

CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA • ISSN 2007-0411



Dr. Daniel Constandse Cortez
RECTOR

Dr. Salvador David Nava Martínez
SECRETARIO GENERAL

Mtra. Guadalupe Gaytán Aguirre
SECRETARIA ACADÉMICA

Dr. Erwin Adán Martínez Gómez
DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Mtra. Mayola Renova
COORDINADORA GENERAL EDITORIAL Y DE PUBLICACIONES

Dr. Manuel Antonio Ramos Murillo
EDITOR EN JEFE DE CULCYT

Comité Editorial

Dr. Manuel Antonio Ramos Murillo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Editor en Jefe

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

Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Dra. Klavdia Oleschko Lutkova
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Abdiel Ramírez Reyes
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dra. Santos Adriana Martel Estrada
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Cortés Sáenz
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Ortega Gaucín
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

CULCYT se fundó en diciembre de 2003 como parte del programa para la formación de investigadores del Instituto de Ingeniería y Tecnología. Lanzó su primer número en abril de 2004. Fundador: Dr. Victoriano Garza Almanza.

CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Volumen 23, número 2, mayo-agosto 2026, es una publicación académica, editada de manera cuatrimestral por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología.

D.R. © UACJ, Avenida del Charro núm. 619 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Editor responsable: Dr. Manuel Antonio Ramos Murillo

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

ISSN (electrónico): 2007-0411.

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

DOI: [10.20983/culcyt.2026.2](https://doi.org/10.20983/culcyt.2026.2)

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

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

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

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

o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ

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



UACJ |  Repositorio Institucional

Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

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

Información para autores:

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

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



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE CIUDAD JUÁREZ

latindex

ADMITIDA EN EL SISTEMA NACIONAL
DE PUBLICACIONES CIENTÍFICAS Y
HUMANÍSTICAS DE SECIHTI

 Dialnet

Artículos de investigación
Research articles

Aplicación de programación entera binaria para el balanceo de un proceso productivo automotriz **5**

Application of Binary Integer Programming for the Balancing of an Automotive Production Process

Antonio Alejandro Morales Velasco, Luis Alberto Rodríguez-Picón, Karla Gabriela Gómez Bull

Identificación algebraica de parámetros en un sistema térmico descrito por la ley de enfriamiento de Newton **16**

Algebraic Parameter Identification in a Thermal System Described by Newton's Law of Cooling

José Gabriel Mendoza Larios, Eduardo Barredo Hernández, Luis Vázquez Sánchez, Miguel Alberto Domínguez Gurriá, Demetrio Pérez Viguera

Agitación y producción de cefalosporina C en CSTR mediante simulación computacional **27**

Agitation and Cephalosporin C Production in CSTR via Computational Simulation

Esteban Ignacio Sánchez Cazarez, Roberto Domingo Mares Navarro

Edición Especial “Fronteras de la Ingeniería y Transformación Tecnológica”
Special Issue “Frontiers of Engineering and Technological Transformation”

Presentación **E1**

Foreword

Dr. Iván Juan Carlos Pérez Olguín, Dr. Luis Alberto Rodríguez Picón, Dr. Luis Asunción Pérez Domínguez, Dr. Javier Molina Salazar

Optimización sostenible de rutas para la gestión de desechos urbanos mediante la implementación del algoritmo Floyd-Warshall y métodos MCDM **E2**

Sustainable Optimization of Routes for Urban Waste Management through the Implementation of the Floyd–Warshall Algorithm and MCDM Methods

Uriel Angel Gómez Rivera, Johana Medina Zárate, Luis Carlos Méndez González, Iván Juan Carlos Pérez Olguín

Sistema inteligente de gestión de transporte para la optimización logística en rutas urbanas **E9**

Intelligent Transport Management System for Logistics Optimization in Urban Routes

Fausto Leyva Salazar, Iván Juan Carlos Pérez Olguín, Georgina Elizabeth Riosvelasco Monroy

Modelos de evaluación y adopción tecnológica: un análisis comparativo en contextos de tecnologías emergentes **E17**

Technology Assessment and Adoption Models: A Comparative Analysis in Emerging Technology Contexts

Beatriz Alvarado Robles, Víctor Manuel Alonso Mendoza, Francesco García, Alma G. Rodríguez

Relación entre el bienestar académico y el *burnout* en estudiantes de ingeniería **E23**

Relationship between Academic Well-Being and Burnout among Engineering Students

Karla Gabriela Gómez Bull, Alejandra Flores Sánchez, Margarita Portillo Reyes, Deysi Guadalupe Márquez Gayosso, David Atayde Campos

