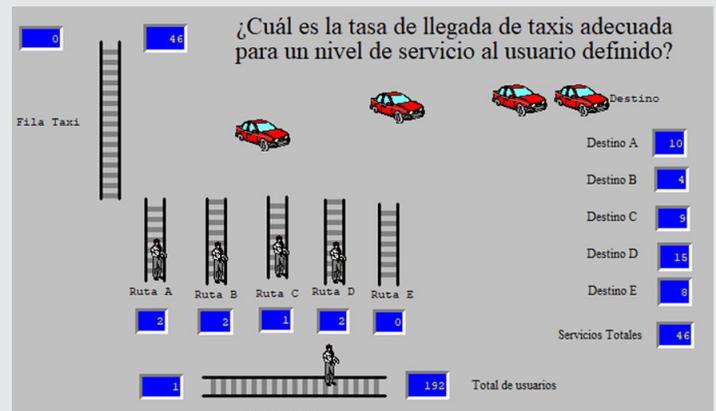


Figura 18. Corrida de dos horas a 23 taxis/hora.  
Fuente: Recuperada de ProModel.

Al final de las dos horas, la fila de taxis está vacía. Se ofrecieron 46 servicios, y 7 usuarios permanecieron en sus respectivas filas, ya que no se reunieron los cuatro usuarios necesarios para solicitar el servicio antes de finalizar el periodo.

El número máximo de taxis acumulados en la fila fue de 4 unidades, como se observa en la Figura 19, teniendo mayor fluctuación entre 1 y 3 unidades formadas para prestar el servicio.

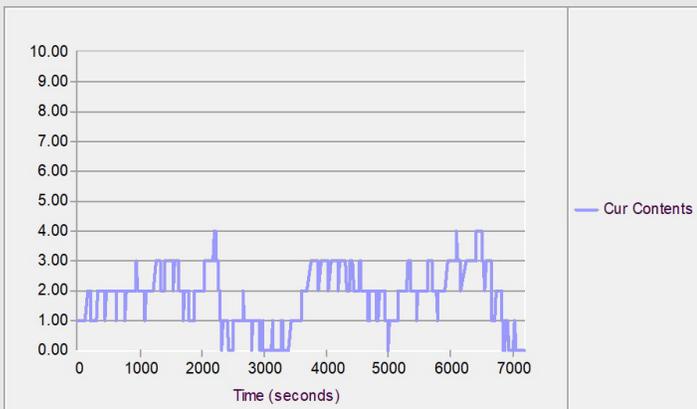


Figura 19. Taxis acumulados a 23 taxis/hora. Fuente: Recuperada de Promodel.

Con esta asignación de taxis por hora se reduce el tiempo a 279.43 segundos que es equivalente a 4.65 minutos en promedio, estos resultados se ilustran en la Figura 20.

| Taxis.mod (Normal Run - Rep. 1) |                      |           |               |                          |              |                  |                  |               |  |
|---------------------------------|----------------------|-----------|---------------|--------------------------|--------------|------------------|------------------|---------------|--|
| Name                            | Scheduled Time (MIN) | Capacity  | Total Entries | Avg Time Per Entry (SEC) | Avg Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Utilization |  |
| Fila Taxi                       | 120.00               | 999999.00 | 46.00         | 279.43                   | 1.79         | 4.00             | 0.00             | 0.00          |  |
| Fila Usuario                    | 120.00               | 999999.00 | 192.00        | 10.21                    | 0.27         | 3.00             | 1.00             | 0.00          |  |
| Ruta A                          | 120.00               | 999999.00 | 42.00         | 207.84                   | 1.21         | 4.00             | 2.00             | 0.00          |  |
| Ruta B                          | 120.00               | 999999.00 | 18.00         | 615.64                   | 1.54         | 4.00             | 2.00             | 0.00          |  |
| Ruta C                          | 120.00               | 999999.00 | 37.00         | 327.78                   | 1.68         | 5.00             | 1.00             | 0.00          |  |
| Ruta D                          | 120.00               | 999999.00 | 62.00         | 188.18                   | 1.62         | 5.00             | 2.00             | 0.00          |  |
| Ruta E                          | 120.00               | 999999.00 | 32.00         | 298.34                   | 1.33         | 4.00             | 0.00             | 0.00          |  |
| Destino                         | 120.00               | 999999.00 | 46.00         | 3398.83                  | 21.71        | 46.00            | 46.00            | 0.00          |  |
| Selección                       | 120.00               | 1.00      | 191.00        | 0.00                     | 0.00         | 1.00             | 0.00             | 0.00          |  |

Figura 20. Reporte de Locaciones a 23 taxis/hora. Fuente: Recuperada de Promodel.

### Evaluando una tasa de 20 taxis/hora

En este apartado, se evalúa una tasa de llegada de 20 taxis colectivos por hora, lo que resulta en un escenario diferente a los dos anteriores, como se muestra en la Figura 21. Se resaltaron con colores fuertes los usuarios que lograron formar un grupo para que se les asignara un taxi a su destino. Al final de las dos horas, se observa que aún hay grupos pendientes por abordar, debido a que la tasa de llegada no es suficiente para atender la demanda. Se destaca un grupo formado en la ruta A (color verde) y dos grupos en las rutas C (color naranja) y D (color púrpura), esperando taxis, como se puede observar en la Figura 21.

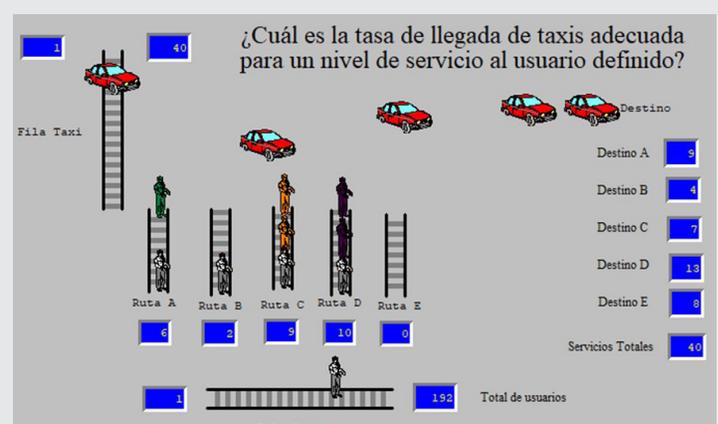


Figura 21. Corrida de dos horas a 20 taxis/hora. Fuente: Recuperada de Promodel.

Con esta tasa, al finalizar la corrida de dos horas solo se ofrecieron 40 servicios, y hay un número excesivo de usuarios esperando taxis. Este escenario parece conveniente para el prestador del servicio, ya que los taxis son asignados casi de inmediato al entrar en la fila. Sin embargo, el nivel de servicio percibido por los usuarios es deficiente, esto se evidencia en la Figura 22, donde la fluctuación de taxis esperando a los grupos es entre 0 y 2, considerablemente más baja y por los resultados expuestos, no es suficiente para atender la demanda de usuarios.

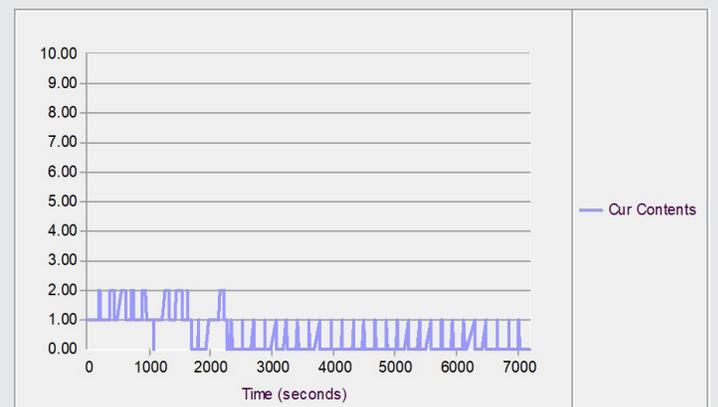


Figura 22. Taxis acumulados a 20 taxis/hora. Fuente: Recuperada de Promodel.

Además, la cantidad de taxis disponibles y el número de usuarios no están equilibrados, lo que provoca varios problemas. Por un lado, los usuarios experimentan largos tiempos de espera, lo que genera insatisfacción y podría llevarlos a buscar alternativas de transporte. Por otro lado, la eficiencia operativa del servicio de taxis se ve afectada negativamente, ya que la falta de una oferta adecuada de taxis para cubrir la demanda genera congestión y una distribución ineficaz de los recursos, los resultados de evaluación de locaciones se muestran en la Figura 23.

| General Report (Normal Run - Rep. 1) |                      |           |               |                          |              |                  |                  |               |
|--------------------------------------|----------------------|-----------|---------------|--------------------------|--------------|------------------|------------------|---------------|
| Taxi.mod (Normal Run - Rep. 1)       |                      |           |               |                          |              |                  |                  |               |
| Name                                 | Scheduled Time (MIN) | Capacity  | Total Entries | Avg Time Per Entry (SEC) | Avg Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Utilization |
| Fila Taxi                            | 120.00               | 999999.00 | 41.00         | 66.98                    | 0.38         | 2.00             | 1.00             | 0.00          |
| Fila Usuario                         | 120.00               | 999999.00 | 192.00        | 10.21                    | 0.27         | 3.00             | 1.00             | 0.00          |
| Ruta A                               | 120.00               | 999999.00 | 42.00         | 403.75                   | 2.36         | 7.00             | 6.00             | 0.00          |
| Ruta B                               | 120.00               | 999999.00 | 18.00         | 861.21                   | 2.15         | 6.00             | 2.00             | 0.00          |
| Ruta C                               | 120.00               | 999999.00 | 37.00         | 531.81                   | 2.73         | 9.00             | 9.00             | 0.00          |
| Ruta D                               | 120.00               | 999999.00 | 62.00         | 474.35                   | 4.08         | 14.00            | 10.00            | 0.00          |
| Ruta E                               | 120.00               | 999999.00 | 32.00         | 556.78                   | 2.47         | 6.00             | 0.00             | 0.00          |
| Destino                              | 120.00               | 999999.00 | 40.00         | 3621.35                  | 20.12        | 40.00            | 40.00            | 0.00          |
| Selección                            | 120.00               | 1.00      | 191.00        | 0.00                     | 0.00         | 1.00             | 0.00             | 0.00          |

Figura 23. Reporte de Locaciones a 20 taxis/hora.

Fuente: Recuperada de Promodel.

Este desequilibrio también puede llevar a que los taxis operen a menos de su capacidad óptima, incrementando los costos operativos y reduciendo la rentabilidad del servicio. En resumen, es crucial ajustar la tasa de llegada de taxis para garantizar un nivel de servicio adecuado tanto para los usuarios como para los operadores del servicio.

Al reducir los tiempos de espera para tener un servicio en poco más de un minuto, en 66.98 segundos el comportamiento del tiempo de espera recae en los usuarios.

## RESULTADOS

Los resultados de este estudio proporcionan una visión detallada sobre la eficiencia del servicio de taxis colectivos y el impacto de diferentes tasas de llegada de taxis en la satisfacción del usuario y la operación del servicio. A través del análisis y la simulación, se obtuvieron varios hallazgos clave.

### Análisis de la Tasa de Llegada de Taxis

#### Tasa de 20/hora

Con una tasa de llegada de 20 taxis por hora, se observó que la demanda superaba significativamente la oferta, resultando en tiempos de espera prolongados para los usuarios y grupos pendientes de abordar al final del periodo de servicio. Solo se ofrecieron 40 servicios, con un número excesivo de usuarios esperando taxis.

#### Tasa de 25/hora

A una tasa de 25 taxis por hora, se encontró que hasta ocho taxis se acumulaban en la fila, reduciendo la eficiencia del servicio desde la perspectiva del prestador. Sin embargo, los usuarios disfrutaban de una disponibilidad constante de taxis.

### Optimización del servicio

El ajuste a una disponibilidad de 23 taxis por hora mostró un equilibrio ajustado. Durante las dos horas de servicio, se atendieron 46 de los 192 usuarios que solicitaron el servicio, dejando pendientes a 7 usuarios y acumulando 5 taxis en la fila al finalizar el periodo. Aunque se mejoró la eficiencia operativa, la demanda se cubre parcialmente.

La Figura 24 compara visualmente las tres tasas, mostrando una relación inversa entre tiempo de espera y ocupación vehicular. La tasa de 23/hora se posiciona en el punto de inflexión de la curva, donde incrementar taxis reduce marginalmente las esperas, pero aumenta significativamente la inactividad de la flota.

Relación entre tasa de llegada, tiempo de espera y ocupación vehicular

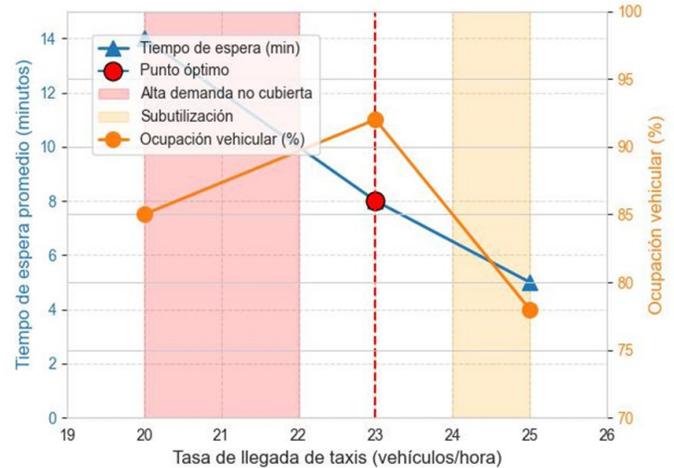


Figura 24. Punto óptimo de la tasa de llegada, tiempo de espera y ocupación vehicular.

Fuente: Elaborada en Python.

### Distribución de grupos de usuarios

La simulación mostró que la agrupación de usuarios con destinos comunes y la asignación de taxis basada en estos grupos es esencial para mejorar la eficiencia. Se destacaron diferentes grupos de usuarios en rutas específicas, evidenciando la necesidad de ajustar la oferta de taxis a la demanda específica de cada ruta, es decir, considerar aquel taxi que pueda ofrecer el servicio al destino con el grupo completo.

El análisis de sensibilidad mostrado en Tabla 2 reveló que una variación de  $\pm 1$  taxi / hora (22-24/hora) altera la eficiencia hasta en un 12%: a 22/hora, los usuarios pendientes aumentan a 15, mientras que a 24/hora, los taxis inactivos suben a 7. Esto muestra la robustez del modelo en torno a 23/hora como valor óptimo.

Tabla 2. Análisis de sensibilidad.

| Tasa de Llegada (taxis/hora) | Tiempo de Espera Promedio (min) | Usuarios Atendidos | Usuarios Pendientes | Taxis Inactivos | Ocupación Vehicular (%) | Eficiencia del Sistema (%) |
|------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------|
| 20                           | 14                              | 40                 | 152                 | 0               | 85                      | 58                         |
| 22                           | 10                              | 42                 | 15                  | 3               | 88                      | 75                         |
| 23                           | 8                               | 46                 | 7                   | 5               | 92                      | 89                         |
| 24                           | 7                               | 48                 | 4                   | 7               | 83                      | 81                         |
| 25                           | 5                               | 50                 | 2                   | 8               | 78                      | 72                         |

Fuente: Elaboración propia

### Ajuste a distribuciones de Probabilidad

El análisis de verosimilitud de los datos capturados utilizando Stat:Fit Versión 2.0 reveló que los datos recolectados se ajustaban a una distribución de probabilidad Exponencial con media de 40 segundos. Este ajuste permitió una mejor comprensión del comportamiento de los usuarios y una aplicación más precisa del modelo de simulación.

### Equilibrio entre taxis y usuarios

Se identificó un desequilibrio entre la cantidad de taxis disponibles y el número de usuarios, lo que afecta negativamente tanto la satisfacción del usuario como la eficiencia operativa. Ajustar la tasa de llegada de taxis es crucial para mejorar el nivel de servicio y la rentabilidad del servicio de taxis colectivos.

Se observó que la mejor tasa de llegada de las evaluadas es la de 23 taxis por hora, con una llegada uniforme.

### CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que un enfoque equilibrado y basado en datos es esencial para optimizar el servicio de taxis colectivos. Ajustar la tasa de llegada de taxis, comprender la demanda de los usuarios y aplicar modelos de simulación adecuados son pasos fundamentales para mejorar la eficiencia operativa y la satisfacción del usuario.

Al abordar estos desafíos, los operadores de taxis colectivos pueden ofrecer un servicio más efectivo y satisfactorio, beneficiando tanto a los usuarios como a los prestadores del servicio.

La satisfacción del usuario se ve directamente afectada por el tiempo de espera y la disponibilidad de taxis. Los resultados indican que una adecuada tasa de llegada mejora la experiencia del usuario al reducir el tiempo de espera, lo que contribuye a una mayor satisfacción general. Sin embargo, la percepción de servicio no solo depende de la disponibilidad inmediata de taxis, sino también de la capacidad del sistema para agrupar a los usuarios de manera eficiente y ofrecer un servicio acorde a la demanda.

Los resultados indican que una tasa de llegada adecuada de taxis es fundamental para equilibrar la oferta y la demanda, optimizar la utilización de los vehículos y mejorar la satisfacción del usuario. El estudio destaca la importancia de ajustar dinámicamente la disponibilidad de taxis en función de la demanda observada y de utilizar modelos de simulación y análisis de datos para tomar decisiones informadas.

La optimización de los recursos disponibles, como los taxis y los usuarios, es esencial para mejorar la eficiencia operativa. El estudio mostró que la agrupación de usuarios con destinos comunes y la correcta asignación de taxis son estrategias efectivas para maximizar la uti-

lización de los vehículos y reducir el tiempo de espera. Ajustar la tasa de llegada y gestionar eficientemente la asignación de taxis permite una mejor utilización de los recursos y una reducción de los costos operativos.

La satisfacción del usuario no solo depende de la disponibilidad inmediata de taxis, sino también de la rapidez con la que se pueden formar los grupos necesarios para que los taxis inicien su recorrido, y esto se debe a la característica colectiva del taxi. Finalmente, el estudio también subrayó la relevancia de agrupar a los usuarios con destinos similares, lo cual contribuye en la eficiencia del sistema de transporte compartido.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México /ITS de Poza Rica por su invaluable apoyo, disposición y colaboración en este proyecto. Su contribución fue fundamental, proporcionando horas sustantivas, recurso tecnológico y fomentando un ambiente de trabajo colaborativo que hizo posible la realización de este estudio. En especial al Departamento de Gestión Empresarial, Departamento de Ingeniería Industrial y al Departamento de Posgrado por su apoyo continuo. Sus instalaciones y recursos fueron cruciales para el desarrollo y la finalización exitosa de este trabajo.

Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al Tecnológico de Teziutlán por su valiosa ayuda sus aportaciones con perspectiva crítica y constructiva que fue esencial para mejorar la calidad y la precisión para la publicación de estos resultados.

Por otra parte, agradecemos las facilidades del Tecnológico de Misantla por la oportunidad de abrir un espacio para publicar en su Revista de investigación Ingeniantes.

### BIBLIOGRAFÍA

[1] Arrestegui, J. V. (2020). *Calidad de servicio y satisfacción del cliente en una empresa de transporte terrestre interprovincial de pasajeros del distrito de La Victoria, 2020 (Tesis de grado, Universidad de San Martín de Porres), Perú.*

[2] Arias, L. M. P., Montoya, L. A., & Henao, S. A. F. (2010). *Análisis de líneas de espera a través de teoría de colas y simulación. Scientia et Technica, 3(46), 56-61.*

[3] Solar Santos, D. M. (2013). *Análisis y dimensionado del servicio de taxi en una ciudad (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).*

[4] Vela, E., & Porrás, H. J. (2023). *Evaluación de la problemática del servicio de las líneas alimentadoras del Metropolitano en el sistema de transporte urbano de Lima y Callao y propues-*

ta de mejora basada en sistemas inteligentes de transporte. Universidad ESAN, 108-110.

[5] Benavides Águila, R. A. (2015). Rediseño y optimización del proceso de asignación de carreras de una empresa de Radio Taxis.

[6] Zurita P., J. E. (2024). Análisis de la calidad de servicio y su incidencia en la satisfacción del usuario del servicio de transporte público de buses urbanos de la ciudad de Tulcán. UPEC.

[7] González M. (2007). Ideas y buenas prácticas para la movilidad sostenible, *Ecologistas en Acción*, Madrid, España.

[8] CEPAL (2022). Herramientas para el modelamiento y la simulación de tendencias futuras en el área de la movilidad urbana. CEPAL, ONU.

[9] Bentley Systems (2025). Modelado de la demanda de viajes y simulación de la movilidad. USA.

[10] PUEC-UNAM (2022). Programa de simulación de tránsito SUMO. México.

[11] ITENE (2025). EMOBCONNECT: Tecnologías para la movilidad sostenible. Valencia, España.

[12] Drivin (2025). Optimización de rutas de transporte: ¿Cómo se logra?. Drivin Co.

[13] Akaike, H. (1998). *Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle*. Springer.





Multidisciplinario  
e  
ingenierías

---

Ingeniantes

# La relación entre las horas prácticas y la calificación obtenida en clase de maquinados industriales



## Colaboración

Jorge Rivera Flores; Luis Juárez Ramiro; Alfredo Carrasco Aráoz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán

Fecha de recepción: 26 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 28 de febrero de 2025

**RESUMEN:** La práctica para la adquisición de los conocimientos es esencial ya que logra permear en el alumno el logro del aprendizaje significativo. En este estudio se aplicó la metodología del Learning By Doing la cual enfatiza el aprendizaje práctico en clases de maquinados por control numérico a 30 alumnos del sistema de Tecnológicos en donde se tomaron como datos las horas que toman práctica en relación a la calificación obtenida, con la finalidad de generar una ecuación que logre predecir su calificación en dependencia de las horas prácticas, teniendo como resultado que entre más horas prácticas tenga, mayor será la calificación obtenida.

**PALABRAS CLAVE:** Regresión Lineal, Aprendizaje, Práctica.

**ABSTRACT:** Practice for the acquisition of knowledge is essential since it manages to permeate the student's achievement of meaningful learning. In this study, the Learning By Doing methodology was applied, which emphasizes practical learning in numerical control machining classes to 30 students from the Technology system, where the hours they take practice were taken as data in relation to the grade obtained, with the purpose of generating an equation that can predict their grade depending on the practical hours, resulting in the more practical hours they have, the higher the grade obtained.

**KEYWORDS:** Linear regression, Learning, Practice.

## INTRODUCCIÓN

Diniz, en su estudio denominado "Accidentalidad e innovación en la industria de la construcción: aprender haciendo para prevenir accidentes y mejorar la producción", enfatiza que esta metodología posibilita la implementación del cambio (innovación) durante el proceso constructivo y la consecuente mejora del proceso constructivo, no sólo en términos de calidad y productividad, sino también en términos de seguridad de los trabajadores, previniendo accidentes [1].

Ozeren, en su estudio denominado “Aprender haciendo utilizando impresoras 3D: experiencia de estudio de fabricación digital en educación arquitectónica” enfatiza los resultados del estudio mostraron respuestas positivas de los estudiantes a la inclusión de la impresión 3D y el uso de técnicas de modelado 3D, lo que aumentó el interés y la participación de los estudiantes en sus proyectos y mejoró su comprensión y visualización de los conceptos de diseño [2].

Un estudio reciente llevado a cabo por el Laboratorio de Formación de Instituto Nacional de Capacitación para las Ciencias Aplicada de la Conducta, muestra que los alumnos aprenden de mejor manera cuando se les involucra de manera activa en el proceso de aprendizaje [3].

De acuerdo a datos recolectados por la Universidad Carleton, el ser humano, retiene tan solo el 5 por ciento de lo que se le enseña en una conferencia, y tan solo el 10 % de lo que lee, resultado de técnicas de estudio tradicionales denominadas aprendizaje pasivo. Existen los métodos de aprendizaje activos o participativos que resultan ser mucho más eficaces, poniendo como ejemplo los grupos de trabajo, o como el “Aprender haciendo” o mejor conocido en inglés como: Learning by Doing, que enfatiza en aplicar lo aprendido complementando a la teoría [4].

La premisa de la aplicación de los contenidos formativos en las actividades prácticas permite que los alumnos investiguen y reflexionen, pero sobre todo apliquen lo aprendido en situaciones reales, permitiendo que los educandos se concentran más en las tareas consolidando el aprendizaje significativo [5].

El software de simulación por computadora, brinda al alumno una interfaz gráfica atractiva, permitiendo presenciar ambientes reales en donde el alumno paso a paso puede ir generando sus códigos de forma interactiva, simular el proceso y realizar ajustes del código y simular su fabricación para que finalmente esté preparado en fabricar su pieza de forma física en una máquina de control numérico real [6]. La simulación es la etapa previa antes de mecanizar la pieza final, lo cual permite identificar los errores de la sintaxis del programa y las posibles colisiones que se pueden dar en las máquinas herramientas, permitiendo con eso verificar cada una de las operaciones, corregir errores ahorrando tiempos y, sobre todo, proteger a los equipos y al propio programador [7].

El objetivo de este estudio, fue el de conocer la relación entre las horas de práctica que los alumnos invierten en realizar ejercicios de programación de códigos para el maquinado de piezas mediante software de computadora y la calificación obtenida a la hora de presentar el examen.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Aprender haciendo, “Learning by Doing” en el idioma inglés, es una metodología de aprendizaje de origen constructivista en donde la clave se encuentra en el aprendizaje práctico [8].

Este método se compone de 4 etapas básicas de acuerdo al proceso de aprendizaje.

### Experiencia / Vivencia

Esta etapa se basa en vivir la experiencia, ejecutando el trabajo con la finalidad de equivocarse, corregir, hacer de nuevo, mejorar y repetir el ciclo, hasta lograr los objetivos que se marcan en la meta. Como pasos que soportan a esta etapa se tienen las actividades siguientes:

- Recopilación de la información.
- Provisión de los recursos para realizar la experiencia.
- Búsqueda de la información.
- Ejecutar las lecturas guía.
- Búsqueda de ejemplos similares.

### Análisis de la experiencia

Esta etapa consiste en hacer un análisis de la experiencia vivida, dando respuesta a las preguntas siguientes:

- ¿Cómo fue la experiencia?
- ¿Qué nos pasó?
- ¿Qué sentimos?
- ¿Cuáles fueron los errores cometidos?
- ¿Qué virtudes se manifestaron?
- Si se repitiera la experiencia de nuevo, ¿qué la haría diferente?
- ¿Qué reflexiones se desprende del trabajo ejecutado?
- ¿Cuál fue la retroalimentación que recibí de los demás?

### Construcción de los conocimientos

Esta etapa del Learning By Doing o en español, “Aprender Haciendo” consiste en migrar del plano práctico al teórico y conceptual, con la finalidad de construir los conceptos y encontrar los significados, haciéndose las preguntas siguientes:

- ¿Qué se aprendió?
- ¿Qué ideas, conceptos o conocimientos se pueden agregar a los que se tenían anteriormente sobre el tema desarrollado?

Para complementar esta etapa es necesario la búsqueda de la información en fuentes confiables, con la finalidad de tener una referencia para reformular la experiencia vivida.

### Generalización de la experiencia

En esta etapa, si se tuviera que recomendar a otra persona la experiencia que se vivió, se le diría lo siguiente:

- Las advertencias que tendría que tomar en cuenta.
- Las precauciones a tomar en cuenta si se repite la experiencia en tareas similares.

- Como aplicaría lo aprendido de manera general en otro proyecto.

### Modelo de regresión lineal simple

El desarrollo del proyecto se realizó mediante la investigación experimental, ya que esta permite con seguridad establecer las relaciones de causa efecto, entre una variable y otra. El tipo de datos a manejar presenta una visión general y aproximada del objeto de estudio basando su diseño de la investigación en un tipo cuantitativo [9].

El análisis de regresión lineal es una metodología estadística usada para estudiar la relación entre dos variables [10]. Método que se adapta en varias áreas la investigación educativa, enfocados al estudio de varios fenómenos, tanto económicos hasta aspectos relacionados con el comportamiento humano. En el campo de la educación, las decisiones se basan en la relación entre dos o más variables [11].

Para este estudio se ejecutó un análisis de la relación que existe entre las horas de práctica realizada por el alumno y su calificación obtenida en el examen, por medio del análisis de regresión lineal simple por la técnica matemática de los mínimos cuadrados. A continuación, se muestran los pasos para el cálculo de la ecuación que genera una predicción de dicha relación.

### Declaración de variables

De acuerdo a la terminología utilizada por la metodología de la regresión lineal, a la variable que se va a predecir se le llama "Variable Dependiente", mientras que a la variable o variables que se utilizan para predecir el valor de la variable dependiente se le llama "Variable Independiente" [12]. Dicho de otra manera, cuando se estudian dos características simultáneamente sobre una muestra, se puede considerar que una de ellas influye sobre la otra de alguna manera [13]. El objetivo de la regresión lineal es descubrir el modo en que se relacionan. A continuación, se declaran cuáles son las dos variables a analizar.

$x$  = Horas de práctica (variable explicativa o independiente)

$y$  = Calificación obtenida (variable explicada o dependiente)

### Toma de muestras

Se realizó la toma de muestras a 30 alumnos quienes se les contabilizaron las horas prácticas que permanecieron en el laboratorio de simulación. Finalmente se obtuvo la calificación por cada alumno entrevistado y calificado vaciando los datos en la tabla siguiente.

Tabla 1. Datos recopilados de 30 alumnos de las horas de práctica y la calificación obtenida.

| Alumno | Horas de práctica | Calificación obtenida |
|--------|-------------------|-----------------------|
| $n$    | $x$               | $y$                   |
| 1      | 7                 | 2                     |
| 2      | 14                | 8                     |
| 3      | 24                | 10                    |
| 4      | 17                | 7                     |
| 5      | 5                 | 3                     |
| 6      | 12                | 5                     |
| 7      | 14                | 8                     |
| 8      | 17                | 9                     |
| 9      | 24                | 9                     |
| 10     | 4                 | 6                     |
| 11     | 6                 | 4                     |
| 12     | 9                 | 8                     |
| 13     | 20                | 8                     |
| 14     | 21                | 8                     |
| 15     | 16                | 5                     |
| 16     | 23                | 9                     |
| 17     | 25                | 10                    |
| 18     | 11                | 7                     |
| 19     | 19                | 7                     |
| 20     | 15                | 6                     |
| 21     | 23                | 8                     |
| 22     | 21                | 8                     |
| 23     | 22                | 9                     |
| 24     | 17                | 6                     |
| 25     | 7                 | 3                     |
| 26     | 19                | 8                     |
| 27     | 15                | 6                     |
| 28     | 9                 | 5                     |
| 29     | 11                | 6                     |
| 30     | 25                | 9                     |

Fuente: Elaboración propia

### Diagrama de dispersión

Seguidamente, mediante el software Excel, se realiza el diagrama de dispersión en donde se ve la relación entre las horas de práctica que el alumno invirtió y su calificación obtenida, mostrando que, a mayores horas de práctica, mayor será la calificación obtenida.

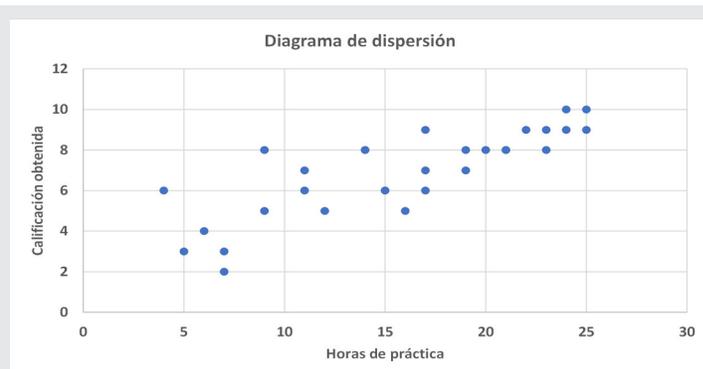


Figura 1. Diagrama de dispersión de puntos de las horas practicadas contra la calificación obtenida.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente mediante la técnica matemática de los mínimos cuadrados se pasan a realizar los cálculos los cuales se concentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Ajuste del modelo por mínimos cuadrados.

| Alum no | Horas de práctica<br>x (Horas) | Calificación obtenida<br>y (Calificación) | $\sum_{i=1}^{30} x_i^2$ | $\sum_{i=1}^{30} y_i^2$ | $\sum_{i=1}^{30} x_i y_i$ |
|---------|--------------------------------|---|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1       | 7                              | 2   | 49                      | 4                       | 14                        |
| 2       | 14                             | 8   | 196                     | 64                      | 112                       |
| 3       | 24                             | 10  | 576                     | 100                     | 240                       |
| 4       | 17                             | 7   | 289                     | 49                      | 119                       |
| 5       | 5                              | 3   | 25                      | 9                       | 15                        |
| 6       | 12                             | 5   | 144                     | 25                      | 60                        |
| 7       | 14                             | 8   | 196                     | 64                      | 112                       |
| 8       | 17                             | 9   | 289                     | 81                      | 153                       |
| 9       | 24                             | 9   | 576                     | 81                      | 216                       |
| 10      | 4                              | 6   | 16                      | 36                      | 24                        |
| 11      | 6                              | 4   | 36                      | 16                      | 24                        |
| 12      | 9                              | 8   | 81                      | 64                      | 72                        |
| 13      | 20                             | 8   | 400                     | 64                      | 160                       |
| 14      | 21                             | 8   | 441                     | 64                      | 168                       |
| 15      | 16                             | 5   | 256                     | 25                      | 80                        |
| 16      | 23                             | 9   | 529                     | 81                      | 207                       |
| 17      | 25                             | 10  | 625                     | 100                     | 250                       |
| 18      | 11                             | 7   | 121                     | 49                      | 77                        |
| 19      | 19                             | 7   | 361                     | 49                      | 133                       |
| 20      | 15                             | 6   | 225                     | 36                      | 90                        |
| 21      | 23                             | 8   | 529                     | 64                      | 184                       |
| 22      | 21                             | 8   | 441                     | 64                      | 168                       |
| 23      | 22                             | 9   | 484                     | 81                      | 198                       |
| 24      | 17                             | 6   | 289                     | 36                      | 102                       |
| 25      | 7                              | 3   | 49                      | 9                       | 21                        |
| 26      | 19                             | 8   | 361                     | 64                      | 152                       |
| 27      | 15                             | 6   | 225                     | 36                      | 90                        |
| 28      | 9                              | 5   | 81                      | 25                      | 45                        |
| 29      | 11                             | 6   | 121                     | 36                      | 66                        |
| 30      | 25                             | 9   | 625                     | 81                      | 225                       |
| Suma    | 472                            | 207                                       | 8636                    | 1557                    | 3577                      |
| Media   | 15.733                         | 6.9                                       |                         |                         |                           |

Fuente: Elaboración propia

Seguido de la tabla, se muestra la simbología matemática para el desarrollo de las fórmulas que servirán para el cálculo de la ecuación de regresión o fórmula para la predicción de la calificación a obtener.

$n=30$

$\sum_{i=1}^{30} x_i = 472$  Ec. (1)

$\sum_{i=1}^{30} y_i = 204$  Ec. (2)

$\bar{x} = 15.733$   
 $\bar{y} = 6.9$

$\sum_{i=1}^{30} x_i^2 = 8636$  Ec. (3)

$\sum_{i=1}^{30} y_i^2 = 1557$  Ec. (4)

$\sum_{i=1}^{30} x_i y_i = 3577$  Ec. (5)

$S_{xx} = \sum_{i=1}^{30} x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{30} x_i)^2}{30} = 8636 - \frac{(472)^2}{30} = 1209.867$  Ec. (6)

$S_{xy} = \sum_{i=1}^{30} x_i y_i - \frac{(\sum_{i=1}^{30} x_i)(\sum_{i=1}^{30} y_i)}{30} = 3577 - \frac{(472)(207)}{30} = 320.20$  Ec. (7)

Por lo tanto, las estimaciones de mínimos cuadrados de la pendiente y la ordenada al origen son:

$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} = \frac{320.20}{1209.867} = 0.2647$  Ec. (8)

$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} = 6.90 - (0.2647)15.733 = 2.7361$  Ec. (9)

El modelo de regresión lineal simple ajustado es:

$\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 x + \hat{\beta}_0$   
 $\hat{y} = 0.2647x + 2.7361$  Ec. (10)

**RESULTADOS**

**Pendiente de la ecuación estimada**

La pendiente de la ecuación de regresión lineal simple estimada es positiva, lo que implica que a medida que se aumenta el número de horas de prácticas tomadas por el alumno, la calificación aumentará, tal y como lo muestra la pendiente de la recta en la Figura 2.

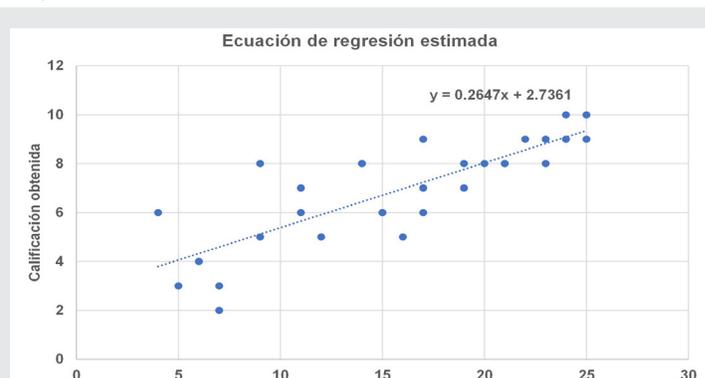


Figura 2. Línea y ecuación de regresión lineal estimada para el caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Se considera que la ecuación de regresión estimada obtenida por el método de los mínimos cuadrados describe de manera adecuada la relación entre las horas de práctica ( $x$ ) y la calificación obtenida ( $y$ ); de manera razonable se recomienda usar dicha ecuación de regresión lineal para estimar el valor de  $y$  para un valor dado de  $x$ . Por ejemplo, si se quisiera predecir obtener un 7 de calificación considerada como la calificación mínima para acreditar el examen, entonces se calcularía de la siguiente manera.

$\hat{y} = 0.2647(7) + 2.7361 = 4.589$  Ec. (11)

De manera que, para obtener una calificación de 7, es necesario estudiar 4 horas y media para alcanzar la calificación mínima aprobatoria.

### Trabajo a futuro

Hasta el momento solo se ha aplicado la regresión lineal para predecir de la calificación, tomando en consideración solo las horas prácticas. Como trabajo a futuro se comenta que es necesario añadir más variables independientes, ya que se estará considerando no solo las horas de práctica, sino que también se tomen en consideración las horas de lectura y de investigación para lo cual se hará uso de una regresión lineal múltiple, ya que la calificación no solo depende de una sola variable.

### CONCLUSIONES

El "learning by doing" es primordial para que el aprendizaje se considere con éxito, ya que su proceso básico se centra en la interiorización de los procesos desde la propia experiencia de forma que la toma de las decisiones se basa en lo aprendido por medio de la ejecución de errores y aciertos, consolidándose como una técnica eficiente para el fortalecimiento del desarrollo de la enseñanza-aprendizaje.

Con esta técnica se evitan las clases magistrales, centrandose el aprendizaje en la parte práctica, fomentando en el alumno sus capacidades emprendedoras con la finalidad de que pierda el miedo a equivocarse y aprenda de sus errores.

La regresión lineal se utiliza para calcular la recta que minimiza los residuos que son las diferencias entre los valores reales y los estimados por la recta, que en otras palabras se podría decir que se utiliza para la búsqueda de valores desconocidos, usando como referencia otras muestras del mismo evento.

La ecuación de regresión calculada por el modelo matemático de los mínimos cuadrados que se han desarrollado en este documento, tiene la finalidad de predecir la calificación que el alumno obtendrá, de acuerdo al número de horas que tomará mediante la técnica del Learning by Doing, en donde se deja en claro que entre más horas realice de práctica, mayor será la calificación, tomando como previsión no tomar tiempo de más a esta actividad ya que tiene que organizar sus tiempos para aplicar los mismo a las demás materias.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a la generación 2021 de la carrera de Ingeniería Industrial perteneciente al Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán quienes fueron los que participaron como muestra para la toma de los datos recopilados.

### BIBLIOGRAFÍA

[1] E. Diniz, «Accidentalidad e innovación en la industria de la construcción: aprender haciendo para prevenir accidentes y mejorar la producción,» *Safety Science*, pp. 18-23, 2021.

[2] O. Ozeren, «Learning-by-Doing using 3D printers: Digital fabrication studio experience in architectural education,» *Journal of Engineering Research*, pp. 23-32, 2023.

[3] B. Morrison, «The BPS continuous Learning Cycle,» *BPS*, Washington, 2020.

[4] Trainmotiv, *El aprendizaje a través de la práctica*, Barcelona: Trainmotiv, 2020.

[5] J. Dewey, *Experiencia y Educación*, Nueva York: Touchstone, 2000.

[6] S. Kalpakjian, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, México: Prentice Hall, 2020.

[7] H. Saila, *Aula Virtual*, Donostia San Sebastián: Birtlh, 2020.

[8] A. Susanto, «Learning by doing: A teaching paradigm for active learning in Islamic high school,» *Revista de educación e investigación en aprendizaje electrónico*, pp. 45-52, 2024.

[9] P. Fernandez, *Investigación Cuantitativa y Cualitativa*, Coruña: Fistera, 2022.

[10] D. Montgomery, *Introduction to linear regression analysis*, Washington: Wiley, 2022.

[11] R. Cárdenas, *Estadística en la Educación*, México: Digital, 2024.

[12] D. Anderson, *Estadística para administración y economía*, Munich: Cengage, 2021.

[13] J. Horra, *Estadística Aplicada*, Madrid: Díaz de Santos, 2020.





Multidisciplinario  
e  
ingenierías

---

Ingeniantes

# Desarrollo de una carta antropométrica integral para el diseño óptimo de una cabina ergonómica en el TECNM Campus Irapuato



## Colaboración

Norma Elizabeth Rodríguez Bustos; Adrián Agustín Ríos Barreto; Mónica Mendoza Khors, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Fecha de recepción: 02 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 04 de marzo de 2025

**RESUMEN:** Este estudio desarrolla una carta antropométrica integral para el diseño de cabinas ergonómicas, dirigida a la población estudiantil del TecNM, departamento de Ingeniería Industrial campus Irapuato. A partir de un riguroso análisis de datos antropométricos, se establecieron parámetros precisos que optimizan la adaptabilidad de un diseño de cabina a las características físicas de los usuarios. Los resultados revelan mejoras estadísticamente significativas en los indicadores de confort, seguridad y disminución de enfermedades musculoesqueléticas de los usuarios, subrayando la relevancia de integrar la antropometría en el diseño industrial. Estos resultados confirman que el uso de herramientas antropométricas robustas es esencial para desarrollar espacios de trabajo personalizados y de alto rendimiento.

**PALABRAS CLAVE:** Ergonomía, Carta antropométrica, cabina ergonómica; salud ocupacional.

**ABSTRACT:** This study develops a comprehensive anthropometric chart for the design of ergonomic cabins, targeting the student population at TecNM, Department of Industrial Engineering, Irapuato Campus. Based on a rigorous analysis of anthropometric data, precise parameters were established to optimize the adaptability of the cabin design to the users' physical characteristics. The results reveal statistically significant improvements in indicators of comfort, safety, and a reduction in musculoskeletal disorders among users, emphasizing the importance of integrating anthropometry into industrial design. These findings confirm that the use of robust anthropometric tools is essential for developing personalized, high-performance workspaces.

**KEYWORDS:** Ergonomics, anthropometric chart, ergonomic cabin; occupational health.

## INTRODUCCIÓN

La ergonomía se centra en optimizar la interacción entre el trabajador y su entorno, adaptando los espacios laborales a las características individuales de los usuarios para mejorar su bienestar, productividad y seguridad [1]. Este enfoque es especialmente crucial en la industria manufacturera, donde el diseño ergonómico de cabinas contribuye significativamente a

minimizar riesgos laborales y a reducir la incidencia de lesiones derivadas de posturas inadecuadas [2].

Para lograr un diseño óptimo, es imprescindible contar con un conocimiento detallado de las dimensiones corporales de los usuarios potenciales. En este sentido, la antropometría es la ciencia dedicada al estudio de las medidas y proporciones del cuerpo humano, la cual resulta fundamental para generar histogramas biométricos idóneos para el desarrollo de cartas antropométricas que sirvan de base en el diseño de equipos de protección personal, maquinaria y estaciones de trabajo [3]. Diversos estudios han demostrado que la aplicación sistemática de datos antropométricos permite adaptar de forma precisa los entornos laborales a la diversidad humana, reduciendo así los riesgos asociados a movimientos repetitivos, posturas forzadas y sobreesfuerzos [4]. Asimismo, investigaciones recientes han evidenciado que integrar estas metodologías en el proceso de diseño no solo optimiza la comodidad, sino que también incrementa la eficiencia y productividad [5], [6].