CIENCIA ABIERTA PARA TODOS

Impulsando el
CONOCIMIENTO
en **MÉXICO**



ACCESO ABIERTO
PARA TODA
LA COMUNIDAD



SIN FINES
DE LUCRO



DIFUSIÓN DEL
CONOCIMIENTO
CIENTÍFICO



COMPROMISO CON LA
CIENCIA, LAS HUMANI-
DADES Y LA SOCIEDAD



CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA
**RECONOCIDA EN EL SISTEMA NACIONAL DE
PUBLICACIONES CIENTÍFICAS Y HUMANÍSTICAS 2026**



Seguimos construyendo conocimiento
JUNTOS



<https://culcyt.uacj.mx>



culcyt@uacj.mx



@uacjoficial

Aplicación de programación entera binaria para el balanceo de un proceso productivo automotriz

Application of Binary Integer Programming for the Balancing of an Automotive Production Process

Antonio Alejandro Morales Velasco¹ , Luis Alberto Rodríguez-Picón¹  , Karla Gabriela Gómez Bull¹ 

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

RESUMEN

El balanceo de líneas permite distribuir actividades entre estaciones de trabajo considerando restricciones de tiempo y precedencia. Este estudio analiza el balanceo de un proceso de ensamble automotriz mediante la aplicación secuencial de métodos heurísticos y programación entera binaria. Se utilizó un caso de referencia compuesto por 33 actividades, con un contenido total de trabajo de 89.28 min y un *takt time* de 18.018 min. Inicialmente, el método del candidato más largo produjo una solución factible de seis estaciones, resultado que se utilizó para limitar el número de estaciones consideradas en la formulación binaria y reducir las variables de decisión de 1089 a 198. El modelo fue implementado en R y obtuvo igualmente una solución de seis estaciones con la misma asignación de actividades. Como análisis complementario, el método de Helgeson-Birnie también produce seis estaciones, aunque con diferencias parciales en la distribución de las actividades. Los resultados muestran que distintas estrategias de balanceo pueden converger al mismo número de estaciones y que una solución heurística inicial puede utilizarse para reducir el tamaño de la formulación binaria. Desde una perspectiva práctica, este enfoque puede apoyar la toma de decisiones en procesos de ensamble automotriz al facilitar la evaluación de configuraciones de estaciones de trabajo y la identificación de oportunidades para una utilización más equilibrada de los recursos productivos.

PALABRAS CLAVE: balanceo de línea; método heurístico; programación entera binaria; *takt time*; tiempo de ciclo.

ABSTRACT

Line balancing allows activities to be distributed among workstations while considering time and precedence constraints. This study analyzes the balancing of an automotive assembly process through the sequential application of heuristic methods and binary integer programming. A reference case consisting of 33 activities was used, with a total work content of 89.28 min and a *takt time* of 18.018 min. Initially, the longest candidate rule produced a feasible six-workstation solution, which was then used to limit the number of workstations considered in the binary formulation and reduce the number of decision variables from 1,089 to 198. The model was implemented in R and also produced a six-workstation solution with the same task assignment. As a complementary analysis, the Helgeson-Birnie method also resulted in six workstations, although with partial differences in task allocation. The results show that different balancing strategies may converge to the same number of workstations and that an initial heuristic solution can be used to reduce the size of the binary formulation. From a practical perspective, this approach can support decision-making in automotive assembly processes by facilitating the evaluation of workstation configurations and the identification of opportunities for a more balanced use of production resources.

KEYWORDS: line balancing; heuristic method; binary integer programming; *takt time*; cycle time.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Luis Alberto Rodríguez-Picón
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: luis.picon@uacj.mx

Fecha de recepción: 14 de abril de 2026. **Fecha de aceptación:** 20 de julio de 2026. **Fecha de publicación:** 21 de agosto de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la competitividad industrial exige que sus procesos de producción sean óptimos y balanceados para responder a la alta demanda del mercado. Sin embargo, una de las problemáticas actuales radica en que las líneas de producción y manufactura son ineficientes debido a la falta de equilibrio de tiempos, cuellos de botella, acumulación de inventario y procesos ineficientes, entre otros ^[1].

En este contexto, la industria automotriz constituye un sector particularmente relevante debido a sus altos volúmenes de producción y a la necesidad de mantener procesos de ensamble coordinados y eficientes. En México, durante 2024 se produjeron 3 989 403 vehículos ligeros, lo que representó un incremento de 5.56 % respecto al año anterior ^[2]. Este nivel de producción evidencia la importancia de disponer de herramientas que permitan analizar la asignación de actividades y el aprovechamiento de las estaciones de trabajo en procesos de manufactura caracterizados por altos volúmenes de operación.