En respuesta a esta necesidad, el presente artículo desarrolla una carta antropométrica integral orientada a guiar la fabricación de cabinas ergonómicas. Mediante el análisis de las dimensiones corporales relevantes de una de la población de los estudiantes de ingeniería industrial del TecNM, se ha diseñado un modelo de cabina que maximiza la funcionalidad y la adaptabilidad a las necesidades reales de los usuarios. Este enfoque, basado en evidencia empírica, refuerza la importancia de incorporar metodologías antropométricas en el diseño ergonómico para la creación de entornos laborales seguros y eficientes.

### MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se enmarca dentro de una investigación descriptiva, observacional y transversal, orientada a la recolección y análisis de datos antropométricos. Su objetivo es generar una carta antropométrica que sirva como herramienta base para diseñar cabinas ergonómicas que se ajusten de forma óptima a las dimensiones corporales de los estudiantes.

El método para diseñar la carta antropométrica que se describe en la Figura 1 representa los pasos metodológicos para el diseño de cabinas ergonómicas con el fin de garantizar que el espacio se adapte de manera precisa a las características físicas de los usuarios. Sin estos datos, es probable que se generen diseños que produzcan incomodidad, restricciones en el rango de movimiento y, en consecuencia, un aumento en la incidencia de lesiones por posturas forzadas y movimientos repetitivos. Esta metodología basada en evidencia, es clave para crear entornos laborales seguros, eficientes y orientados al bienestar del usuario.

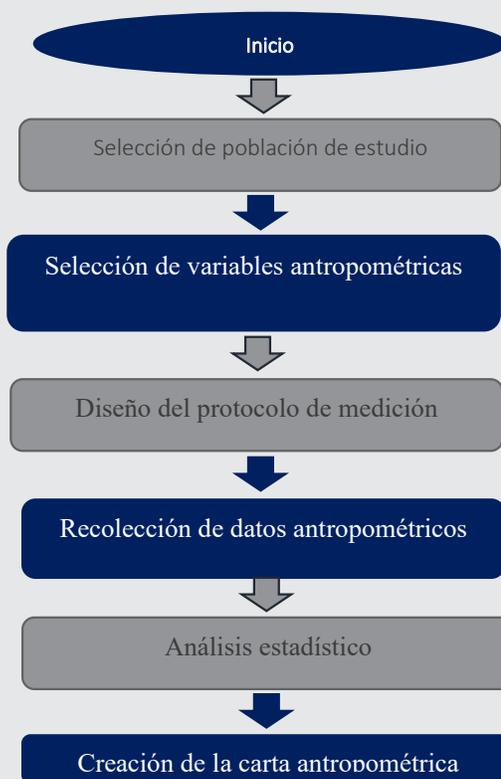


Figura 1. Ejemplo de diagrama de flujo para realizar una carta antropométrica.

Fuente: Elaboración propia.

**Paso 1. Selección de la Población de Estudio.** La población objetivo para este estudio fue seleccionada con base en los usuarios del TecNM del campus Irapuato. La determinación del tamaño muestral se realizó considerando la necesidad de obtener datos precisos y representativos que permitan generalizar los hallazgos al conjunto de estudiantes de Ingeniería Industrial. Para ello, se utilizó una fórmula estadística basada en un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 2%, lo que permitió calcular una muestra que refleje la variabilidad de las dimensiones antropométricas dentro de la población estudiantil. Además, se consideraron estudios previos en el área de ergonomía y antropometría que sugieren que una muestra con una distribución equilibrada de variables relevantes (edad, género y nivel académico) es fundamental para capturar las diferencias significativas en las medidas corporales. En la ecuación 1 se encuentra la fórmula para calcular el tamaño de la muestra. [7].

$$n = \left( \frac{Z_{\alpha} * \sigma}{e} \right)^2 \quad \text{Ec. (1)}$$

Para este estudio se considera un nivel de confianza del 95 % ( $Z=1.96$ , este valor se obtiene de la tabla  $Z$  de distribución normal), una desviación estándar ( $\sigma=5\text{cm}$ ) considerando la variabilidad de las estaturas de los estudiantes y un margen de error permitido de ( $e = 2$ ).

Al sustituir las variables en la fórmula obtendremos que el número de estudiantes que son necesarios para la toma de las muestras antropométricas con un 95 % de confianza es de 24 alumnos tal como se observa en la ecuación 2.

$$n = \left( \frac{z_{0,05+5}}{2} \right)^2 = 24 \quad \text{Ec. (2)}$$

El resultado obtenido fue de 24, pero es importante contemplar que no se podrá incluir a estudiantes con discapacidades físicas o trastornos musculoesqueléticos que puedan distorsionar las medidas.

**Paso 2. Selección de variables antropométricas.** Se identifican las medidas corporales relevantes para el diseño de la cabina, como altura, anchura de hombros, etc. Para el diseño de este prototipo de cabina ergonómica se tomarán las dimensiones solo considerando el trabajo de pie. La selección de los datos antropométricos considerados para este trabajo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Selección de variables antropométricas.

| Datos antropométricos     |                               |
|---------------------------|-------------------------------|
| Edad                      | Anchura de hombros            |
| Estatura (Talla)          | Anchura de pecho              |
| Peso del cuerpo           | Anchura de cadera             |
| Altura del cuerpo         | Largura de brazo              |
| Altura al ojo             | Circunferencia de pecho       |
| Altura al hombro          | Circunferencia de cintura     |
| Altura al codo            | Circunferencia de cadera      |
| Altura a la cadera        | Largura de mano               |
| Altura al gluteo          | Largura de palma de la mano   |
| Altura a la muñeca        | Anchura de palma de la mano   |
| Altura al tercer dedo     | Diámetro de agarre de la mano |
| Anchura lateral de brazos | Largura del pie               |
| Anchura de codos          | Altura del pie                |
| Largura de brazos         | Anchura del pie               |
| Largura de puño           |                               |

Fuente: Elaboración propia

**Paso 3. Diseño del protocolo de medición.** Se establece un protocolo estandarizado para la toma de medidas, asegurando la precisión y la consistencia de los datos, por tanto, todos los instrumentos serán calibrados previamente siguiendo protocolos estandarizados

para garantizar la validez y confiabilidad de las mediciones. Para este paso es necesario contar con las herramientas necesarias para tomar cada dato de la variable antropométrica definida en el paso 2. Para obtener el valor de cada dato antropométrico se utilizaron las herramientas que se enlistan en la Figura 2.

| INSTRUMENTO DE MEDICIÓN | IMAGEN   | INSTRUMENTO DE MEDICIÓN | IMAGEN   |
|-------------------------|--|-------------------------|--|
| CINTA METRICA           |   | TABLITA DE APOYO        |   |
| VERNIER                 |   | BÁSCULA                 |   |
| FLEXOMETRO              |   | TAPETE                  |   |
| REGLA                   |  | GONIOMETRO              |  |

Figura 2. Instrumentos necesarios para tomar las medidas antropométricas.

Fuente: Elaboración propia.

**Paso 4. Recolección de Datos Antropométricos.** Se recopilaron datos antropométricos utilizando técnicas estándar, incluyendo mediciones de altura, longitud de brazos, anchura de hombros, entre otras. Estos datos fueron procesados y analizados para identificar las dimensiones clave que influyen en el diseño ergonómico de la cabina [3].

Posteriormente se tomaron las medidas a cada estudiante considerando que el tipo de vestimenta que no interfiera en las medidas de cada sector como se observa en la Figura 3.

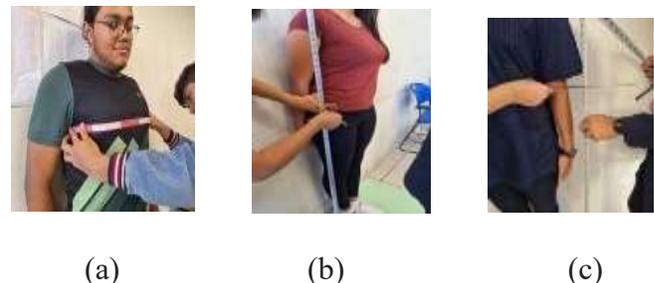


Figura 3. Instrumentos necesarios para tomar las medidas antropométricas.

Fuente: Elaboración propia.

Cada una de las medidas se registró en una hoja de Excel como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Recolección de datos antropométricos.

| Datos antropométricos / Muestras | 1   | 2   | 3   | 4    | 5    | ↔    | 23   | 24  |
|----------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----|
| Edad                             | 19  | 20  | 20  | 20   | 20   | 25   | 20   | 20  |
| Estatura (Talla)                 | 166 | 153 | 160 | 168  | 179  | 164  | 178  | 168 |
| Peso del cuerpo                  | 69  | 50  | 73  | 67   | 82.6 | 69.5 | 90   | 71  |
| Altura del cuerpo                | 166 | 153 | 160 | 168  | 179  | 164  | 178  | 168 |
| Altura al ojo                    | 153 | 140 | 146 | 155  | 166  | 155  | 165  | 155 |
| Altura al hombro                 | 138 | 125 | 132 | 138  | 144  | 135  | 143  | 138 |
| Altura al codo                   | 106 | 100 | 97  | 103  | 111  | 105  | 110  | 106 |
| Altura a la cadera               | 96  | 80  | 85  | 90   | 102  | 89   | 101  | 90  |
| Altura al gluteo                 | 75  | 65  | 71  | 77   | 80   | 75   | 79   | 76  |
| Altura a la muñeca               | 83  | 74  | 75  | 80   | 86   | 78   | 85   | 79  |
| Altura al tercer dedo            | 65  | 59  | 63  | 63   | 68   | 61   | 67   | 62  |
| Anchura lateral de brazos        | 160 | 153 | 157 | 170  | 177  | 165  | 176  | 165 |
| Anchura de codos                 | 84  | 82  | 69  | 85   | 94   | 86   | 95   | 85  |
| Largura de brazos                | 72  | 74  | 78  | 80   | 84   | 82   | 83   | 83  |
| Largura de puño                  | 64  | 64  | 74  | 67   | 74   | 68   | 73   | 69  |
| Anchura de hombros               | 45  | 37  | 44  | 44   | 48   | 45   | 47   | 48  |
| Anchura de pecho                 | 35  | 32  | 38  | 30   | 37   | 32   | 36   | 35  |
| Anchura de cadera                | 45  | 33  | 49  | 30   | 35   | 30   | 34   | 31  |
| Largura de brazo                 | 63  | 67  | 70  | 64   | 69   | 65   | 69   | 65  |
| Circunferencia de pecho          | 95  | 90  | 108 | 93   | 103  | 94   | 107  | 102 |
| Circunferencia de cintura        | 79  | 70  | 97  | 71   | 84   | 72   | 97   | 84  |
| Circunferencia de cadera         | 110 | 90  | 111 | 86   | 96   | 88   | 102  | 96  |
| Largura de mano                  | 17  | 16  | 16  | 16   | 18   | 16   | 21   | 17  |
| Largura de palma de la mano      | 9   | 9   | 10  | 9    | 10.5 | 9    | 10   | 9   |
| Anchura de palma de la mano      | 8   | 7   | 7   | 8    | 9    | 8    | 11   | 7   |
| Diámetro de agarre de la mano    | 5   | 5   | 4   | 5    | 5    | 5    | 7    | 4.5 |
| Largura del pie                  | 24  | 23  | 22  | 24.5 | 28   | 25.5 | 27.5 | 24  |
| Altura del pie                   | 7   | 5   | 6   | 8    | 11   | 8    | 11   | 8   |
| Anchura del pie                  | 8.3 | 7.5 | 9   | 9    | 10   | 9    | 10   | 9   |

Fuente: Elaboración propia.

**Paso 5. Análisis estadístico.** Se analizan los datos recopilados para calcular medidas de tendencia central, dispersión y percentiles como se observa en la Figura 4.



Figura 4. Procedimiento para análisis estadístico.

Fuente: Elaboración propia.

Se calculó cada parámetro de media y desviación estándar y se registró en la Tabla 3.

Tabla 3. Selección de variables antropométricas.

| Datos antropométricos / Muestras | MEDIA   | DESVEST     |
|----------------------------------|---------|-------------|
| Edad                             | 20.5    | 1.8516402   |
| Estatura (Talla)                 | 167     | 8.635475006 |
| Peso del cuerpo                  | 71.5125 | 11.71512301 |
| Altura del cuerpo                | 167     | 8.635475006 |
| Altura al ojo                    | 154.375 | 8.683934263 |
| Altura al hombro                 | 136.625 | 6.093028803 |
| Altura al codo                   | 104.75  | 4.713203339 |
| Altura a la cadera               | 91.625  | 7.614600637 |
| Altura al gluteo                 | 74.75   | 4.803272694 |
| Altura a la muñeca               | 80      | 4.40778532  |
| Altura al tercer dedo            | 63.5    | 3.023715784 |
| Anchura lateral de brazos        | 165.375 | 8.634441003 |
| Anchura de codos                 | 85      | 8           |
| Largura de brazos                | 79.5    | 4.472135955 |
| Largura de puño                  | 69.125  | 4.155461123 |
| Anchura de hombros               | 44.75   | 3.535533906 |
| Anchura de pecho                 | 34.375  | 2.774243784 |
| Anchura de cadera                | 35.875  | 7.180081575 |
| Largura de brazo                 | 66.5    | 2.618614683 |
| Circunferencia de pecho          | 99      | 6.845227743 |
| Circunferencia de cintura        | 81.75   | 10.89888592 |
| Circunferencia de cadera         | 97.375  | 9.575825216 |
| Largura de mano                  | 17.125  | 1.726888201 |
| Largura de palma de la mano      | 9.4375  | 0.623211727 |
| Anchura de palma de la mano      | 8.125   | 1.356202682 |
| Diámetro de agarre de la mano    | 5.0625  | 0.8634441   |
| Largura del pie                  | 24.8125 | 2.086307401 |
| Altura del pie                   | 8       | 2.138089935 |
| Anchura del pie                  | 8.975   | 0.822452778 |

Fuente: Elaboración propia.

**Paso 6. Desarrollo de la Carta Antropométrica.** Los datos antropométricos fueron utilizados para construir una carta que define las dimensiones críticas para el diseño de la cabina. Esta carta sirvió como guía durante el proceso de diseño, asegurando que se cumplieran los requisitos ergonómicos para un trabajo de pie para el percentil del 95 %.

Los datos antropométricos se expresan mayormente en percentiles. Considerando que el percentil es una medida que indica el porcentaje de la población que podrá utilizar la cabina, sin riesgo a sufrir un trastorno musculoesquelético a causa del diseño de la misma. En la Figura 5 se muestra la explicación de los valores del percentil 5 al 95 representados en la curva normal.

Para el cálculo de los percentiles se utiliza la fórmula de la ecuación 3, donde el valor de z del nivel de confianza del 95 % unilateral es 1.645. [9].

$$P_{95\%} = \mu + \sigma (1.645) \quad \text{Ec. (3)}$$

Para calcular el valor del percentil de la altura de la cabina se realiza con el dato de altura del cuerpo y se obtuvieron de las variables  $\mu=167 \text{ cm}$ , y  $\sigma=8.64$

$$P_{95\%} = 167 \text{ cm} + (8.64 * 1.645) = 181.21 \text{ cm} \quad \text{Ec. (4)}$$

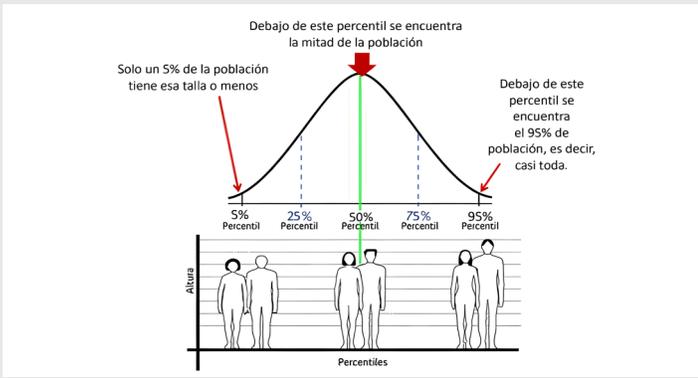


Figura 5. Explicación de percentiles.

Fuente: ¿Cómo elaborar percentiles?, formula y procedimiento [8].

Este procedimiento se repite para cada dato antropométrico y se registra en la Tabla 4 como se muestra a continuación:

Tabla 4. Cálculo de percentiles.

| Datos antropométricos / Muestras | MEDIA   | DESVEST | z del 5% | z del 95% | percentil 95% |
|----------------------------------|---------|---------|----------|-----------|---------------|
| Edad                             | 20.5    | 1.85164 | 1.96     | 1.645     | 23.546        |
| Estatura (Talla)                 | 167     | 8.63548 | 1.96     | 1.645     | 181.205       |
| Peso del cuerpo                  | 71.5125 | 11.7151 | 1.96     | 1.645     | 90.784        |
| Altura del cuerpo                | 167     | 8.63548 | 1.96     | 1.645     | 181.205       |
| Altura al ojo                    | 154.375 | 8.68393 | 1.96     | 1.645     | 168.660       |
| Altura al hombro                 | 136.625 | 6.09303 | 1.96     | 1.645     | 146.648       |
| Altura al codo                   | 104.75  | 4.7132  | 1.96     | 1.645     | 112.503       |
| Altura a la cadera               | 91.625  | 7.6146  | 1.96     | 1.645     | 104.151       |
| Altura al gluteo                 | 74.75   | 4.80327 | 1.96     | 1.645     | 82.651        |
| Altura a la muñeca               | 80      | 4.40779 | 1.96     | 1.645     | 87.251        |
| Altura al tercer dedo            | 63.5    | 3.02372 | 1.96     | 1.645     | 68.474        |
| Anchura lateral de brazos        | 165.375 | 8.63444 | 1.96     | 1.645     | 179.579       |
| Anchura de codos                 | 85      | 8       | 1.96     | 1.645     | 98.160        |
| Largura de brazos                | 79.5    | 4.47214 | 1.96     | 1.645     | 86.857        |
| Largura de puño                  | 69.125  | 4.15546 | 1.96     | 1.645     | 75.961        |
| Anchura de hombros               | 44.75   | 3.53553 | 1.96     | 1.645     | 50.566        |
| Anchura de pecho                 | 34.375  | 2.77424 | 1.96     | 1.645     | 38.939        |
| Anchura de cadera                | 35.875  | 7.18008 | 1.96     | 1.645     | 47.686        |
| Largura de brazo                 | 66.5    | 2.61861 | 1.96     | 1.645     | 70.808        |
| Circunferencia de pecho          | 99      | 6.84523 | 1.96     | 1.645     | 110.260       |
| Circunferencia de cintura        | 81.75   | 10.8989 | 1.96     | 1.645     | 99.679        |
| Circunferencia de cadera         | 97.375  | 9.57583 | 1.96     | 1.645     | 113.127       |
| Largura de mano                  | 17.125  | 1.72689 | 1.96     | 1.645     | 19.966        |
| Largura de palma de la mano      | 9.4375  | 0.62321 | 1.96     | 1.645     | 10.463        |
| Anchura de palma de la mano      | 8.125   | 1.3562  | 1.96     | 1.645     | 10.356        |
| Diámetro de agarre de la mano    | 5.0625  | 0.86344 | 1.96     | 1.645     | 6.483         |
| Largura del pie                  | 24.8125 | 2.08631 | 1.96     | 1.645     | 28.244        |
| Altura del pie                   | 8       | 2.13809 | 1.96     | 1.645     | 11.517        |
| Anchura del pie                  | 8.975   | 0.82245 | 1.96     | 1.645     | 10.328        |

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se realiza el diseño de la carta antropométrica considerando los diagramas de gauss de cada dato antropométrico y calculando todos los percentiles requeridos como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Diseño de la carta antropométrica.

| N. formato                       | 1                 | de   | 1    | Revisa | Norma Elizabeth Rodríguez Bustos |         |          |           |                  |                  |               |
|----------------------------------|-------------------|------|------|--------|----------------------------------|---------|----------|-----------|------------------|------------------|---------------|
| Departamento                     | Producción        |      |      | Fecha  | 1 de noviembre del 2023          |         |          |           |                  |                  |               |
| Analista                         | Michelle Martínez |      |      | Otros  |                                  |         |          |           |                  |                  |               |
| Datos antropométricos / Muestras | 1                 | ←→   | 23   | 24     | MEDIA                            | DESVEST | z del 5% | z del 95% | percentil 5% sup | percentil 5% inf | percentil 95% |
| Edad                             | 19                | 25   | 20   | 20     | 20.5                             | 1.85164 | 1.96     | 1.645     | 24.12921         | 16.87079         | 23.546        |
| Estatura (Talla)                 | 166               | 164  | 178  | 168    | 167                              | 8.63548 | 1.96     | 1.645     | 183.9255         | 150.0745         | 181.205       |
| Peso del cuerpo                  | 69                | 69.5 | 90   | 71     | 71.5125                          | 11.7151 | 1.96     | 1.645     | 94.47414         | 48.55086         | 90.784        |
| Altura del cuerpo                | 166               | 164  | 178  | 168    | 167                              | 8.63548 | 1.96     | 1.645     | 183.9255         | 150.0745         | 181.205       |
| Altura al ojo                    | 153               | 155  | 165  | 155    | 154.375                          | 8.68393 | 1.96     | 1.645     | 171.3955         | 137.3545         | 168.660       |
| Altura al hombro                 | 138               | 135  | 143  | 138    | 136.625                          | 6.09303 | 1.96     | 1.645     | 148.5673         | 124.6827         | 146.648       |
| Altura al codo                   | 106               | 105  | 110  | 106    | 104.75                           | 4.7132  | 1.96     | 1.645     | 113.9879         | 95.51212         | 112.503       |
| Altura a la cadera               | 96                | 89   | 101  | 90     | 91.625                           | 7.6146  | 1.96     | 1.645     | 106.5496         | 76.70038         | 104.151       |
| Altura al gluteo                 | 75                | 75   | 79   | 76     | 74.75                            | 4.80327 | 1.96     | 1.645     | 84.16441         | 65.33559         | 82.651        |
| Altura a la muñeca               | 83                | 78   | 85   | 79     | 80                               | 4.40779 | 1.96     | 1.645     | 88.63926         | 71.36074         | 87.251        |
| Altura al tercer dedo            | 65                | 61   | 67   | 62     | 63.5                             | 3.02372 | 1.96     | 1.645     | 69.42648         | 57.57352         | 68.474        |
| Anchura lateral de brazos        | 160               | 165  | 176  | 165    | 165.375                          | 8.63444 | 1.96     | 1.645     | 182.2985         | 148.4515         | 179.579       |
| Anchura de codos                 | 84                | 86   | 95   | 85     | 85                               | 8       | 1.96     | 1.645     | 100.68           | 69.32            | 98.160        |
| Largura de brazos                | 72                | 82   | 83   | 83     | 79.5                             | 4.47214 | 1.96     | 1.645     | 88.26539         | 70.73461         | 86.857        |
| Largura de puño                  | 64                | 68   | 73   | 69     | 69.125                           | 4.15546 | 1.96     | 1.645     | 77.2697          | 60.9803          | 75.961        |
| Anchura de hombros               | 45                | 45   | 47   | 48     | 44.75                            | 3.53553 | 1.96     | 1.645     | 51.67965         | 37.82035         | 50.566        |
| Anchura de pecho                 | 35                | 32   | 36   | 35     | 34.375                           | 2.77424 | 1.96     | 1.645     | 39.81252         | 28.93748         | 38.939        |
| Anchura de cadera                | 45                | 30   | 34   | 31     | 35.875                           | 7.18008 | 1.96     | 1.645     | 49.94796         | 21.80204         | 47.686        |
| Largura de brazo                 | 63                | 65   | 69   | 65     | 66.5                             | 2.61861 | 1.96     | 1.645     | 71.63248         | 61.36752         | 70.808        |
| Circunferencia de pecho          | 95                | 94   | 107  | 102    | 99                               | 6.84523 | 1.96     | 1.645     | 112.4166         | 85.58335         | 110.260       |
| Circunferencia de cintura        | 79                | 72   | 97   | 84     | 81.75                            | 10.8989 | 1.96     | 1.645     | 103.1118         | 60.38818         | 99.679        |
| Circunferencia de cadera         | 110               | 88   | 102  | 96     | 97.375                           | 9.57583 | 1.96     | 1.645     | 116.1436         | 78.60638         | 113.127       |
| Largura de mano                  | 17                | 16   | 21   | 17     | 17.125                           | 1.72689 | 1.96     | 1.645     | 20.5097          | 13.7403          | 19.966        |
| Largura de palma de la mano      | 9                 | 9    | 10   | 9      | 9.4375                           | 0.62321 | 1.96     | 1.645     | 10.65899         | 8.216005         | 10.463        |
| Anchura de palma de la mano      | 8                 | 8    | 11   | 7      | 8.125                            | 1.3562  | 1.96     | 1.645     | 10.78316         | 5.466843         | 10.356        |
| Diámetro de agarre de la mano    | 5                 | 5    | 7    | 4.5    | 5.0625                           | 0.86344 | 1.96     | 1.645     | 6.75485          | 3.37015          | 6.483         |
| Largura del pie                  | 24                | 25.5 | 27.5 | 24     | 24.8125                          | 2.08631 | 1.96     | 1.645     | 28.90166         | 20.72334         | 28.244        |
| Altura del pie                   | 7                 | 8    | 11   | 8      | 8                                | 2.13809 | 1.96     | 1.645     | 12.19066         | 3.809344         | 11.517        |
| Anchura del pie                  | 8.3               | 9    | 10   | 9      | 8.975                            | 0.82245 | 1.96     | 1.645     | 10.58701         | 7.362993         | 10.328        |

Fuente: Elaboración propia

Dentro de la estructura de la carta antropométrica se incluyen los diagramas de los percentiles como se muestra en el ejemplo de la Figura 6, en la cual se observa la campana de gauss con el percentil de la variable de altura.

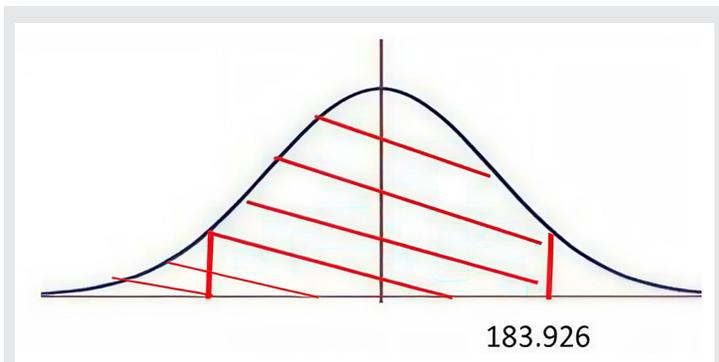


Figura 6. Representación del percentil de altura.

Fuente: Elaboración propia.

**Paso 7. Diseño de la Cabina.** El diseño de la cabina se llevó a cabo en colaboración con los alumnos de ergonomía de la carrera de Ingeniería Industrial. Se aplicaron los datos de la carta antropométrica para ajustar las dimensiones de la cabina y garantizar que cumpliera con los estándares de ergonomía [6]. Se toman en consideración las dimensiones de los percentiles tal como se observa en la Figura 7.

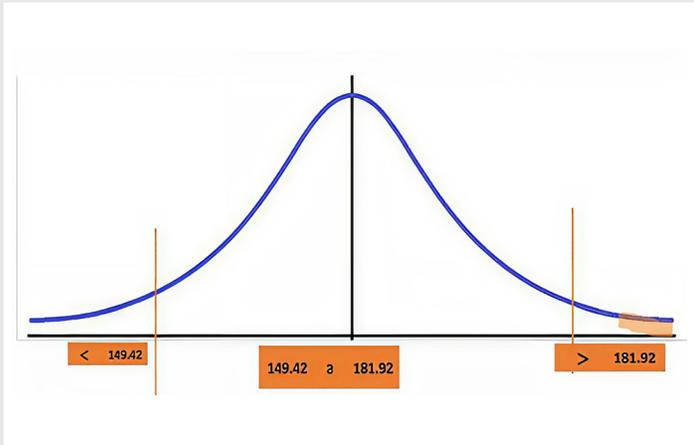


Figura 7. Datos de los percentiles de cada dimensión.  
Fuente: Elaboración propia.

Con referencia a la carta antropométrica se realizó el diseño de la cabina ergonómica en el software de AutoCAD tomando en consideración cada dato de los percentiles calculados en la carta antropométrica.

De las 29 variables (partes del cuerpo) que se tomaron en consideración para el diseño de la cabina, las que resultan más significativas son:

La altura, que es un factor clave para el diseño de la cabina, especialmente en relación con el espacio libre para la cabeza y el acceso a los controles.

El ancho de hombros influye en la anchura del asiento y el espacio libre para los brazos.

La longitud de los brazos determina el alcance de los controles y la comodidad al operar la cabina.

En la Figura 8 se muestra la vista frontal del diseño de la cabina ergonómica, para esta vista se considera que la longitud de las piernas afecta el espacio libre.

En la Figura 9 se muestra la vista isométrica del diseño de la cabina.

En la Figura 10 se muestran las dimensiones y el diseño de la vista lateral de la cabina.

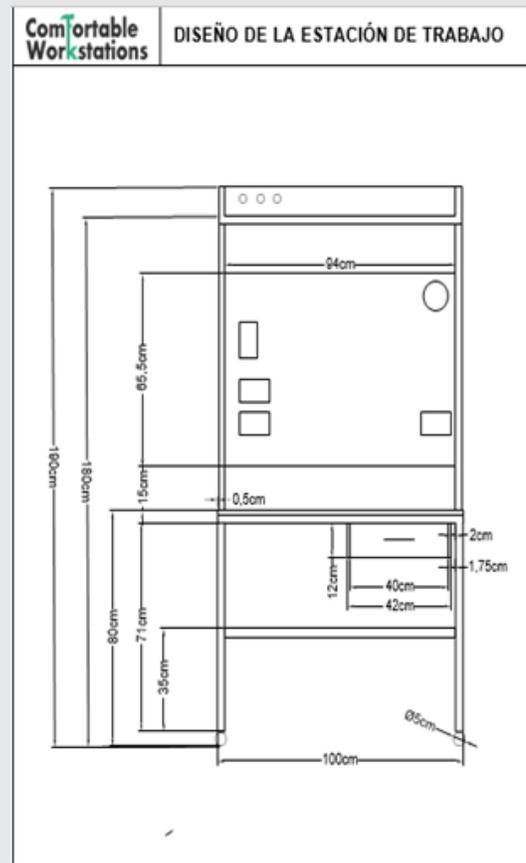


Figura 8. Vista frontal del diseño de la cabina.  
Fuente: Elaboración propia.

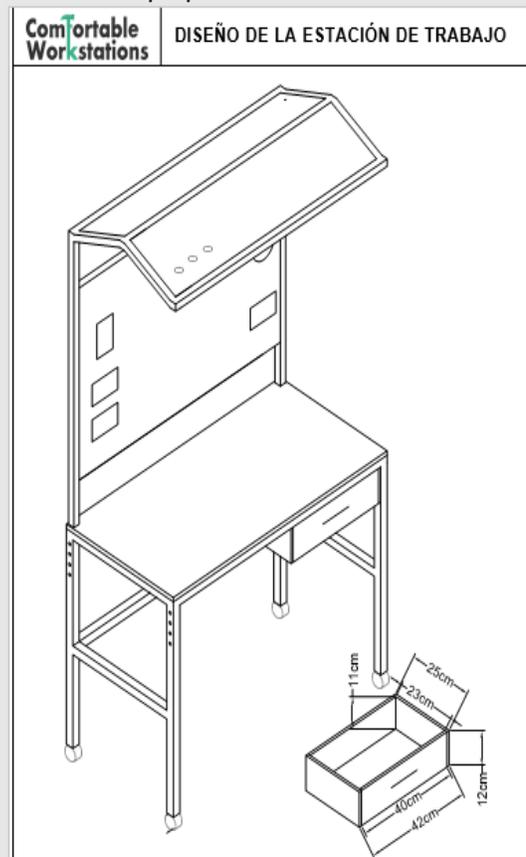


Figura 9. Vista Isométrica del diseño de la cabina.  
Fuente: Elaboración propia.

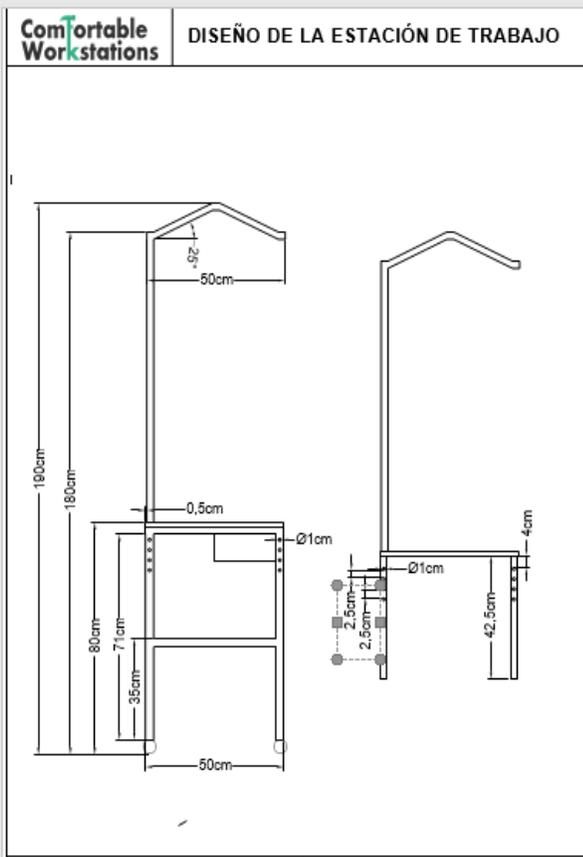


Figura 10. Vista lateral del diseño de la cabina.  
Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS

El análisis de los datos antropométricos se llevó a cabo mediante un enfoque estadístico riguroso, utilizando Excel, que permiten realizar análisis descriptivos, obtención de las medidas de tendencia central como media y desviación estándar. Con estos datos se calculan los percentiles para obtener los valores de las variables de la carta antropométrica y proceder con el diseño en el software de AutoCAD para validar el modelo de la cabina. Tras aplicar esta metodología estadística, se procedió a elaborar una carta antropométrica que sirvió como base para el desarrollo del prototipo de cabina. Los resultados obtenidos indicaron mejoras significativas en la comodidad y la funcionalidad de la cabina, las cuales fueron evaluadas mediante encuestas a los usuarios sobre su experiencia al usar el nuevo diseño. Estos resultados se compararon con los obtenidos de diseños previos, demostrando una reducción en el reporte de incomodidad y una mejora en la percepción de ergonomía respecto a las versiones anteriores, según los puntajes promedio de las encuestas. En cuanto a aspectos ergonómicos específicos, la implementación de la carta antropométrica permitió lograr ajustes cruciales en la altura de la mesa de trabajo de la cabina, la distribución de los controles y la visibilidad de las pantallas, adaptándolos a las dimensiones corporales más comunes de los estudiantes. Por ejemplo, se ajustó la altura de la mesa en base al percentil 95 de

la estatura de los estudiantes y la longitud del torso, resultando en una mejora en el soporte cervical y la reducción de la tensión en la espalda. Además, la disponibilidad de espacio adecuado para los movimientos de los usuarios contribuyó significativamente a la mejora de la postura y la reducción de movimientos forzados, con un aumento del 58 % en el confort y 100 % de mejora en ajustabilidad. En la Figura 10 se muestra que de los 24 alumnos de esta investigación en el factor de confort 14 de ellos observaron un aumento significativo con respecto a los módulos existentes en el laboratorio y el total de la muestra (24) reportó una mejora del 100 % en el índice de ajustabilidad, lo cual abona significativamente a la disminución de las lesiones musculoesqueléticas.

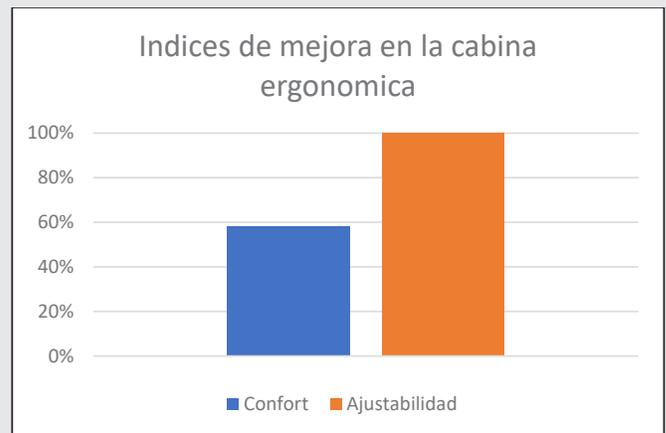


Figura 11. Gráfico de índices de mejora de la cabina.  
Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar esta carta, se desarrolló una cabina que ofrece un ajuste mejorando significativamente la comodidad y la funcionalidad en comparación con diseños previos. El análisis de los resultados ha revelado patrones interesantes en las dimensiones corporales de la población objetivo. Se ha observado que la altura, el ancho de hombros, la longitud de brazos y piernas, y las dimensiones de la cabeza y el torso varían significativamente entre los individuos. Estos hallazgos son cruciales para el diseño de cabinas ergonómicas, ya que las dimensiones corporales influyen en la posición de los usuarios, el alcance de los controles, la visibilidad de las pantallas y la comodidad general. Esta carta antropométrica proporciona una guía detallada para el diseño de cabinas que se adapten a un rango amplio de usuarios, considerando su variabilidad física y mejorando significativamente el confort, por tanto, la productividad aumentará significativamente.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de la carta antropométrica integral ha proporcionado una herramienta valiosa para el diseño de cabinas ergonómicas. La carta considera un rango amplio de medidas corporales, incluyendo altura, ancho de hombros, longitud de brazos y piernas, y dimensiones de la cabeza y el torso.

Este estudio demuestra que la elaboración de una carta antropométrica es esencial para la creación de cabinas ergonómicas que sean seguras y cómodas para los usuarios. Esta investigación confirma que el uso de datos antropométricos en el diseño industrial puede llevar a mejoras significativas en la funcionalidad y la seguridad de los productos manufacturados. Futuras investigaciones deberían enfocarse en la validación de este procedimiento en diferentes contextos industriales y poblacionales.

Los resultados de este estudio subrayan la importancia de la antropometría en el diseño ergonómico. La carta desarrollada no solo proporciona una guía clara para la fabricación de cabinas, sino que también destaca la necesidad de considerar variaciones individuales dentro de la población objetivo. Además, se discutieron las limitaciones del estudio, como la necesidad de ampliar la muestra para incluir una mayor diversidad de usuarios [9].

La carta se puede utilizar como referencia para la selección de los materiales, la configuración de los asientos, la ubicación de los controles, el diseño de las pantallas y la distribución general del espacio.

Para futuras investigaciones, se sugiere realizar estudios adicionales para realizar cabinas ergonómicas enfocadas en la inclusividad como estudiantes con sillas de ruedas o alguna discapacidad visual o auditiva. También se puede considerar la inclusión de otras medidas antropométrica, como la circunferencia del pecho y la longitud de la espalda, para mejorar la precisión del diseño ergonómico.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] Y. Torres, and Y. Rodriguez. "Surgimiento y evolución de la ergonomía como disciplina: reflexiones sobre la escuela de los factores humanos y la escuela de la ergonomía de la actividad". *Rev. Fac. Nac. Salud Pública [online]. vol.39, n.2 [cited 2025-02-24], e342868. Available from: <[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-386X2021000200010&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2021000200010&lng=en&nrm=iso)>Epub Nov 01, 2021. ISSN 0120-386X. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.e342868>. 2021.*

[2] MH. Saavedra, "Aplicaciones de la metodología TRIZ en el diseño ergonómico de estaciones de trabajo". *Industrial Data*, vol. 16, núm. 1, pp. 102-107. Enero-junio, 2013.

[3] F. Esparza, and R. Vaquero, *Antropometría: Fundamentos para la aplicación e interpretación*. 1ra ed. Editorial:Aula Magna. 2023.

[4] MJ. Agost, M. Vergara, (2015) *Antropometría aplicada al diseño de producto*. 1ra ed. Editorial: Editorial: Publicacions de la Universitat Jaume. 2023

[5] J. Lopez. *Productividad*. 1ra ed. Editorial:Palibrio. 2012.

[6] H. Gutiérrez. *Calidad y productividad*. 3ra ed. Editorial: Mc Graw Hill. 2010.

[7] G. Hernández. "Uso de medidas antropométricas para el diseño de estaciones de trabajo enfocado a operadoras de las industrias de la ZMG". *Repositorio CIATEQ*. Junio 2016.

[8] O. Casilleros. "¿Cómo calcular percentiles? Fórmula y procedimiento". *Portal Psicología y Mente*. <https://psicologiymente.com/miscelanea/como-calcular-percentiles>. Septiembre 3, 2019.

[9] D. M. Dudek, "Anthropometric design of workstations and work environments," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 23, no. 3, pp. 231-242, Jun. 2003.





Mecánica  
*de*  
Materiales

---

Ingeniantes

# Análisis de efectividad de las estrategias de marketing institucional en la captación de alumnos de nuevo ingreso del ITSCH

**RESUMEN:** Las instituciones educativas utilizan el marketing educativo para promocionar los servicios que ofertan, y se enfrentan a la competencia entre ellas con la finalidad de lograr una mayor captación de alumnos de nuevo ingreso, de este factor depende el trabajo de muchos empleados que van desde docentes, personal administrativo y de servicios, por si cada institución no llega a la meta corre el riesgo de perder horas de alguna de sus áreas académicas y en lo más drástico llegarla a cerrar de manera definitiva, por lo que esto hace que el marketing educativo recobre importancia, por ello este estudio analiza la efectividad de las estrategias de marketing que implementa el instituto para la captación de alumnos de nuevo ingreso, se realiza en el Tecnológico Nacional de México (TecNM) / Instituto Tecnológico Superior de Las Choapas (ITSCH), con estudiantes inscritos en el primer semestre en el periodo agosto 2023, tiene un enfoque cuantitativo al calcular una muestra probabilística aleatoria, aplicando un cuestionario politómico con escala Likert, posee un diseño experimental, con un alcance documental, correlacional, descriptivo, explicativo y transversal.

La hipótesis planteada se acepta debido a que se demuestra, a través de este estudio que el enfoque de estrategias de marketing que se implementan y percepción del servicio, es percibido por los estudiantes de manera favorable, considerando que debe reforzar el marketing digital ya que actualmente se utiliza más el tradicional.

**PALABRAS CLAVE:** marketing, estrategias, estudiantes, captación.



## Colaboración

Marisol López Mendoza; Yesenia González Cruz; Elda Jacinto Martínez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Las Choapas

Fecha de recepción: 04 de junio de 2024

Fecha de aceptación: 22 de noviembre de 2024

**ABSTRACT:** Educational institutions use educational marketing to promote the services they offer, and face competition between them in order to achieve a greater recruitment of new students, the work of many employees ranging from teachers, administrative and service staff depends on this factor, because if each institution does not reach the goal, it runs the risk of losing hours of one of its academic areas and at the most drastic, closing it permanently, so this makes educational marketing regain importance, therefore this study analyzes the effectiveness of the marketing strategies implemented by the institute to attract new students, it is carried out at the National Technological Institute of Mexico (TecNM) / Higher Technological Institute of Las Choapas (ITSCH), with students enrolled in the first semester in the period August 2023, it has a quantitative approach by calculating a random probability sample, applying a polytomous questionnaire with a Likert scale, it has an experimental design, with a documentary, correlational, descriptive, explanatory and transversal scope The hypothesis proposed is accepted because it is demonstrated through this study that the marketing strategies implemented and the perception of the service is perceived favorably by the students, considering that digital marketing should be reinforced, since traditional marketing is currently used more.

**KEYWORDS:** marketing, strategies, students, recruitment.

## INTRODUCCIÓN

La Asociación de Marketing de Estados Unidos (AMA, American Marketing Association), considera al marketing como un proceso de planeación y ejecución en la que se encuentran partes importantes como son: precio, promoción, distribución

de bienes, así como servicios [1, p. 67]. En las instituciones educativas se utiliza el marketing en la promoción realizada para la captación de alumnos que son matriculados cada año, por lo que se considera que la educación es un servicio.

El TecNM/ITSCH cuenta con 23 años de ofrecer servicios educativos en la localidad de Las Choapas, Veracruz, México; con la siguiente matrícula de alumnos en los periodos Agosto20-enero21 con 1,979 alumnos; en agosto21-enero22 su matrícula fue de 1,868 alumnos; en agosto22-enero23 fue de 2,031 y de agosto a octubre de 2023, tenía en las 10 áreas académicas un total de matrícula de 1,700 alumnos, por lo que se puede decir que la institución no pudo mantener una captación de matrícula por lo menos igual al periodo anterior y según los datos proporcionados por la institución se puede observar que del año 2020 al 2024, ha tenido constante variación en la matrícula, ya que en algunas ocasiones sube y en otras baja, por lo que estos datos llevan a determinar que no se ha podido mantener una matrícula constante.

Actualmente el TecNM / ITSCH cuenta con el departamento de vinculación y difusión, quien se encarga de las estrategias de marketing que se utilizan en la promoción institucional y que tiene como objetivo lograr la mayor captación de matrícula de nuevo ingreso, uno de los problemas que presenta el departamento es que no cuenta con un plan estratégico definido lo que lleva a: que la promoción salga de manera tardía, y no cuenta con un especialista en marketing.

El departamento de vinculación y difusión cada semestre utiliza las siguientes estrategias:

1.-Visitas planeadas a escuelas que se encuentran alrededor de la institución como son telebachillerato, Cobaev, Cecytev, CBtis 113, en la mayoría de los casos no le presenta material de todas las carreras o lo hace en momentos diferentes.

2.-Difusión en Redes Sociales como Facebook Institucional, Facebook por área académica, no hay una planeación para el lanzamiento de promoción de cada una de las 10 áreas académicas que se ofertan, lo hace de manera general abordando todas, pero sin brindar información específica.

3.- WhatsApp, Instagram una página web institucional, TikTok, también se carece de un plan de seguimiento y lanzamiento de estrategia.

Aunque hace todo esto en la mayoría de las veces no utiliza en la promoción a los especialistas de cada uno de los programas académicos que oferta el TecNM/ITSCH, otro elemento importante es que en ocasiones solo realiza una promoción institucional generalizada donde promueve todas las áreas académicas sin detallar estas, y en otras la realiza por cada una, pero deja de fuera algunas, considerando también que la información llega al aspirante en momentos o tiempos diferentes.

En toda institución educativa sea pública o privada se requiere del marketing educativo que le será de utilidad no solo para realizar la promoción del o los servicios que oferte si no también transmite un valor distintivo que es de utilidad en la captación de alumnos de nuevo ingreso, retención y fidelización de los alumnos ya inscritos, impulsa la imagen institucional, responde a las demandas del mercado laboral, en esto radica la importancia del marketing educativo, el cual es definido como: “un proceso de investigación que permite desarrollar servicios educativos, de acuerdo con un valor percibido, distribuidas en tiempo y lugar, que se promocionan éticamente para generar bienestar de los individuos y de la sociedad, satisfaciendo las necesidades individuales y sociales” [2, p. 14]

También se debe considerar que como afirma Ramírez (2009), el marketing educativo “es un proceso que debe ser planificado, con la intención de generar relaciones rentables o beneficiosas con los clientes, que en el caso de las instituciones educativas son los estudiantes en primer plano, teniendo por tanto como objetivo central, captar estudiantes y conservarlos que hayan seleccionado, otorgándoles a todos en general, satisfacción y excelente servicio”. [3, p. 70-71]

En cualquier organización, además de la “captación de los clientes, es necesario la retención y la fidelización de estos, considerando que para que se logre lo anteriormente expuesto se deben incluir estrategias que permitan la satisfacción de los estudiantes”. [4]

Dichas estrategias empleadas se deben “enfocar al mercado objetivo y competitivo haciendo uso de la fidelización de colectivos, de las herramientas tecnológicas a su disposición, y buen uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (Tics)”. [5, p. 27]

Para que sean funcionales las estrategias se debe desarrollar un “plan de marketing educativo, para ello existen varios pasos o elementos importantes, como son: el objetivo, el cliente o mercado objetivo, el servicio, posición, técnicas, presupuestos. Sainz de Vicuña (2013), plantea que, sin el establecimiento de estos pasos y su consolidación, la propaganda pierde sentido”. [5, p. 28]

De acuerdo con lo descrito en párrafos anteriores la investigación tiene por objetivo analizar la efectividad de las estrategias de marketing que implementa el TecNM/ITSCH para la captación de alumnos de nuevo ingreso.

La investigación plantea el siguiente cuestionamiento: ¿Las estrategias de marketing que implementa el TecNM/ITSCH son las adecuadas para la captación de matrícula?

**MATERIAL Y MÉTODOS**

**Metodología**

La investigación se realiza en el TecNM/ITSCH, con estudiantes inscritos en el primer semestre en el periodo agosto2023-enero2024 del sistema escolarizado. La investigación sigue un enfoque cuantitativo al calcular una muestra probabilística aleatoria, aplicando un cuestionario politómico en la escala Likert, posee un diseño experimental, con un alcance documental, correlacional, descriptivo, explicativo y transversal.

**Participantes**

En este estudio se considera a una población de 406 alumnos que se inscribieron al primer semestre del periodo agosto 23-enero 24 en las carreras ofertadas en el TecNM/ITSCH, las cuales son: Ingeniería en Industrial, Ingeniería en Gestión Empresarial, Ingeniería Civil, Ingeniería en Sistemas Computacionales, Ingeniería en Industrias Alimentarias, Ingeniería en Geociencias, Ingeniería Petrolera, Ingeniería Forestal, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Electromecánica.

**Muestra**

En este estudio se utiliza técnica probabilística que “permite conocer la probabilidad que cada individuo a estudio tiene de ser incluido en la muestra a través de una selección al azar” [6, p. 228]. Y para determinar la muestra se utiliza la fórmula finita de proporciones [7, p. 254] con un nivel de confianza del 95 % la cual le corresponde un valor de Zeta crítica de 1.96 y una probabilidad de que ocurra el evento estudiado en proporción del 50 %, así como un error estimado de 5%, con estos datos se obtuvo un valor de muestra de 198 alumnos a encuestar.

**Instrumento**

Para la investigación, se diseñó como instrumento de recolección de información un cuestionario politómico en la escala Likert.

El cual consta de dos variables: estrategias de marketing y percepción del servicio. Incluye 10 ítems, con un rango de respuesta de 1 a 5, donde: 1 = Muy malo, 2 = Malo, 3 = Regular, 4 = Bueno, 5 = Excelente.

Este instrumento permite analizar la efectividad de las estrategias de marketing implementadas por el TecNM/ITSCH, para la captación de alumnos de nuevo ingreso durante el periodo de agosto2023-enero2024. A continuación, se muestra en la Tabla 1 la variable independiente con dos dimensiones.

Tabla 1. Estrategias de marketing.

| Variable Independiente             | Estrategias de Marketing  | Ítems |
|------------------------------------|---|-------|
| Dimensión 1- Marketing Tradicional | Publicidad (perifoneo), correo directo, llamadas, televisión, periódicos, revistas, anuncios físicos, folletos y vallas.                                | 1,5,6 |
| Dimensión 1- Marketing Digital     | Sitios web, página institucional, redes sociales, correo electrónico, aplicaciones móviles, motores de búsqueda, influencer, artículos, e-book, y post. | 3,4,7 |

Elaboración: Propia de los autores.

En la Tabla 2 se muestra la variable dependiente con una dimensión.

Tabla 2. Estrategias de percepción del servicio.

| Variable Independiente          | Estrategias de Marketing   | Ítems    |
|---------------------------------|--|----------|
| Dimensión 1.- Calidad Educativa | Atención en el servicio de ventanilla docente especializaros, instalaciones equipadas, variedad de servicios ofertados | 2,8,9,10 |

Elaboración: Propia de los autores.

**Validación del instrumento**

Para la confiabilidad o fiabilidad del instrumento de medición utilizado en el estudio, se realiza con el programa IBM SPSS Statistics, Versión 29 [8] para el cálculo de Alfa de Cronbach y comprobar su “consistencia interna al relacionarse los ítems que conforman el instrumento” considerando un rango de “0,72 a 0,99” [9, p. 250].

Se puede observar en la Tabla 3 el estadístico de fiabilidad en donde el análisis nos entrega un resultado del 0.833 quedando en el rango de excelente.

Tabla 3. Estadístico de fiabilidad en SPSS V.29.

| Estadístico de fiabilidad |  |                  |
|---------------------------|--|------------------|
| Alfa de Cronbach          | Alfa de Cronbach basada en elementos tipificados | No. de Elementos |
| 0.833                     | 0.855  | 10               |

Elaboración: Propia de los autores.

En este estudio se considera la siguiente hipótesis de investigación:

Hi: A mejores estrategias de marketing implementada en la publicidad del TecNM/ITSCH para la captación de alumnos de nuevo ingreso mejor percepción del servicio.

**Variable independiente:** Estrategias de marketing

**Variable dependiente:** Percepción del servicio.

**RESULTADOS**

Se organiza la información mediante el uso del software Microsoft Excel, para su análisis por variable, en la Figura 1 se muestra la variable independiente “estrategias de marketing” con su dimensión 1 marketing tradicional que corresponde a la pregunta 1, 5 y 6.

Al analizar el marketing tradicional para la pregunta 1. ¿Cómo consideras el Marketing tradicional con respecto a la publicidad (perifoneo), anuncios físicos, folletos, vallas publicitarias que utiliza la institución? En un 52 % los alumnos lo consideran bien, un 29 % regular, un 12 % excelente, el 5 % malo y el 3 % muy malo. La pregunta 5 plantea ¿Cómo consideras la claridad de la información proporcionada de forma directa en el Marketing tradicional por correo directo y llamadas? Se obtuvo en la escala más alta que el 47 % considera que regular, un 26 % consideran que bien, y una

minoría con el 18 % indica que excelente, el 7 % malo y por último un 2 % muy malo. Y la pregunta 6, ¿Cómo consideras las estrategias de marketing tradicional en periódicos, revistas, radio, que utiliza el TecNM/ITSCH en la promoción de la captación de alumnos? En la que contestaron los estudiantes con un porcentaje más alto del 48 % lo consideran muy malo seguido del 29 % en excelente, con un 19 % de los alumnos lo consideran malo, el 3 % regular y solo el 1 % lo consideran bien.

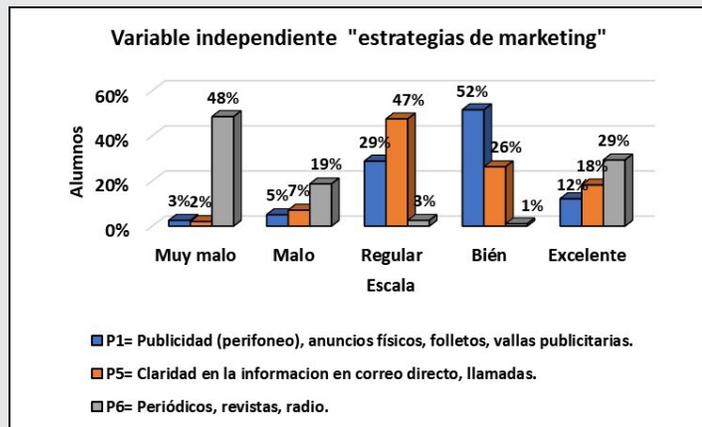


Figura 1. Dimensión 1 Marketing Tradicional.  
Fuente: Propia de los autores.

En la Figura 2 también se muestra la variable independiente de "estrategias de marketing" pero con su dimensión 2 marketing digital que corresponden a las preguntas 3, 4 y 7, para el cuestionamiento de la pregunta 3 ¿Cómo consideras el marketing digital en el uso de las redes sociales Facebook, Instagram, tik tok, post digitales que utiliza el TecNM/ITSCH en la difusión de sus carreras? se observa que se tiene un 48% en excelente, un 24 % para regular, 19% para bien, un 6 % para malo y un 3 % para muy malo, indicando esto que en promedio los tipos de recursos mencionados y que corresponde al marketing digital que se ha utilizado es excelente, en donde predomina que el marketing digital por medio de redes como el Facebook, tik tok y post es excelente.

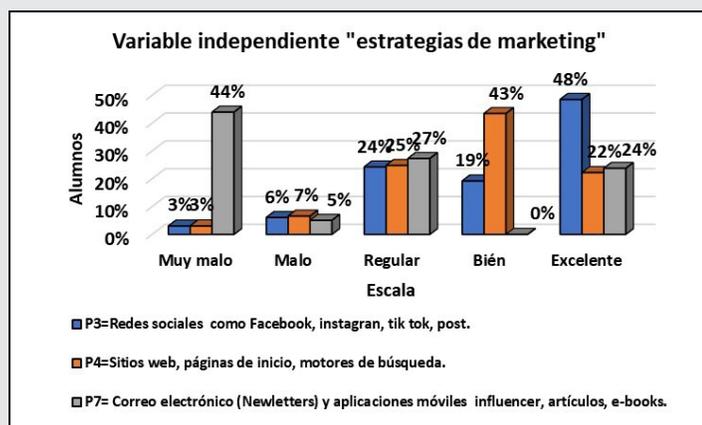


Figura 2. Dimensión 2 Marketing digital.  
Fuente: Propia de los autores.

La pregunta 4 plantea lo siguiente: ¿Consideras efectivo los sitios web, páginas de inicio, motores de búsqueda que utiliza la institución en la promoción y difusión de cada una de las carreras que oferta? En esta se obtuvo el porcentaje más alto con 43 % consideran que bien, seguido con un 25 % en regular, así como un 22 % en excelente, el 7 % en malo y un 3 % en muy malo. Mientras que en la pregunta 7 indica ¿Cómo consideras el correo electrónico (Newsletters) y aplicaciones móviles influencer, artículos, e-books que utiliza el instituto en la promoción y difusión de las carreras que oferta? Los alumnos encuestados consideran en un 44 % muy mala, el 27 % regular, seguido del 24 % en excelente, un 7 % en malo, por lo que se confirma que la efectividad de los tipos de recursos mencionados y que corresponden al marketing digital son muy mala.

En la Figura 3 se muestra la variable dependiente que corresponde a la: "percepción del servicio" con su dimensión 1 calidad educativa y se aborda en las preguntas 2, 8, 9 y 10. La pregunta 2 plantea: ¿Cómo evalúas los servicios ofertados por la institución como son: internet en todos los espacios de la institución, ¿así como las áreas climatizadas? El 51 % de los alumnos contestaron que bien, mientras que el 26 % regular, el 18% excelente, el 4 % malo y un 1 % muy malo.

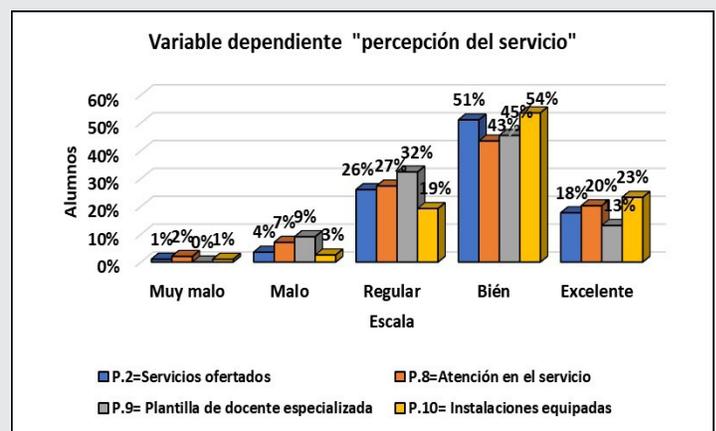


Figura 3. Dimensión 1 Calidad educativa  
Fuente: Propia de los autores.

Para la pregunta 8 plantea ¿Cómo consideras la atención del servicio que te brinda el personal de admisiones o asesoramiento académico del TecNM/ITSCH? Un 43% de los alumnos consideran que es buena, el 27% regular, un 2 % excelente, 7% malo y 2 % muy malo.

Pregunta 9 ¿Cómo consideras a la plantilla docente especializada en tu área ofertada?, un 45% considera que es buena, un 32% regular, una minoría del 13% excelente, el 9% malo, con esto queda claro que los docentes deben especializarse en el área a la que se encuentra asignado dentro del instituto.

La pregunta 10 ¿Cómo consideras el equipamiento de la institución en sus instalaciones y cada una de sus

áreas? Un 54 % considera que son buenas, el 23 % excelente, un 19 % regular, el 3 % malo y solo un 1 % muy malo. Con lo que se puede afirmar que la atención en el servicio de los alumnos, contar con instalaciones equipada, docentes especializados en su área asignada, así como la variedad de servicios que oferta, son factores importantes para que los alumnos de la localidad deseen pertenecer a la institución.

## CONCLUSIONES

Con los datos obtenidos en los resultados se comprueba que las estrategias realizadas en el marketing del TecNM / ITSCH se enfocan más a la forma tradicional como lo especifica la pregunta 1 ¿Cómo consideras el Marketing tradicional con respecto a la publicidad (perifoneo), anuncios físicos, folletos, vallas publicitarias? los alumnos en un 52% lo consideran bien, mientras que un 29 % regular, excelente 12 %, pasa todo lo contrario cuando se plantea el cuestionamiento que hace alusión al uso del marketing digital en la pregunta 3 ¿Cómo consideras el marketing digital en el uso de las redes sociales Facebook, Instagram, tik tok, post digitales que utiliza el TecNM/ITSCH en la difusión de sus carreras? Donde se observa que se tiene un 48 % en excelente, 24 % para regular, 19% bien, esto lleva a la pregunta de investigación establecida que plantea lo siguiente: ¿Las estrategias de marketing que implementa el TecNM/ITSCH son las adecuadas para la captación de matrícula? Por lo que de acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que las estrategias digitales se deben reforzar ya que actualmente se utiliza más el marketing tradicional entre las cuales se encuentran la radio, televisión, periódicos y perifoneo, han funcionado parcialmente, pero podrían ser mejores implementando más recursos de las digitales.

Con respecto a la variable dependiente percepción del servicio, en su dimensión 1 calidad educativa, los resultados obtenidos indican que a los alumnos les agrada y están satisfecho con el servicio e instalaciones, pero cuando se les plantea el cuestionamiento en la pregunta 9: ¿Cómo consideras a la plantilla docente especializada en tu área ofertada? Un 45 % considera que bien, un 32 % regular una minoría del 13 % excelente y un 9 % malo, estos resultados indican que se debe verificar que las asignaturas se asignen de acuerdo con el perfil profesional que posea cada docente, que posea la experiencia, conocimiento y dominio de la asignatura que le ha sido asignada, ya que esto permitirá una mejor percepción del alumno respecto a la plantilla docente con la que cuenta cada una de las áreas académicas.

Se puede concluir que la hipótesis planteada en la investigación de "a mejores estrategias de marketing implementada en la publicidad del TecNM / ITSCH para la captación de alumnos de nuevo ingreso mejor percepción del servicio" se acepta debido a que se

demuestra, que de acuerdo a las estrategias de marketing que se implementan en la publicidad, se tiene mejor percepción de cada uno de los servicios que brinda el instituto, desde la perspectiva de los alumnos de nuevo ingreso ellos consideran de manera favorable la publicidad, pero los datos aportados por ellos mismos se considera que se debe reforzar el marketing digital ya que actualmente se utiliza más el tradicional.

Lo que lleva a sugerir que debido a la necesidad de seguir avanzando que tiene la institución se debe adaptar a los cambios continuos que le permita satisfacer las demandas cambiantes del entorno educativo y social, por ello es importante que el departamento encargado de la promoción sea dirigido por un especialista en marketing o neuromarketing, que tenga la visión de adaptación a un mundo en constante evolución.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la participación de cada uno de los departamentos que apoyaron para que esta investigación contará con datos reales de la institución. A los alumnos que participaron con sus aportaciones y en general a todos y cada una de las personas que indirectamente participaron para que se lograra la realización de la investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] F. D. Álvarez Pinto, *Planificación estratégica de marketing, Perspectivas*, vol. 20, pp. 67-104, 2007. [Consultado: 5 de septiembre de 2023]. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=425942331006>.

[2] H. Trejo y M. Valdez (2017) LA GERENCIA DEL MARKETING EDUCATIVO EN EL CONTEXTO UNIVERSITARIO DEL ESTADO YARACUY, [Versión electrónica]. *Educare*, 21(2) 4-26. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.46498/reduipb.v21i2.61>

[3] A.J López Barrera & Z.I Esteves-Fajardo (2022, enero) *El marketing digital educativo. Un aporte innovador para gestión educativa*, CIENCIAMATRIA Revista Interdisciplinaria de Humanidades, Educación, Ciencia y Tecnología Vol. 8 Núm. 1 (8) <https://cienciamatriarevista.org.ve/index.php/cm/article/view/630>.

[4] Gordillo, L., Domínguez, B., Vega, C., De la Cruz, A. & Ángeles, M. (2020, abril) *El marketing educativo como estrategia para la satisfacción de alumnos universitarios, Propósitos y Representaciones*, 8(SPE1), e499. Consultado el 09 septiembre 2023, [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2307-79992020000100006](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2307-79992020000100006)

[5] M.R Altamirano-Pazmiño & L. F. Cusme-Vélez, *Marketing educativo como estrategia en el sector educativo FIPCAEC (Edición 33) Vol. 7, No 1 Especial Junio 2022*, pp. 24-34  
<https://fipcaec.com/index.php/fipcaec/article/view/580/1014>.

[6] Otzen, T. y Manterola, C. (2017, marzo) *Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. International Journal of Morpholog*, 35(1), Consultado el 22 agosto 2023. [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-95022017000100037&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-95022017000100037&script=sci_arttext).

[7] A. Díaz Mata (2013) *Estadística aplicada a la administración y a la economía*, Primera edición. México: McGraw-Hill.

[8] IBM Corp. *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 29.0 [Software]*. [Consultado: 11 de septiembre de 2023] [Instalación: 31 de julio de 2023]

[9] M. Quero Virla, "Confiableidad y coeficiente Alfa de Cronbach," *\*Telos\**, vol. 12, no. 2, pp. 248-252, 2010. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99315569010>. [Accessed: Jun. 3, 2024].





Mecánica  
*de*  
Materiales

---

Ingeniantes

# Desarrollo de prácticas de fabricación en CNC y pruebas de tensión en probetas de acero, aluminio y cobre en Máquina Universal

**RESUMEN:** Este trabajo consiste en la fabricación de probetas para someterlas a ensayo de tensión de acuerdo a las normas DIN en ISO 6892-1 [1] y ASTM E8 [2].

Una probeta es una muestra de un producto industrial o manufacturado, que se saca de un lote para ser sometida a pruebas mecánicas, análisis químicos u otros ensayos [3]. Se denomina prueba de tensión al ensayo que permite conocer las características de un material cuando se somete a esfuerzos de tracción [4]. El objetivo es determinar la resistencia a la rotura y las principales propiedades mecánicas del material vs normatividad.

La práctica inicio con el diseño de las probetas de acero, aluminio y cobre, de acuerdo a la normatividad antes mencionada, continuando con la programación y mecanizado en el CNC, una vez fabricadas las probetas se procedió a realizar el ensayo de tensión en cada una de las diferentes probetas, finalmente, se realizó una comparación entre la teoría y la práctica.

Los resultados obtenidos en la prueba de tensión demostraron a los estudiantes que los datos teóricos no difieren de los datos que proporcionan las normas DIN, ISO y ADTM; se refuerza que los estudios realizados con anterioridad sobre estos materiales son acordes a la normatividad vigente.

El TecNM demuestra con este estudio que tienen la capacidad de brindar servicios de diseño, maquinado y pruebas de tensión a la industria Metal – Mecánica, ya que los resultados obtenidos en esta práctica están conforme a normatividad vigente.

#### PALABRAS CLAVE:

Probeta, CNC, Normatividad, Comparación, Fabricación, Mecanizado, Tensión.



#### Colaboración

Carlos Alberto González Jiménez; María de los Ángeles Balderas Cid; Raúl Eusebio Grande, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Atlixco

Fecha de recepción: 13 de junio de 2024

Fecha de aceptación: 04 de marzo de 2025

**ABSTRACT:** This work consists of the fabrication of test specimens to be subjected to tensile testing according to the DIN standards in ISO 6892-1 [1] and ASTM E8 [2].

A test specimen is a sample of an industrial or manufactured product, taken from a batch to be subjected to mechanical tests, chemical analysis, or other trials [3]. It is called a tensile test to the test that allows knowing the characteristics of a material when subjected to tensile stresses [4]. The objective is to determine the breakage resistance and the main mechanical properties of the material versus standards.

The practice began with the design of steel, aluminum, and copper specimens, according to the aforementioned regulations, followed by programming and machining on the CNC. Once the specimens were manufactured, tensile testing was conducted on each of the different specimens. Finally, a comparison between theory and practice was made.

The results obtained in the tensile test demonstrated to the students that the theoretical data does not differ from the data provided by the DIN, ISO, and ADTM standards; it reinforces that the studies previously conducted on these materials are in accordance with current regulations.

The TecNM demonstrates with this study that they have the capacity to provide design, machining, and tensile testing services to the Metal-Mechanical industry, as the results obtained in this practice comply with current regulations.

#### KEYWORDS:

Probe, CNC, Standards, Comparison, Fabrication, Machining, Tension.

## INTRODUCCIÓN

Todos los seres humanos aprenden de diferente forma, a algunos estudiantes les basta con solo leer, otros ven vídeos, pero existen algunos que prefieren llevar a cabo experimentos para corroborar información y generar aprendizaje significativo. Al abordar el tema de tensión, la propuesta del docente fue diseñar probetas de acero, aluminio y cobre, maquinas en máquina CNC – fresadora, para someterlas a pruebas destructivas de tensión en la Máquina Universal y comparar los resultados con la normatividad DIN en ISO 6892-1 y ASTM E8.

La selección del material fue en base al uso que tienen en la industria metal mecánica y su disponibilidad en el mercado del estado de Puebla, México; de acuerdo al sitio Alsimet [5] (2022), los metales más utilizados son: acero, hierro, aluminio, cobre y titanio.

El acero es una aleación de hierro y carbono, donde el carbono generalmente no supera el 2% en peso. Esta combinación de elementos le confiere al acero propiedades mecánicas superiores al hierro puro [6].

McCormac y Csernak [7] en su libro Diseño de estructuras de acero, menciona las ventajas de del acero ver Figura 1.

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>Alta resistencia</b> | • Alta resistencia por unidad de peso.   |
| <b>Uniformidad</b>      | • Las propiedades del acero no cambian con el tiempo.                                |
| <b>Elasticidad</b>      | • Los momentos de inercia del acero se pueden calcular exactamete.                   |
| <b>Durabilidad</b>      | • Bajo ciertas condiciones no se requiere de ningún mantenimiento a base de pintura. |
| <b>Ductilidad</b>       | • Soporta grandes deformaciones sin fallar.  |
| <b>Tenacidad</b>        | • Los aceros poseen resistencia y ductilidad.  |

Figura 1. Ventajas del Acero.  
Fuente: Elaboración propia.

El aluminio es un metal abundante, constituye alrededor del 8% de la corteza terrestre [8], solo superado por la sílice; es un material relativamente fácil de fabricar con una alta relación peso/resistencia, que lo hace atractivo para la fabricación de recipientes.

Las características del aluminio se muestran en la Figura 2. [9]

|  |   |
|--|---|
| <b>Peso y densidad</b>                   | • Su densidad es de aproximadamente 2.7 g/cm3, es un metal ligero.  |
| <b>Resistencia a la corrosión</b>        | • Cuando se expone al aire, el aluminio forma una capa de óxido de aluminio en su superficie que es extremadamente dura y resistente a la corrosión.  |
| <b>Conductividad térmica y eléctrica</b> | • Es un buen conductor de calor y electricidad, solo superado por el cobre.   |
| <b>Maleabilidad y ductilidad</b>         | • Es un metal muy maleable y dúctil, excelente opción pra una amplia gama de aplicaciones.  |
| <b>Atoxicidad</b>                        | • Tiene poca incidencia negativa en la salud, pero la exposición a altos niveles de aluminio si puede tener efectos perjudiciales para el ser humano. |
| <b>Reciclabilidad</b>                    | • 100% reciclable sin perder sus propiedades, requiere solo el 5% de eergía del utilizado en la producción de aluminio primario.                      |

Figura 2. Características del Aluminio.  
Fuente: Elaboración propia.

Codelco [10], empresa dedicada a la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre, en Chile, informa en su página web que el cobre es un elemento químico esencial, un metal de transición rojizo y uno de los metales más utilizados por la humanidad. Su símbolo químico es Cu y su número atómico es 29.

En la Figura 3 se muestran sus principales propiedades. [11]

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| <b>Conductividad</b>              | • Excelente conductor de la electricidad y el calor, solo superado por la plata.                |
| <b>Maleabilidad</b>               | • Es muy maleable y dúctil, lo que facilita su transformación.                                  |
| <b>Resistencia a la corrosión</b> | • Forma una capa de pátina (carbonato de cobre) en su superficie que lo protege de la corrosión |
| <b>Antibacteriano</b>             | • Tiene propiedades antibacterianas naturales.  |
| <b>Reciclable</b>                 | • Es 100% reciclable sin perder sus propiedades, lo que lo convierte en un material sostenible. |

Figura 3. Características del Cobre.  
Fuente: Elaboración propia.

## Problema de investigación

Demostrar a los estudiantes de Ingeniería Industrial mediante la experimentación -diseño, maquinado, pruebas de tensión destructiva- que las propiedades de resistencia de las probetas elaboradas de acero, aluminio y cobre son acordes a las normas DIN en ISO 6892-1 [1] y ASTM E8.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El desarrollo de este proyecto se realizó en el Instituto Tecnológico Superior de Atlixco, en el estado de Puebla. De acuerdo al INEGI [12], en el año 2022, la industria manufacturera represento un 11% del VAB del estado. Estas empresas están relacionadas con la industria automotriz, qué en sus procesos, utilizan principalmente acero, aluminio y cobre.

Los materiales utilizados para este trabajo fueron adquiridos en la ciudad de Puebla, en la sucursal de Materiales Torrecillas.

El material fue usado para la fabricación de cinco muestras de acero comercial, cinco de aluminio y cinco de cobre. A continuación, se muestran los pasos que se siguieron en la metodología realizada:

### Diseñar probeta en software CAD

Como primer paso, se realizó el diseño de la probeta de acuerdo con la norma ISO 6892-1 [8], como se muestra en la Figura. 4.

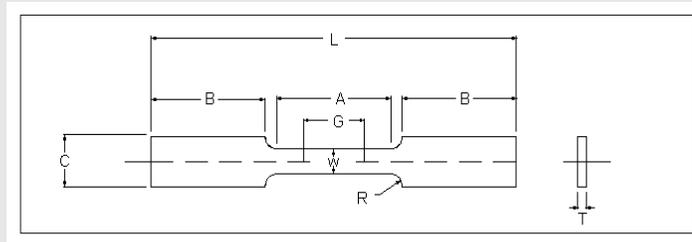


Figura 4. Diseño de la Probeta.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Dimensiones de probeta a ensayar.

| Dimensiones                         |                 |
|-------------------------------------|-----------------|
| G - Logitud calculada               | 2in o 50.8mm    |
| W - Anchura                         | ½ in o 12.7mm   |
| T - Espesor                         | 3/6 o 4.76mm    |
| R - Radio del filete                | ¼ o 6.35mm      |
| L - Longitud total                  | 8 0 203.2mm     |
| A - Longitud de la sección reducida | 2 ½ in o 63.5mm |
| B - Longitud de fijación            | 2 ½ in o 63.5mm |
| C - Anchura de fijación             | 1in o 25.4mm    |

Fuente: Elaboración propia.

### Generar códigos G y M mediante Software CAM

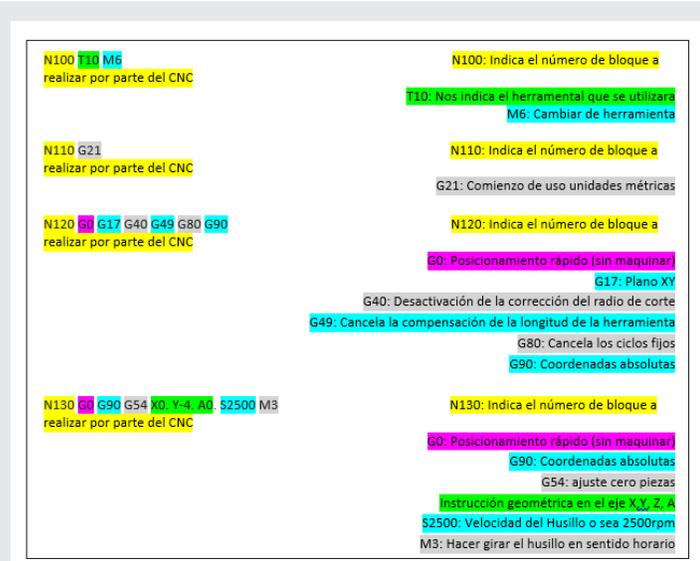


Figura 5. Extracto de código G y M.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5, se muestra solo una parte o extracto de los códigos utilizados en Software CIMCO, debido a que la codificación abarca siete hojas, para la fabricación de las diferentes probetas en CNC.

### Fabricar probetas según las normas DIN EN ISO 6892-1 y ASTM E8.

Para la fabricación de las probetas se utilizaron tres diferentes materiales los cuales, se mencionan a continuación:

#### Acero comercial:

Estos presentan aleaciones de hierro y carbono con porcentaje de este último que varía entre el 0.08 % y el 2 % en masa de su composición. El acero al carbono se deriva de la aleación entre hierro y carbono. Al variar el porcentaje de carbono, es posible producir aceros con diferentes cualidades. En general, mientras más alto es el porcentaje de carbón, más tenaz y rígido será el acero. El acero con un contenido medio de carbón es altamente tenaz, motivo por el cual se usa para fabricar puentes o partes estructurales aptas para soportar enormes cargas. Por su parte, el acero con alto contenido de carbón se utiliza para fabricar cables. Cuando el porcentaje de carbón es mayor que el de hierro, se habla de hierro fundido, el cual se trabaja para la fabricación de jarrones y otro tipo de artículos. Aunque este último tipo de acero es bastante duro, también es altamente frágil. El acero con bajo porcentaje de carbón se conoce en el mercado como hierro forjado. Este tipo de acero es fácil de manipular, ya que es altamente plástico.

#### Aluminio:

Las características mecánicas del aluminio varían considerablemente dependiendo de la aleación que se esté considerando, la resistencia al cizallamiento es un valor importante para tener en cuenta y poder calcular la fuerza necesaria para el corte, así como para determinadas construcciones.

#### Cobre:

Para mejorar sus propiedades mecánicas de resistencia el cobre puro se suele mezclar con otros elementos, formando aleaciones que mejoran sus prestaciones resistentes, aunque sea a costa de perder algo de su buena conductividad original [13]

A continuación, en la Figura. 6 se presenta un collage de imágenes de la fabricación de las probetas de acuerdo con las dimensiones presentadas en la Tabla 1.



Figura 6. Maquinado de probetas.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Probetas maquinadas de los tres materiales, acero, aluminio y cobre.

Fuente: Elaboración propia.

**Las probetas fabricadas en máquina universal se someten a ensayo y tensión**

En este apartado se realizaron pruebas de ensayo a tres probetas: la primera de acero comercial, la segunda de aluminio y la tercera de cobre [14], tal como se observa en la Figura 8.

A continuación, se muestra en la Figura 8 un collage del cómo se realizó dicha actividad en la máquina universal.

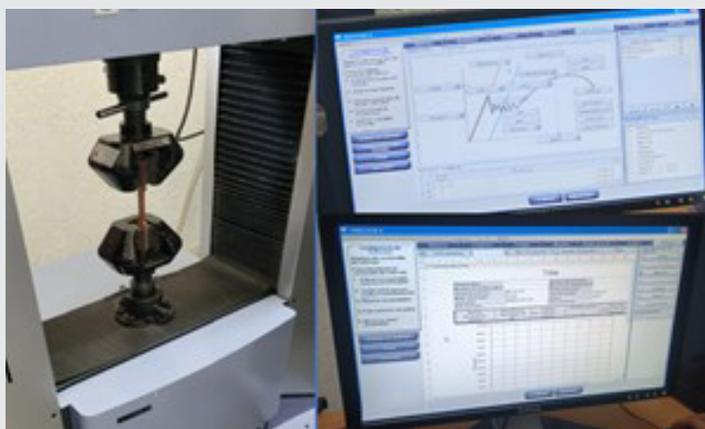


Figura 8. Collage de prueba de tensión en máquina universal.

Fuente: Elaboración propia.

**Corroborar resultados obtenidos de Máquina Universal con la teoría**

De acuerdo con la normatividad DIN en ISO 6892-1 y ASTM E8 [1], se realizó en el Anexo A el comparativo de los resultados de la Teoría a la práctica, como se muestra a continuación:

**RESULTADOS**

De acuerdo con el Anexo A, podemos observar que la probeta de acero posee una gran resistencia en comparación con las probetas de aluminio y cobre, de tal forma que la probeta de acero puede tener una mayor tensión sin sufrir deformación, como es el caso de las probetas de aluminio y cobre, es decir, puede tener una buena tensión y poder regresar a su forma original, tal como se visualiza en la Figuras 9, 10 y 11 esfuerzo - deformación.

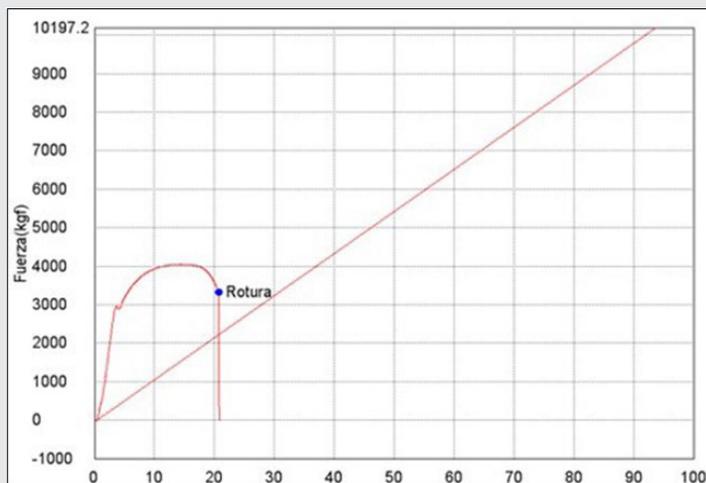


Figura 9. Resultado de la probeta de acero en diagrama de esfuerzo.

Fuente: Elaboración propia.

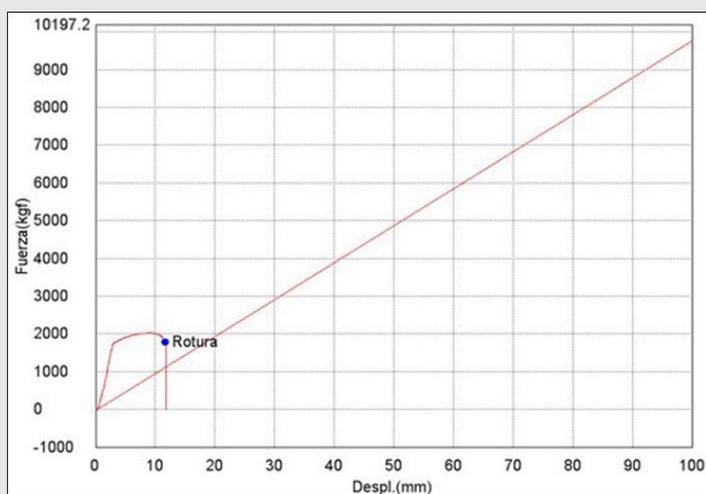


Figura 10. Resultado de la probeta de aluminio en diagrama de esfuerzo.

Fuente: Elaboración propia.

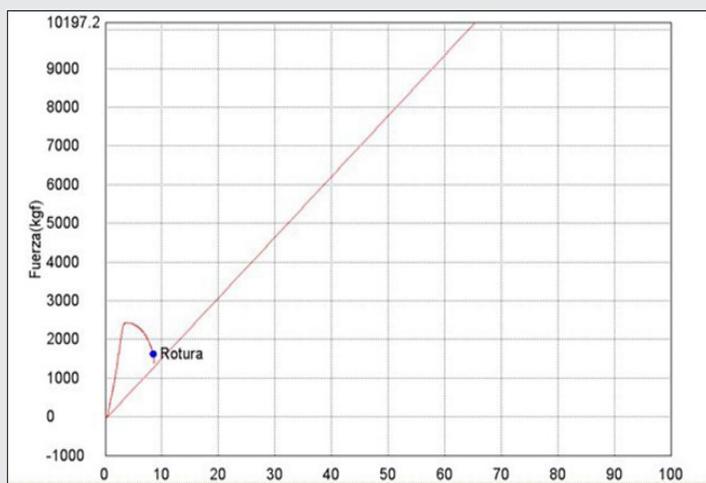


Figura 11. Resultado de la probeta de cobre en diagrama de esfuerzo.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que hay probabilidad de que llegue el momento en el que la probeta pierda tensión y pase a la deformación permanente, lo cual, generaría una ruptura, así como lo explica el ensayo de tensión de la norma DIN en ISO 6892-1 y ASTM E8. [1] [2]

El segundo caso, las probetas de aluminio, (ver Figura 10) tienen un mejor resultado en las pruebas de ensayo de tensión, en comparación con las probetas de cobre, ya que se observa que, al aplicar un poco de tensión, la probeta tiene una ligera deformación al momento de entrar en la zona de endurecimiento, esto nos indica que tiene una mayor deformación en comparación con el acero, lo que indica que este material es más maleable con respecto al material anterior. [13]

Por último, en el ensayo de tensión, las probetas de cobre llegan más rápido a la ruptura, de acuerdo con la tabla 2 y así como con la teoría, se observa que el cobre al igual que el aluminio empiezan a sufrir una ligera deformación en la prueba de tensión, aunque este tiene una resistencia menor en comparación al aluminio, es decir no pasa mucho tiempo en la zona de endurecimiento por deformación lo que ocasiona que su zona de tensión sea mayor. [14]

## CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados, se concluye que, no existe gran diferencia entre la teoría y la práctica de este trabajo, esto se debe a que los materiales en ocasiones tienen diferentes porcentajes en la combinación de los elementos que los conforman, como ejemplo podemos mencionar al acero, que entre mayor porcentaje de carbón, mayor será su resultado en la prueba de tensión, es decir, va a tener un mayor esfuerzo a la deformación y a la ruptura.

Es importante mencionar, que estas pruebas tienen un impacto muy importante en la industria de la Metalmeccánica, como por ejemplo, la industria automotriz, ya que estas pruebas se utilizan para determinar la resistencia de la estructura del metal que conforma el auto, tal como es el caso del chasis, en el que realizan pruebas tomando en cuenta las normas DIN en ISO 6892-1 y ASTM E8.

En lo que respecta a la parte académica, es muy importante que el alumnado tenga conocimientos en el funcionamiento de cada uno de los equipos que se tiene en el ITSA, tales como el CNC y la máquina universal, así como el diseño de piezas, todo esto para poder responder a los requerimientos de las empresas interesadas en que se lleve a cabo dichas pruebas para sus componentes que fabrican en sus diferentes empresas referentes a la Metalmeccánica y sobre todo y más importante tener al alumnado capacitado para cumplir con los objetivos educativos del TECNEM.

## AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Instituto Tecnológico Superior de Atlixco por su invaluable apoyo en el desarrollo de nuestras prácticas de probeta CNC y en el uso de la máquina universal.

El acceso a sus instalaciones y recursos técnicos ha sido fundamental para llevar a cabo nuestras investigaciones y proyectos prácticos. La colaboración y disposición del personal del instituto, así como el uso de sus equipos avanzados, han permitido que se adquieran conocimientos y habilidades esenciales en el ámbito de la ingeniería y la tecnología.

Agradecemos especialmente la dedicación y profesionalismo de los profesores y colaboradores que nos han asistido durante estas prácticas. Su experiencia y orientación han sido cruciales para el éxito de nuestras actividades y para el crecimiento académico y profesional.

Esperamos continuar esta fructífera colaboración en el futuro y seguir contando con su valioso apoyo para el desarrollo de proyectos educativos y de investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] ISO 6892-1:2019. (s. f.). ISO. <https://www.iso.org/standard/78322.html>

[2] ASTM E8: Norma y probetas Ensayo de tracción en metal. (s. f.). ASTM E8: Norma y Probetas Ensayo de Tracción En Metal. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-traccion-en-metales-astm-e8/>

[3] Ruiz, Diego Hernán; Fundamentos y ensayos en materiales metálicos, coordinado por Juan Manuel Kirschenbaum. - 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2006. ISBN 950-00-0547-6

[4] La Prueba de Tensión. (n.d.). Tecnopole.es. <https://tecnopol.es/actualidad/la-prueba-de-tension>.

[5] Welcome To Zscaler Directory Authentication. (2025). Alsimet.es. <https://alsimet.es/es/noticias/los-5-metales-mas-usados-en-la-construccion>

[6] Acero. (n.d.). Www.quimica.es. <https://www.quimica.es/enciclopedia/Acero.html>

[7] McCormac, Jack C. y Csernak, Stephen F. Diseño de Estructuras de Acero. Quinta Edición. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C. V., México; ISBN: 978 607 707 559 2

[8] Tarbuck, E. J. (2005). *Ciencias de la tierra: Una Introducción a la geología Física*. España: Pearson Educación.

[9] Admin. (2023, December 4). *Aluminio: propiedades, usos y producción en la industria actual*. Corte Laser Madrid Empresa Corte Y Grabado Laser. <https://www.lasercor.com/aluminio/>

[10] CODELCO - Corporación Nacional del Cobre , Chile - Inicio. (n.d.). Codelco. <https://www.codelco.com/>

[11] Vilar, R. (2002). *Cobre*. *Educación Química*, 13(2), 142-144.

[12] *Estructura económica de Puebla en síntesis*. (n.d.). [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825086213.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825086213.pdf)

[13] *Ensayo de Tracción ¿Cuál es su aplicación?* Infinitia Research. (n.d.). Retrieved September 15, 2021, from <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayo-de-traccion-y-su-aplicacion-en-materiales/>

[14] Riley W, *Mecánica de Materiales*. Primera Edición. Limusa Wiley. Mexico D. F. 708 paginas  
ding Research Supplement,171-178.



Anexo A. Comparación de los resultados obtenidos en las pruebas de tensión de las 9 probetas ensayadas.

| Probeta de Acero # 1  | Teoría  | Práctica                                |
|---|---|---|
| Concepto/<br>parametro/Unidad                                     | Normatividad<br>DIN en ISO<br>6892-1 y ASTM<br>E8 | Resultados<br>obtenidos                 |
| Rotura_ Fuerza/<br>Sensibilidad/ Kg fuerza<br>( Punto de ruptura) | 3762 kg fuerza                                    | 3326.59 kg<br>fuerza                    |
| Energía 1/Calculo<br>completo/Kgf.mm                              | 70000 kg fuerza<br>por mm                         | 69350.5 kg<br>fuerza por mm             |
| Desplazamiento/---/<br>porcentaje %                               | 6% de su<br>longitud                              | -99.5 o el 5 %<br>de su longitud        |
| Probeta de Acero # 2  | Teoría  | Práctica                                |
| Concepto/<br>parametro/Unidad                                     | Normatividad<br>DIN en ISO<br>6892-1 y ASTM<br>E8 | Resultados<br>obtenidos                 |
| Rotura_ Fuerza/<br>Sensibilidad/Kgf /mm2<br>( Punto de ruptura)   | 3762 kg fuerza                                    | 3176.33 kg<br>fuerza                    |
| Energía 1/Calculo<br>completo/Kgf.mm                              | 70000 kg fuerza<br>por mm                         | 66217.98 kg<br>fuerza por mm            |
| Desplazamiento/---/<br>porcentaje %                               | 6% de su<br>longitud                              | -99.5 o el 5 %<br>de su longitud        |
| Probeta de Acero # 3  | Teoría  | Práctica                                |
| Concepto/<br>parametro/Unidad                                     | Normatividad<br>DIN en ISO<br>6892-1 y ASTM<br>E8 | Resultados<br>obtenidos                 |
| Rotura_ Fuerza/<br>Sensibilidad/Kgf /mm2<br>( Punto de ruptura)   | 3762 kg fuerza                                    | 3298.7 kg<br>fuerza                     |
| Energía 1/Calculo<br>completo/Kgf.mm                              | 70000 kg fuerza<br>por mm                         | 68769.06 kg<br>fuerza por mm            |
| Desplazamiento/---/<br>porcentaje %                               | 6% de su<br>longitud                              | -98.6 o el 1.4<br>% de su<br>longitud   |
| Probeta de Aluminio # 1   | Teoría  | Práctica                                |
| Concepto/<br>parametro/Unidad                                     | Normatividad<br>DIN en ISO<br>6892-1 y ASTM<br>E8 | Resultados<br>obtenidos                 |
| Rotura_ Fuerza/<br>Sensibilidad/Kgf<br>( Punto de ruptura)        | 2000 kg fuerza                                    | 1788.77 kg<br>fuerza                    |
| Energía 1/Calculo<br>completo/Kgf.mm                              | 40000 kg fuerza<br>por mm                         | 19281.2 kg<br>fuerza por mm             |
| Desplazamiento/---/<br>porcentaje %                               | 1% de su<br>longitud                              | -99.5 o el 0.5<br>% de su<br>longitud   |
| Probeta de Aluminio # 2   | Teoría  | Práctica                                |
| Concepto/<br>parametro/Unidad                                     | Normatividad<br>DIN en ISO<br>6892-1 y ASTM<br>E8 | Resultados<br>obtenidos                 |
| Rotura_ Fuerza/<br>Sensibilidad/Kgf<br>( Punto de ruptura)        | 2000 kg fuerza                                    | 1801.55 kg<br>fuerza                    |
| Energía 1/Calculo<br>completo/Kgf.mm                              | 40000 kg fuerza<br>por mm                         | 19418.95 kg<br>fuerza por mm            |
| Desplazamiento/---/<br>porcentaje %                               | 1% de su<br>longitud                              | -99.21 o el<br>0.79 % de su<br>longitud |

| Probeta de Aluminio # 3                                    | Teoría  | Práctica                                |
|--|---|---|
| Concepto/<br>parametro/Unidad                              | Normatividad<br>DIN en ISO<br>6892-1 y ASTM<br>E8 | Resultados<br>obtenidos                 |
| Rotura_ Fuerza/<br>Sensibilidad/Kgf<br>( Punto de ruptura) | 2000 kg fuerza                                    | 1698.5 kg<br>fuerza                     |
| Energía 1/Calculo<br>completo/Kgf.mm                       | 40000 kg fuerza<br>por mm                         | 18308.17 kg<br>fuerza por mm            |
| Desplazamiento/---/<br>porcentaje %                        | 1 % de su<br>longitud                             | -99.47 o el<br>0.53 % de su<br>longitud |
| Probeta de Cobre # 1                                       | Teoría  | Práctica                                |
| Concepto/<br>parametro/Unidad                              | Normatividad<br>DIN en ISO<br>6892-1 y ASTM<br>E8 | Resultados<br>obtenidos                 |
| Rotura_ Fuerza/<br>Sensibilidad/Kgf<br>( Punto de ruptura) | 2600 kg fuerza                                    | 1622.22 kg<br>fuerza                    |
| Energía 1/Calculo<br>completo/Kgf.mm                       | 20000 kg fuerza<br>por mm                         | 15128.1 kg<br>fuerza por mm             |
| Desplazamiento/---/<br>porcentaje %                        | 1 % de su<br>longitud                             | -99.5 o el 0.5<br>% de su<br>longitud   |
| Probeta de Cobre # 2                                       | Teoría  | Práctica                                |
| Concepto/<br>parametro/Unidad                              | Normatividad<br>DIN en ISO<br>6892-1 y ASTM<br>E8 | Resultados<br>obtenidos                 |
| Rotura_ Fuerza/<br>Sensibilidad/Kgf<br>( Punto de ruptura) | 2600 kg fuerza                                    | 1597.3 kg<br>fuerza                     |
| Energía 1/Calculo<br>completo/Kgf.mm                       | 20000 kg fuerza<br>por mm                         | 14895.7 kg<br>fuerza por mm             |
| Desplazamiento/---/<br>porcentaje %                        | 1 % de su<br>longitud                             | -99.97 o el<br>0.03 % de su<br>longitud |
| Probeta de Cobre # 3                                       | Teoría  | Práctica                                |
| Concepto/<br>parametro/Unidad                              | Normatividad<br>DIN en ISO<br>6892-1 y ASTM<br>E8 | Resultados<br>obtenidos                 |
| Rotura_ Fuerza/<br>Sensibilidad/Kgf<br>( Punto de ruptura) | 2600 kg fuerza                                    | 1543.6 kg<br>fuerza                     |
| Energía 1/Calculo<br>completo/Kgf.mm                       | 20000 kg fuerza<br>por mm                         | 14394.92 kg<br>fuerza por mm            |
| Desplazamiento/---/<br>porcentaje %                        | 1 % de su<br>longitud                             | -99.67 o el<br>0.33 % de su<br>longitud |

Fuente: Elaboración propia.



**Tierra,**  
*Medio Ambiente*  
**y Energía**

---

Ingeniantes

# Análisis de la calidad de pellets de biomasa de *Agave durangensis*, para su posible uso como biocombustible sólido

**RESUMEN:** El aumento global en el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero ha generado un creciente interés en el uso de biomasa como fuente alternativa de energía, debido a su alta densidad energética, densidad a granel, vida útil en almacenamiento y facilidad de transporte. Este estudio se enfoca en evaluar la calidad de los pellets elaborados a partir de residuos de la producción de mezcal de *Agave durangensis*, específicamente el bagazo, siguiendo los estándares establecidos en la norma EN-14961-2 para la certificación de pellets de madera para usos térmicos.

Las características de los pellets usando materia prima con 10.7% de humedad, se determinaron con pruebas estandarizadas para biocombustibles sólidos densificados. Se obtuvieron pellets con una durabilidad del 93.81%, y una densidad a granel de  $765.07 \text{ kg/m}^3 \pm 18.93$ . Además, se observó un Índice de Resistencia al Impacto (IRI) de 187 y una densidad de partícula de  $1.09 - 1.19 \pm 0.09$ . Estos resultados indican que los pellets de *Agave durangensis* pueden equipararse en calidad a los pellets clasificados como Enplus-B, con potencial para mejorar aún más su calidad mediante innovaciones tecnológicas y alcanzar la clasificación Enplus-A1. A pesar de su calidad técnica, la producción de pellets para auto consumo en pequeñas vinatas productoras de mezcal en Durango resulta inviable, debido a los costos asociados a la producción. No obstante, su comercialización como biocombustible certificado sí representa una oportunidad económicamente viable.

**PALABRAS CLAVE:** Pellet, *Agave durangensis*, EN-14961-2, biomasa y bagazo.



## Colaboración

Pedro Rubén Reyes Corral; Manuel Ismael Mata Escobedo; Karla María Ortega Valdez, Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Guadiana; Artemio Carrillo Parra; Universidad Juárez del Estado de Durango; Jazmín Ramírez Ayala, Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Guadiana

Fecha de recepción: 04 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 22 de mayo de 2025

**ABSTRACT:** The global increase in energy consumption and greenhouse gas emissions has generated a growing interest in the use of biomass as an alternative energy source, due to its high energy density, bulk density, storage life, and ease of transportation. This study focuses on evaluating the quality of pellets made from *Agave durangensis* mezcal production residues, specifically bagasse, following the standards established in EN-14961-2 for the certification of wood pellets for thermal uses.

The parameters of the pellets using raw material with 10.7% moisture were determined with standardized tests for densified solid biofuels. Pellets that were obtained had a durability of 93.81% and a bulk density of  $765.07 \text{ kg/m}^3 \pm 18.93$ . In addition, an Impact Resistance Index (IRI) of 187 and a particle density of  $1.09 - 1.19 \pm 0.09$  were observed. These results indicate that *Agave durangensis* pellets can be comparable in quality to pellets classified as Enplus-B, with the potential to further improve their quality through technological innovations and achieve Enplus-A1 classification. Despite their technical quality, pellet production for self-consumption in small mezcal distilleries in Durango is unfeasible due to production-related costs. However, their commercialization as certified biofuels represents an economically viable opportunity.

**KEYWORDS:** Pellet, *Agave durangensis*, EN-14961-2, biomass & bagasse.

## INTRODUCCIÓN

La industria del mezcal en México ha experimentado un crecimiento considerable debido a la creciente popularidad del destilado de agave tanto a nivel nacional como internacional. Este crecimiento presenta desafíos en varios aspectos, como

el aumento de la demanda de agave para su procesamiento, la necesidad de espacio y agua para su cultivo adecuado y la generación de residuos, lo que supone mayores costos para los productores.

En 2023, se produjeron en México 12,239,655 litros de mezcal, de los cuales el 1.07% correspondió a la región de Durango, equivalente a 130,964 L [1]. Estos procesos de producción generan residuos, como pencas, bagazo y vinazas, que en su mayoría no se desechan adecuadamente. Esto tiene un impacto negativo en el paisaje local y en los suelos y cuerpos de agua donde se descartan, causando modificaciones de pH y cambiando las condiciones del entorno [2].

Con la creciente demanda de energía a nivel mundial en todos los niveles económicos, para el año 2017, el consumo energético dependiente del uso del petróleo alcanza 565 EJ con un aumento pronosticado de 1.7% anual en la década siguiente [3], por lo que es la fuente de energía principal a nivel mundial y se pronostica que lo seguirá siendo más allá del 2040 que para entonces las emisiones de dióxido de carbono, se espera, hayan aumentado un 46% [4], las consecuencias ambientales y económicas de ese consumo energético han generado la búsqueda y uso de fuentes de energía alternativas y/o renovables.

Una de las que generan más interés son biocombustibles sólidos densificados, entre los que están los pellets y las briquetas, que son partículas de biomasa comprimida a alta presión y temperatura a través de troqueles, teniendo ventajas sobre la madera como la alta densidad a granel, una mayor densidad energética, facilidad de manejo y almacenamiento, así como bajos niveles de desperdicio de materia prima [5].

El uso de la biomasa como fuente de energía ha aumentado a tal punto que para el 2020 el 10% [6] de la energía global se obtuvo de la biomasa. Desde el 2018 se ha observado un aumento aproximado del 8% anual de su uso en países como Japón, China, Alemania y el Reino Unido [4] por lo que el mercado para el biocombustible sólido densificado es bastante amplio. Se espera que el mercado de pellets para el 2024 sea similar al pronosticado por la USDA en 2020 ya que la tendencia se ha mantenido en los últimos años con alrededor de 50 millones de toneladas [7], por lo que la producción de pellets es una excelente opción para el manejo de los residuos agroindustriales.

Con el objetivo de abordar las problemáticas ambientales y económicas, se busca desarrollar una propuesta tecnológica y económicamente viable para la reutilización de las fibras residuales en forma de bagazo obtenidas del proceso de elaboración de mezcal, específicamente con *Agave durangensis* como principal materia prima. Esto mediante la generación de biocombustibles sólidos densificados en forma de pellets he-

chos de biomasa para la generación de energía, esto con el fin de que se utilicen en las partes del proceso de elaboración del mezcal que requieran calor, reduciendo los costos de producción y la contaminación de la industria, además de contar con la posibilidad de convertirse en una alternativa de ingresos económicos adicionales para los productores.

En este contexto, se priorizó el uso de recursos tecnológicos ya disponibles para los productores artesanales en la elaboración de pellets, con el objetivo de minimizar la inversión en recursos tecnológicos y garantizar accesibilidad. De forma simultánea, se evaluará la viabilidad económica de los pellets, tanto para cubrir demandas energéticas del proceso productivo de la vinata "La Herradura" ubicada en Nombre de Dios, Durango, como para su posible comercialización como subproducto de la industria mezcalera.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Lugar de Ejecución

El proceso de pelletizado y evaluación de las características físicas y energéticas de los mismos se realizó en Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera (ISIMA). El análisis económico se realizó en el Tecnológico Nacional de México campus Valle del Guadiana (ITVG).

### Material

#### Acondicionamiento de Materia Prima

Para su correcto procesamiento, el bagazo pasó por un proceso de secado y de reducción de granulometría. El proceso de secado de la materia prima fue en 2 instituciones, en el ISIMA en el patio de secado y en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) campo experimental "Valle del Guadiana" en camas de secado en invernadero. El proceso de molienda se realizó en el ISIMA.

El bagazo utilizado fue donado por la vinata "La Herradura" ubicada en Nombre de Dios, Durango y extraídas de la localidad "El Venado" en el municipio de Nombre de Dios, Durango, todo del mismo lote. Toda la materia prima procedente exclusivamente de *Agave durangensis* de 19 años de edad.

### Métodos

El acondicionamiento de la materia prima se realizó en 2 etapas, una vez extraídas del lote, el bagazo se secó usando camas de secado con ventilación superior e inferior y en camas de secado a nivel del suelo por 3 semanas con una temperatura promedio de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y humedad relativa de  $56.9\% \pm 2.56\%$ . Posteriormente, el material con una humedad aproximada de 8%-12% determinada por una termobalanza ROCQ modelo DSH-50-10 [8,9] fue procesado en un molino de martillos HAIGE modelo TSF 420 mediante alimentación directa de forma moderada del material seco obteniendo harina de bagazo hasta alcanzar un tamaño de partícula ideal  $> 1\text{ mm}$ , pero  $< 2\text{ mm}$  [10] Figura 1.



Figura 1. Bagazo molido.  
Fuente: Elaboración propia.

El pelletizado se realizó con una pelletizadora Mill modelo ZSLP-R300 de matriz plana, con capacidad de 350 kg/h a una temperatura promedio de trabajo aproximada de  $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  con una malla de 3.15mm, utilizando un vernier digital se obtuvieron las medidas promedio del largo y ancho Figura 2.



Figura 2. Pellets de Bagazo.  
Fuente: Elaboración propia.

Los pellets se dejaron enfriar por 24 horas para “madurarlos” o “curarlos” ya que al finalizar el pelletizado son frágiles y se rompen con facilidad. Adicionalmente el proceso de “curado” sirve para bajar los niveles de humedad y dejar que algunos de los componentes solubles en el material se recristalicen al bajar la temperatura [11].

La determinación de humedad de los pellets se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma UNE-EN14774-3 colocando crisoles de níquel en una mufla a  $550^{\circ}\text{C}$  por 1 hora, después se introdujeron en un desecador para enfriarse, se introdujo la muestra de 1 g y se secó en un horno a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 3 horas. Posteriormente se dejó enfriar y se pesó el crisol, utilizando la siguiente fórmula se calculó la humedad:

$$M_{ad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde  $M_{ad}$  es el contenido de humedad en % de peso,  $m_1$  es el peso del crisol vacío,  $m_2$  es el peso del crisol y la muestra antes del secado y  $m_3$  es el peso del crisol y la muestra después del secado.

La durabilidad de los pellets se determinó utilizando el método de cámara de volteo (tumbling can method) por triplicado con 500g por 10 minutos a 50 RPM [8], posteriormente se tamizó el material utilizando una malla de 3.1mm para separar los finos bajo los lineamientos de la norma ASAE S269.4 ya que es el método más utilizado en EUA [12] y también se ha utilizado en conjunto con la norma ASTM D 440-86 para la determinación de resistencia al impacto [13], esto, para simular el desgaste por manejo y transporte del material y predecir la cantidad finos producidos mediante la ecuación:

$$D = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde  $D$  es la durabilidad,  $M_1$  es la masa de los pellets antes del ensayo y  $M_2$  es la masa de los pellets después del ensayo.

El índice de resistencia al impacto (IRI) se determinó adecuando los principios de la norma ASTM D440-86 [14] dejando caer 15 pellets de una altura de 1.85m sobre una superficie plana de concreto donde se cuantifica el número de partes en las que la pieza se quiebra después de 3 intentos, despreciando las piezas que pesen menos del 5% del peso total de la pieza. Mediante la ecuación de Richards [15] se obtiene el IRI:

$$IRI = \frac{(100 \times N)}{(n)} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde  $N$  es el número de caídas de la pieza y  $n$  es el número de piezas totales después del ensayo, por lo que el IRI máximo sería 300.

La densidad a granel se evaluó siguiendo los principios de la norma ASTM E873 - 82 [5] y adecuados a el material disponible utilizando un recipiente cilíndrico con un volumen determinado de 600 ml, el cual fue llenado con pellets hasta su máxima capacidad, posteriormente se registró el peso y se utilizó una película de polímero flexible para cubrir el recipiente con la finalidad de prevenir el derrame de material, a una altura de 25 cm se dejó caer en una superficie plana de concreto 5 veces para asentar el material lo más posible y se colocó más material en el recipiente hasta llegar a la máxima capacidad del mismo. La ecuación utilizada para calcular la densidad a granel es:

$$\rho_g = \frac{M_1 - M_2}{v} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde  $\rho_g$  es la densidad a granel  $M_1$  es la masa del contenedor con los pellets y  $M_2$  es la masa del contenedor y  $v$  es el volumen del contenedor.

Para el cálculo de densidad de partícula, se emplearon 30 pellets a los cuales se les determinaron sus dimensiones con un vernier y se utilizó un cálculo estereométrico del pellet para posteriormente pesarlo y determinar su densidad mediante la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v} \rightarrow \pm 8.7\% dep \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde  $\rho$  es la densidad en g/cm<sup>3</sup>, m es la masa del pellet, v es el volumen calculado estereométricamente y al final se hace un ajuste por el porcentaje de variabilidad existente [16].

Para la evaluación general de los pellets se siguieron las guías señaladas en el “Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos” que opera bajo los principios de la norma EN-14961-2 [17] donde se puede clasificar la calidad del material mediante parámetros establecidos para cada una de las pruebas, en la Tabla 1 se exponen los parámetros que evalúa la norma.

Tabla 1: Valores límites para los parámetros de pellets.

| Parámetro                         | Unid.s              | ENplus-A1                   | ENplus-A2     | EN-B                 |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|----------------------|
| Diámetro                          | mm                  | 6 or 8                      |               |                      |
| Longitud                          | mm                  | 3.15 ≤ L ≤ 40 <sup>3)</sup> |               |                      |
| Humedad                           | p-% <sup>1)</sup>   | ≤ 10                        |               |                      |
| Cenizas                           | p-% <sup>2)</sup>   | ≤ 0.7                       | ≤ 1.5         | ≤ 3.0                |
| Durabilidad mecánica              | p-% <sup>1)</sup>   | ≥ 97.5 <sup>4)</sup>        |               | ≥ 96.5 <sup>4)</sup> |
| Finos (< 3.15 mm)                 | p-% <sup>1)</sup>   | < 1                         |               |                      |
| Poder Calorífico Inferior         | MJ/kg <sup>1)</sup> | 16,5 ≤ Q ≤ 19               | 16,3 ≤ Q ≤ 19 | 16,0 ≤ Q ≤ 19        |
| Densidad aparente                 | kg/m <sup>3</sup>   | ≥ 600                       |               |                      |
| Nitrogeno                         | p-% <sup>2)</sup>   | ≤ 0.3                       | ≤ 0.5         | ≤ 1.0                |
| Sulfur content                    | p-% <sup>2)</sup>   | ≤ 0.03                      |               | ≤ 0.04               |
| Cloro                             | p-% <sup>2)</sup>   | ≤ 0.02                      |               | ≤ 0.03               |
| Fusibilidad cenizas <sup>4)</sup> | °C                  | ≥ 1200                      | ≥ 1100        |                      |

1) Base húmeda 2) Base seca

3) Un máximo de 1 p-% de los pellets pueden ser más largos de 40 mm, no se permiten pellets > 45 mm

4) Temperatura de Deformación, preparación de la muestra a 815 °C

Fuente: Manual EN-Plus14961-2 para la certificación de pellets de madera para usos térmicos (recortada).

### Los parámetros que se evaluaron son los que se expusieron previamente en la metodología

Para el análisis económico se plantearon 2 escenarios posibles donde todo se calculo en pesos mexicanos (MXN), el primero (E1) estipula la adquisición de un molino de martillos de una capacidad de 2,000 Kg/h con un valor de \$35,000 (Agosto 2024) para el ajuste de granulometría, costos mensuales de producción de \$18,185.54 (Agosto 2024) incluyendo gastos de operación e insumos y una inversión inicial de \$140,219.54 (Agosto 2024).

En contraste, el segundo escenario (E2) establece la renta de de dicho molino con un costo de \$400 por hora (Agosto 2024) con una tasa de molienda de 135 Kg/h, costos mensuales de producción de \$27,044.54 (Agosto 2024) y una inversión inicial de \$114,078.54 (Agosto 2024).

Una vez establecidos los escenarios, se determinaron los supuestos económicos que son iguales en ambos escenarios, los cuales son:

- Una pelletizadora con capacidad de producción de 150 Kg/h con un costo de \$35,000 (Agosto 2024).
- 3,590 Kg de bagazo base seca anual.
- Un rendimiento de pelletizado del 86.2%.
- Un consumo anual de madera para la producción de mezcal de 50 t.
- Un costo de \$1,200 por tonelada de madera (Agosto 2024).
- Un precio de venta de \$100 por una bolsa de 10 Kg de pellets (Agosto 2024).
- Una venta total mensual del producto.

El periodo simple de retorno (PSR) se realizo una relación entre el monto de la inversión inicial (II) y las ganancias anuales estimadas (FEA).

$$PSR = \frac{II}{FEA} \quad \text{Ec. (6)}$$

## RESULTADOS

### Propiedades Físicas

Los pellets elaborados con bagazo de penca de Agave presentaron una humedad de 10.7% ± la desviación estándar de 0.49% siendo está a la que se obtuvieron de una forma más constante y alargada. Las dimensiones obtenidas de los pellets son 15.3mm en promedio para los pellets mas cortos ~ 34.33mm de largo en promedio para los pellets mas largos ± la desviación estándar de 0.08mm y 6.09mm ~ 6.13mm ± la desviación estándar de 0.82mm de diámetro, con una humedad promedio de 1.9% ± la desviación estándar de 0.042% después del proceso de “madurado”. Se encontró también que el color de los mismos se tornó ligeramente más oscuro. La densidad de partícula obtenida fue de 1.09 – 1.20 ± 0.09 g/cm<sup>3</sup> el cual está dentro de los parámetros esperados para materiales lignocelulósicos [16]. La densidad a granel obtenida fue de 765.07 ± 18.93 kg/m<sup>3</sup>, el cual está por encima del estándar europeo de 500 – 600 kg/m<sup>3</sup> dependiendo de la norma [17,18].

### Propiedades Mecánicas

La durabilidad mecánica de los pellets fue de 93.81%, por lo que la cantidad de los residuos en forma de finos fue relativamente bajo. Sin embargo, hay que señalar que el bagazo de penca se pelletizó en crudo, es decir, que no se le dio ningún pretratamiento térmico, químico o biológico; por lo que la durabilidad se puede mejorar por acondicionamiento de muestra, adición de agentes aglomerantes o condiciones de pelletizado. Los procesos sugeridos han reportado mejoras de durabilidad de

otros residuos agroindustriales [19] y lignocelulósicos [20].

Por otra parte, el índice de resistencia al impacto obtenido fue de 187, el cual es similar con otros pellets compuestos de residuos lignocelulósicos los cuales se clasifican como Enplus-A1 [18]. La correlación entre las propiedades mecánicas y las características de la materia prima (químicas y físicas) [21], respaldan la posibilidad de que se podría mejorar la calidad de los pellets mediante ajustes en el tratamiento de la materia prima o durante el proceso de obtención de lo pellets.

Siguiendo los parámetros de evaluación en el manual para la certificación de pellets, los pellets de bagazo de penca de Agave durangensis obtenidos califican en Enplus-A1 en 4 de los 5 parámetros evaluados, como se muestra en la Tabla 2, la única que está ligeramente abajo es la durabilidad mecánica, estando 2.69% bajo el mínimo aceptable para la clasificación Enplus-B, de acuerdo al manual. La clasificación se emplea en pellets hechos de madera virgen de baja calidad, residuos de la industria maderera y madera usada que no ha sido tratada químicamente por lo que obtener un biocombustible sólido a partir de Agave durangensis amplía el panorama para la mejora y obtención de biocombustibles sólidos densificados a partir de estos residuos, puesto que los pellets obtenidos a partir de maderas suelen tener propiedades físicas muy superiores a otros hechos a partir de otros residuos agroindustriales como paja de trigo, paja de maíz, paja de arroz, entre otros [19, 21].

Tabla 2: Resultados y clasificación de los parámetros evaluados a los pellets de bagazo de agave durangensis.

| Parámetro            | Resultado                | Categoría        |
|----------------------|--------------------------|------------------|
| Diámetro             | 6.09 mm – 6.13 mm        | Enplus-A1        |
| Longitud             | 15.30mm – 34.33mm        | Enplus-A1        |
| Humedad              | 1.90%                    | Enplus-A2        |
| Durabilidad Mecánica | 93.81%                   | Posible Enplus-B |
| Densidad Aparente    | 765.07 kg/m <sup>3</sup> | Enplus-A1        |

Fuente: Elaboración propia.

### Análisis Económico

En el E1 para su posible comercialización, se proyecta una ganancia mensual de \$2,744.46, esto debido a que los gastos de operación fueron menores que las ventas mensuales proyectadas resultando en una utilidad. Por lo que se estimó una ganancia anual total de \$51,119 con un periodo simple de retorno de 2.74 años. Adicionalmente, el costo de producción total anual de la materia prima disponible para la elaboración de pellets para auto consumo resultó en \$218,226.48 para un 71.76% del requerimiento energético anual de la vinata. Por el contrario, en el E2 se proyectaron pérdidas mensuales de \$6,114.54 a causa del alto costo de producción mensual debido a la renta del molino (\$8,859). Esto resultó en un periodo de retorno nulo donde se calculó que en un plazo de 2.46 años, se habrá perdido

el mismo monto que la inversión inicial. Similarmente, los costos de producción para el auto consumo resultaron en \$324,534.48.

Ambos escenarios resultan en un aumento del 363% (E1) y 540% (E2) en comparación del costo anual de madera (\$60,000) para suplir las necesidades energéticas de producción de mezcal en la vinata.

### CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el uso de bagazo de Agave durangensis para la obtención de biocombustibles sólidos densificados en forma de pellets con calidad Enplus-A1 es posible. Las propiedades físicas muestran una densidad a granel favorable. En relación a las propiedades mecánicas, los parámetros evaluados de durabilidad que está por debajo del límite aceptable y el IRI menor a 200 podría ser causado por la procedencia de la materia prima, debido a que es un subproducto de la producción de mezcal, por lo que las estructuras moleculares de las fibras podrían tener degradación. Adicionalmente, hay altas probabilidades de que aun tenga materiales volátiles que podrían lubricar la biomasa lo que disminuiría la fricción en el pistón de pelletizado resultando en una unión intermolecular y temperaturas más bajas a las posibles propiciando un decremento en la propiedades mecánicas.

El auto consumo de los pellets obtenidos a partir de los subproductos de la producción de mezcal resultan económicamente no viables debido a los altos costos de producción en comparación a la madera pero resultan en una opción económicamente redituable para su posible comercialización.

Es posible optimizar las propiedades de los pellets de Agave durangensis para alcanzar clasificaciones superiores como Enplus-B o incluso Enplus-A1, con potencial de cumplir los estándares Enplus-A2. Esta mejora técnica no solo ampliaría su aplicabilidad a mercados mas amplios (industrias alimentarias o sistemas de calefacción urbana), sino que incrementaría su valor comercial, garantizando una viabilidad económica sólida.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio Nacional CONAHCYT de Biocombustibles Sólidos (Bioener) con sede en el Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, al Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por el apoyo brindado con sus equipo e instalaciones para la realización de este estudio, así como a la vinata "Madre Tierra" en Nombre de Dios, Durango por la donación del bagazo utilizado para la elaboración de este estudio.

### BIBLIOGRAFÍA

[1] COMERCAM (2024). Informe Estadístico 2024; Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del

Mezcal, A. C.: Oaxaca, México, 2024; Available online: [https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2024/04/PUBLICO\\_INFORME\\_2024.pdf](https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2024/04/PUBLICO_INFORME_2024.pdf).

[2] Garzón Rocha, E. C. y Rodríguez Leiton, M. C. (2023) Aprovechamiento de residuos generados en procesos agroindustriales en la industria mezcatera. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9313>.

[3] Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215-232.

[4] Bajwa, D. S., Peterson, T., Sharma, N., Shojaeirani, J., & Bajwa, S. G. (2018). A review of densified solid biomass for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 296-305.

[5] Liu, Z., Mi, B., Jiang, Z., Fei, B., & Cai, Z. (2016). Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. *Renewable energy*, 86, 1-7.

[6] Mian, I., Li, X., Dacres, O. D., Wang, J., Wei, B., Jian, Y., ... & Rahman, N. (2020). Combustion kinetics and mechanism of biomass pellet. *Energy*, 205, 117909.

[7] Flach, B., Lieberz, S., & Bolla, S. (2014). EU-28 Biofuels Annual EU Biofuels Annual 2019. USDA: Washington, DC, USA.

[8] Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and bioenergy*, 33(3), 337-359.

[9] Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683-707.

[10] Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2021). Pilot scale production of fuel pellets from waste biomass leaves: Effect of milling size on pelletization process and pellet quality. *Fuel*, 285, 119145.

[11] Žurovec, D., Jezerská, L., Nečas, J., Hlostá, J., Diviš, J., & Zegzulka, J. (2021). Spiral Vibration Cooler for Continual Cooling of Biomass Pellets. *Processes*, 9(6), 1060.

[12] Winowski, T. (1998). Examining a new concept in measuring pellet quality: which test is best. *Feed Management*, 49(1), 23-26.

[13] Kabaş, Ö., Ünal, İ., Sözer, S., Selvi, K. C., & Ungureanu, N. (2022). Quality Assessment of Biofuel Briquettes Obtained from Greenhouse Waste Using a Mobile Prototype Briquetting Machine with PTO Drive. *Energies*, 15(22), 8371.

[14] Fang, J., He, J., Hong, Y., Luo, Z., Ke, H., Fan, Z., ... & Lingjun, K. (2023). Coupling effect of the refuse and sludge on the physical and combustible properties of the densified pellets for energy production. *Renewable Energy*, 216, 119081.

[15] Richards, S. R. (1990). Physical testing of fuel briquettes. *Fuel Processing Technology*, 25(2), 89-100.

[16] Rabier, F., Temmerman, M., Böhm, T., Hartmann, H., Jensen, P. D., Rathbauer, J., ... & Fernández, M. (2006). Particle density determination of pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 954-963.

[17] Niedziółka, I., Szpryngiel, M., Kachel-Jakubowska, M., Kraszkiewicz, A., Zawiślak, K., Sobczak, P., & Nadulski, R. (2015). Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. *Renewable Energy*, 76, 312-317.

[18] Blancarte-Contreras, E., Corral-Rivas, S., Domínguez-Gómez, T. G., Lujan-Soto, J. E., Goche-Télles, J. R., & Montiel-Antuna, E. (2022). Improving the physical, mechanical and energetic characteristics of pine sawdust by the addition of up to 40% Agave durangensis gentry pellets. *Energies*, 15(10), 3711.

[19] Thapa, S., & Engelken, R. (2020). Optimization of pelleting parameters for producing composite pellets using agricultural and agro-processing wastes by Taguchi-Grey relational analysis. *Carbon Resources Conversion*, 3, 104-111.

[20] Castellano, J. M., Gómez, M., Fernández, M., Esteban, L. S., & Carrasco, J. E. (2015). Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. *Fuel*, 139, 629-636.

[21] Sarker, T. R., Nanda, S., Meda, V., & Dalai, A. K. (2023). Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 231-264.





Multidisciplinario  
e  
ingenierías

---

Ingeniantes

# Análisis de deformaciones mecánicas en herrajes para la estimación de la confiabilidad en líneas de transmisión

**RESUMEN:** El presente análisis de estudio está ubicado en el campo de la ingeniería eléctrica, a través de los herrajes que soportan líneas de transmisión (LTs) con un papel fundamental en la distribución de la energía en el país, los herrajes y sus componentes, asimismo los aisladores en las LTs., aunque a menudo pasan desapercibidos, son componentes cruciales que garantizan la estabilidad y eficiencia del sistema, estos elementos incluyen aisladores, grapas y conductores, etc., no solo sostienen cables, sino que también protegen la infraestructura contra las inclemencias del tiempo, tales podrían ser descargas atmosféricas. En este estudio, se analizarán los diferentes tipos de herrajes utilizados en las LTs, los materiales, las propiedades mecánicas-eléctricas y el impacto de confiabilidad y durabilidad del sistema. Uno de los enfoques es el análisis de los mecanismos de amortiguamiento mecánicos de las LTs aérea, estos comprenden a los herrajes tipo calavera ojo corta, así como de aisladores tipo suspensión en tensión de 115 kV., En el recorrido a través de las LTs cuya consigna es detectar visualmente cuales elementos serían los más afectados para remplazar, además de reunir los herrajes que presentan depósitos blanquecinos, pérdida de su capa exterior conocida como recubrimiento galvanizado para proceder a su reemplazo.

**PALABRAS CLAVE** Línea de transmisión, herrajes (tipo calavera ojo corta y calavera ojo larga), pruebas mecánicas, análisis de laboratorio y confiabilidad.



## Colaboración

Miguel Ángel Esquivel Sánchez; Julio Cesar Méndez Gutiérrez; Fernando Jurado Pérez; José Roberto Razo Hernández; Gerardo Daniel Pérez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Fecha de recepción: 21 de febrero de 2025

Fecha de aceptación: 27 de mayo de 2025

**ABSTRACT:** This study analysis is located in the field of electrical engineering, through the hardware that supports transmission lines (LTs) with a fundamental role in the distribution of energy in the country, the hardware and its components, also the insulators in the LTs., although they often go unnoticed, are crucial components that guarantee the stability and efficiency of the system, these elements include insulators, staples and conductors, etc., not only support cables, but also protect the infrastructure against inclement weather, such as atmospheric discharges. In this study, the different types of hardware used in LTs, the materials, the mechanical-electrical properties and the impact on the reliability and durability of the system will be analyzed. One of the approaches is the analysis of the mechanical damping mechanisms of the overhead lines, these include the short eye-skull type hardware, as well as 115 kV tension suspension type insulators. In the tour through the lines, the objective is to visually detect which elements would be the most affected to replace, in addition to gathering the hardware that presents whitish deposits, loss of its outer layer known as galvanized coating to proceed with its replacement.

**Keywords.** Transmission line, ironwork (short eye skull and long eye skull type), mechanical testing, laboratory analysis and reliability.

## INTRODUCCIÓN

En la industrialización actual ha surgido una creciente demanda de optimizar la confiabilidad y seguridad en la instalación de líneas de transmisión aéreas, impulsada por la necesidad de integración y precisión, características fundamentales de la innovación industrial y eléctrica. Este proceso es esencial no solo por su complejidad técnica, sino también por los altos costos asociados. El monitoreo continuo de los relés de protección, así como

de los sensores de corriente y voltaje, es crucial para detectar y mitigar posibles fallos. Asimismo, el análisis de datos para identificar patrones anómalos, junto con la capacidad del ingeniero liniero para detectar patrones mediante inspecciones visuales y pruebas periódicas, constituye un elemento vital para garantizar la seguridad operativa del sistema eléctrico nacional (SEN).

La importancia de la descripción mecánico-eléctrico, y dimensional a través de las normativas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), tales como la especificación CFE 2C301-15 y CFE 52100-65, desempeñan un papel fundamental en este proceso, estableciendo directrices claras sobre los niveles de tensión y las medidas de seguridad a adoptar. Estas especificaciones abarcan un rango de tensiones desde 13.8 kV hasta 138 kV, siendo aplicables a diversas líneas de transmisión, incluyendo las líneas de 115 kV. Por otra parte, la especificación CFE 2C301-15 se centra en las aéreas con tensiones de 69 kV a 400 kV, asegurando que se cumplan los estándares de seguridad y eficiencia para estos rangos de tensión.

En el presente análisis de estudio se enfatiza la importancia de la inspección y el mantenimiento regular de los herrajes en las líneas de transmisión, así como aisladores, grapas y conductores, es de vital conocimiento saber que sin ellos sería prácticamente imposible existieran torres de transmisión, sin elementos de sujeción donde es de vital importancia para proteger la infraestructura contra las inclemencias del tiempo y asegurar la durabilidad y confiabilidad del SEN.

Aunado a las previas especificaciones, también se revisaron otras normativas y estándares que son aplicables a la estabilidad y confiabilidad de las LTs aéreas. A continuación, se mencionan las siguientes:

- NOM-008-SCFI-2002: Relativa a los sistemas de unidades.
- NMX-H-075-SCFI-1996: Enfocada en las especificaciones y métodos de prueba para ciertos componentes.
- NMX-H-076-SCFI-1994: Que aborda cuestiones mecánicas aplicables a la infraestructura de las líneas aéreas.

Estas normativas aseguran que todos los componentes, incluyendo los herrajes, cumplan con altos estándares de calidad y seguridad. Adicionalmente, existen especificaciones enfocadas en el empaque, embalaje, embarque, transporte y almacenamiento de los herrajes y sus accesorios. Dos de las normativas más relevantes en este ámbito son:

- CFE L 1000-11-2015: Establece los estándares para el empaque y transporte de los herrajes.
- CFE 21000-01-2015: Se centra en los conjuntos de herrajes para líneas de transmisión aéreas con tensiones de 69 kV a 400 kV.

El cumplimiento de las presentes normativas no solo asegura la estabilidad y confiabilidad de las líneas, sino

que también contribuye a la durabilidad y eficiencia del sistema general en su conjunto. Estas especificaciones y normativas son esenciales para el presente caso de estudio, ya que proporcionan un marco claro y detallado para la instalación y el mantenimiento de las líneas de transmisión, garantizando un funcionamiento seguro y eficiente. La problemática se analizará desde las perspectivas mecánica, eléctrica y química, de tal manera verificar la confiabilidad de las LTs a través de los herrajes. Se integrarán las características mecánicas, eléctricas y dimensionales, además del análisis químico el cual deben cumplir los mecanismos de amortiguamiento.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El proceso metodológico para evaluar la línea LTs TTA 73150 de 115 kV se basa en normativas comúnmente consultadas y aplicadas por la comisión, incluyendo el estándar de mediciones de vibraciones en conductores, el Informe del Comité IEEE, el Libro de referencia de líneas de transmisión del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) y el manual del equipo electrónico analizador de vibraciones eólicas, SAVLE. En la Figura 1 se puede apreciar la línea bajo estudio.



Figura 1. Tramo de la Línea 73150 de 115 kV  
Fuente: Elaboración propia.

Esto permite desarrollar pruebas típicas a líneas, junto con inspecciones visuales de los herrajes y ensayos de tensión mecánica, destacando la calavera de ojo corta y la calavera de ojo larga, así como los ensayos en los aisladores sintéticos tipo suspensión de 115 kV. Con el objetivo de abordar la evaluación del estado de operación en campo, el presente análisis de deformaciones

y estudio mecánico del estado de la LTs, basado en la metodología de pruebas consultadas por la CFE [1].

Se presenta un método de evaluación integral del estado de la línea aérea. En donde se detalla el análisis de la línea aérea mediante esquemas. A través de la inspección visual de los herrajes, y al seleccionar muestras para el reemplazo de todo el conjunto de aisladores sintéticos de suspensión, se determinó que los herrajes denominados calavera de ojo corta presentaba agentes blanquecinos, pérdida de su capa exterior de recubrimiento galvanizado y acumulación de depósitos en la parte de sujeción. Además, se detectaron fracturas en los faldones de algunos aisladores y en el material circundante del núcleo. En la Figura 1 puede ver una torre de transmisión típica con líneas de transmisión de 115 kV con sus complementos.



Figura 2 Torre de transmisión de 115kV.  
Fuente: Elaboración propia.

En los ensayos de tensión mecánica, se destacaron los herrajes de calavera de ojo corta y calavera de ojo larga. Las pruebas realizadas a tres muestras de herrajes revelaron diferencias entre los fabricantes, denominados **M1**, **M2** y **M3**.

Del análisis mecánico **M1** alcanza una resistencia de 140.74 kN, **M2** 124.70 kN y **M3** 174 kN lo cual derivado de esto se determina que los valores están por encima del valor de diseño y de la propia especificación [2]. A continuación, se presenta las pruebas de resistencia a la tensión de herrajes de suspensión, y de aisladores sintéticos tipo suspensión destacando los resultados, los cuales se pueden verificar en la Tabla 1.

Tabla 1 Pruebas de resistencias a la tensión mecánica.

| Espécimen No.          | Carga de ruptura mínima requerida por la especificación (kN) | Carga de ruptura mínima según el fabricante (kN) | Carga máxima obtenida (kN) | Incertidumbre (kN) | Resultado  |
|------------------------|--|--|----------------------------|--------------------|--|
| M1- CALAVERA OJO CORTA | 111  | 13.6   | 140.74                     | ± 1.40             | INFORMATIVO. El herraje fue sometido a una carga progresiva hasta que el herraje utilizado para su acondicionamiento presento falla. |
| M2- CALAVERA OJO CORTA |  | 140  | 124.70                     | ± 1.24             |  |
| M3- CALAVERA OJO LARGA |  | SIN DATO   | 174.03                     | ± 1.74             |  |

En la Figura 3 se puede apreciar a uno de los linieros de CFE en el proceso de recolección y cambio de aisladores sintéticos. Dentro de las observaciones se indica que los especímenes con una referencia de 111 kN de tensión mecánica.



Figura 3 Cambio de Aisladores tipo sintético.  
Fuente: Elaboración propia.

En estos ensayos las muestras presentan una resistencia mayor al rango mínimo del diseño de 140.7 kN, y la segunda de 124.7 kN, y la tercera de 174 kN Herrajes y conjunto de herrajes para líneas de transmisión aéreas con tensiones de 69 kV a 400 kV. 2C301-15, N. D.

En las Figuras 4 y 5 se puede apreciar y visualizar estos tipos de aisladores sintéticos los cuales son colocados en las torres de transmisión de hasta 400kV recordemos que estos están diseñados a 115kV en el presente caso de estudio. [3].

No se evalúa la conformidad entendiéndose esta por la satisfacción de los requisitos específicos viables aplicables, por lo tanto, debido a pruebas de comportamiento mecánico, registrándose únicamente los valores obtenidos, por lo cual, el resultado es de carácter informativo.



**Línea 73150  
Torre 102  
Fase C**

Figura 4 Perspectiva del Aislador.  
Fuente: Elaboración propia.

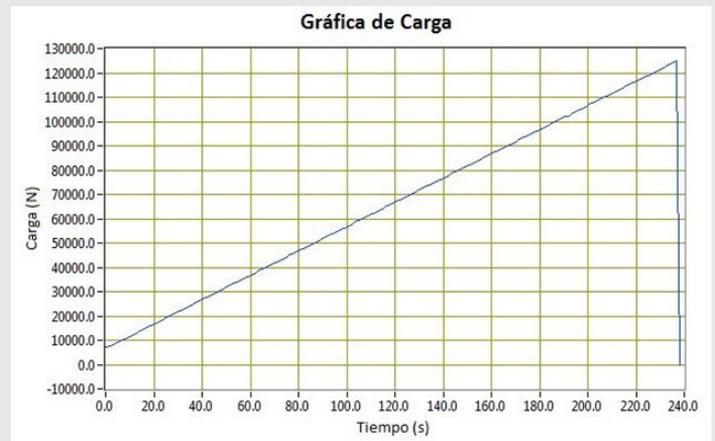


Figura 7 Gráficas de Comportamiento PR a la Tensión Herraje con una tensión superior a los 111kN por encima de la Normativa de CFE.



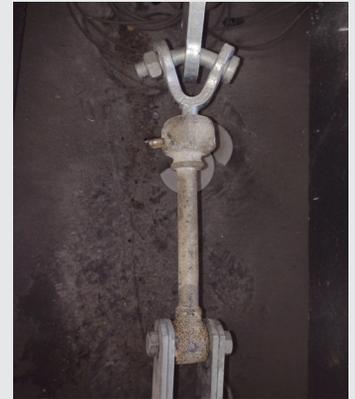
**Línea 73150  
Torre 102  
Fase B**

Figura 5 Perspectiva de los Herrajes y aislador.  
Fuente: Elaboración propia.

Dentro del set de pruebas en laboratorio mediante los elementos en preparación (Herrajes) al ejecutar las pruebas de resistencia a la tensión se puede apreciar en la siguiente Figura 8 algunas de las imágenes, tal como la máquina de tensión.



Máquina de tensión Horizontal donde se desarrolla la prueba de resistencia a la tensión.



Acondicionamiento de herraje M1 (Calavera ojo corta).

En las Figuras 6 y 7 se puede observar el comportamiento de la prueba a la tensión al herraje calavera ojo corta y calavera ojo larga [4].

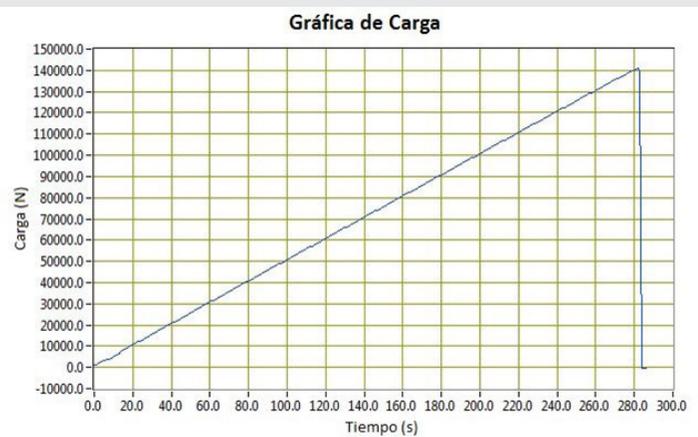


Figura 6 Gráficas de Comportamiento Prueba de Resistencia (PR) a la Tensión Herraje Calavera Ojo Corta y Calavera ojo Larga  
Fuente: Elaboración propia.



Acondicionamiento de M2 (Calavera ojo corta).

Figura 8 Desarrollo de pruebas en herrajes de línea de transmisión aérea.

Fuente: Elaboración propia.

El acondicionamiento del herraje calavera ojo corta, y calavera ojo larga. Demostrando que fusionado a su aspecto y envejecimiento producido o generado durante su tiempo instalado aún conservan sus propiedades mecánicas.

De los ensayos de tensión mecánica a los aisladores sintéticos tipo suspensión (115kV) y del mecanismo de prueba a los siguientes aisladores se obtuvieron algunos valores. Destacando una vez más la diferencia de fabricantes donde su resistencia máxima en **M1** 140.57 kN, **M2** 142.41 kN, **M3** 152.63., por estar al aire libre (intemperie) lo cual recae en su deterioro en este no se encontró grabado en el su valor mínimo permitido.

Dentro de la inspección microscópica se determinó que tenía zonas con corrosión en la superficie del herraje, a su vez depósitos incrustados, se visualizan algunos defectos durante la fundición y pérdida de material en la capa superficial esto es el recubrimiento llegando hasta el metal base, así como las microgrietas causadas por el esfuerzo que se le aplico al llevar la muestra a la falla [5].

En la referencia se observa un valor de 120 kN, lo que demuestra que, a pesar del desgaste y envejecimiento acumulado durante su tiempo de instalación, los herrajes aún conservaban sus propiedades mecánicas para soportar cargas. La Figura 9 muestra imágenes de herrajes que presentaron fracturas (fallo) después de ser sometidos al ensayo de resistencia, tal como se describe [6].

En la Figura 10 se observan algunas imágenes del herraje (calavera ojo corta) en la zona de falla donde se perciben las grietas (rojo) en la zona superficial debidos a los ensayos de resistencia a la tensión, y se muestran los nódulos o bultos del granulado (azul).



Muestra al término del ensayo de resistencia a la tensión debido al fallo del elemento (M1).



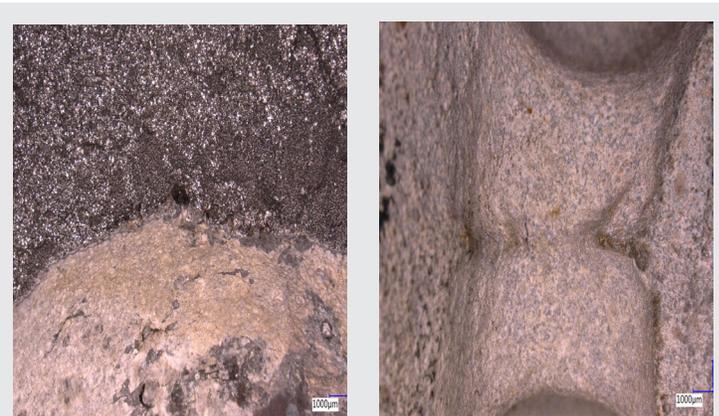
Muestra M1 fallado



Muestra M2 fallado

Figura 9 Análisis de herrajes mediante los ensayos de resistencia a la tensión

Fuente: Elaboración propia.



Máquina de tensión Horizontal donde se desarrolla la prueba de resistencia a la tensión.

Acondicionamiento de herraje M1 (Calavera ojo corta).



Figura 10 Evidencia de la inspección microscópica del herraje en cuestión.

Fuente: Elaboración propia.

A demás de visualizar algunos defectos en la fundición debido a burbujas causadas por gases (rojo), grietas transversales en la capa superficial (azul), presencia de depósitos blanquecinos en la capa superficial del herraje (verde).

Por otro lado, del análisis químico implementado mediante energía dispersiva de rayos X, en dos de las muestras de herrajes calavera ojo corta, validando la aleación metálica de su material base y el material de su recubrimiento, así como los depósitos adheridos en

la superficie del herraje conteniendo elementos corrosivos como es, azufre y sodio, pérdida progresiva del material, presentando corrosión incipiente, donde en estos elementos en particular se aprecia la pérdida de su capa de recubrimiento, así como donde el deterioro ocasionado por algunos contaminantes típicos tales puede ser provenientes de la industria local y del medio ambiente.

En la Figura 11 se aprecian dos imágenes del barrido aplicado a los herrajes en sus zonas de mayor concentración de depósitos donde se determina la composición de la sanidad del material, verificando su aleación.

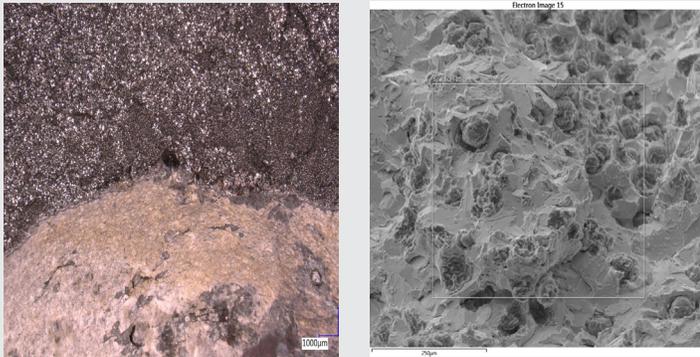


Figura 11 Evidencia de la inspección microscópica del herraje en cuestión.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12 se puede apreciar de la inspección química desglosando los porcentajes de los elementos presentes en dos imágenes como se muestra.

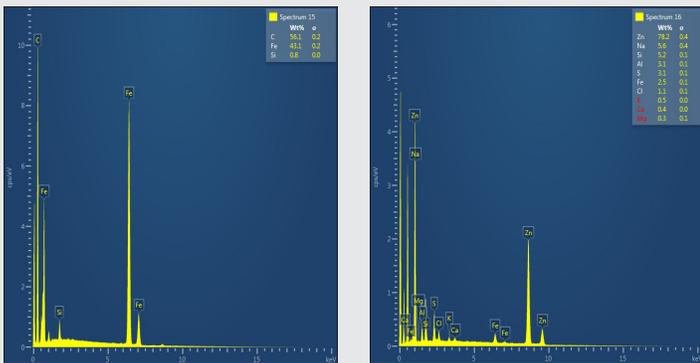


Figura 12 Evidencia de la inspección del análisis químico.

Fuente: Elaboración propia.

Los herrajes seleccionados y extraídos para su análisis en laboratorio mostraron características mecánicas superiores a las exigidas por el documento de referencia. Es decir, presentan una resistencia a la tensión que varía entre un 12% y un 57% por encima del valor mínimo requerido, dependiendo de la marca o el fabricante de los herrajes. Sin embargo, los especímenes también mostraron deterioro en diversas zonas de la capa de galvanizado, evidenciando una corrosión incipiente en el material base. Esta corrosión es resultado del depósito de agentes corrosivos, como se detalla en el análisis químico, los cuales se originan tanto por

medios naturales como por contaminantes industriales. La humedad de ambiente favorece la formación de ácidos e hidróxidos, actuando como agentes corrosivos, acelerando la degradación del material [7]. Muy a pesar de las condiciones, los herrajes mantienen sus propiedades mecánicas. No obstante, es evidente que, con el tiempo, estas propiedades se verán afectadas.

## CONCLUSIONES

En el análisis llevado a cabo en el campo y en el laboratorio durante la inspección de la línea LTs TTA 73150 de 115 kV, así como las pruebas de las muestras en el laboratorio, se concluye que de manera factible el estado del herraje y del aislamiento de la LT aérea.

En relación a los herrajes, se determinaron signos de envejecimiento y corrosión incipiente, atribuibles al depósito de agentes corrosivos descritos en el análisis químico, originados tanto de manera natural como por contaminantes industriales, al combinarse con el oxígeno y la humedad del ambiente, generan la formación de ácidos e hidróxidos que actúan corrosivamente, acelerando la degradación del material. El fenómeno es evidente en las picaduras observadas en las superficies de los herrajes.

Y asimismo el aislamiento, se detectaron fracturas en la capa superficial de dos de las muestras, y desprendimientos de algunos faldones aislantes, lo que resulta en una pérdida de propiedades dieléctricas. En una sección del aislamiento, se observaron cúmulos blanquecinos que actúan como contaminantes del material. En otras palabras, aunque los herrajes y el aislamiento de la LTs aún mantienen sus propiedades mecánicas y dieléctricas, la evidencia de corrosión y desgaste sugiere que, con el tiempo, estas propiedades podrían verse comprometidas, activando mecanismos de falla que pondrían en riesgo la integridad de las líneas de transmisión.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Especificación CFE 2C-301-15, Editada en Nov 2020".
- [2] "MÉXICO HERRAJES, CONJUNTOS DE HERRAJES Y ACCESORIOS PARA CABLE DE GUARDA CON FIBRAS ÓPTICAS REVISIÓN Y SUSTITUYE A LA EDICIÓN DE DICIEMBRE DE 2015."
- [3] "Especificación del cable de aluminio con cableado concéntrico y núcleo de acero (ACSR) CFE E1000-12," Normativa CFE, Cable de aluminio de cableado concéntrico, vol. 3, no. 3, pp. 1-51, Dec. 2020.
- [4] R. Fernández Vásquez, "Desempeño mecánico de montajes de líneas de distribución de energía eléctrica Mechanical Performance of Electric Power Distribution Line Mounting."
- [5] A. Ghavamian, M. R. Maghami, S. Dehghan, and C. Gomes, "Concerns of corrosive effects with respect

to lightning protection systems," 2015. doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.08.019.

[6] E. Hakansson, P. Predecki, and M. S. Kumosa, "Galvanic Corrosion of High Temperature Low Sag Aluminum Conductor Composite Core and Conventional Aluminum Conductor Steel Reinforced Overhead High Voltage Conductors," IEEE Trans Reliab, vol. 64, no. 3, 2015, doi: 10.1109/TR.2015.2427894.

[7] N. Jaffrey and S. Hettiwatte, "Corrosion Detection in ACSR Cables."





Multidisciplinario  
e  
ingenierías

---

Ingeniantes

# Modelado de Circuitos RLC: del Método Matemático a la Aproximación Impulsada por Datos



## Colaboración

Ramón Daniel Rodríguez Soto; Emilio Barocio Espejo; Universidad de Guadalajara; Oswaldo Cortes Robles; Universidad Tecnológica de Jalisco, Dunstano del Puerto Flores; Pavel Zuñiga Haro, Universidad de Guadalajara

Fecha de recepción: 30 de septiembre 2024

Fecha de aceptación: 04 de marzo de 2025

**RESUMEN:** Este artículo explora el modelado de circuitos RLC utilizando métodos matemáticos, numéricos y basados en datos, con un enfoque especial en la Descomposición en Modos Dinámicos (DMD). Se realiza una comparación de la precisión y eficiencia de cada enfoque, destacando cómo el DMD ofrece ventajas significativas frente a los métodos tradicionales, particularmente en la captura de comportamientos dinámicos y en la simplificación del análisis del sistema. Esta técnica basada en datos no solo mejora la precisión del modelado, sino que también proporciona una herramienta poderosa para el estudio de circuitos eléctricos, lo que podría transformar las prácticas de diseño y análisis en ingeniería eléctrica.

**PALABRAS CLAVE:** Circuitos RLC, Descomposición en Modos Dinámicos (DMD), Métodos Basados en Datos, Modelado de Circuitos, Ingeniería Eléctrica.

**ABSTRACT:** This article explores the modeling of RLC circuits using mathematical, numerical, and data-driven methods, with a special focus on Dynamic Mode Decomposition (DMD). A comparison of the accuracy and efficiency of each approach is presented, highlighting how DMD offers significant advantages over traditional methods, particularly in capturing dynamic behaviors and simplifying system analysis. This data-driven technique not only enhances modeling accuracy but also provides a powerful tool for studying electrical circuits, potentially transforming design and analysis practices in electrical engineering.

**KEYWORDS:** RLC Circuits, Dynamic Mode Decomposition (DMD), Data-Driven Methods, Circuit Modeling, Electrical Engineering

## INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la tecnología y la industria de sistemas de potencia, los circuitos RLC (Resistencia, Inductancia, Capacitancia) son fundamentales. Estos circuitos constituyen la base de numerosos dispositivos y sistemas que se utilizan a diario, desde transformadores y generadores hasta sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica [1]. El modelado matemático de estos circuitos es esencial para comprender su comportamiento y optimizar su rendimiento. A través de ecuaciones diferenciales y métodos para resolverlas, es posible describir el comportamiento de un circuito

RLC y su respuesta ante diferentes estímulos, permitiendo así el diseño de sistemas de potencia más eficientes y confiables [2].

Tradicionalmente, la resolución de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de un circuito RLC se ha abordado mediante métodos directos, numéricos con un enfoque temporal y la transformada de Laplace [3] basado en la frecuencia. Si bien estos enfoques son robustos, los modelos matemáticos tradicionales suelen ser ideales y no siempre capturan todas las dinámicas de los sistemas reales, especialmente cuando se trata de fenómenos no lineales o pérdidas imprevistas. Aquí es donde cobran relevancia las técnicas basadas en datos, las cuales utilizan cualquier tipo de información cuantitativa o cualitativa que puede ser recopilada, almacenada y analizada, como números, texto, imágenes y registros históricos; en nuestro caso, mediciones. Estas técnicas han emergido como una poderosa herramienta para el modelado, análisis y simulación de sistemas dinámicos, como los circuitos RLC [4,5].

El análisis de circuitos RLC es fundamental en diversas aplicaciones de ingeniería, pero su modelado tradicional enfrenta limitaciones significativas. Los métodos analíticos, como la Transformada de Laplace, requieren suposiciones idealizadas que pueden no representar con precisión sistemas reales sujetos a perturbaciones y ruido. Por otro lado, los métodos numéricos, como Runge-Kutta, ofrecen mayor precisión, pero a un alto costo computacional. En este contexto, surge la necesidad de explorar enfoques basados en datos, que permiten modelar dinámicas directamente a partir de mediciones, sin depender de ecuaciones matemáticas explícitas.

Las técnicas impulsadas en datos se han consolidado por su capacidad estimar la dinámica de sistemas sin necesidad de un modelo físico explícito. Esto es particularmente ventajoso cuando los modelos tradicionales son inadecuados o difíciles de formular. Por ejemplo, la optimización de la red eléctrica mediante modelos tradicionales puede resultar extremadamente compleja debido a la interconexión de múltiples elementos y la variabilidad en la demanda y generación de energía. Sin embargo, las técnicas basadas en datos permiten optimizar la distribución de energía en tiempo real, al considerar factores como la generación renovable, la demanda actual y las condiciones de la red. El uso de estos métodos representa un cambio paradigmático en el modelado de sistemas, ya que ofrece modelos precisos sin recurrir al modelo en variables de estado, superando las limitaciones de los métodos analíticos y numéricos convencionales. Entre estas técnicas destaca Descomposición en Modos Dinámicos (DMD) [6], como una técnica eficaz para extraer pa-

trones dinámicos de datos temporales, permitiendo descomponer sistemas en modos coherentes y describir su evolución, esta flexibilidad es crucial en el análisis de circuitos RLC.

En este estudio, se analiza un mismo circuito RLC en serie como caso de estudio y se comparan diversas metodologías analíticas, numéricas y basadas en datos para resolver su modelo matemático. Se evalúa la precisión de cada enfoque bajo las mismas condiciones y parámetros, garantizando una comparación equitativa. Además, se implementa y contrasta la técnica basada en datos de DMD, demostrando cómo esta metodología puede mejorar la fidelidad del modelado, especialmente en escenarios donde los métodos tradicionales presentan limitaciones o se vuelven imprácticos.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El modelo de espacio de estados de un circuito RLC es una representación matemática que describe la dinámica del sistema. La Figura 1 muestra un diagrama del circuito RLC en serie.

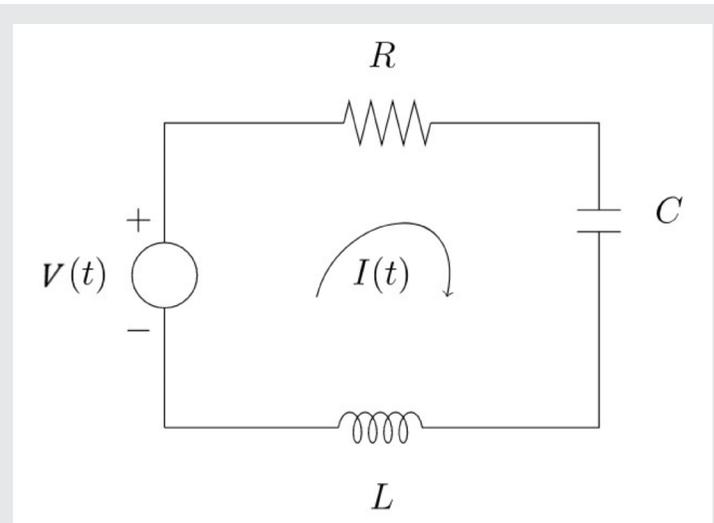


Figura 1. Diagrama de circuito RLC en serie.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede imaginar un circuito RLC, que es una pequeña ciudad eléctrica donde la corriente eléctrica (flujo de carga eléctrica) es el tráfico. El voltaje de entrada es como la autopista principal que permite la entrada de vehículos (corriente) a la ciudad, pero en un solo sentido y con flujo vehicular constante. Primero el flujo de vehículos se regula por una caseta de acceso (la resistencia) que genera una fila de longitud constante, pero sin detener el flujo del todo. Luego, la corriente llega al capacitor que funciona como un estacionamiento donde la carga parcialmente se almacena eventualmente hasta llegar a su límite de capacidad y permita el flujo totalmente. Parte de este flujo sale del capacitor al inductor que a medida que avanzan, el inductor actúa como

una rotonda que regula el flujo, almacenando y liberando energía gradualmente.

A continuación, se explicarán las reglas de tráfico en la ciudad eléctrica. Estas reglas son las ecuaciones diferenciales que describen cómo se mueve la "electricidad" a través de la ciudad. En el circuito RLC, la velocidad de cambio de la corriente  $i$  (la derivada de la corriente) está relacionada con la caída de voltaje en el inductor  $v_L$ . De manera similar, la velocidad de cambio del voltaje del capacitor  $v_C$  (la derivada del voltaje del capacitor) está relacionada con la corriente a través del capacitor  $i$ .

Por lo tanto, se pueden escribir dos ecuaciones diferenciales de primer orden que describen estas reglas de tráfico. Y, al aplicar la ley de Kirchhoff para los voltajes, es posible obtener una descripción completa de cómo funciona nuestra ciudad eléctrica. Así es como analizamos el modelo de espacio de estados de un circuito RLC.

Para explorar la respuesta natural de un circuito RLC, es necesario recurrir a las ecuaciones diferenciales, por lo tanto, se modelará y analizará el circuito RLC con una ecuación diferencial [7]. Esta ecuación permitirá observar cómo cambia la corriente en el circuito con el tiempo, en función de la resistencia, la inductancia y la capacitancia, se encuentra dada por

$$L \frac{d i(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t)dt = v_s(t) \quad \text{Ec.(1)}$$

Donde  $L$  es la inductancia (en Henrios (H)),  $R$  es la resistencia (en Ohmios ( $\Omega$ )),  $C$  es la capacitancia (en Faradios (F)),  $i$  es la corriente (en Amperios (A)),  $v_s(t)$  es la fuente de voltaje en función del tiempo (en Voltios (V)) y  $t$  es el tiempo (en segundos (s)). Aplicando una segunda derivada a la corriente ( $i(t)$ ), se simplifica la ecuación y es expresada en términos de la aceleración de la corriente. La ecuación diferencial de segundo orden con respecto al tiempo es:

$$L \frac{d^2 i(t)}{dt} + R \frac{d i(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = \frac{d v_s(t)}{dt} \quad \text{Ec.(2)}$$

El primer término,  $t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$ , describe cómo  $L$  afecta la aceleración de la corriente (la rapidez con la que cambia la velocidad de la corriente).

El segundo término,  $R \frac{d i(t)}{dt}$ , muestra cómo  $R$  afecta la velocidad de la corriente (cuánto cambia la corriente en un cierto tiempo).

El tercer término,  $\frac{1}{C} i(t)$ , describe cómo  $C$  afecta la cantidad de corriente en el circuito, mientras la integral de la ecuación original representa la acumulación de carga en el condensador.

Se tiene ahora una ecuación diferencial ordinaria de segundo grado. A continuación, se resolverá por diferentes métodos la ecuación diferencial y se comparará con una estimación basada en datos.

### Método de Resolución Directa

Abordando la solución de la ecuación diferencial de un circuito RLC en serie utilizando el Método de Resolución Directa. Se inicia con la ecuación diferencial que describe el circuito dada por la Ecuación (2), la solución homogénea satisface la ecuación

$$\frac{d^2 i(t)}{dt} + R \frac{d i(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = 0 \quad \text{Ec.(3)}$$

Donde  $v_s(t) = 0$ , por lo que en un circuito RLC en serie, se describe un circuito en descarga, sin una fuente de tensión externa aplicada. Esta ecuación se denomina homogénea debido a que cada término está vinculado con la variable  $i(t)$  y sus derivadas. Se supone que una solución homogénea tiene la forma  $Ae^{\zeta t}$ , ya que las soluciones de ecuaciones homogéneas con coeficientes constantes suelen ser exponenciales. La razón es que las funciones exponenciales tienen la propiedad de que sus derivadas son proporcionales a la función original, lo que simplifica el proceso de resolución [7]. Aquí,  $A$  es una constante que representa la amplitud de la corriente, mientras que  $\zeta$  es la llamada frecuencia natural. Sustituyendo  $Ae^{\zeta t}$  en la Ecuación (3), obtenemos la ecuación característica:

$$L\zeta^2 + R\zeta + \frac{1}{C} = 0 \quad \text{Ec.(4)}$$

Al resolver esta ecuación se obtendrán las raíces  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$  del polinomio característico siguiente:

$$\zeta_1, \zeta_2 = \frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad \text{Ec.(5)}$$

Esta expresión que permite definir el factor de amortiguamiento  $\alpha$  y la frecuencia de resonancia  $\omega_0$  dada por

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{Ec.(6)}$$

Finalmente, la solución homogénea será una combinación de términos exponenciales basados en las raíces del polinomio característico:

$$i(t) = A_1 e^{\zeta_1 t} + A_2 e^{\zeta_2 t} \quad \text{Ec.(7)}$$

Donde  $A_1$  y  $A_2$  son constantes de amplitud de la corriente que se determinan utilizando las condiciones iniciales,  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$  son frecuencias naturales.

Este proceso proporciona una solución para la corriente en función del tiempo en un circuito RLC serie.

## Método de transformada de Laplace

La transformada de Laplace es una poderosa herramienta matemática que permite analizar sistemas dinámicos en el dominio de la frecuencia. Con ella, se pueden convertir ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas más manejables. Para una función  $f(t)$ , la transformada de Laplace  $\mathcal{L} [ f(t) ]$  se define como [3]:

$$\mathcal{L} [ f(t) ] = F(s) \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad \text{Ec.(8)}$$

Aquí,  $s$  es una variable compleja y  $F(s)$  es la función transformada de  $f(t)$ .

Es posible utilizar el método de Laplace para analizar circuitos eléctricos y resolver las ecuaciones diferenciales. Se considera la Ecuación (1) de un circuito RLC en serie que representa  $f(t)$ , se aplica la transformada de Laplace a ambos lados de la Ecuación (1) [3], esto conduce a la siguiente expresión en el dominio de Laplace:

$$LsI(s) + RI(s) + \frac{1}{C} \frac{I(s)}{s} = \frac{V(s)}{s} \quad \text{Ec.(9)}$$

donde  $I(s)$  y  $V(s)$  son las transformadas de Laplace de  $i(t)$  y  $v_s(t)$  respectivamente, simplificando el análisis, se asumen condiciones iniciales  $i(0)=0$  y

Entonces despejando la Corriente  $I(s)$  de la expresión anterior:

$$I(s) = \frac{V(s)}{Ls^2 + Rs + 1/C} \quad \text{Ec.(10)}$$

Finalmente se aplica la transformada inversa de Laplace para obtener la corriente nuevamente en el dominio del tiempo:

$$i(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{V(s)}{Ls^2 + Rs + 1/C} \right\} \quad \text{Ec.(11)}$$

Donde  $\alpha = R/2L$  y  $\omega = \sqrt{1/LC - R^2/4L^2}$

Este método proporciona una expresión para la corriente en función del tiempo en un circuito RLC en serie [3, 7]. La transformada de Laplace simplifica la resolución de ecuaciones diferenciales aplicando exclusivamente expresiones algébricas y permite analizar el comportamiento del circuito en el dominio de la frecuencia de una manera más eficiente.

## Modelo numérico por Runge-Kutta

El método Runge-Kutta es un método numérico que sirve para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias, es decir, ecuaciones que relacionan una función con sus derivadas. El método Runge-Kutta consiste en seguir unos pasos que permiten ir avanzando poco a poco desde el valor inicial hasta el valor final que se quiere obtener. En cada paso, se utiliza la información que ya se tiene para estimar la información faltante. El método Runge-Kutta tiene

diferentes variantes según el número de pasos y el orden de precisión que se quiera obtener.

Se puede decir que el método Runge-Kutta es una forma de encontrar soluciones aproximadas de ecuaciones que no es posible resolver fácilmente con otros métodos. Por ejemplo, para resolver la ecuación RLC usando el método Runge-Kutta de cuarto orden, se pueden seguir los siguientes pasos [8].

Primero se reescribe la Ecuación (1) como un sistema de dos ecuaciones de primer orden como se muestra a continuación

$$\frac{di}{dt} = \frac{v(t) - Ri - \frac{1}{C}q}{L} \quad \text{Ec.(12)}$$

donde  $q$  representa la carga, establecido por  $\frac{dq}{dt} = i$ .

Después se elige un intervalo de tiempo  $[t_0, t_f]$ , si es conocida la carga y la corriente en un momento, se puede estimar la carga y la corriente en el siguiente momento usando la ecuación y un valor pequeño llamado  $h$ , que es el intervalo de tiempo entre un momento y otro. Entonces se divide en  $N$  subintervalos de igual tamaño  $h=(t_f-t_0)/N$ , para después definir los puntos  $t_n=t_0+nh$ , con  $n=0,1,\dots,N$ .

Ahora se asignan unos valores iniciales  $q_0$  e  $i_0$  para la carga y la corriente en el tiempo inicial  $t_0$ . Para hacer esta estimación, el método Runge-Kutta usa cuatro valores intermedios, llamados  $k_1, k_2, k_3$ , y  $k_4$  para la corriente, y  $l_1, l_2, l_3$  y  $l_4$  para la carga. Estos valores se calculan usando la ecuación y los valores anteriores de la siguiente manera [8]:

$$k_1 = h \frac{V(t_n) - Ri_n - \frac{q_n}{C}}{L}, \quad l_1 = hi_n \quad \text{Ec.(13a)}$$

$$k_2 = h \frac{V(t_n + \frac{h}{2}) - R(i_n + \frac{k_1}{2}) - \frac{q_n + l_1}{C}}{L} \quad \text{Ec.(13b)}$$

$$l_2 = h \left( i_n + \frac{k_1}{2} \right)$$

$$k_3 = h \frac{V(t_n + \frac{h}{2}) - R(i_n + \frac{k_2}{2}) - \frac{q_n + l_2}{C}}{L} \quad \text{Ec.(13c)}$$

$$l_3 = h \left( i_n + \frac{k_2}{2} \right)$$

$$k_4 = h \frac{V(t_n + h) - R(i_n + k_3) - \frac{q_n + l_3}{C}}{L} \quad \text{Ec.(13d)}$$

$$l_4 = h(i_n + k_3)$$

Estos valores se usan para calcular la corriente y la carga en el siguiente momento con estas fórmulas:

$$i_{n+1} = i_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad \text{Ec.(14)}$$

$$q_{n+1} = q_n + \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \quad \text{Ec.(15)}$$

Estas fórmulas son una forma de promediar los valores intermedios para obtener un valor más preciso. Así, se repite el proceso hasta llegar al momento final  $t_f$  que se quiere conocer. Este método permite obtener una solución numérica de la ecuación con un error pequeño, sin necesidad de conocer la solución exacta.

### Técnica Impulsada por Datos

En el análisis de sistemas dinámicos, varias técnicas basadas en datos han sido desarrolladas para modelar y comprender su comportamiento. Entre las más conocidas se encuentran la Estimación de Relación Autoregresiva (ERA), el Método del Lápiz de Matrices (Matrix Pencil), y el Método de Prony [9]. Aunque estas técnicas han sido útiles en diversas aplicaciones, la Descomposición en Modos Dinámicos (DMD) se destaca por su modernidad, flexibilidad y capacidad para trabajar directamente con datos sin necesidad de suposiciones sobre la estructura del modelo [6, 10]. A diferencia de ERA, Matrix Pencil y Prony, DMD ofrece una mayor robustez en capturar dinámicas complejas, encontrarse en diversos campos como la física en fluidos [6], la biología y medicina en encefalogramas [11], la economía en mercados de energía [12] y la ingeniería en monitoreo de sistemas de potencia [10], lo que la convierte en la técnica elegida en este trabajo para el modelado, análisis y simulación de circuitos RLC.

DMD es una técnica avanzada de análisis basada en datos que se utiliza para estimar el comportamiento de sistemas dinámicos [6]. Esta técnica es especialmente útil en la identificación de patrones temporales recurrentes en sistemas que cambian con el tiempo, como ondas que se propagan o circuitos RLC [5, 10]. La principal ventaja de DMD radica en su capacidad para descomponer datos temporales complejos en los llamados modos dinámicos característicos, permitiendo así una descripción compacta del sistema y una mejor comprensión de su evolución como se ilustra en la Figura 2.

El método DMD tiene la capacidad de aproximar el sistema dinámico a partir de los datos de medición del sistema  $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ , en esta matriz cada renglón  $m$  corresponde a un conjunto de mediciones o estados del sistema recopiladas durante  $n$  instantes de tiempo, donde cada columna está representada por las llamadas instantáneas  $\mathbf{X}_k \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ , con  $k=1, \dots, n$ .

Las mediciones se organizan en dos matrices, la matriz  $\mathbf{X}_1 \in \mathbf{R}^{m \times n-1}$ , y la matriz  $\mathbf{X}_2 \in \mathbf{R}^{m \times n-1}$ , la cual presenta

un desplazamiento temporal, lo que permite que el método DMD estime la matriz dinámica, es decir, se busca una relación entre estos dos conjuntos mediante un operador lineal  $\mathbf{F} \in \mathbf{R}^{(m \times m)}$ , tal que:

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{F}\mathbf{X}_1 \quad \text{Ec.(16)}$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_1^\dagger \quad \text{Ec.(17)}$$

donde  $\mathbf{X}_1^\dagger$  es la pseudo inversa de  $\mathbf{X}_1$ . DMD busca identificar una matriz de mapeo (operador)  $\mathbf{F}$  que describe la dinámica de transición entre dos conjuntos de datos,  $\mathbf{X}_1$  y  $\mathbf{X}_2$ , es decir, permite estimar o predecir el estado futuro del sistema a partir de su estado pasado.

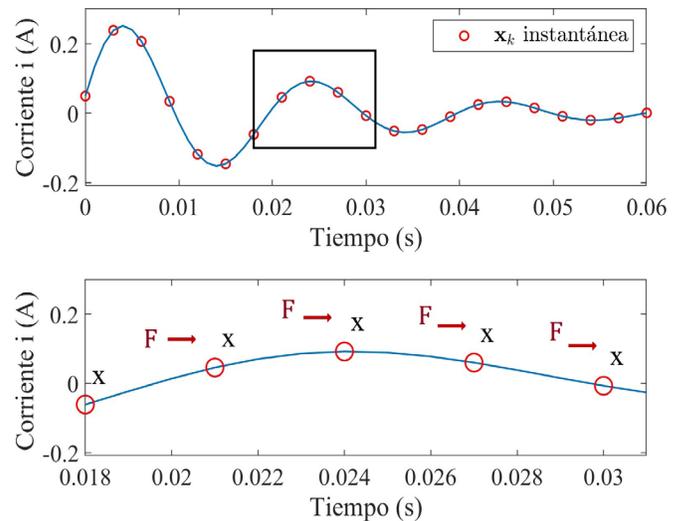


Figura 2. Serie de tiempo de corriente (imagen superior) muestras las instantáneas  $x_k$  que componen la serie de tiempo y (imagen inferior) la evolución del sistema la cual captura DMD. Fuente: Elaboración propia.

Para mejorar la estimación del operador  $\mathbf{F}$  y capturar la información más relevante del sistema, se emplea la técnica de Descomposición en Valores Singulares (DVS), que se define como:

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad \text{Ec.(18)}$$

donde  $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{m \times m}$  y  $\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{n \times n}$  son los vectores singulares y  $\mathbf{\Sigma} \in \mathbf{R}^{m \times n}$  se conoce como los valores singulares. Esta descomposición separa los datos las diferentes matrices y componentes de diferente importancia, permitiendo seleccionar únicamente los componentes más significativos  $r$  y descartando aquellos con menor influencia en el comportamiento del sistema [6], obteniendo las matrices  $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{m \times r}$ ,  $\mathbf{V}^T \in \mathbf{R}^{r \times n}$  y  $\mathbf{\Sigma} \in \mathbf{R}^{r \times r}$ .

Finalmente, el operador lineal  $\mathbf{F}$  se calcula sustituyendo la Ecuación (18) en Ecuación (17) y multiplicando  $\mathbf{U}^T$  obteniendo:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F} &= \mathbf{U}^T \mathbf{F} \mathbf{U} \\
 \mathbf{F} &= \mathbf{U}^T \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_1^\dagger \mathbf{U} \\
 \mathbf{F} &= \mathbf{U}^T \mathbf{X}_2 \mathbf{V} \Sigma^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{U} \\
 \mathbf{F} &= \mathbf{U}^T \mathbf{X}_2 \mathbf{V} \Sigma^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{Ec.(19)}$$

A partir del operador  $\mathbf{F}$ , se obtienen sus vectores propios  $\mathbf{w}_j$  asociado a los valores propios  $\lambda_j$ , donde  $j = 1, 2, \dots, m$ , para determinar los modos DMD  $\phi_j$ , definidos como  $\phi_j = \mathbf{U} \mathbf{w}_j$ . Estos modos representan las dinámicas subyacentes del sistema con una frecuencia y una tasa de crecimiento o decaimiento fijas dadas por  $\lambda_j$ .

Posteriormente obtenemos los coeficientes  $\mathbf{b}$ , calculados como  $\mathbf{b} = \phi_j^{-1} \mathbf{x}^1$ , donde  $\mathbf{x}^1$  son los datos en el primer instante, permiten ponderar la contribución de cada modo en la combinación final. De este modo, el estado del sistema en cualquier instante de tiempo  $t$  se obtiene mediante la combinación de los modos, los valores propios y los coeficientes, siguiendo la ecuación:

$$x(t) = \sum_{j=1}^m b_j \phi_j e^{\omega_j t}
 \tag{Ec.(20)}$$

donde  $\omega_j = \log(\lambda_j / \Delta t)$ , siendo  $\Delta t$  el intervalo de tiempo entre mediciones consecutivas.

Este enfoque permite una descripción simplificada pero precisa del sistema, facilitando tanto la comprensión de su comportamiento como la predicción de su evolución futura. A diferencia de los métodos tradicionales, que requieren modelar cada sistema dinámico con ecuaciones específicas para describir su comportamiento, DMD puede aplicarse a una amplia variedad de sistemas sin necesidad de reformular ecuaciones individuales. Además, en comparación con las diferentes formulaciones matemáticas de estos métodos, DMD se reduce principalmente a multiplicaciones de matrices, lo que simplifica su implementación y cálculo.

El método DMD actúa como un dron que sobrevuela la ciudad y analiza el tráfico eléctrico del circuito, identifica patrones en la evolución de la corriente y el voltaje. A partir de estas observaciones, DMD extrae "rutas preferidas" o modos dinámicos que describen el comportamiento del sistema, permitiendo predecir cómo fluirá la electricidad en el futuro sin necesidad de conocer todas las reglas exactas del tráfico en la ciudad. Así como en el circuito RLC el voltaje y la corriente evolucionan en función de las características de los componentes, DMD analiza la evolución de los datos para encontrar patrones recurrentes que describan el sistema sin necesidad de ecuaciones explícitas.

## RESULTADOS

Se evaluaron diversas metodologías analíticas, numéricas y basadas en datos mediante simulaciones en MAT-

LAB / SIMULINK [13], aplicadas a un mismo caso de estudio: un circuito RLC. Para garantizar una comparación equitativa, todos los modelos se han analizado utilizando los mismos parámetros (Los dos primeros modelos, Ec. (11) para Laplace y Ec. (14) y Ec. (15) para Runge-Kutta):  $v_s = 1 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 0.001 \text{ s}$ ,  $t = 0 \text{ s}$ ,  $t_f = 0.1 \text{ s}$ ,  $R = 1 \text{ } \Omega$ ,  $L = 0.01 \text{ H}$ , y  $C = 0.001 \text{ F}$ . La matriz  $\mathbf{X}^{4 \times 121}$  obtenida de una ventana de tiempo de 0.06 s utilizada en DMD (Figura 2, imagen superior), fue generada a partir del modelo RLC de Simscape Electrical en SIMULINK, empleando un desplazamiento temporal de 0.001 s, asegurando así la coherencia en la evaluación de todas las metodologías.

En la Figura 3, se observan los resultados demuestran que las trayectorias de corriente obtenidas mediante las distintas metodologías –analítica, numérica y basada en datos– presentan una coincidencia notable, validando la precisión de todas ellas en la descripción de la dinámica del sistema. Esta correspondencia en la respuesta de la corriente del circuito RLC en serie, donde las soluciones obtenidas mediante los distintos métodos son prácticamente indistinguibles. Esto destaca la capacidad del DMD para capturar la evolución del sistema únicamente a partir de datos, sin requerir un modelo matemático explícito.

La solución analítica del circuito RLC, derivada de ecuaciones diferenciales, es precisa bajo condiciones ideales, pero se ve limitada ante perturbaciones o cambios no modelados. Por otro lado, el método numérico de Runge-Kutta ofrece robustez ante variaciones, aunque con un alto costo computacional. La Transformada de Laplace permite un análisis eficiente en el dominio de la frecuencia, pero su aplicación se complica en sistemas con entradas complejas. En contraste, el DMD trabaja directamente con los datos medidos, lo que le permite capturar las dinámicas del sistema sin requerir ecuaciones diferenciales explícitas, adaptándose mejor a condiciones reales.

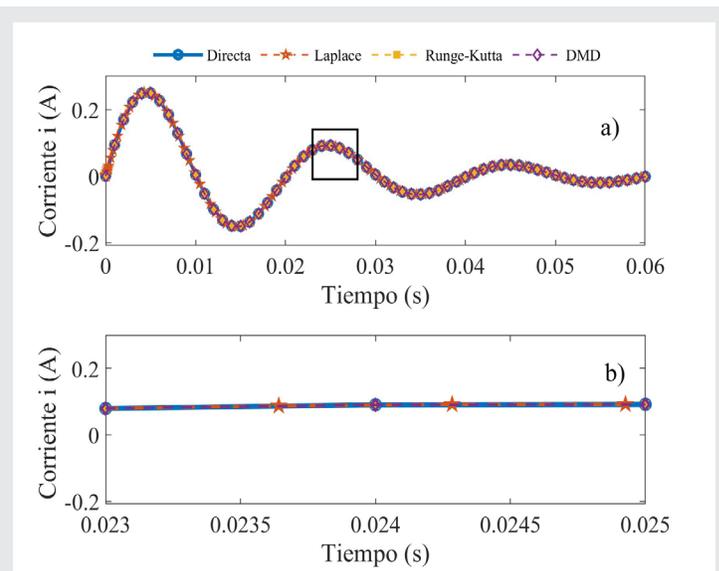


Figura 3: Estimación de las trayectorias de la corriente en a) y primer plano de las diferentes cuatro estimaciones en b). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4, se presentan los valores de frecuencia y amortiguamiento extraídos con cada método para la corriente, evidenciando una notable coincidencia entre ellos. Se observa que las discrepancias son mínimas, del orden de  $10^{-4}$ , como se detalla en la Tabla 1. La distribución de los puntos en el plano frecuencia-amortiguamiento muestra que los valores obtenidos con DMD prácticamente se superponen con los derivados de los métodos analíticos y numéricos, lo que indica que la técnica basada en datos es capaz de recuperar las características dinámicas del sistema con una precisión comparable únicamente a partir del operador  $F$  construido con datos.

Tabla 1. Datos comparativos de frecuencia y amortiguamiento para los cuatro métodos.

|                 | Directa  | Laplace  | Runge-Kutta | DMD      |
|-----------------|----------|----------|-------------|----------|
| Frecuencia (Hz) | 50.0000  | 50.0000  | 49.99857    | 49.99698 |
| Amortiguamiento | -50.0000 | -50.0001 | -50.0001    | -50.0001 |

Fuente: Elaboración propia.

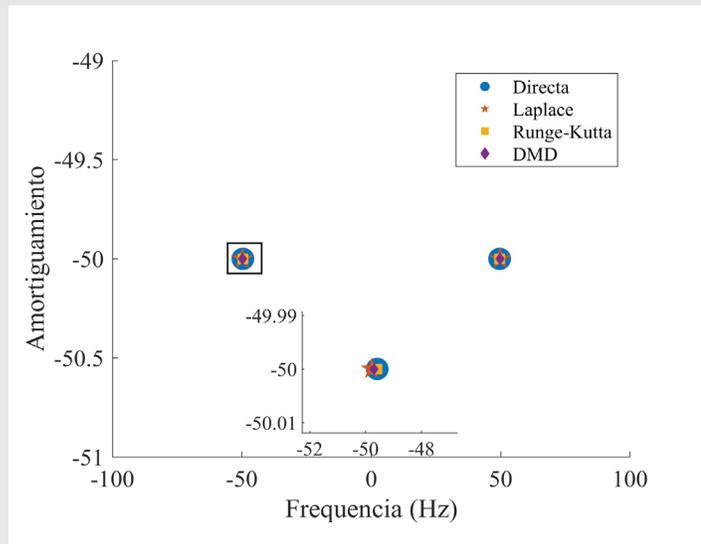


Figura 4. Amortiguamiento y frecuencia obtenidos de la serie de tiempo de la corriente.

Fuente: Elaboración propia.

Una de las principales ventajas del DMD es su capacidad para predecir la evolución del sistema a partir de datos históricos, sin requerir un conocimiento detallado de su estructura matemática. En la Figura 5, se ilustra cómo el operador  $F$  obtenido con DMD, a partir de una ventana de datos de solo 0.03s, es capaz de predecir la trayectoria de la corriente hasta  $t = 0.12s$  con un error medio absoluto de solo 0.00012%.

Esta capacidad predictiva es una ventaja significativa sobre los métodos analíticos y numéricos tradicionales, que dependen de un conocimiento detallado del sistema y pueden verse afectados por idealizaciones que no reflejan completamente las condiciones del mundo real. En contraste, el DMD permite modelar sistemas de manera flexible que se adapta mejor a las complejidades de los sistemas reales, capturando su comportamiento a partir de mediciones de voltaje o corriente sin necesidad de un modelo matemático explícito. Esto lo convierte en una herramienta poderosa para el análisis y la simulación de circuitos eléctricos y otros sistemas dinámicos complejos donde las perturbaciones, el ruido o las variaciones no modeladas pueden afectar el rendimiento del sistema.

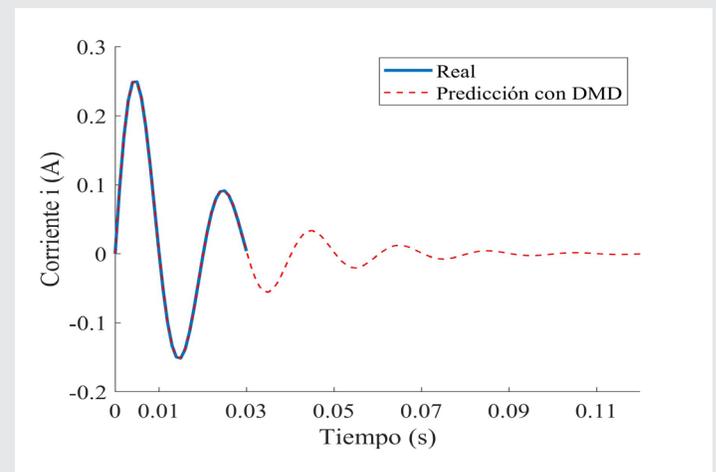


Figura 5. Pronóstico de la evolución dinámica de la corriente utilizando el operador  $F$ .

Fuente: Elaboración propia.

### CONCLUSIONES

Este estudio ha demostrado la efectividad de la Descomposición en Modos Dinámicos (DMD) como una alternativa robusta para el modelado y análisis de circuitos RLC. A diferencia de los métodos tradicionales –analíticos y numéricos– que requieren un modelo matemático explícito del sistema, DMD trabaja únicamente con datos y es capaz de reconstruir con alta precisión la dinámica del circuito.

Los resultados obtenidos muestran que DMD puede replicar la frecuencia y el amortiguamiento del sistema con una precisión comparable a la de métodos como la Transformada de Laplace y Runge-Kutta. Sin embargo, su principal ventaja radica en su capacidad para operar en escenarios donde los métodos convencionales pueden ser limitados, como en sistemas con componentes difíciles de modelar o sujetos a perturbaciones no previstas.

Además, la posibilidad de aplicar DMD sin necesidad de una formulación matemática específica lo

convierte en una herramienta versátil para el análisis de sistemas eléctricos complejos, incluyendo redes eléctricas donde la identificación y caracterización de dinámicas es esencial para la estabilidad y el control del sistema. Este trabajo resalta la importancia de los enfoques basados en datos para la modelación de sistemas dinámicos, abriendo nuevas oportunidades para la optimización y el monitoreo de circuitos eléctricos mediante técnicas avanzadas de procesamiento de datos.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] H. Amreiz, A. Janbey and M. Darwish, "Simulation of HVAC Transmission Line," 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-6.

[2] H. Amreiz, A. Janbey and M. Darwish, "Emulations of Overvoltage and Overcurrent Relays in Transmission Lines," 2022 57th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Istanbul, Turkey, 2022, pp. 1-6.

[3] S. Farlow, *Partial Differential Equations for Scientists and Engineers*, ser. Dover Books on Mathematics. Dover Publications, 2012.

[4] H. Huang, Y. Lin, Y. Zhou, Y. Zhao, P. Zhang, and L. Fan, "Data-driven modeling of power system dynamics: Challenges, state of the art, and future work," *iEnergy*, vol. 2, no. 3, pp. 200-221, 2023.

[5] A. Alassaf and L. Fan, "Dynamic mode decomposition in various power system applications," in 2019 North American Power Symposium (NAPS), 2019, pp. 1-6.

[6] J. N. Kutz, S. L. Brunton, B. W. Brunton, and J. L. Proctor, *Dynamic Mode Decomposition*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2016. [Online]. Available: <https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9781611974508>

[7] W. F. Trench, *Elementary Differential Equations with Boundary Value Problems*. San Antonio, TX: Faculty Authored and Edited Books & CDs – Trinity University, 2013.

[8] J. Kafle, B. K. Thakur, and I. B. Bhandari, "Application of numerical methods for the analysis of damped parallel rlc circuit," *Journal of Institute of Science and Technology*, vol. 26, no. 1, p. 28-34, Jun. 2021.

[9] A. Almunif, L. Fan, and Z. Miao, "A tutorial on data-driven eigenvalue identification: Prony analysis, matrix pencil, and eigensystem reali-

zation algorithm," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 4, p. e12283, 2020.

[10] E. Barocio, B. C. Pal, N. F. Thornhill, and A. R. Messina, "A dynamic mode decomposition framework for global power system oscillation analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 6, pp. 2902-2912, 2015.

[11] O. K. Cura, A. Akan, *Analysis of epileptic EEG signals by using dynamic mode decomposition and spectrum*, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, Volume 41, Issue 1, p. 28-44, 2021.

[12] C. T. Elmore, A. W. Dowling, *Learning spatiotemporal dynamics in wholesale energy markets with dynamic mode decomposition*, *Energy*, Volume 232, p. 121-131, 2021,

[13] T. M. Inc., "Matlab version: 9.13.0 (r2022b)," Natick, Massachusetts, United States, 2022. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com>



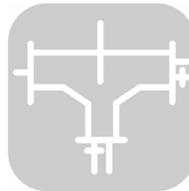


Multidisciplinario  
e  
ingenierías

---

Ingeniantes

# Algoritmo para el cálculo de fallas trifásicas en líneas de transmisión de sistemas de potencia



## Colaboración

José Miguel García Guzmán; Roberto Alejandro Vargas González; Ángel Antonio Soria Salazar; Miroslava Cano Lara; Juan Pablo Razón González, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Fecha de recepción: 30 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 04 de abril de 2025

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta la propuesta de un algoritmo para el cálculo de fallas trifásicas en líneas de transmisión de sistemas de potencia. El método consiste en agregar un nodo ficticio en el sistema de potencia, el cual es ubicado en el punto donde se requiere calcular la falla en la línea de transmisión y es definido en forma porcentual tomando como referencia al nodo de envío de la línea. Una vez especificado el punto de la falla se procede a llevar a cabo el análisis de fallas sistemáticas del sistema de potencia mediante la matriz Z-barra. La confiabilidad y precisión del algoritmo se demuestran mediante un caso de estudio con un sistema de potencia de prueba de 5 nodos y un sistema equivalente real de 39 nodos. Los resultados de los casos de estudio muestran que el algoritmo propuesto es confiable y dispone de precisión para calcular o simular fallas trifásicas en líneas de transmisión de sistemas de potencia.

**PALABRAS CLAVE:** Algoritmo, Falla trifásica, Línea de transmisión, Sistemas de Potencia, Corriente de falla.

**ABSTRACT:** This paper proposes an algorithm for calculating three-phase faults in transmission lines of power systems. The method consists of adding a fictitious node in the power system, which is located at the point where it is required to calculate the fault in the transmission line and is defined as a percentage, taking as a reference the line sending node. Once the fault point is specified, the power system's systematic fault analysis is carried out using the Z-bar matrix. The reliability and accuracy of the algorithm is demonstrated through a case study with a 5-node test power system and a real equivalent system of 39 nodes. The results of the case studies show that the proposed algorithm is reliable and has accuracy for calculating or simulating three-phase faults in transmission lines of power systems.

**KEYWORDS:** Algorithm, Three-phase fault Transmission line, Fault current.

## INTRODUCCIÓN

La continuidad del suministro de energía a las cargas conectadas al sistema de potencia depende de la capacidad operativa de las protecciones eléctricas, ya que estas deben operar de manera correcta durante la ocurrencia de una falla con la finalidad de proteger al sistema de potencia. Para ello, dichas protecciones deben ser capaces de soportar el nivel de cortocircuito que se presenta en el punto de falla y abrir el circuito fallado. Las fallas trifásicas balanceadas son las menos comunes, pero más severas en los sistemas de potencia [1].

Es ampliamente reconocido que en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) se presentan fallas simétricas y asimétricas originadas por diversas razones. En la literatura se han reportado diversos estudios y algoritmos donde se calculan las corrientes de falla en subestaciones [2-4] o cuando se presentan oscilaciones de potencia

[5-7]. En lo que respecta al análisis de fallas en líneas de transmisión la mayoría de los trabajos se han enfocado a la detección, clasificación y localización de fallas utilizando diversas metodologías y algoritmos [8-12], mientras que en otros trabajos se han analizado las líneas de transmisión compensadas e incluyendo la integración de dispositivos FACTS [13, 14]. Sin embargo, se debe precisar que muy pocos algoritmos se han enfocado al análisis de fallas en las líneas, de los cuales se pueden mencionar al Algoritmo de Reactancia, Algoritmo de Phadke [15], Algoritmo de Novosel [16] y el Algoritmo de Reactancia y Tagaki [17]. No es menos importante recalcar que la mayoría de los softwares comerciales y especializados en el análisis de corto circuito no tienen implementada la herramienta para el cálculo de fallas en las líneas de transmisión. Por esta razón, resulta importante desarrollar e implementar un algoritmo computacional que permita calcular y localizar las fallas simétricas en las líneas de transmisión a lo largo de su distancia, esto con la finalidad de obtener información que permita dimensionar los interruptores, coordinar las protecciones y determinar el punto, por ende, las causas, donde se presentó la falla en la línea de transmisión [1].

**Cálculo de fallas trifásicas balanceadas**

Una falla trifásica se produce cuando se presenta un cortocircuito en las 3 fases de un equipo del sistema eléctrico. Debido a que el sistema se mantiene balanceado durante esta falla es posible llevar a cabo su análisis por fase. El algoritmo propuesto en este trabajo utiliza el análisis de fallas sistemáticas basado en la Zbarra, el cual se expresa matricialmente mediante la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} V_{F1} \\ \vdots \\ V_{Fk} \\ \vdots \\ V_{Fn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_k \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_{Fk} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Ec. (1)}$$

Donde la corriente de falla o el nivel de cortocircuito en el bus k del sistema de potencia es,

$$I_{Fk} = \frac{V_k}{Z_k + Z_{kk}} \text{ Ec. (2)}$$

Una vez que se conocen los voltajes de falla en los nodos del sistema es posible conocer las corrientes de falla que se presentan en las líneas de transmisión como sigue,

$$I_{Fij} = \frac{V_{Fi} - V_{Fj}}{Z_{ij}} \text{ Ec. (3)}$$

**Algoritmo propuesto para el cálculo de falla trifásicas en líneas de transmisión**

El algoritmo propuesto en este trabajo se basa en la adición de un nuevo nodo en el sistema de potencia, el cual se ubica entre el nodo de envío y recepción, y a cierta distancia, medida en porcentaje, del nodo de en-

vío de la línea donde se desea calcular la falla trifásica, tal como se muestra en la Fig.1. Así, el nodo de envío es el nodo de referencia para medir la ubicación de la falla en la línea de transmisión, lo cual se realiza manejando una equivalencia en porcentaje entre la distancia y la impedancia serie de la línea, es decir, si la ubicación de la falla es al 50 % de la distancia de la línea, entonces la impedancia serie vista desde el nodo de envío será el 50 % de la impedancia serie total. Es claro que, si la distancia es 0 % o 100 % la falla se ubica en el nodo de envío y recepción, respectivamente. Es importante mencionar que el algoritmo propuesto permite ubicar fallas en cualquier punto a lo largo de las líneas de transmisión de un sistema de potencia.

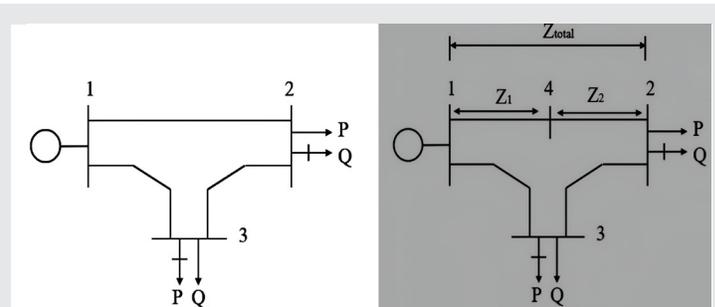


Figura 1: Sistema de 3 nodos con y sin el nodo adicional de falla.

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, cuando no se conoce la distancia total de la línea de transmisión se divide la impedancia serie entre el porcentaje de la distancia en la cual se desea calcular la falla y en ese porcentaje de distancia se ubica el nuevo nodo donde se va a calcular la falla. Así, la línea de transmisión siempre se divide en dos partes, como se ilustra en la Figura 1, considerando el punto de ubicación de la falla como un nuevo nodo en el sistema de potencia, por lo que, el sistema tendrá un nodo y una línea adicional. Una vez que se define la ubicación del nuevo nodo se procede a llevar a cabo el análisis de fallas sistemáticas utilizando la barra.

**Caso de estudio**

Con el fin de ilustrar la confiabilidad del algoritmo propuesto para el cálculo de fallas trifásicas en líneas de transmisión se llevan a cabo dos casos de estudio con los sistemas de potencia de prueba del IEEE de 5 nodos [18] y de Nueva Inglaterra de 39 nodos [19], en los que simulan fallas en diferentes porcentajes a lo largo de una línea en particular.

Caso de estudio con el sistema de potencia de 5 nodos En este caso de estudio se adiciona un nuevo nodo para determinar fallas trifásicas en la línea de transmisión 5-4 en intervalos del 20% de su longitud total, cubriendo desde el 0% hasta el 100%. Se debe notar que una falla al 0% de la longitud de la línea corresponde a una falla en el nodo de envío de esta, mientras que una falla al 100 % de la longitud se ubica en el nodo de recepción. En todos los porcentajes de la longitud de la

línea se considera una impedancia de falla igual a 0.16j pu. Los resultados del análisis de fallas trifásicas en la línea 5-4 se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. IF en la línea de transmisión 5-4 a diferentes porcentajes de distancia.

| Longitud de la línea (%) | Magnitud $I_F$ (pu) |
|--------------------------|---------------------|
| 0                        | 2.7603              |
| 20                       | 2.7499              |
| 40                       | 2.7416              |
| 60                       | 2.7354              |
| 80                       | 2.7313              |
| 100                      | 2.7293              |

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior el ángulo de fase de la corriente de falla es de 90°, lo cual concuerda con la Ec. (2) porque se desprecia la resistencia de los elementos de transmisión del sistema de potencia, es decir, al despreciar la resistencia no existe una parte real y solo se dispone de la reactancia o la parte imaginaria de la impedancia en la topología del sistema, lo que resulta en una impedancia con un ángulo de 90°. Los resultados presentados en la Tabla 1 se muestran gráficamente en la Figura 2 con la finalidad de apreciar de mejor manera el comportamiento de las fallas a una distancia dada de la línea de transmisión. En esta figura se observa que con el aumento del porcentaje de la longitud de la línea disminuye el nivel de corriente de falla, lo cual se debe a que la impedancia serie de la línea varía proporcionalmente con la longitud, esto es, a mayor porcentaje de distancia vista desde el nodo de recepción se tiene una impedancia más grande. Se debe mencionar que el nivel de cortocircuito en el nodo 5 es de 2.7603 pu, que, como se mencionó, corresponde al 0 % de la longitud de la línea.

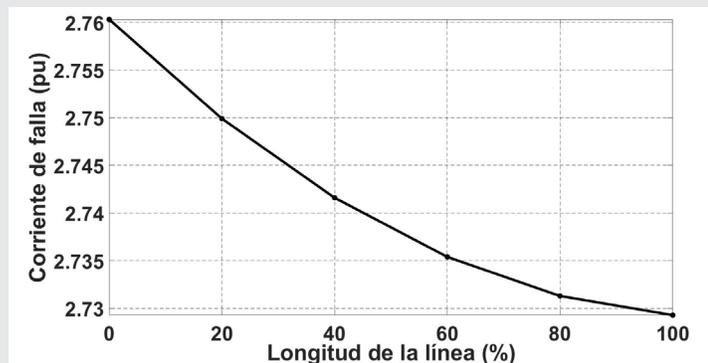


Figura 2 Comportamiento de la corriente de falla en la línea de transmisión 5-4.

Fuente: Elaboración propia.

La confiabilidad de los resultados obtenidos en este caso de estudio puede ser ilustrada mediante un balance de corrientes de falla en las líneas de transmisión que se conectan en el nodo adicional 6, para ello se

utilizan los datos mostrados en la Tabla 2. Es importante mencionar que los datos de la tabla en mención se obtienen con el nodo adicional a 60 % de la distancia vista desde el nodo de envío.

Tabla 2. Valores de corrientes de falla respecto al nuevo nodo en el sistema de 5 nodos.

| Corrientes de falla en las líneas de transmisión |                   |               |
|--|-------------------|---------------|
| Nodo de envío                                    | Nodo de recepción | Magnitud (pu) |
| 5  | 6                 | 1.5238        |
| 6  | 4                 | 1.2116        |

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el balance de corriente de falla en el nodo 6, se obtiene una corriente total de 2.7354 pu, lo cual coincide exactamente, de acuerdo a la Tabla 1, con el valor de la corriente total de falla al 60% de la longitud de la línea de transmisión conectada entre los nodos 5 y 4 es igual a 2.7354 pu. De igual manera, se verifica el correcto balance de corriente en cada nodo del sistema de potencia utilizado en este caso de estudio. Así, es posible corroborar que los resultados del algoritmo propuesto son confiables para llevar a cabo el cálculo de fallas trifásicas a cualquier distancia de una línea de transmisión. Esta misma técnica se aplicó en un sistema de potencia real, cuyos resultados se muestran enseguida.

### Caso de estudio con el sistema de potencia de 39 nodos

En este caso de estudio se verifica la confiabilidad del algoritmo propuesto para calcular fallas trifásicas en sistemas de mayor tamaño. La línea de transmisión que se selecciona se encuentra conectada entre los nodos 20-34 y se adiciona el nodo 40 entre dichos nodos para llevar el análisis de fallas trifásicas en la línea. Los resultados de la corriente de falla a distintos porcentajes de la longitud de la línea se muestran en la Tabla 3. El ángulo de la corriente de falla es en todos los casos de 90°.

Tabla 3. Corriente de falla en la línea de transmisión 20-34 a diferentes porcentajes de distancia.

| Longitud de la línea (%) | Magnitud $I_F$ (pu) |
|--------------------------|---------------------|
| 0                        | 4.5636              |
| 20                       | 4.5110              |
| 40                       | 4.4606              |
| 60                       | 4.4124              |
| 80                       | 4.3663              |
| 100                      | 4.3221              |

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el comportamiento de la corriente de falla trifásica a lo largo de la línea de transmisión en análisis se muestra en la Figura 3. Igual que en caso de estudio con el sistema de potencia de 5 nodos, en este caso la corriente de falla disminuye al aumentar la distancia, manteniendo un comportamiento muy similar.

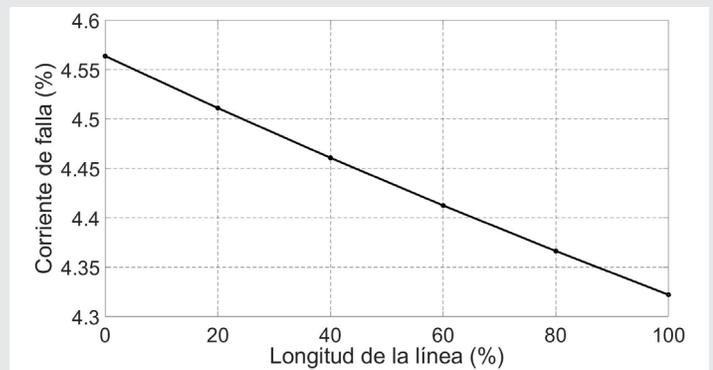


Figura 3 Comportamiento de la corriente de falla en la línea de transmisión 20-34.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al comportamiento de la falla en términos de la distancia de la línea de transmisión, ilustrado en las Figuras 2 y 3, se debe mencionar que dicho comportamiento es único y diferente, ya que depende de la topología del sistema eléctrico de potencia, así como de los valores de las reactancias de las líneas de transmisión donde se localiza la falla trifásica. La razón de lo mencionado, se debe a que los resultados de los casos de estudio que se realizaron con los sistemas de potencia mostraron un comportamiento único y específico para cada línea y para cada sistema de potencia, lo cual lo vuelve muy difícil de predecir a causa de la no linealidad de los sistemas de potencia.

Tabla 4. Valores de corrientes de falla respecto al nuevo nodo en el sistema de 39 nodos.

| Corrientes de falla en las líneas de transmisión |                   |               |
|--|-------------------|---------------|
| Nodo de envío                                    | Nodo de recepción | Magnitud (pu) |
| 20   | 40                | 3.6904        |
| 40   | 34                | 0.7220        |

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera que en el caso del sistema de 5 nodos, la confiabilidad de los resultados de este caso de estudio se demostró mediante un balance de la corriente de falla en el nodo adicional 40, dando una corriente total en este nodo de 4.4124 pu, ver Tabla 4. Esto concuerda con la corriente de falla al 60% presentada en la Tabla 2. Claramente, para realizar el balance de potencia el nodo adicional este se colocó al 60% de la línea de transmisión.

### CONCLUSIONES

Un algoritmo para el cálculo de fallas trifásicas en líneas de transmisión se ha presentado. El algoritmo se basa en la adición de un nodo ficticio para ubicar la falla a una distancia deseada de la línea. La confiabilidad del algoritmo se demostró utilizando sistemas de potencia de prueba y reales mediante un balance de corrientes en el punto donde se localiza la falla. Los resultados de los casos de estudio muestran que el algoritmo puede ser utilizado de manera confiable para calcular y posteriormente para localizar fallas trifásicas en las líneas de transmisión de cualquier sistema de potencia, así mismo el algoritmo tiene potencial para ser modificado y adecuado para llevar a cabo estudios para coordinar la protección de distancia o para conocer el nivel de cortocircuito de las subestaciones del sistema de potencia. Por último, es importante señalar que el algoritmo propuesto puede ser adaptado de manera sencilla para calcular otro tipo de fallas en líneas de transmisión, tales como fallas monofásicas, fallas línea-línea o fallas línea-línea a tierra. Para ello, se puede modificar el modelo matemático basado en la matriz de impedancia Zbarra, integrando el teorema de componentes simétricas o alguna otra metodología que permitan analizar fallas bajo condiciones desbalanceadas del sistema de potencia.

### BIBLIOGRAFÍA

[1] aadat, H. (2010). *Power System Analysis (3rd ed.)*. Long Grove, IL: Waveland Press.

[2] Prasad, A., Edward, J. B., & Ravi, K. (2018). A review on fault classification methodologies in power transmission systems: Part I. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 5(1), 48-60.

[3] Yalçin, F., & Yildirim, Y. (2019). A study of symmetrical and unsymmetrical short circuit fault analyses in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 23(5), 879-895.

[4] Mehtre, V. V., Keshari, R., & Hyder, Z. (2021). Symmetrical and unsymmetrical faults analysis. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 9(7), 166-169.

[5] Moravej, Z., Dehghani Ashkezari, J., & Pazoki, M. (2015). An effective combined method for symmetrical faults identification during power swing. *Electrical Engineering*, 64, 24-34.

[6] Swetapadma, A., & Yadav, A. (2015). Data-miningbased fault during power swing identification in power transmission system. *IET Science, Measurement & Technology*, 10(2), 130-139.

[7] Patel, B., & Bera, P. (2019). Fast fault detection during power swing on a hybrid transmission line

using WPT. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(3), 1811-1820.

[8] Yadav, A., & Swetapadma, A. (2015). A novel transmission line relaying scheme for fault detection and classification using wavelet transform and linear discriminant analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 6, 199-209.

[9] Adly, A. R., El Sehiemy, R. A., Elsadd, M. A., & Abdelaziz, A. Y. (2019). A novel wavelet packet transform based fault identification procedure in HV transmission line based on current signals. *Journal of Electrical Engineering and Automation*, 8(1), 11-21.

[10] Jiang, J.-A., Chen, C.-S., & Liu, C.-W. (2003). A new protection scheme for fault detection, direction discrimination, classification, and location in transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(1), 34-42.

[11] Chen, K., Huang, C., & He, J. (2016). Fault detection, classification, and location for transmission lines and distribution systems: A review on the methods. *High Voltage*, 1(1), 25-33.

[12] Abdullah, A. (2017). Ultrafast transmission line fault detection using a DWT-based ANN. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(2), 1182-1193.

[13] Mishra, S. K., & Tripathy, L. N. (2019). A critical fault detection analysis & fault time in a UPFC transmission line. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 4(1), 1-10.

[14] Ray, P., Panigrahi, B. K., & Senroy, N. (2012). Hybrid methodology for fault distance estimation in series compensated transmission line. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7(5), 431-439.

[15] Phadke, A. G., & Xavier, M. A. (1993). Limits to fault location accuracy. Presented at the Seventh Annual Conference for Fault and Disturbance Analysis, Texas A&M University, College Station, Texas.

[16] Novosel, W. E. D., & Phadke, A. G. (1993). Improvements in Fault Location Estimate. Presented at the Seventh Annual Conference for Fault and Disturbance Analysis, Texas A&M University, College Station, Texas.

[17] Takagi, T., & Yamaura, M. (1982). Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 75(8), 2892-2898.

[18] Stagg, G. W., & El-Abiad, A. H. (1968). *Computer Methods in Power System Analysis*. New York, USA: McGraw-Hill.

[19] Pai, M. A. (1989). *Energy function analysis for power system stability*. Kluwer Academic Publishers.





Multidisciplinario  
e  
ingenierías

---

Ingeniantes

# Diseño y construcción del sistema mecánico para un agitador de movimiento orbital

**RESUMEN:** El sistema mecánico en un agitador orbital es la parte fundamental para un correcto y eficiente funcionamiento. Este proyecto se centró en el diseño y desarrollo del sistema mecánico para el prototipo de un agitador de movimiento orbital, abordando el proceso en diversas etapas de diseño y construcción. Se emplearon conjuntos, componentes mecánicos y eléctricos, algunos de los cuales fueron fabricados a medida, mientras que otros se adquirieron a través de plataformas digitales. Los materiales principales fueron ruedas de sincronización, baleros, motor eléctrico y ejes excéntricos, estos últimos elaborados en un torno para hacerlos a la medida del sistema. Como resultado se desarrolló y validó el funcionamiento de un agitador de movimiento orbital capaz de soportar una carga máxima de 1.8 kg en su máxima capacidad, además, con una velocidad ajustable de 0 a 250 r.p.m., lo que permite al usuario personalizar el funcionamiento según sus necesidades experimentales. Este sistema es recomendado para experimentos que requieran largos periodos de operación. Las principales ventajas del sistema mecánico radican en su diseño y construcción, facilitando tanto el ensamblaje como el desmontaje, además de permitir un mantenimiento sencillo, contribuyendo a la reducción de tiempos y costos operativos, haciendo que el agitador sea una opción eficiente y accesible para laboratorios y entornos de investigación.

**PALABRAS CLAVE:** Control, Mecánico, Orbital, Sistema, Velocidad.



## Colaboración

José Jonathan Barreto Gutiérrez; Merit Cisneros González, Jaime Herrera Gamboa; Darío Cisneros Arreola, Manuel Ismael Mata Escobedo, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Valle del Guadiana

Fecha de recepción: 22 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 04 de marzo de 2025

**Abstract:** The mechanical system in an orbital shaker is fundamental part for a correct and efficient operation. This project focused on the design and development of the mechanical system for the prototype of an orbital motion shaker, addressing the process in various stages of design and construction. Mechanical and electrical assemblies and components were used, some of which were custom-made, while others were acquired through digital platforms. The main materials were synchronization wheels, bearings, electrical motor, and eccentric shafts, the last ones were crafted on a lathe machine to fit into the system precisely. As a result, the operation of an orbital motion shaker capable of supporting a maximum load of 1.8 kg at its highest capacity, with an adjustable speed ranging from 0 to 250 r.p.m., allowing the user to customize its operation according to their experimental requirements. This system is highly recommended for experiments that need long periods of operation. The main advantages of the mechanical system lie in its design and construction, which facilitate both assembly and disassembly, as well as allowing for easy maintenance, contributing to reduced operational times and costs, making the shaker an efficient and accessible option for laboratories and research environments.

**KEYWORDS:** Control, Mechanical, Orbital, System, Speed.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de la gran variedad de equipos de laboratorio que se encuentran en el mercado, están los agitadores de movimiento orbital, los cuales tienen una alta demanda por sus aplicaciones en los laboratorios [1].

En México, la mayoría son importados, elevando significativamente su costo. En este contexto, se pueden buscar alternativas para el desarrollo con mayor eficiencia y costos más accesibles [2].

El sistema mecánico de los agitadores orbitales representa el componente de mayor costo, en términos de fabricación y mantenimiento. Además, la disponibilidad de refacciones y especialización técnica requerida para su reparación pueden ser limitadas y de origen extranjero. Esto no solo incrementa los costos de operación, dificulta su mantenimiento oportuno, afectando la continuidad de los procesos experimentales. Aunque su durabilidad es generalmente alta, la obtención de repuestos y complejidad de mantenimiento representa desafíos especialmente para laboratorios e instituciones con presupuestos limitados.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo el diseño y desarrollo de un sistema mecánico para un agitador que ofrezca una alternativa accesible y eficiente frente a los equipos convencionales que se encuentran en el mercado. Utilizando materiales económicos y de fácil adquisición sin comprometer la resistencia y eficiencia del sistema. Para ello, el proceso se llevo a cabo en diferentes etapas de desarrollo, abarcando desde el diseño hasta la construcción del sistema mecánico.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Se llevo a cabo el diseño y la construcción del sistema mecánico para un agitador de movimiento orbital, donde se destaca la importancia de los componentes clave: el motor eléctrico, los ejes excéntricos y los rodamientos. Estos elementos son cruciales para generar el movimiento orbital preciso y estable, asegurando un desempeño eficiente del equipo. Además, implementando un sistema eléctrico para control de velocidad del movimiento. El proceso de desarrollo incluye las siguientes etapas: Diseño del sistema mecánico, selección de los materiales, desarrollo del sistema, pruebas de funcionamiento.

### Diseño del sistema mecánico

La agitación orbital depende de un sistema mecánico que genera un movimiento circular, gracias a la acción de los componentes excéntricos. Esto permite que, en cualquier punto de la bandeja, se trace una trayectoria perfectamente circular [3].

Para el diseño del sistema, se utilizó el software FreeCADMR, el cual fue fundamental para el desarrollo del proyecto, ya que permite la creación de modelos en 3D que brindan una visión integral del diseño. Mediante las representaciones tridimensionales, se visualiza de manera precisa la disposición de cada pieza, verifica las dimensiones y realizar

ajustes. Este enfoque facilita la optimización de cada componente, asegurando el ensamblaje que se va a realizar.

En la Figura 1 se presenta el diseño en 3D utilizado como base para la construcción del sistema mecánico del agitador orbital. Este diseño muestra la distribución del sistema mecánico del agitador, con la distribución de las piezas clave del sistema que son: los ejes excéntricos, el motor eléctrico, las ruedas de sincronización y los rodamientos (baleros).

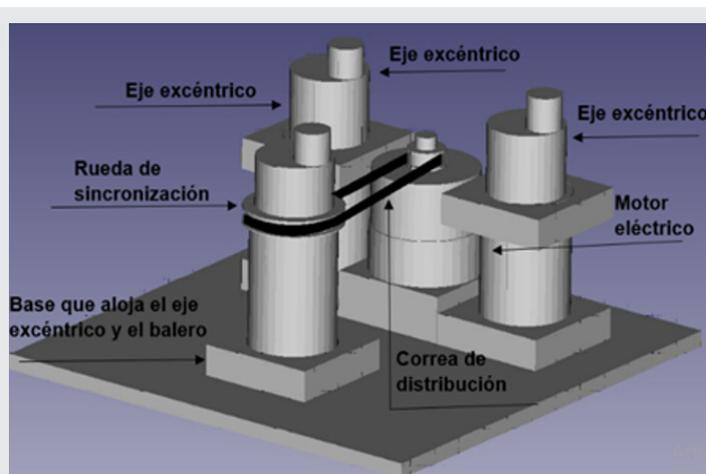


Figura 1. Diseño del sistema mecánico.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema se compone de tres ejes excéntricos, siendo uno de ellos posicionado directamente enfrente del motor. Dicho eje y el motor tienen cada uno una rueda de sincronización dentada que se conectan por medio de una rueda de distribución, asegurando la transmisión del sistema, la elección de utilizar la rueda de sincronización en el diseño garantiza el acoplamiento firme y evita deslizamientos durante el movimiento.

Los dos ejes excéntricos ubicados al costado del motor son fundamentales para garantizar la estabilidad en la bandeja y asegurar el movimiento orbital. Además, que dichos ejes ayudan a equilibrar las fuerzas, mejorando la estabilidad del agitador.

Para reducir la fricción y asegurar un giro suave en los ejes excéntricos, se instalaron baleros en sus ejes y la parte central e inferior de cada pieza, como se muestra en el diseño utilizado.

En la Figura 2 se presenta el diseño con una vista área del sistema mecánico y la distribución de cada pieza, dentro de lo que es la carcasa del agitador. El sentido de giro del movimiento orbital será respecto a las manecillas del reloj. La secuencia de operación comienza cuando el motor gira e impulsa al eje excéntrico que está unido a él. A medida que la bandeja se coloque sobre cada eje excéntrico, estos también comienzan a girar, logrando el movimiento orbital deseado.

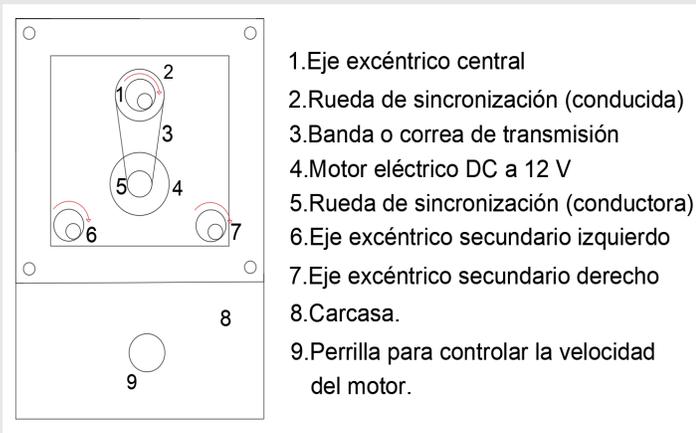


Figura 2. Diseño del eje excéntrico.

Fuente: Elaboración propia.

### Selección del material

El sistema está compuesto por elementos mecánicos que permiten a la bandeja realizar un movimiento orbital [4]. La selección de los materiales se llevó a cabo basándose lo más posible al diseño realizado (Figura 1), así como del proceso geométrico de cada componente mecánico y electrónico, además de los requisitos de manufactura.

En algunos casos, ciertos elementos no fueron diseñados específicamente, sino que fueron adquiridos directamente del mercado digital. Este fue el caso de componentes como el motor eléctrico, ruedas de sincronización, correa de distribución y los rodamientos.

El motor eléctrico seleccionado para la transmisión es un motor de corriente continua, diseñado para operar con un voltaje de 12 V y corriente nominal de 0.5 A. Con un par de arranque de 1.9 kg y una velocidad variable de 0 a 550 r.p.m., ese motor fue elegido por su capacidad para generar la potencia necesaria sin ocupar demasiado espacio, lo cual es fundamental para adaptarse a la carcasa del agitador. Para asegurar una instalación estable, se desarrolló una base impresa en 3D que mantiene el motor firmemente en su lugar.

Los ejes excéntricos fueron fabricados mediante un proceso de torneado, utilizando acero inoxidable como material principal. Esta elección se debe a las propiedades superiores de resistencia y durabilidad del acero inoxidable, lo que garantiza un alto rendimiento incluso bajo carga, además asegurar una mayor estabilidad durante el movimiento rotacional. La excentricidad de los ejes es fundamental para generar el movimiento orbital requerido, por lo que se fabricaron tres piezas idénticas. Con el fin de asegurar la precisión y uniformidad en su funcionamiento

La Figura 3 muestra el diseño excéntrico con sus dimensiones. El eje tiene una longitud total de 14 cm y un radio de giro de 1 cm. El diseño específico asegura que el movimiento no sea simplemente rotacional, si no que describa una trayectoria elíptica.

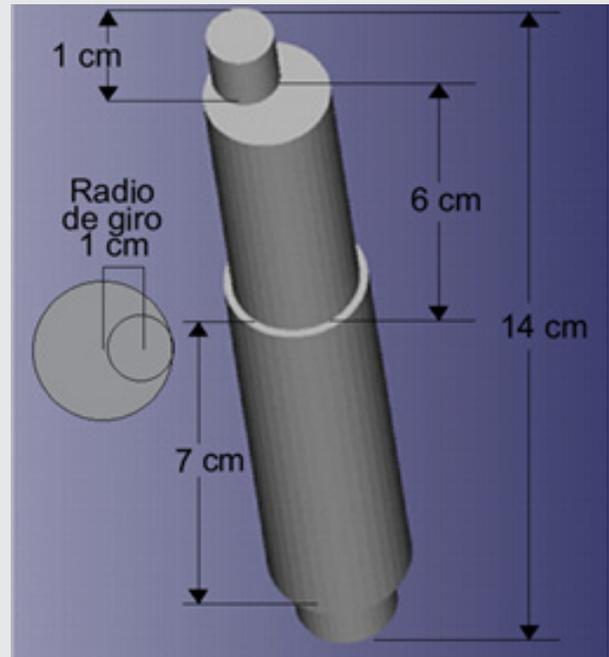


Figura 3. Diseño del eje excéntrico.

Fuente: Elaboración propia.

Se optó por utilizar dos ruedas de sincronización encontradas en el mercado digital, fabricadas en aleación aluminio Figura 4, para garantizar una alta resistencia y durabilidad. La primera rueda tiene un diámetro de 4.4 cm, con un centro de 0.8 cm y 60 dientes, mientras que la segunda mide 1.6 cm de diámetro, con un centro de 0.8 cm y 20 dientes. La cantidad de dientes en ambas ruedas son esenciales para tener un acoplamiento preciso y eficiente, permitiendo una transmisión de movimiento fluido y sin deslizamientos.

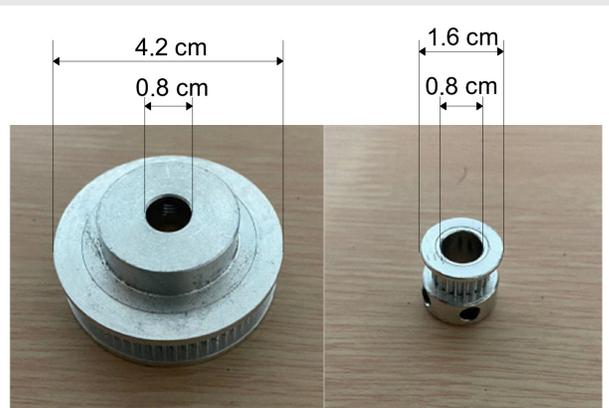


Figura 4. Dibujo carcasa (vista lateral).

Fuente: Elaboración propia.

Estas ruedas van acompañadas de una correa de distribución hecha de caucho, con una longitud de 20 cm y equipada con dientes que se ajustan perfectamente a las ruedas de sincronización, lo que garantiza un funcionamiento constante y sin pérdidas de sincronización, asegurando la precisión durante el movimiento.

Se emplearon un total de 9 baleros de dos medidas diferentes Figura 5. Estos son cruciales para reducir la fricción entre piezas móviles (con el eje excéntrico), además contribuye a la estabilidad y precisión del movimiento orbital. seis baleros son de medida 608 2RS, tienen un diámetro exterior de 4.7 cm y un diámetro interior de 2 cm, mientras que el resto son de medida 620 2RS y cuentan con un diámetro exterior de 2.2 cm e interior de 0.8 cm.

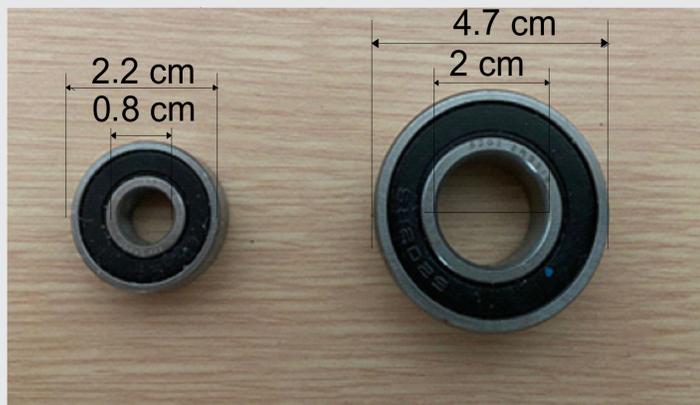


Figura 5. Dibujo carcasa (vista superior).  
Fuente: Elaboración propia.

Para alojar todo el sistema mecánico se optó por utilizar una carcasa reciclada de aluminio, material elegido por su ligereza, resistencia y capacidad de disipar el calor. Además, es esencial para asegurar la protección y alineación de los componentes, lo que contribuye a la durabilidad del equipo. Las dimensiones de la carcasa se detallan las Figuras 6 y 7.

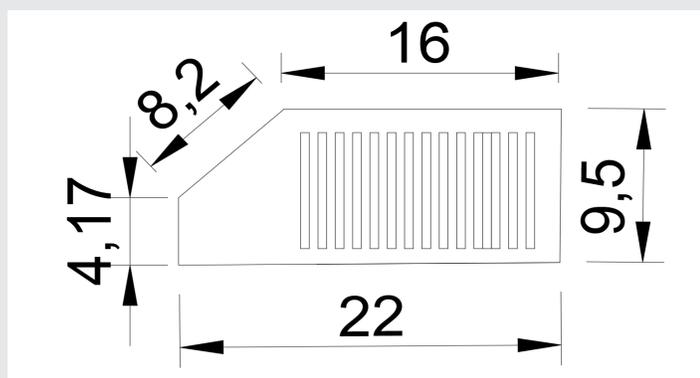


Figura 6. Carcasa.  
Fuente: Elaboración propia.

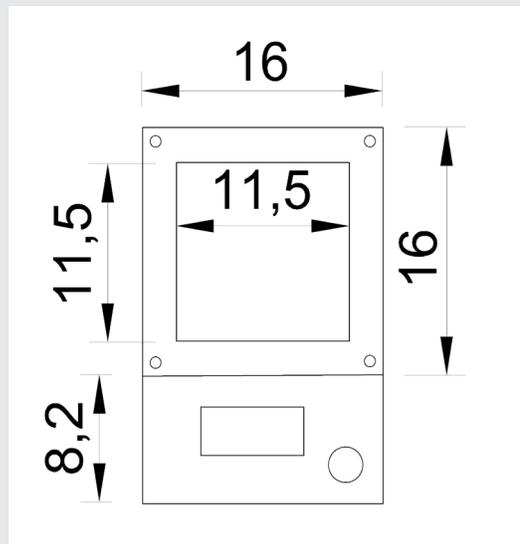


Figura 7. Sistema mecánico.  
Fuente: Elaboración propia.

**Desarrollo del sistema**  
**a) Desarrollo sistema mecánico**

El proceso de construcción del equipo incluyó varias etapas clave, comenzando con la restauración de la carcasa. Este paso fue fundamental para asegurar la funcionalidad como la estética del agitador. La carcasa se pulió para obtener una superficie más lisa, lo que no solo mejora su apariencia visual, sino que también facilita la aparición de la pintura y previene la acumulación de suciedad o contaminantes. Posteriormente, se pintó de color azul Figura 8, para mejorar la estética y proporcionando una capa adicional de protección, asegurando una mayor durabilidad y resistencia.

La carcasa está compuesta de dos piezas principales como se muestra en la Figura 8, la parte inferior que funciona como base y donde se aloja el sistema mecánico, asegurando la sujeción y alineación de cada componente para su funcionamiento estable y la parte superior, que se ensambla con la parte inferior. Esta última no solo cumple una función estructural, sino que también tiene un enfoque estético, ya que es la parte visible del agitador, por ello se busca una apariencia atractiva que contemplara la funcionalidad del equipo.



Figura 8. Carcasa.  
Fuente: elaboración propia.

En la sección de la carcasa donde va alojado el sistema mecánico, se instaló una barra metálica de 1 cm de ancho por 16 cm de largo en posición horizontal. Su función es proporcionar soporte a las bases metálicas que sostienen los baleros y los ejes excéntricos.

En la Figura 9 se muestra la colocación de cada componente real, según el diseño en 3D presentado en la Figura 1.

Para garantizar un funcionamiento más estable del sistema, se instalaron los tres ejes excéntricos en una disposición triangular. De esta manera se optimizó la distribución de las fuerzas que se aplican. Cada eje excéntrico se apoya sobre un balero de 4.7 cm de diámetro, mientras que otro balero fue colocado en el centro del cuerpo para mejorar la estabilidad, reducir el ruido y la fricción.

como la polea conducida, al recibir el movimiento por la polea conductora.

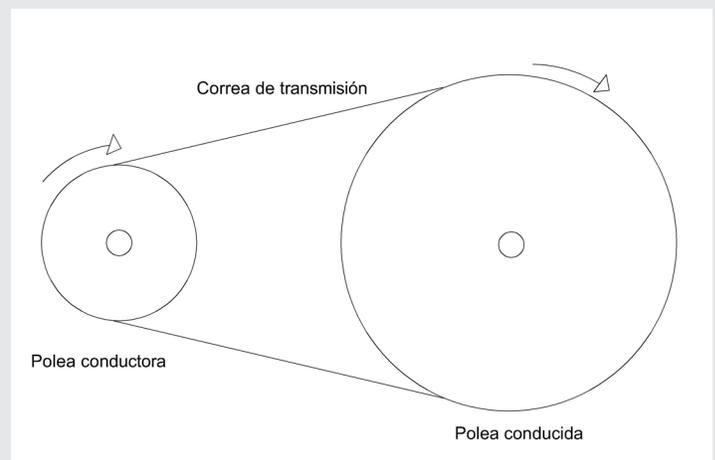


Figura 10. Sistema polea conductora-polea conducida.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se presenta el diseño y las dimensiones de la bandeja destinada al agitador orbital. Como parte fundamental del sistema, se incorporaron tres baleros, cuya función es proporcionar un soporte a cada uno de los ejes excéntricos.

Cuando los ejes excéntricos comienzan a girar, los baleros facilitan el movimiento suave y controlado de la bandeja, permitiendo que se desplace de manera orbital. Esta configuración garantiza una transmisión de movimiento eficiente, mejorando la estabilidad del sistema.

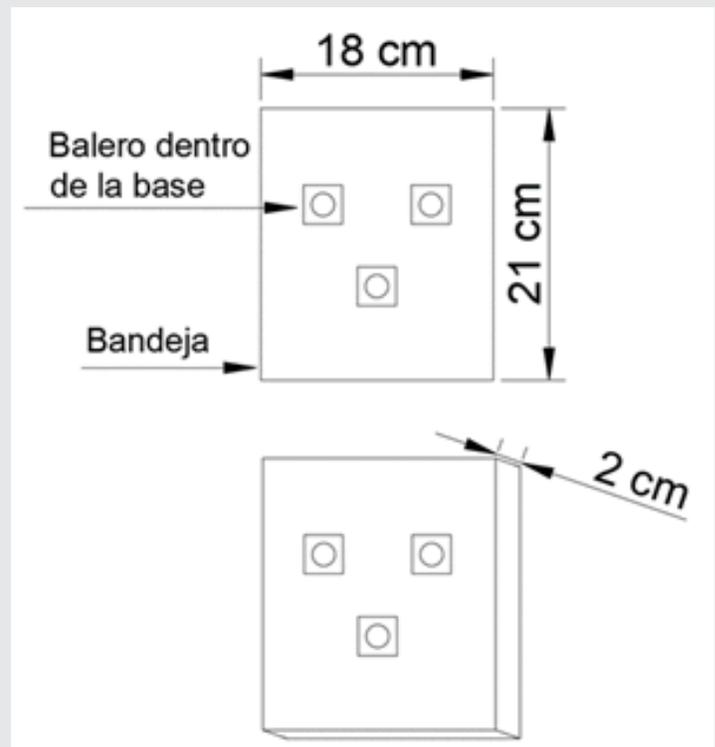


Figura 11. Diseño de la bandeja del agitador orbital.

Fuente: elaboración propia.

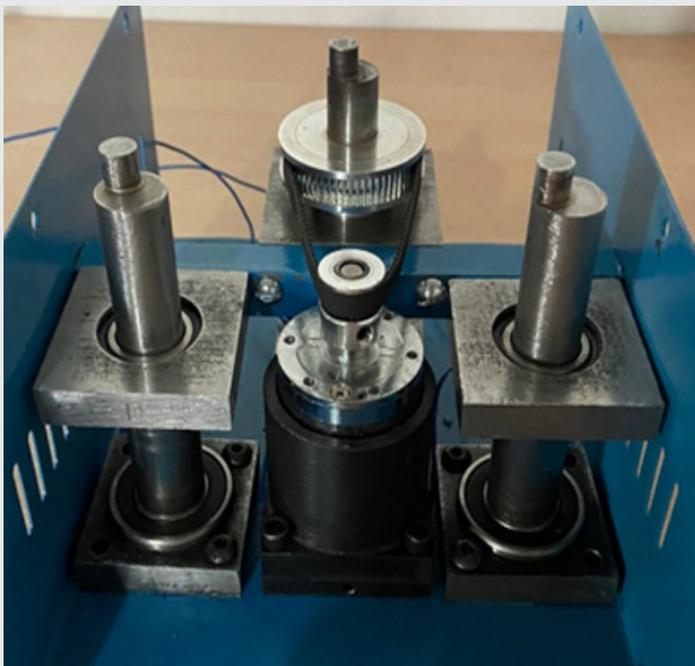


Figura 9. Base o bandeja del agitador.

Fuente: Elaboración propia.

El eje excéntrico principal fue equipado con una rueda de sincronización de 60 dientes, elemento clave para la transmisión del movimiento. Frente a esta pieza se instaló el motor eléctrico, al cual también se instaló a su eje una rueda de sincronización de 20 dientes. Ambos componentes, el eje principal y el motor eléctrico están conectados mediante una correa de sincronización dentada, lo que permite la transmisión de movimiento.

La transmisión del sistema se basa en una configuración de polea conductora y polea de conducida (Figura 10). En este caso, el motor eléctrico actúa como la polea conductora, porque es el que genera el desplazamiento de la correa y el eje excéntrico funciona

La bandeja diseñada para el agitador orbital mostrada en la Figura 12 se fabricó en aluminio debido a sus propiedades mecánicas y su baja densidad, lo que la hace ligera pero resistente, además su peso reducido contribuye a mejorar la eficiencia del sistema, reduciendo la carga sobre los ejes excéntricos y los baleros.

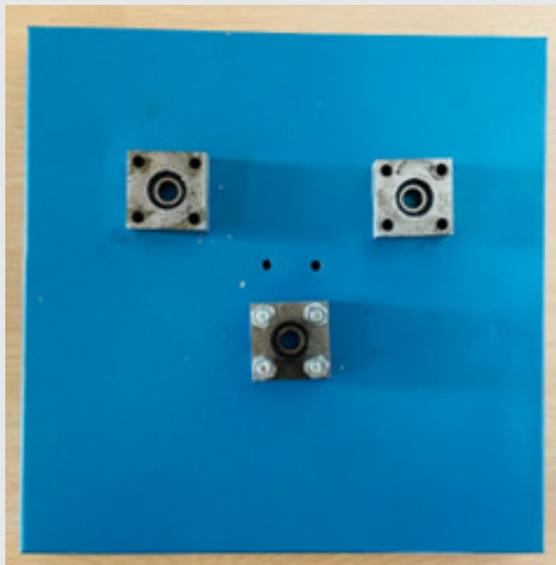


Figura 12. Bandeja del agitador.  
Fuente: elaboración propia.

Para lograr una estética uniforme y acorde con la carcasa, se pintó de color azul. Siguiendo las especificaciones de la Figura 11, se integraron los tres baleros de 2.2 cm de diámetro, asegurando un movimiento fluido y estable.

Una de las principales ventajas del sistema mecánico, es su diseño modular, que permite ensamblar y desmontar fácilmente cada componente, Todas las piezas están unidas mediante tornillos, lo que simplifica el mantenimiento, reduce el tiempo de operación y facilita la sustitución de piezas en caso de desgaste o falla.

#### b) Sistema electrónico para el control de velocidad

Para el control de velocidad del motor se utilizó el método de modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). Este método consiste en generar pulsos que varían en su ciclo conforme el valor de señal de la entrada, en este caso la señal de voltaje [5].

Se utilizó un módulo fabricado que cuenta una placa de circuito que contiene 3 transistores, unidos por sus respectivos pines y capacitores para almacenamiento de voltaje. Conectados a una terminal de alimentación para la fuente de poder y el motor eléctrico de corriente directa. El módulo trabaja de

6 a 60 V y soporta hasta 30 A y regula la velocidad desde 0 a 100%. El control es de forma manual, es decir el usuario puede regular la velocidad por medio de un potenciómetro de 100 k, que al girarlo puede variar la velocidad.

Se utilizó una fuente de poder que se conecta a 127 V y proporciona los 12 V con los que trabaja el módulo. Esto con el fin del equipo pueda conectarse en cualquier lugar que tenga 127 V.

#### Pruebas de funcionamiento

Una vez ensamblado y en funcionamiento el equipo, se realizaron diversas pruebas de desempeño del agitador orbital para evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones. Se analizaron factores como variaciones de carga, ajustes de velocidad y estabilidad a lo largo del tiempo, con pruebas realizadas en distintos días de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1. Días de trabajo del agitador orbital.

| Número de Días de Trabajo | Carga Aplicada en Kilogramos | Revoluciones por minuto |
|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 7                         | 1.3                          | 120                     |
| 7                         | 1.3                          | 240                     |
| 7                         | 1.8                          | 120                     |
| 7                         | 1.8                          | 240                     |
| 7                         | 2.2                          | 120/240                 |

Fuente: elaboración propia.

El agitador funcionó de manera estable y sin vibraciones ni perturbaciones durante los 28 días de operación con una carga que variaba entre 1.3 y 1.8 kg. Sin embargo, al incrementar la carga a 2.2 kg y mantener una velocidad de 240 r.p.m. se comenzaron a observar vibraciones en la bandeja. A pesar de reducir la carga a 2 kg, las vibraciones persistieron a menor medida.

Finalmente, al disminuir la carga a 1.8 kg, el movimiento orbital volvió a estabilizarse, eliminándose las vibraciones. Estos resultados evidencian que la capacidad de carga y velocidad son factores clave para garantizar la estabilidad operativa del agitador, lo que a su vez asegura la eficiencia y seguridad del proceso.

#### a) Funcionamiento del equipo

El agitador orbital está diseñado para operar con cualquier fuente de alimentación de 127 V, lo que facilita su uso en diferentes entornos. Una vez energizado, el usuario puede controlar la velocidad de

rotación mediante un potenciómetro, el cual permite un ajuste y aumenta progresivamente su velocidad hasta alcanzar el nivel deseado, garantizando un control óptimo del proceso de agitación.

Este equipo tiene la capacidad de alojar hasta nueve matraces Erlenmeyer de 125 ml, siempre que el peso total no supere los 1.8 kg, límite establecido para asegurar un funcionamiento estable y evitar sobrecargas en el sistema mecánico. Gracias a su diseño robusto y su control de velocidad ajustable, el agitador orbital es una herramienta esencial en los laboratorios que requiere una agitación uniforme.

## RESULTADOS

Se diseñó y construyó un prototipo de agitador orbital (Figura 13), donde lo fundamental fue la construcción del sistema mecánico que se aparta de los diseños convencionales al emplear un número menor de piezas y de fácil acceso. Una de sus mayores ventajas de este diseño mecánico es el empleo de tornillería para el ensamble y desmontaje, lo que permite un mantenimiento básico ágil y accesible. Este sistema de fijación asegura que el equipo pueda ser desarmado y reparado fácilmente, sin necesidad de herramientas especializadas, lo que reduce los tiempos de inactividad. Además, la facilidad de realizar mantenimiento preventivo y correctivo contribuye a una mayor durabilidad y confiabilidad del agitador orbital.

El equipo funciona como una interfaz hombre-máquina, permitiendo al usuario controlar la velocidad dentro de un rango de 0 a 250 r.p.m. Este ajuste preciso de velocidad ofrece un control óptimo del proceso de agitación.



Figura 13. Agitador orbital.  
Fuente: Elaboración propia.

La capacidad máxima recomendada de carga en el agitador es de 1.8 kg si se llega a utilizar en su máxima velocidad. Además, el diseño permite adaptar

bandejas de diferentes tamaños o formas, ya que se les puede instalar las bases con los baleros que se colocan en el eje excéntrico, lo que brinda facilidad para personalizar el equipo según las necesidades específicas que llegaran a surgir.

De acuerdo con las pruebas realizadas, el equipo se puede dejar trabajando por minutos, hora, días o semanas, mientras no sobre pase los límites de carga especificados. Esto se debe al diseño que emplea los tres ejes excéntricos, los cuales distribuyen la carga de manera equilibrada, reduciendo el estrés de cada elemento. Además, el motor eléctrico no presenta sobrecalentamientos, lo que garantiza durabilidad en altos periodos de operación del equipo.

En relación con el precio, se construyó un prototipo de bajo costo. Dentro del mercado comercial, un agitador orbital cuesta promedio de 8000 MXN, el costo del prototipo construido es alrededor de 3500 MXN, el ahorro proviene de la selección de materiales metálicos y utilizar un sistema electrónico que cuenta con piezas económicas. Además, que es más accesible la tornillería que la soldadura industrial.

El utilizar la carcasa reciclada contribuyó al ahorro y tiempo de construcción, pero es fundamental considerar que en algunos casos será necesario diseñar y fabricar la carcasa desde cero, lo que podría incrementar el precio estimado. Este aumento dependerá del tipo de material seleccionado, así como el proceso de fabricación que se vaya a utilizar, ya que esto tiene un impacto en el costo y tiempo requerido para su construcción.

## CONCLUSIONES

El diseño y construcción se llevó a cabo a través de diferentes etapas técnicas, en las cuales se buscó tener el menor número de procesos de manufactura, y menor cantidad de materiales. Por sus propiedades de diseño, construcción y de funcionamiento únicas, no se encuentra un agitador orbital igual en el mercado comercial, lo cual es importante por tener un diferenciador de los comerciales, por ejemplo, se diseñó utilizando piezas de fácil acceso y económicas, lo que reduce su costo de fabricación y mantenimiento, así como la facilidad de ensamblaje, lo que permite un desmontaje rápido y sencillo. En cuanto al funcionamiento del equipo, se adapta para realizar experimentos donde el periodo de actividad sea de varios días. Al combinar el bajo costo, facilidad de mantenimiento y funcionamiento ininterrumpido, este agitador ofrece una solución accesible y adaptable. Lo que lo convierte en una alternativa atractiva en los laboratorios.

Los materiales que se utilizaron son de alta resistencia mecánica, minimizando el riesgo de fracturas o deformaciones en caso de golpes o caídas, esto ga-

rantiza una mayor durabilidad y estabilidad del equipo en el entorno en que se encuentre. Además, se minimizaron los componentes eléctricos y mecánicos que se distribuyeron a manera de protegerlos contra derrame de líquidos.

Por medio de la investigación realizada con el desarrollo del equipo, es recomendable seguir buscando innovaciones y mejoras que pueda tener, así como también el desarrollo de nuevos productos que puedan tener similitud al mismo principio de diseño.

El equipo al ser construido mayormente de metal es pesado, por lo cual se recomienda que se instale en un lugar solido que soporte su peso. Pero puede instalarse en espacios reducidos.

Por ser un equipo de laboratorio, se recomienda utilizar la mayor seguridad e higiene, así como precaución al utilizarse y maniobrar con él, en especial si está trabajando a su máxima capacidad y con velocidades elevadas.

#### **BIBLIOGRAFÍA**

[1] D. I. Calderón-Lamas. (2016). *Diseño de un agitador magnético cronometrado con control de temperatura y con alarma sonora y visual. Facultad de ciencias e ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.*

[2] F. I. Espinosa-Espin, G.L. Trávez-Padilla. (2016). *Diseño y construcción de un agitador orbital modular de doble bandeja para el laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales de la carrera de Ingeniería en Biotecnología. Departamento de ciencias de la energía y mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador.*

[3] A. Espinosa-Bautista, A. Lara-Hernández, E. Plasencia-Díaz, J. Rojas-Monroy. (1989). *DISEÑO Y FABRICACION DE UN AGITADOR ORBITAL CON CAMARA DE TEMPERATURA CONTROLADA. Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, México.*

[4] D. M. Ballesteros. (2008). *MODULACIÓN PWM EN FPGA BASADO EN MÁQUINAS DE ESTADO FINITO. Scientia Et Technica, vol. XIV, no. 38, pp. 421-426.*

[5] D. Loza-Matovelle, M. Torres, M. Ruilova, L. Albán, R. Velasco, J. L. Segura, R. Dabirian. (2016). *Diseño y Construcción del Prototipo de Código Abierto de una Incubadora con Agitación Orbital. Revista Politécnica, vol. 36, no. 3.*





Multidisciplinario  
e  
ingenierías

---

Ingeniantes

# Análisis Cinemático y de Esfuerzos en Brazo Manipulador para la Recolección de la Cereza del Café



## Colaboración

Alfredo Carrasco Aráoz; Mario Andrés Paredes Valverde; Luis Manuel García Martínez; Gabriel Ángel Ramírez Vicente; Jorge Rivera Flores, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán

Fecha de recepción: 15 de enero de 2025

Fecha de aceptación: 04 de marzo de 2025

**RESUMEN:** El presente artículo expone los resultados del análisis de esfuerzos realizado a los elementos de un brazo manipulador destinado a la cosecha del grano de café. Se expone la cinemática del manipulador, así como el análisis estático mediante cargas límite para evaluar su resistencia. El estudio cinético y el análisis estático se realizaron mediante un software especializado CAD aplicando la metodología del elemento finito.

Los resultados arrojados por el análisis corroboraron que el material seleccionado para la fabricación del sistema mecánico soportará adecuadamente los esfuerzos. El prototipo se elaborará mediante fabricación aditiva, utilizando filamento PLA; y se ha demostrado su funcionamiento en un prototipo funcional, que ha confirmado un desempeño superior al esperado, lo que pone de manifiesto que la construcción de un prototipo de mayores dimensiones es técnicamente viable.

**PALABRAS CLAVE:** Brazo manipulador, Cinemática, Análisis de esfuerzos, Grano de café, Impresión 3D.

**ABSTRACT:** This paper presents the results of the stress analysis performed on the elements of a manipulator arm used for coffee bean harvesting. The kinematics of the manipulator is presented, as well as the static analysis using limit loads to evaluate its resistance. The kinematic study and the static analysis were carried out by means of a specialized CAD software applying the finite element methodology.

The results of the analysis corroborated that the material selected for the fabrication of the mechanical system will adequately support the stresses. The prototype will be manufactured by additive manufacturing, using PLA filament; and its operation has been demonstrated in a functional prototype, which has confirmed a higher performance than expected, which shows that the construction of a larger prototype is technically feasible.

**KEYWORDS:** Manipulator arm, Kinematics, Stress analysis, Coffee bean, 3D printing.

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), México se posiciona dentro de los principales países productores de café en el mundo, con potencias como: Brasil, Colombia o Vietnam. El ranking de productores se basa en la cantidad de café que se produce anualmente, esta se ha visto mermada en los últimos años alcanzando actualmente 3,600,000 sacos (60 kg por saco) por año, debido en gran medida a la disminución en la exportación derivada de la

caída del precio internacional del café que, en consecuencia, vuelve al producto menos atractivo para los productores.

En México, estados como Veracruz, Oaxaca o Chiapas cuentan con denominaciones de origen. Sin embargo, el estado de Puebla ocupa el tercer lugar a nivel nacional en producción, siendo la sierra nororiental una de las zonas más importantes con producciones anuales que rebasan las 18,500 toneladas de café, con calidad de exportación.

De acuerdo con SAGARPA (2019), los municipios que pertenecen a la sierra nororiental contribuyen de manera importante aportando más de 10,000 toneladas anuales del aromático. Municipios tales como: Hueyapan, Hueytamalco, Teziutlán Tlatlauquitepec, Venustiano Carranza y Zacapoaxtla [1] [2] [3] [4] tienen plantaciones de calidad internacional.

En muchos de los cafetales la siembra de la planta del café se realiza en laderas debido a las condiciones orográficas de la región, permitiendo el cultivo de un grano de calidad de exportación. Estas condiciones se atribuyen al bosque mesófilo de montaña, que se presenta en altitudes comprendidas entre 800 y 2400 msnm (metros sobre el nivel medio del mar) donde confluyen poblaciones como: Teziutlán, Cuetzalan y Xicotepec, donde la topografía del terreno es escarpada.

La recolección manual, tradicionalmente utilizada en las plantaciones de café en Puebla debido a su topografía montañosa, enfrenta limitaciones que afectan tanto la productividad como la calidad del grano, como lo comenta el señor, Aquilino Santillán López propietario del cafetalero "Xanát Café" en entrevista realizada in situ desde el lugar donde se realizará el proyecto.

La propuesta de un brazo manipulador robótico busca superar las limitaciones inherentes al proceso manual. El enfoque específico en el diseño adaptado a las condiciones geográficas de Puebla, junto con la aplicación de la tecnología robótica, ofrece la posibilidad de mejorar la eficiencia, velocidad y precisión de la cosecha, beneficiando tanto a productores como a consumidores.

La implementación de un brazo manipulador automatizado tiene el potencial de transformar la forma en que se cosechan los granos de café en la región, mejorando la calidad del grano y optimizando la productividad. La propuesta contribuye a mitigar los riesgos asociados con el trabajo manual, como son los daños por manipulación incorrecta, caídas y movimientos bruscos, preservando así la integridad de los granos.

Con base en la literatura analizada, no se observa evidencia de un dispositivo de similares características. El proyecto más cercano fue una competencia de robots

recolectores de café desarrollada en 2011, donde la práctica fue demostrativa. Para lograr este objetivo es preciso dividir el proyecto en dos partes: por un lado, el diseño de la aeronave de recolección que tendrá la tarea de llevar los granos de café hacia un punto de acopio y como complemento, el diseño de un brazo manipulador que pueda retirar los granos de la planta sin causar daño a los que aún no se encuentran en condiciones de ser cosechados.

Por lo tanto, en este trabajo se presenta el análisis de los esfuerzos que se presentan en los elementos que conforman el prototipo con la finalidad de saber si el material empleado en su construcción es el adecuado para resistir los esfuerzos que se presentan en la propuesta de diseño.

## MATERIAL Y MÉTODOS

La propuesta se basa en la integración de principios de robótica y análisis cinemático para crear una solución técnica que aumente la eficiencia y calidad del proceso de recolección. Para lograrlo se sigue la metodología lineal de diseño, Figura 1 donde luego de tres iteraciones, el modelo presentado en la Figura 2 se caracteriza por tener los motores que le dan la movilidad concentrados en la parte superior lo más cerca del centro de gravedad del dron, en lo que se interpretaría como el hombro del brazo.

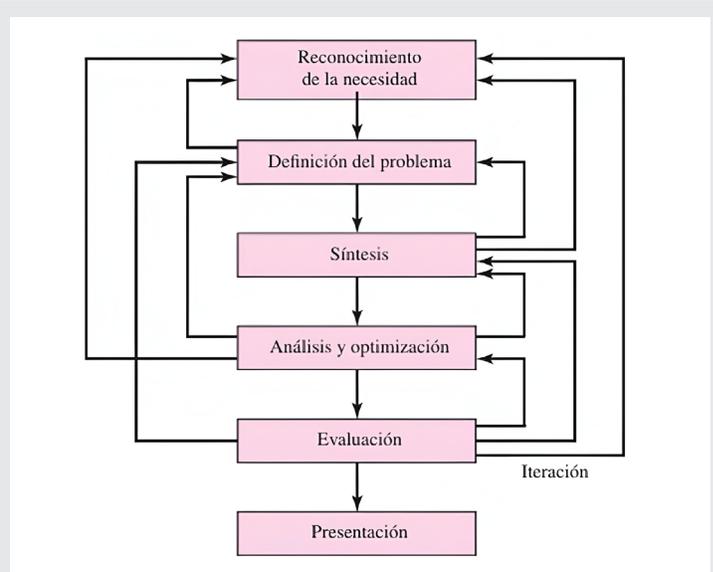


Figura 1. Metodología Lineal de Diseño.  
Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. Budynas y Nisbett 8va Ed.

El brazo se montará en una base provisional para realizar prueba. Con el fin de simular el movimiento del dron sobre el eje vertical se aprovisiono con un motor que me brindará la movilidad necesaria.

Los parámetros de diseño requeridos, que corresponden con el planteamiento del modelo, se exponen a continuación:

- Existen 2 eslabones que integran el brazo manipulador, el eslabón primero "Bombro2" tiene 90 grados de libertad de movimiento en "Y" y el eslabón "Brazo" tiene 180° de movimiento en "Y", este segundo es el que va a recibir la fuerza de los frutos.
- Se mejoró la base teniendo en cuenta el equilibrio con respecto del centro de gravedad del robot, lo cual permitió que el brazo desequilibre lo menos posible a la máquina que lo trasportará.
- La cámara se ubica en la parte superior del hombro del brazo dejando totalmente libre al brazo manipulador.
- El peso del manipulador es menor que la carga límite de 800 gramos que se traduce en la máxima carga útil con la que cuenta el dron.

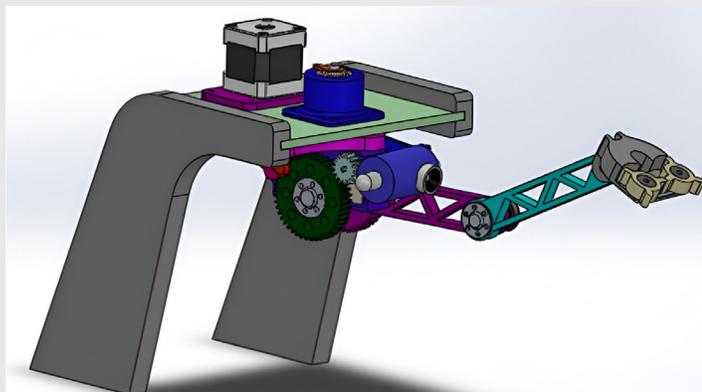


Figura 2. Iteración final del diseño del brazo manipulador. Se observa el brazo montado en una base que ocupa el lugar del dron donde se realizará el ensamble final.

Fuente: Elaboración propia 2024.

La Tabla 1 muestra la ponderación establecida para los parámetros de selección, el dispositivo debería de cumplir con: una funcionalidad que le permitiera cumplir con la tarea para la cual sería diseñado, el peso es otro factor importante a tener en cuenta ya que el brazo deberá de ir adosado a una maquina voladora y como es sabido cuanto mayor sea el peso a levantar el consumo energético se incrementa, de igual forma es importante tener un mecanismo confiable para que el porcentaje de falla se el menor posible, finalmente el tamaño y la forma son considerados para lograr una propuesta acorde al tamaño de la máquina que lo trasportará.

Tabla 1. Ponderación establecida para la selección de la iteración de diseño.

| Propiedad            | Ponderación |
|----------------------|-------------|
| Funcionalidad - 30%  | 27 %        |
| Peso - 30 %          | 30 %        |
| Confiabilidad - 20 % | 17 %        |
| Forma - 10 %         | 10 %        |
| Tamaño - 10 %        | 10 %        |
| Total                | 94%         |

Fuente: Elaboración propia 2024.

Al realizar la suma de las ponderaciones de los criterios de diseño se obtiene el 94% porcentaje que permite concluir que el mecanismo diseñado tendrá un desempeño adecuado.

### Cinemática directa del brazo manipulador

Para realizar el estudio de la cinemática del brazo es necesario conocer los eslabones con los que cuenta el brazo a través de un diagrama de cuerpo libre, que se observa en la Figura 3.

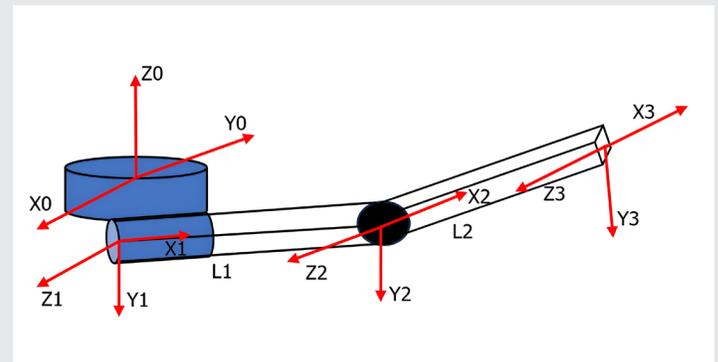


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre del brazo manipulador Fuente: Elaboración propia 2024.

Tras conocer los datos de movimiento mediante el diagrama de cuerpo libre, se obtienen los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) que para esta aplicación corresponden a un sistema de tres grados de libertad. Esta metodología permite representar adecuadamente, las direcciones de los sistemas coordenados (principal y secundarios) de modo que sea posible observar las transformaciones de coordenadas de forma organizada. De manera general para representar esta transformación de coordenadas se genera la ecuación de transformación que corresponde a la conversión entre subsistemas, con base en el producto matricial, tal como se muestra a continuación:

$$T_3^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 \quad \text{Ec(1)}$$

Para obtener cada una de las matrices de transformación A, se aplican las matrices de rotación en los ejes, como a continuación se muestra:

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{Ec(2)}$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{Ec(3)}$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec(4)}$$

Para determinar el movimiento del sistema de referencia 0 al subsistema 1, se tiene:

$$A_1^0 = R_{z,\theta} * R_{x,\theta} \quad \text{Ec(5)}$$

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec(6)}$$

Para establecer el cambio entre el subsistema 1 y el subsistema 2, se tiene una rotación en el eje x de 90° y una traslación también en x, con valor l<sub>1</sub>:

$$A_2^1 = R_{x,90} * T_{x,l_1} \quad \text{Ec(7)}$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{Ec(8)}$$

Por tanto:

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & C_{90} & -S_{90} & 0 \\ 0 & S_{90} & C_{90} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec(9)}$$

Finalmente se determina la matriz de transformación.

$$T_3^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 \quad \text{Ec(10)}$$

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec(11)}$$

## Análisis de esfuerzos

Para llevar a cabo el análisis de los esfuerzos en los elementos del brazo manipulador es necesario realizar el análisis estático de las partes que conforman el mecanismo mediante CAD aplicando el Método del Elemento Finito para cuerpos rígidos.

## Cálculo de las fuerzas que intervienen en los elementos del brazo manipulador

En esta parte se inicia por determinar las fuerzas a las que se ven sometidos los elementos de los eslabones, el estudio comienza con el miembro más alejado del sistema, el cual realiza la función de antebrazo siguiendo la anatomía humana, por razones de diseño el elemento tiene una longitud de 120mm una altura o peralte de 14.383mm y un espesor de 10 mm.

Estas dimensiones sirven como punto de partida para la generación de la estructura del brazo manipulador. Durante este proceso, se identifican y crean un total de 8 nodos, estos nodos actúan como puntos de conexión clave en la armadura del eslabón, estableciendo la estructura básica que permitirá el movimiento y la flexibilidad necesarios para la recolección de granos de café.

La Figura 4 muestra al diagrama de la armadura que conforma el elemento que se someterá a análisis, en ella se pueden observar los nodos antes señalados y su ubicación. Los nodos 1 y 2 es donde la estructura se supone fija para el estudio que se ha de llevar a cabo.

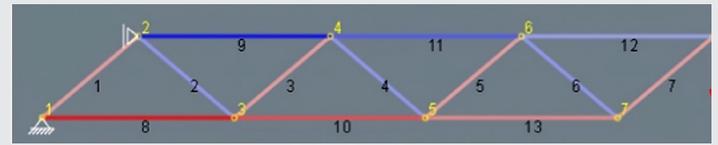


Figura 4. Diagrama de nodos del elemento a analizar.

Fuente: Elaboración propia 2024.

La Figura 5 muestra las condiciones iniciales del punto de partida. La carga aplicada es de 50 gr o 0.49 0N, la cual hace referencia al peso del manipulador que se ubicara al extremo del elemento en conjunto con el promedio del peso de un grano de café; el análisis se realiza partiendo de considerar una viga empotrada.

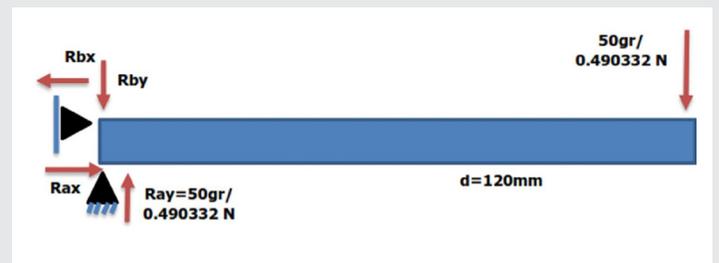


Figura 5. Condiciones iniciales de las cargas en el elemento a prueba.

Fuente: Elaboración propia 2024.

Una vez se han establecido las condiciones iniciales y con apoyo de un software de diseño, se realiza el estudio. En la Figura 6 se muestra la configuración necesaria para el ensayo; en ella se observa las distancias a los que se encuentran los elementos de la estructura, los nodos donde se encuentra empotrada la viga, así como el punto donde se aplica la carga.

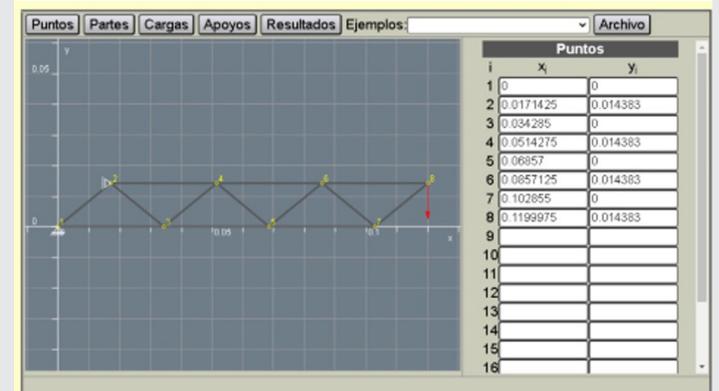


Figura 6. Parámetros iniciales para el ensayo estático de fuerzas.

Fuente: Elaboración propia 2024.

Tras haberse realizado la simulación se obtuvo que el elemento que se encuentra sometido a la mayor compresión es el eslabón 8 y de igual forma en el eslabón 9 se encuentra la mayor tensión esto haciendo referencia a la Figura 4.

Con base a un estudio similar aplicado al elemento que se encuentra cercano a la parte de la fuente de potencia, en esta ocasión el brazo si se hace referencia a la biomecánica humana. La tabla 2, muestra una fracción de los resultados obtenidos tras la prueba, en ellos destacan los valores obtenidos para el eslabón 8 con una fuerza a compresión de -3.506 N y el eslabón 9 con una fuerza a tensión de 2.922 N.

Tabla 2. Muestra de valores obtenidos en el análisis de fuerzas del elemento 2 destacando el nodo 8 y 9 con la mayor fuerza de compresión y de tensión respectivamente.

| Eslabón 1           |                     |                      |
|---------------------|---------------------|----------------------|
| $F_x = 0.5844$<br>N | $F_y = 0.4903$<br>N | $F_N = -0.7629$<br>N |
| Eslabón 2           |                     |                      |
| $F_x = 0.5844$<br>N | $F_y = 0.4903$<br>N | $F_N = 0.7629$<br>N  |
| Eslabón 3           |                     |                      |
| $F_x = 0.5844$<br>N | $F_y = 0.4903$<br>N | $F_N = -0.7629$<br>N |
| Eslabón 8           |                     |                      |
| $F_x = 3.506$ N     | $F_y = 0$ N         | $F_N = -3.506$<br>N  |
| Eslabón 9           |                     |                      |
| $F_x = -2.922$<br>N | $F_y = 0$ N         | $F_N = 2.922$<br>N   |

Fuente: Elaboración propia 2024.

### Análisis estático de esfuerzos

Para realizar el análisis de esfuerzos en los elementos es necesario definir el material con el cual se fabricarán las piezas del robot manipulador. Se empleará plástico PLA ya que la manufactura de las piezas se realizará mediante manufactura aditiva, el filamento utilizado cuenta con una densidad igual a  $\rho = 1385.836 \text{ kg} / \text{m}^3$ .

La Tabla 3 muestra las propiedades mecánicas obtenidas tras pruebas realizadas a tensión y compresión a los materiales plásticos: PLA (ácido poliláctico), PCL (poli-caprolactona) y Lay-Form 40, materiales empleados frecuentemente en la impresión 3D. las pruebas realizadas por Zuleima et al., (2019) fueron realizadas como lo expresa "deposición fundida" con las que obtuvo: modulo elástico, coeficiente de Poisson, modulo cortante, límite de tracción, límite de compresión y límite elástico. [5]

Con base en la tabla anterior, se configura el material en el programa de CAD utilizado para realizar la simulación de los elementos. La Figura 7 muestra dicha configuración.

Tabla 3. Propiedades mecánicas para los materiales PLA, PCL y Lay-Form 40 [5].

| Material    | P [%] | A [°]  |           | E [MPa] | $\sigma_y$ [MPa] | $\sigma_U$ [MPa] |
|-------------|-------|--------|-----------|---------|------------------|------------------|
| PLA         | 30    | 0-90   | $\bar{x}$ | 25.96   | 41.2             | 48.37            |
|             |       |        | s         | 1.80    | 4.42             | 1.91             |
|             |       | 45-135 | $\bar{x}$ | 12.61   | 27.76            | 30.87            |
|             |       |        | s         | 0.43    | 2.30             | 2.50             |
|             | 40    | 0-90   | $\bar{x}$ | 23.88   | 29.67            | 33.04            |
|             |       |        | s         | 1.06    | 2.08             | 2.54             |
|             |       | 45-135 | $\bar{x}$ | 15.41   | 31.00            | 36.27            |
|             |       |        | s         | 0.13    | 1.00             | 1.71             |
| PCL         | 30    | 0-90   | $\bar{x}$ | 6.93    | -                | 9.68             |
|             |       |        | s         | 0.14    | -                | 1.46             |
|             |       | 45-135 | $\bar{x}$ | 4.7     | 6.6              | 7.52             |
|             |       |        | s         | 0.30    | 0.44             | 0.89             |
|             | 40    | 0-90   | $\bar{x}$ | 7.24    | 9.92             | 10.28            |
|             |       |        | s         | 0.07    | 0.14             | 0.58             |
|             |       | 45-135 | $\bar{x}$ | 4.16    | 6.38             | 6.99             |
|             |       |        | s         | 0.11    | 0.13             | 0.62             |
| Lay-Fomm 40 | 30    | 0-90   | $\bar{x}$ | 1.65    | 3.53             | 28.24            |
|             |       |        | s         | 0.18    | 0.42             | 2.16             |
|             |       | 45-135 | $\bar{x}$ | 0.72    | 1.77             | 12.26            |
|             |       |        | s         | 0.18    | 0.31             | 2.30             |
|             | 40    | 0-90   | $\bar{x}$ | 1.28    | 2.65             | 18.97            |
|             |       |        | s         | 0.18    | 0.39             | 3.17             |
|             |       | 45-135 | $\bar{x}$ | 1.07    | 2.82             | 21.50            |
|             |       |        | s         | 0.19    | 0.78             | 0.70             |

Fuente: Elaboración propia 2024.

### RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el análisis de esfuerzos muestran la magnitud del desplazamiento de las partes del sistema mecánico en función de la carga administrada, así como la flexión que pudiera presentarse en los elementos citados.



Figura 7. Configuración de los parámetros del filamento PLA en el software utilizado para el ensayo de esfuerzos.

Fuente: Elaboración propia 2024.

El análisis se realizó como lo sugieren [6], [7] y [8] para la carga aplicada se tomó la mayor a la que se podría enfrentar en la vida real ya que cuando se diseña se debe hacer para las condiciones extremas a las que se enfrentara el modelo.

El criterio de energía máxima de distorsión o de Von Mises mide la resistencia elástica el cual se aplica a materiales de naturaleza dúctil, según este criterio el material no fluirá en el punto de interés mientras la energía de distorsión por unidad de volumen aplicada sea menor a la energía de distorsión por unidad de volumen.

El análisis aquí mostrado hace referencia solo a uno de los elementos Figura 8 debido a que el análisis para el otro elemento es de procedimiento similar. Se muestra la pieza del antebrazo mismo que para la prueba se configurará para el plástico PLA cuyos parámetros fueron configurados en el software como ha sido mencionado con antelación.

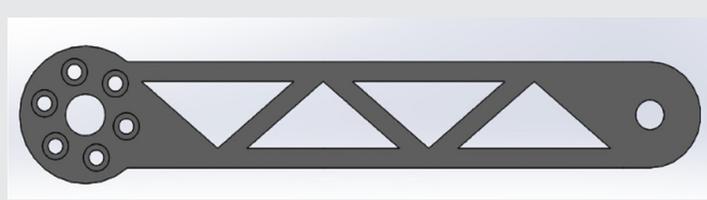


Figura 8. elemento de prueba configurado con material PLA para la simulación.  
Fuente: Elaboración propia 2024.

Para para el análisis se realizó un corte al elemento para realizar un anclaje similar a las condiciones de prueba mostradas con anterioridad en la Figura 3, los resultados arrojados por el ensayo se muestran en la Figura 9.

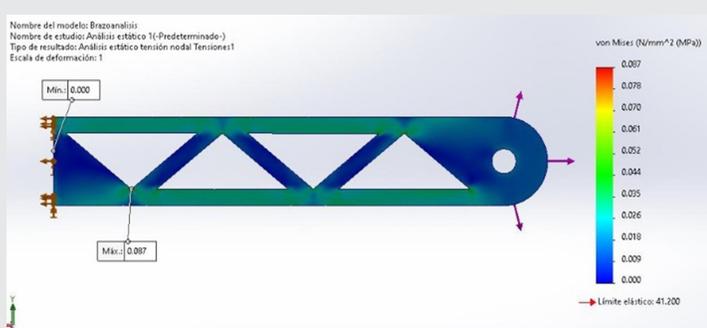


Figura 9. Resultados del esfuerzo de Von Mises ante flexión.  
Fuente: Elaboración propia 2024.

Los datos recabados indican la energía de distorsión máxima de 0.087 MPa valor que se encuentra por debajo del límite elástico del material de 41.2 MPa.

Se repitió el análisis, pero esta vez con un anclaje en la parte donde se sujetará la pieza Figura 10 de forma real, arrojando los siguientes resultados: El esfuerzo de Von Mises es de 0.186 MPa, encontrándose por debajo del límite elástico del material de 41.2 MPa.

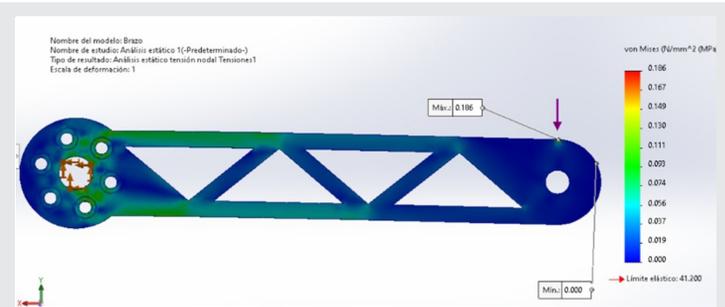


Figura 10. resultados de la prueba de von Mises para la pieza completa.  
Fuente: Elaboración propia 2024.

Encontrándose ubicada en el extremo del elemento como se puede ver en la Figura 11.

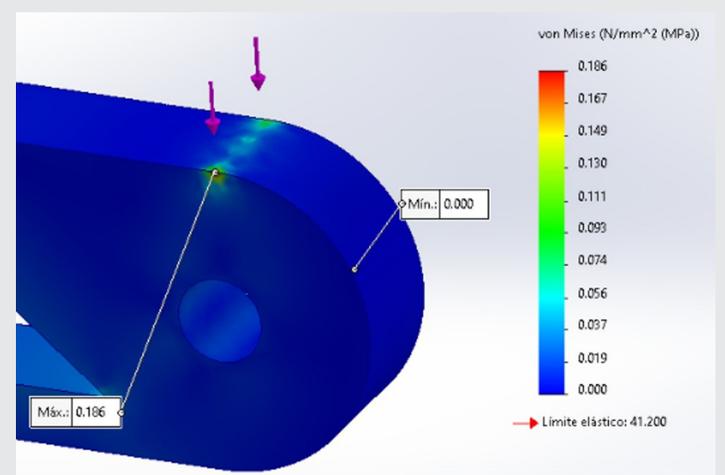


Figura 11. Ubicación del esfuerzo máximo de Von Mises.  
Fuente: Elaboración propia 2024.

La deformación unitaria es una magnitud adimensional, expresada en un valor comprendido de 0 a 1 siendo este último el 100 % de la longitud del elemento, tras la prueba el valor de esta deformación resulto de 0.006 MPa lo que indica que la pieza sufrió un cambio en su longitud del 0.6 % con respecto a la inicial; la máxima deformación se presenta en la parte superior de la estructura cercana al origen del elemento, como se aprecia en la Figura 12.

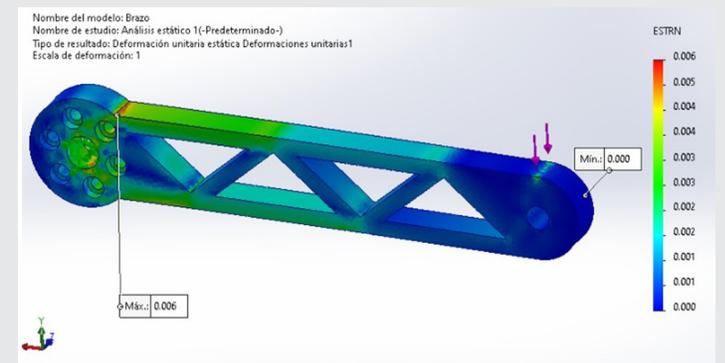


Figura 12. Resultados de la prueba de deformación unitaria para la pieza completa.  
Fuente: Elaboración propia 2024.

**Discusión**

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la propuesta de diseño del brazo manipulador es viable tanto técnica como tecnológicamente, ya que su construcción mediante el uso de técnicas de manufactura aditiva es viable al estar desarrollado sobre geometrías simples, lo que facilita su impresión con los recursos estándar con los que se cuentan.

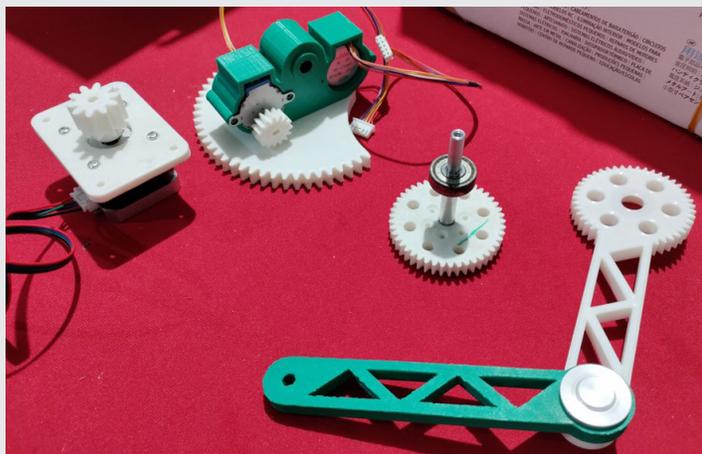


Figura 13. Partes del brazo manipulador impresas en 3D con filamento PLA.

Fuente: Elaboración propia 2024.

Con la certeza demostrada por los datos encontrados mediante el análisis de esfuerzos se procedió a la impresión de las partes que formaran el brazo manipulador propuesto, la Figura 13 muestra las partes impresas con filamento PLA.

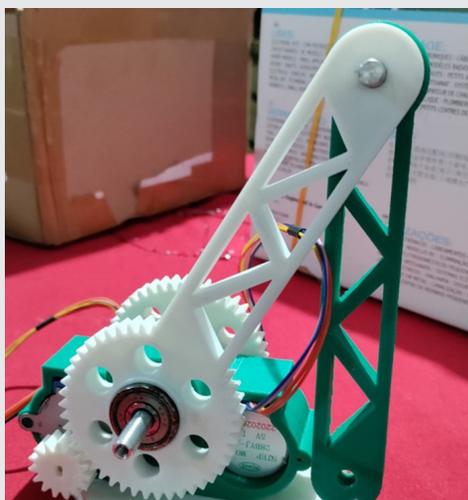


Figura 14. ensamble de las partes del brazo manipulador.

Fuente: Elaboración propia 2024.

La Figura 14 muestra el parcial de las partes del mecanismo en conjunto de su fuente motriz, el modelo estará impulsado por dos motores a pasos con 400 pulsos por revolución lo que le permitirá al conjunto realizar movimientos con precisión.

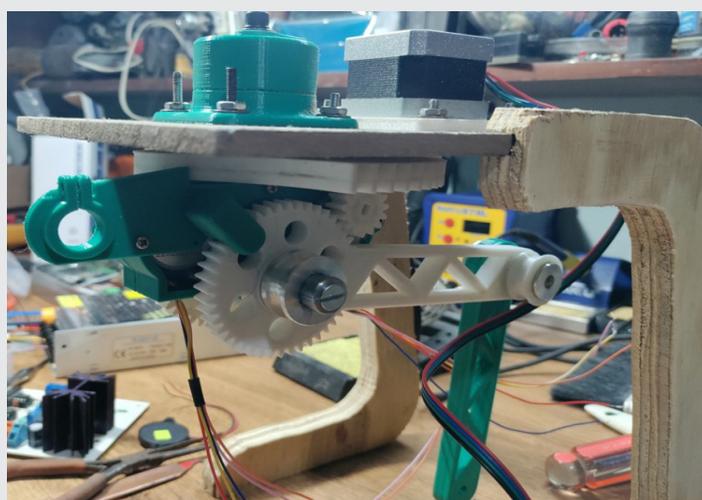


Figura 15. ensamble de las partes del brazo en la base de pruebas.

Fuente: Elaboración propia 2024.

La Figura 15 muestra al brazo manipulador montado sobre una base de pruebas la base esta provista de un motor que simula los giros dados por el dron donde montara en un futuro, el diseño de la base le permitió las pruebas de funcionamiento tanto mecánicas, electrónicas y de comunicación con el software de control.

La Figura 16 muestra las pruebas realizadas a todo el sistema, durante el desarrollo de estas se pudo observar que los movimientos del brazo son fluidos, sin oscilaciones indeseadas, los mecanismos se mueven de forma precisa alcanzando el objetivo deseado.

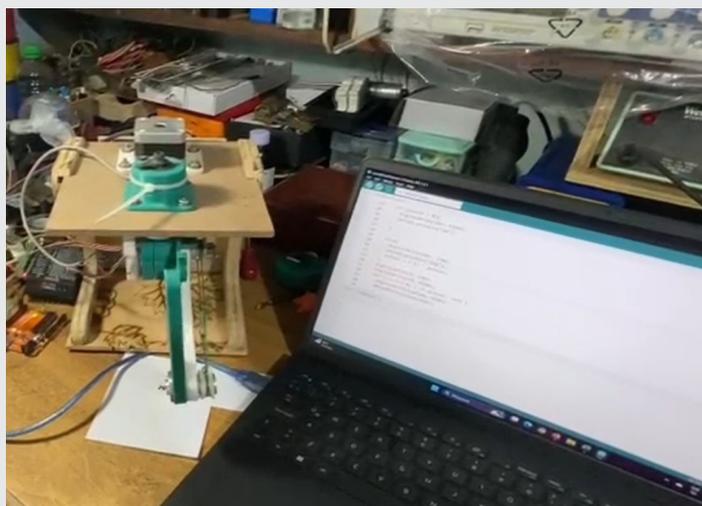


Figura 16. pruebas de funcionamiento del brazo manipulador.

Fuente: Elaboración propia 2024.

**CONCLUSIONES**

El desarrollo del presente trabajo puso de manifiesto la viabilidad del proyecto, dejando ver los resultados obtenidos en el análisis de la simulación. Así, es posible expresar que el tamaño, forma y materiales elegidos cuentan con la capacidad técnica para que

el prototipo realice sus funciones de manera adecuada.

Los resultados observan que el material elegido para la construcción del robot cumple con los criterios para su selección, lo que concluyó eficientemente con la construcción de las partes utilizando la deposición fundida del material, dando como resultado piezas con la solidez adecuada para cumplir con las expectativas del proyecto.

En cuanto a los resultados de las pruebas puede observarse: el esfuerzo máximo de Von Mises es fue de 0.186 MPa al encontrándose por debajo del 2 % y para el caso del PLA es de 0.824 MPa, por lo tanto como no se supera este valor los elementos son confiables, de igual forma en el caso de la deformación unitaria el valor encontrado es de 0.6 % que esta por debajo del 1 % de la deformación del elemento, este también se considera seguro.

Finalmente, el estudio pone de manifiesto que el plástico PLA es un material adecuado para realizar prototipos de ingeniería sometidos a cargas mecánicas moderadas las cuales no produzcan grandes esfuerzos en los elementos.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] A. C. Robles y I. R. Medina, «El bosque mesófilo de montaña y el cultivo del café en el municipio de Xilotepet, Puebla, México,» 8 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000009262.pdf>. [Último acceso: 8 enero 2024].

[2] G. de Mexico, «SAGARPA,» [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/analisis-de-los-principales-productores-de-cafe-a-nivel-mundial/>. [Último acceso: 5 enero 2024].

[3] «Cursos Baristas Café,» 27 septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://cursosbaristas.com.mx/blog/cafe-de-puebla>. [Último acceso: 10 Enero 2024].

[4] «Statista,» 2021. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/600243/ranking-de-los-principales-productores-de-cafe-a-nivel-mundial/>. [Último acceso: 20 febrero 2024].

[5] J. Zuleima, «Caracterización mecánica de piezas de ácido poliláctico, policaprolactona y L-lysina fabricadas por modelado de deposición fundida, en función de los parámetros de impresión,» ITECKNE, 2019.

[6] L. Armando, «ANÁLISIS DE ESFUERZOS RESIDUALES EN ELEMENTOS MECÁNICOS A CAR-

GAS SIMPLES,» 14 abril 2021. [En línea]. Available: [http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2012articulos/pdfs/A1/A1\\_156.pdf](http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2012articulos/pdfs/A1/A1_156.pdf).

[7] J. Celigueta, «MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISIS ESTRUCTURAL,» 19 septiembre 2011. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/10171/19069>.

[8] J. M. Gere y B. J. Goodho, *Mecánica de Materiales*, CENGAGE Learning, 2015.

[9] 3D, C. (04 de Marzo de 2022). *Simulación Computacional: Una herramienta indispensable para la solución de problemas de ingeniería*. Obtenido de Prototica3D: <https://www.prototica3d.com/2022/03/simulacion-computacional-una.html>.

[10] LEYTON, F. (2019). *Características y limitantes de la impresión 3D como método de fabricación digital*. *Textos De Tecnología*, (00), pp 151-162. Recuperado a partir de <https://revistas.udelar.edu.uy/OJS/index.php/RTdT/article/view/97>





# Ciencias *de la* Computación

---

# Ingeniantes

# Diseño de un Controlador de Temperatura basado en Lógica Difusa para una Incubadora de Huevos de Aves de Corral



## Colaboración

Jaime Castañeda Delgado; María del Refugio Molina Wong; Abraham Esquivel Salas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte

Fecha de recepción: 13 de noviembre de 2024

Fecha de aceptación: 18 de marzo de 2025

**RESUMEN:** Una incubadora es un mecanismo artificial que imita el proceso de incubación de las aves, controlando los factores ambientales para que un embrión en el huevo se desarrolle. Es imprescindible asegurar que la temperatura se mantendrá en los límites de la temperatura ideal.

Como propuesta, en una primera etapa se hace énfasis en un control de temperatura basado en lógica difusa utilizando el método de centros máximos (COM). Los resultados observables en el prototipo son alentadores, y se considera en una segunda etapa, controlar de igual manera la humedad.

**PALABRAS CLAVE:** Control Automático, Lógica Difusa, Control de Variables Ambientales.

**ABSTRACT:** An incubator is an artificial mechanism that replaces the incubation process of birds, controlling environmental making the development of an embryo possible. It is essential to ensure that the temperature will be kept within the limits of the ideal temperature.

As a proposal, was developed a temperature control based on fuzzy logic using the maximum center method (COM). The prototype encouraging results, and in a second stage, it is considered to control the humidity in the same way.

**KEYWORDS:** Automatic Control, Fuzzy Logic, Environmental Variables Control.

## INTRODUCCIÓN

En la región norte del estado de Zacatecas, según INEGI en el Censo 2022, la producción de gallos, gallinas, pollos y pollitos, en unidades de producción fue del 96.40 % mientras en las viviendas tan solo del 3.60%. La producción de pollo en la vivienda puede ser una opción económica viable para mejorar la economía familiar.

Una incubadora es un dispositivo capaz de controlar factores ambientales, como la temperatura y la humedad, además, debe permitir la renovación del aire y proporcionar mecanismos para cambiar la posición del huevo [1].

El diseño de una incubadora requiere de un sistema electrónico que consta de un microcontrolador, sensores y programas de control para la regulación de las variables ambientales, con el propósito de mantener los huevos en el rango de temperatura y humedad deseables, que propague el calor de manera uniforme, cambiando de posición el huevo hasta que eclosione.

Es posible encontrar incubadoras con un sistema de control ON/OFF. Como ventaja es el tipo de control más sencillo, pero este tipo de control es incapaz de mantener la variable de temperatura estable en situaciones donde se presentan cambios bruscos [2].

Otro sistema de control es el PID (proporcional-integral-derivativo), que es el más usado en las aplicaciones industriales, y consiste en aplicar un control proporcional que actúa en tiempo real, un control integrativo que toma en cuenta el comportamiento en tiempo pasado de la variable, y un control derivativo que es capaz de estimar la naturaleza de la variable en el futuro inmediato, lo que revelan que el sistema PID mantiene de forma eficaz los valores de temperaturas deseados [2].

Por lo tanto, en este trabajo de investigación se propone diseñar una incubadora con un sistema de control de temperatura basado en lógica difusa utilizando el método de centros máximos (COM). El algoritmo utiliza funciones de pertenencia para el control de la variable de temperatura, permitiendo tomar decisiones en función de grados intermedios de cumplimiento de una premisa.

De alcanzar el resultado esperado, permitirá el control de otras variables ambientales que afectan el proceso de incubación de los huevos, como la ventilación y la calidad del aire, para aumentar la tasa de supervivencia de los embriones.

A continuación, se presenta un estado del arte, seguido por la propuesta de control de temperatura, el diseño, resultados y finalmente las conclusiones de la investigación.

### Estado del arte

Un sistema de control difuso es una técnica de inteligencia artificial que utiliza lógica difusa para tomar decisiones y controlar sistemas.

Los sistemas de control difuso son particularmente útiles en situaciones en las que es difícil definir reglas o parámetros exactos para la toma de decisiones, como en entornos complejos o dinámicos.

La evolución del proceso de incubación se caracteriza por un importante desarrollo científico y tecnológico. En la

actualidad, se hace énfasis en el control de las condiciones térmicas de incubación, aunque tal y como lo plantea Boleli et al. [1], es necesario plantearse que tan efectivas son las condiciones físicas actuales de incubación para promover una mayor incubabilidad.

En un esfuerzo por mejorar la eficiencia y la precisión de la eclosión, Auliafitri et al. [3] presenta una máquina para incubar huevos. La máquina está equipada con sensores para medir en tiempo real la temperatura y humedad dentro de la incubadora. Los datos obtenidos de los sensores se utilizan como entrada para un sistema de control basado en lógica difusa que regula la temperatura y humedad de la incubadora. Como resultado, el modelo difuso de Mamdani puede calcular las variaciones de temperatura y humedad en la máquina de incubación y brindar recomendaciones para la potencia óptima de la lámpara. Como trabajo futuro, incluirán un análisis más exhaustivo de otras variables ambientales que afectan el proceso de incubación de los huevos, como la ventilación y la calidad del aire, para aumentar la tasa de supervivencia de los embriones.

Aldair et al. [4] presenta una idea similar, que utiliza un sistema de control difuso para controlar la temperatura, humedad y posición del huevo. Su prototipo, construido con Arduino pretende en un futuro usar tecnología de IoT para monitorear desde remoto, las variables ambientales de la incubadora.

Okpagu y Nwosu [5] controlan la temperatura de una incubadora usando un controlador PID implementado en un microcontrolador. Como resultado de sus simulaciones, su controlador PID puede garantizar la estabilidad de la temperatura en la incubadora.

### METODOLOGÍA

El enfoque que se aplicara para esta investigación es mixto ya que se pretende realizar una incubadora con un sistema de control de temperatura basado en lógica difusa, donde se observa y analiza el comportamiento de la variable en un tiempo determinado.

Se construyó un prototipo de madera y puede fabricarse de forma sencilla mediante técnicas y herramientas disponibles.

Se eligió como fuente de calor durante la incubación una bombilla de 100 watts que se controla a través de su intensidad, esto por su facilidad instalación y su bajo costo. Considerando que este tipo de fuentes generan calor residual e incrementan rápidamente la temperatura a 37 grados centígrados, también disminuye la humedad en el interior. Para esto, se planea mejorar el diseño como trabajo futuro, utilizando focos de 50 Watts o bien otras alternativas como las resistencias eléctricas [6].

El calentamiento de los huevos durante la incubación se logra mediante el intercambio de calor entre el aire y los

huevos. La temperatura óptima de incubación se encuentra en el rango de 37 y 38°C.

Hoy en día las incubadoras cuentan con los más modernos sistemas de control de temperatura, humedad, volteo y ventilación, entre lo que destacan es el control ON/OFF, PID y lógica difusa.

El sistema ON/OFF, es aquel que solo ocupa una de las dos posibles posiciones sin estados intermedios por lo que no es posible mantener la variable estable ante los cambios en corto tiempo.

El algoritmo de control PID consiste de tres modos básicos, el proporcional, el integral y el derivativo. Generalmente los algoritmos básicos usados son P, PI o PID, y existiendo una amplia variedad de formas y métodos de ajuste de este esquema de control. Sin embargo, a medida que se exige una mayor precisión en el sistema, el ajuste de este tipo de control se hace más difícil sobre todo por el ruido y cuando se presentan retardos, además cuando los procesos a controlar son no lineales y el control debiera tener la capacidad de compensar esas no-linealidades, el control PID no tiene la capacidad de responder porque asume relaciones lineales [7].

Por otra parte, un controlador con lógica difusa es un sistema que puede ser expresado mejor como un control a través de palabras que interpretan el sentido común, en lugar de números, o bien, sentencias en lugar de ecuaciones. Es un sistema matemático que analiza los valores de entrada analógica en términos de variables lógicas que toman valores continuos entre 0 y 1. Con estos podemos lograr que un sistema pueda ajustarse a condiciones cambiantes que son algunas veces imposibles de predecir, tales como los cambios ambientales o las condiciones de desgaste en sus componentes físicos. Un control de lógica difusa puede igualar y exceder el rendimiento de un controlador PID estándar [8].

Mientras el controlador PID puede parecer más simple, el control difuso presenta mejor respuesta a las perturbaciones. Cuando la perturbación desaparece, el control difuso estabiliza de manera más rápida la temperatura.

## Materiales y métodos

Es necesario que la fuente de calor simule el calor que un gallina proporciona al huevo. Se eligió como fuente de calor una bombilla de 100 watts, controlada a través de su intensidad. Como microcontrolador, se eligió el microcontrolador Atmega 328 de Arduino Uno.

El control de la intensidad del foco, fue realizado por medio de un triac, que conectado al foco y a un MOC (optoacoplador), envía una señal al microcontrolador para modificar la intensidad del foco. El diseño se realizó en dos etapas: emisor y receptor.

Para la detección de la temperatura dentro de la incubadora, se instalaron 4 sensores de temperatura LM35 (véase la Figura 1. Este prototipo mantiene comunicación con el receptor (etapa de potencia), ubicada dentro de la incubadora, para monitorear y optimizar la temperatura del entorno.

Además, el prototipo cuenta con una pantalla LCD 16x2, que muestra la temperatura dentro de la incubadora.

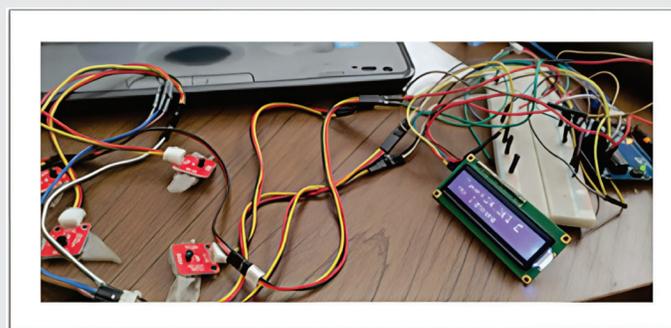


Figura 1. Conexión de sensores en físico.  
Fuente: Elaboración propia.

La etapa de potencia, fue integrada por el microcontrolador Arduino Uno, que envía una señal PWM (modulación de ancho de pulso) al circuito de control de carga para el encendido de la bombilla en base a la lectura registrada por el emisor.

Un control difuso, será el encargado de hacer que la temperatura se aproxime, en medida de lo posible, a la temperatura ideal.

La etapa de potencia está diseñada por un microcontrolador de Arduino Uno. y un circuito de control de carga formado por un mosfet BTB12 600B, teniendo un MOC 3021 para la manipulación de corriente contando con una resistencia de 220Ohms y una de 500Ohms manipulando un foco incandescente de 100 WATTS véase la Figura 2.



Figura 2. Diagrama de potencia en físico.  
Fuente: Elaboración propia.

El control de la temperatura es un sistema basado en lógica difusa y está dado por un controlador de lazo cerrado de tipo Proporcional-Derivativo, de dos entradas y una salida. Las entradas físicas del sistema son la temperatura

deseada y la temperatura actual, hablando de la máquina de inferencia, las entradas son el error y la derivada del error. La salida de la máquina de inferencia genera una señal PWM que activara un triac para suministrar la energía de encendido que tendrán los focos véase la Figura 3.

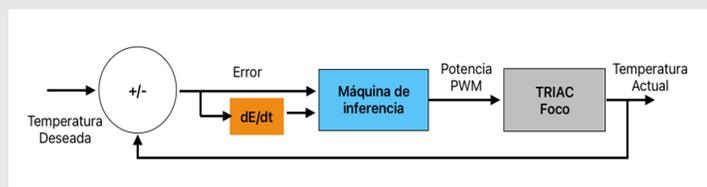


Figura 3. Esquema del control de temperatura difuso PD.  
Fuente: Elaboración propia.

La máquina de inferencia difusa está formada por tres partes esenciales. la Difusión, el Razonamiento o Reglas difusas IF-THEN y la Desdifusión.

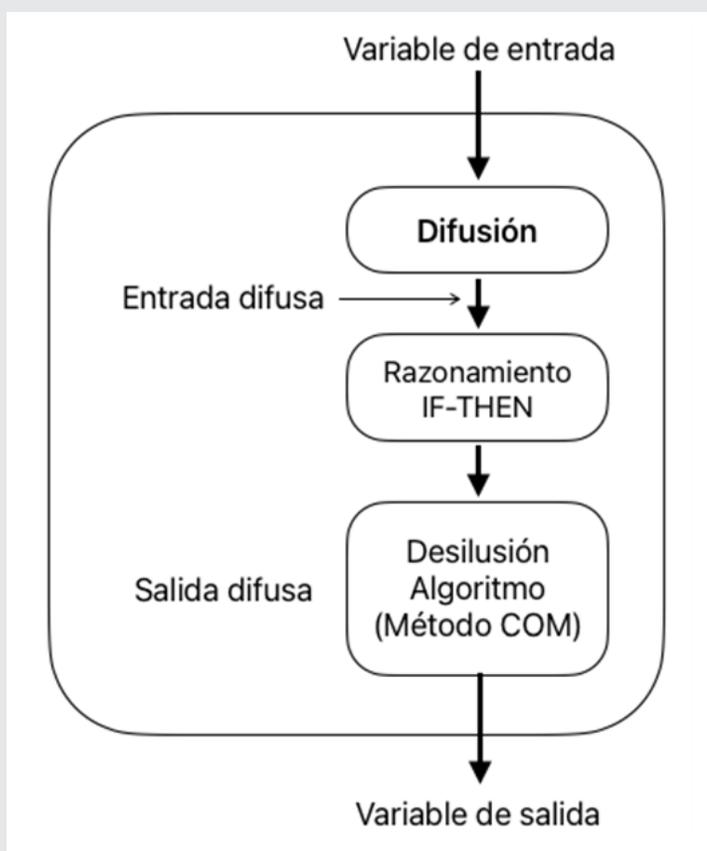


Figura 4. Máquina de inferencia difusa.  
Fuente: Elaboración propia.

La difusión es un proceso en el cual las variables físicas son convertidas en entradas difusas, el valor de las variables es evaluado y se les asigna un grado de pertenencia dentro de los conjuntos difusos que define el diseñador. Para hacer este proceso se usan las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos.

El razonamiento dentro de una máquina de inferencia difusa es el que se encarga de evaluar las reglas propuestas por el diseñador. Las reglas relacionan las entradas difusas y

generan la salida difusa; estas reglas son llamadas “Reglas Difusas” posteriormente esta salida difusa es convertida en una salida real mediante el proceso de desdifusión, con la salida real el sistema realizará la acción deseada.

El razonamiento en las reglas difusas de Mamdani se realiza de la manera siguiente:

$$if (X_1 is A AND X_2 is B) then (U_1 is C) \quad Ec. (1)$$

Donde  $X_1$  y  $X_2$  son las variables de entrada,  $A$  y  $B$  son las funciones de membresía de entrada,  $U_1$  es la salida difusa y  $C$  es la función de membresía de salida.

La primera parte del enunciado “*if (X<sub>1</sub> is A AND X<sub>2</sub> is B)*” se conoce como antecedente y “*then (U<sub>1</sub> is C)*” es el consecuente.

Como ventajas se puede decir que es intuitiva, con amplia aceptación, adaptada a la incorporación de conocimiento y experiencia.

La desdifusión es la conversión de la salida difusa de la máquina de inferencia a una variable de salida, es decir, el resultado obtenido de las reglas dentro de la máquina de inferencia será traducido en una señal física real para el sistema de control.

Para la desdifusión existen dos métodos, el método de centroide y el método centro de máximos (COM). Para este prototipo se utilizó el método COM por ser más eficiente y por su bajo costo, pues utiliza funciones simétricas y puede obtener valores de salida reales usando recursos computacionales limitados.

#### Diseño del control

Hablando del controlador, sus entradas están dadas por el Error de temperatura obtenida del invernadero (Temperatura ideal - Temperatura actual) y la Derivada del error de temperatura ( $dE/dt$ ), que viene a ser la diferencia entre el error actual y el anterior.

Las entradas difusas, compuestas por el Error de la Temperatura y la Derivada de la Temperatura, pasan por un proceso de difusión, asignándoles valores de pertenencia.

Con un intervalo de 29 a 45 grados, de acuerdo al rango de temperatura de una incubadora de huevos, se definieron una función lambda, tres funciones triangulares y una gamma.

#### Muy Positivo (MP) Lambda

$$(u; 29,33) \begin{cases} 1, si u \leq 29; \\ \frac{33 - u}{33 - 29}, si 29 \leq u \leq 33; \\ 0, si u > 33. \end{cases} \quad Ec. (2)$$

Positivo (P) Triangular

$$\Lambda(u; 29, 33, 37) \begin{cases} 0, si u \leq 29; \\ \frac{u - 29}{33 - 29}, si 29 \leq u \leq 33; \\ \frac{37 - u}{37 - 33}, si 33 \leq u \leq 37; \\ 0, si u > 37. \end{cases} \quad \text{Ec. (3)}$$

Cero (Z) Triangular

$$\Lambda(u; 33, 37, 41) \begin{cases} 0, si u \leq 33; \\ \frac{u - 33}{37 - 33}, si 33 \leq u \leq 37; \\ \frac{41 - u}{41 - 37}, si 37 \leq u \leq 41; \\ 0, si u > 41. \end{cases} \quad \text{Ec. (4)}$$

Negativo (N) Triangular

$$\Lambda(u; 37, 41, 45) \begin{cases} 0, si u \leq 37; \\ \frac{u - 37}{41 - 37}, si 37 \leq u \leq 41; \\ \frac{45 - u}{45 - 41}, si 41 \leq u \leq 45; \\ 0, si u > 45. \end{cases} \quad \text{Ec. (5)}$$

Muy Negativo (MN) Gamma

$$\Gamma(u; 41, 45) \begin{cases} 0, si u \leq 41; \\ \frac{u - 41}{45 - 41}, si 41 \leq u \leq 45; \\ 1, si u > 45. \end{cases} \quad \text{Ec. (6)}$$

La Derivada del error tiene un intervalo que va de -1 a 1, donde -1 indica que la temperatura de la incubadora es fría respecto de la temperatura ideal, por lo tanto, los focos deben permanecer encendidos. Por el contrario, 1 indica que la temperatura ha subido, por lo tanto, los focos deben estar apagados. Para mantener la temperatura de la incubadora idónea.

Derivada Negativa (DN) Función Lambda

$$L(u; -1, 0) \begin{cases} 1, si u \leq -1; \\ \frac{0 - u}{0 + 1}, si -1 \leq u \leq 0; \\ 0, si u > 0. \end{cases} \quad \text{Ec. (7)}$$

Derivada Cero (DC) Función Triangular

$$\Lambda(u; -0.5, 0, 0.5) \begin{cases} 0, si u < -0.5; \\ \frac{u + 0.5}{0 + 0.5}, si -0.5 \leq u \leq 0; \\ \frac{0.5 - u}{0.5 - 0}, si 0 \leq u \leq 0.5; \\ 0, si u > 0.5. \end{cases} \quad \text{Ec. (8)}$$

Derivada Positiva (DP) Función Gamma

$$\Gamma(u; 0, 1) \begin{cases} 0, si u < 0.5; \\ \frac{u - 0.5}{1 - 0.5}, si 0.5 \leq u \leq 1; \\ 1, si u > 1. \end{cases} \quad \text{Ec. (9)}$$

Las reglas difusas realizadas con la arquitectura de Mamdani, generadas a partir de la experiencia en campo que sigue la máquina de inferencia, se pueden apreciar en una memoria difusa Véase la Tabla 1.

Es preciso mencionar que las salidas con (\*) son señaladas de esa forma, debido a que nunca se presentaron el caso de pertenencia entre las funciones del Error de Temperatura y la derivada del Error. En el caso de la salida N, se presenta de esta manera, porque no se genera ningún movimiento, debido a que se llega a la temperatura deseada (set point).

Tabla 1. Memoria difusa.

|    | MP  | P   | Z  | N   | MN |
|----|-----|-----|----|-----|----|
| DN | ET  | EA  | EM | EB* | A* |
| DC | ET* | EA  | N  | EB  | A* |
| DP | ET  | EA* | EM | AB  | A  |

Fuente: Elaboración propia.

La defusificación de la salida (focos) se puede presentar en la Tabla 2 y Figura 5.

Tabla 2. Niveles de intensidad.

| ET | ENCENDIDO TOTAL | 100% |
|----|-----------------|------|
| EA | ENCENDIDO ALTO  | 80%  |
| EM | ENCENDIDO MEDIO | 60%  |
| EB | ENCENDIDO BAJO  | 40%  |
| AB | APAGADO BAJO    | 20%  |
| A  | APAGADO         | 0%   |

Fuente: Elaboración propia.

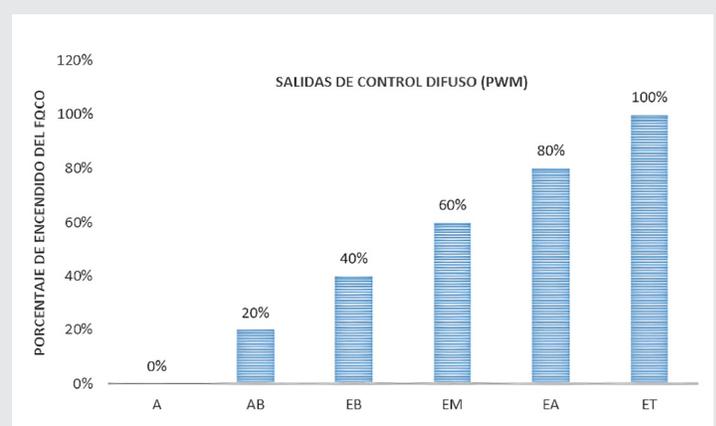


Figura 5. Salida del Control Difuso, ciclo de trabajo de señal PWM. Porcentaje de encendido del foco.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción de las salidas de control Difuso mediante funciones singleton:

Apagado (A)

$$\mu(u) = \begin{cases} 1, si u = 0 \\ 0, si u \neq 0 \end{cases} \quad \text{Ec. (10)}$$

Apagado Bajo (AB)

$$\mu(u) = \begin{cases} 1, si u = 20 \\ 0, si u \neq 20 \end{cases} \quad \text{Ec. (11)}$$

**Encendido Bajo (EB)**

$$\mu(u) = \begin{cases} 1, & \text{si } u = 40 \\ 0, & \text{si } u \neq 40 \end{cases} \quad \text{Ec. (12)}$$

**Encendido Medio (EM)**

$$\mu(u) = \begin{cases} 1, & \text{si } u = 60 \\ 0, & \text{si } u \neq 60 \end{cases} \quad \text{Ec. (13)}$$

**Encendido Alto (EA)**

$$\mu(u) = \begin{cases} 1, & \text{si } u = 80 \\ 0, & \text{si } u \neq 80 \end{cases} \quad \text{Ec. (14)}$$

**Encendido Total (ET)**

$$\mu(u) = \begin{cases} 1, & \text{si } u = 100 \\ 0, & \text{si } u \neq 100 \end{cases} \quad \text{Ec. (15)}$$

Aplicando el método COM para la Desdifusión, a partir de los máximos de la Derivada del Error y Error de la temperatura, mediante la expresión:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(ui) * ui}{\sum_{i=1}^n \mu(ui)} \quad \text{Ec. (16)}$$

Nos arroja el valor Z que representa el porcentaje de encendido del foco (señal PWM o ciclo de trabajo).

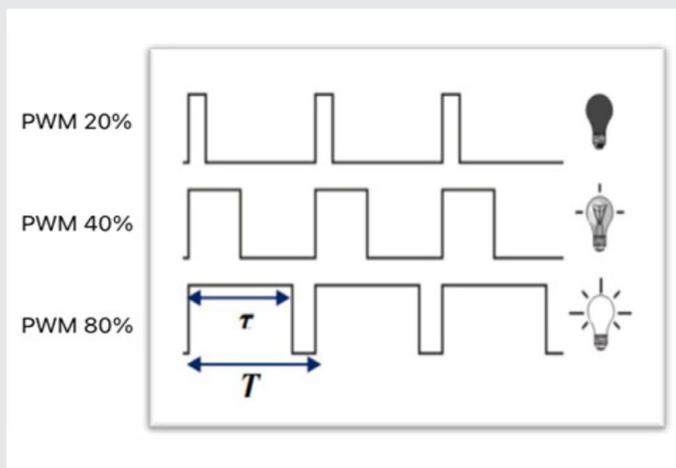


Figura 6. Modulación de ancho de pulso.  
Fuente: Elaboración propia.

El PWM o Modulación por ancho de pulso es una técnica para modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica, véase Figura 6. Para controlar la cantidad de energía que se manda al foco.

El ciclo de trabajo D esta dado por la expresión.

$$D = \frac{\tau}{T} \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde  $\tau$  es la duración donde el pulso está en alto y  $T$  es el periodo del pulso.

**RESULTADOS**

Al aplicar el Método de Centros Máximos (COM), se obtiene la siguiente tabla que muestra la salida Z de la ecuación que representa el porcentaje promedio de encendido del foco para cada rango de temperatura medida en grados centígrados en el interior de la incubadora (véase la ecuación 16). Se puede apreciar que, para una temperatura menor de 26 grados, el foco deben estar encendidos al 100% para elevar la temperatura y para temperaturas mayores de 44 grados, el foco debe estar apagado para bajar la temperatura véase la Tabla 3.

Tabla 3. Valores para el encendido de la bombilla.

| Descripción  | Temperatura (T)                                      | Valor Z  |
|--------------|--|----------|
| Muy caliente | $T > 44^{\circ} \text{ c}$                           | 0%       |
| Caliente     | $38^{\circ} \text{ c} < T \leq 44^{\circ} \text{ c}$ | 20%-15%  |
| Idónea       | $32^{\circ} \text{ c} < T \leq 38^{\circ} \text{ c}$ | 80%-40%  |
| Fría         | $26^{\circ} \text{ c} < T \leq 32^{\circ} \text{ c}$ | 100%-85% |
| Muy Fría     | $T \leq 26^{\circ} \text{ c}$                        | 100%     |

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 muestra que, para una temperatura monitoreada de 37 grados centígrados (idónea), la bombilla debe estar encendida en un 40%, para mantener la temperatura.

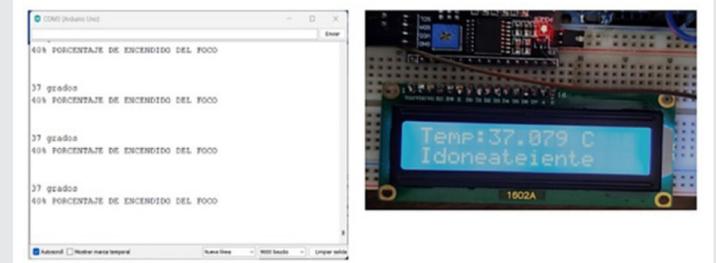


Figura 7. Al lado izquierdo, medición de temperatura y el porcentaje de encendido de la bombilla. Al lado derecho, su visualización en la pantalla LCD.

Fuente: Elaboración propia.

**CONCLUSIONES**

Se construyó un prototipo a partir de una caja de forma rectangular, acondicionada con un sistema de control de temperatura basado en lógica difusa; para el cual se investigaron los materiales para la fabricación, los dispositivos electrónicos, el lenguaje de programación del microcontrolador de Arduino Uno. También las entradas de este control como son los sensores analógicos de temperatura y la salida con su fase de potencia para la variación de la intensidad del foco.

Sin embargo, el prototipo presenta algunas limitaciones que necesitan ser consideradas en el futuro, tal como la influencia de otras variables que no fueron tomadas en cuenta y que aumentarían la exactitud del modelo construido con lógica difusa.

En lo posterior, se pretende implementar un controlador PID (Proporcional Integral, Derivativo), y emplear un puente H, para ajustar la cantidad de potencia en la carga, proporcionando un control más eficiente.

También se pretende remplazar algunos dispositivos para hacer mejoras al proceso de control, como son, una sonda de humedad y temperatura, una resistencia eléctrica industrial, y un inyector de ozono desinfectante. Por otra parte, retomar la idea de Sanjaya et al. [9] y mejorar la comunicación a través de un mecanismo de monitoreo remoto.

Finalmente, como trabajo a mediano plazo, dar continuidad a la implementación del control de humedad, así como el cambio de posición del huevo.

## AGRADECIMIENTOS

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatecas Norte.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Boleli, I., Morita, V., Matos Jr, J., Thimotheo, M., & Almeida, V. (2016). *Poultry Egg Incubation: Integrating and Optimizing Production Efficiency*. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*, 18(2), 1-16.

[2] Ramos, J. M. P., & Cedeño, E. A. L. (2020). *Estudio de las tecnologías de control utilizadas en las incubadoras avícolas*. *E-IDEA Journal of Engineering Science*, 2(4), 13-23.

[3] Auliafitri, D., RizkySuro, E., Kurniawan, T., Darmawan, M. D. M., Nurfadillah, F., & Octavia, N. (2024). *Chicken Egg Hatching Optimization with Automatic Control Using Fuzzy Logic*. *Journal of Applied Science, Technology & Humanities*, 1(3), 174-186.

[4] Aldair, A. A., Rashid, A. T., & Mokayef, M. (2018). *Design and implementation of intelligent control system for egg incubator based on IoT technology*. In *2018 4th International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE)* (pp. 49-54). IEEE.

[5] Okpagu, P. E., & Nwosu, A. W. (2016). *Development and temperature control of smart egg incubator system for various types of egg*. *European Journal of Engineering and Technology*, 4(2).

[6] Canaza, F. I. E. (2019). *Construcción y evaluación del funcionamiento de un prototipo de incubadora para usos múltiples*, Chachapoyas, 2018. *Revista científica UNTRM: Ciencias Naturales e ingeniería*, 2(1), 26-32.

[7] Medina, M. A. P. L., Saba, M. G. H., de Guevara Durán, M. E. L., & Silva, M. J. H. (2011). *Con-*

*troladores PID y controladores difusos*. *Revista de ingeniería industrial*, 5(1).

[8] Ferreyra, A., & Fuentes, R. (2012). *Estudio comparativo entre control PID y difuso*. In *Memorias, XV Congreso Nacional de Instrumentación*. Ciudad de México, México (pp. 1-6).

[9] Sanjaya, W. M., Maryanti, S., Wardoyo, C., Anggraeni, D., Aziz, M. A., Marlina, L., ... & Kusumorini, A. (2018, March). *The development of quail eggs smart incubator for hatching system based on microcontroller and Internet of Things (IoT)*. In *2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)* (pp. 407-411). IEEE.



Ingeniantes®