Existen diversos estudios que destacan herramientas como Value Stream Mapping (VSM), utilizada para comprender el flujo de materiales a través de la cadena de suministro. Por otra parte, existen metodologías como Kaizen, que consisten en la mejora continua, mediante la cual se busca el mejor desempeño en el proceso. Asimismo, existen recursos como el SMED (Single Minute Exchange of Die) que busca reducir los tiempos de preparación y cambios de modelos, minimizando la carga y mejorando la sincronización del flujo productivo ^[3].

En este sentido, otro método importante para mejorar los indicadores de procesos productivos, así como la competitividad, consiste en el balanceo de líneas de ensamble. El balanceo de líneas es una técnica de ingeniería industrial cuyo propósito es contribuir en tareas de distintas estaciones de trabajo de las líneas de producción. Su principal objetivo es lograr que los tiempos se acerquen lo más posible al *takt time* (TT), evitar la presencia de tiempos muertos, así como la inactividad de equipos, por lo que el balanceo de líneas favorece un flujo de producción continuo, eficiente y en sincronía ^[4].

Una característica de este método es que depende en gran medida de las magnitudes y variaciones de los

tiempos de ciclo para un balanceo apropiado, dado que se busca que los tiempos totales de tareas asignadas a cada estación no excedan el tiempo del TT ^[5]. Un elemento esencial en el balanceo del proceso es la flexibilidad, dado que este proceso permite adaptarse a cambios, tanto de distribución de equipos como de demanda de producción ^[6]. En ocasiones se pueden presentar volúmenes altos de demanda; por lo tanto, se requiere que el proceso obtenga un equilibrio adecuado, procurando reducir los tiempos muertos al mínimo. Otro factor a tomar en cuenta es la asignación de diferentes tareas que se deben realizar respetando la precedencia lógica de cada estación hasta la última actividad del proceso ^[7].

Entre los beneficios importantes del método de balanceo de líneas está la reducción de cuellos de botella, lo que mejora significativamente la producción ^[8]. Se ha comprobado que la aplicación de herramientas de este tipo impulsa la productividad y mejora la capacidad de respuesta ante la demanda, al mismo tiempo que favorece un mejor control de costos ^[9]. Este método permite aumentar la producción sin necesidad de incrementar la mano de obra, además de facilitar una inversión más precisa en equipos de producción, basada en la optimización de recursos ^[10]. Por consiguiente, se permite un flujo continuo, lo cual a su vez reduce los inventarios en los procesos ^[11].

En este sentido, resulta relevante discutir métodos específicos de balanceo de líneas. Un método relevante es la programación lineal mixta, que consiste en reducir la cantidad de estaciones de ciclo mediante diversos algoritmos y número de estaciones con modelos matemáticos ^[12]. Este método genera soluciones óptimas que incorporan algunas restricciones, como costos, tiempos máximos y precedencias, entre otros ^[13]. Asimismo, otro método utilizado es la programación entera binaria, cuyo funcionamiento es que las líneas de ensamble se analicen de manera secuencial utilizando 1 y 0. Una ventaja es que la programación binaria permite la realización de variables con programación lineal con un enfoque computacional ^[14]. A continuación, se presentan algunos otros métodos:

Programación por restricciones. Este es un método que considera las precedencias. Si una estación termina y requiere una precedencia, entonces se hace un balanceo en donde se toman en cuenta tiempos lógicos y matemáticas simples. Con esta alternativa se busca obtener soluciones satisfactorias con todas las restricciones ^[15].

Enumeración exhaustiva. Con este método se evalúan todas las posibles combinaciones de estaciones de trabajo hasta encontrar la solución óptima, lo que garantiza un mejor balanceo ^[16].

Ramificación y acotación. En este método, del inglés Branch and Bound, se explora sistemáticamente el espacio de soluciones mediante la división del problema original en subproblemas o ramas. Para cada subproblema se calculan cotas que permiten determinar si la región correspondiente puede contener una solución mejor que la mejor solución factible encontrada hasta ese momento. Cuando una rama no puede mejorar dicha solución, se descarta, reduciendo así la cantidad de combinaciones que deben evaluarse ^[17].

Métodos de algoritmo heurístico. Están basados en el rango de compresión y un ejemplo de aplicación ha sido presentado por ^[18]. En este estudio heurístico, los autores proponen balancear líneas de ensamble en forma de U, que se basa en calcular el valor del rango integral, lo que permite a su vez asignar las estaciones respetando las precedencias y tiempos de ciclos con métodos de algoritmos que son significativamente más exactos en los cálculos. Por tanto, en este método se proponen estrategias para balancear líneas de ensamblajes bidireccionales y dinámicas, lo que permite minimizar el número de estaciones de trabajo para evitar la tasa de tiempo de inactividad de cada estación ^[19].

Dadas estas consideraciones, el objetivo de este trabajo es analizar el balanceo de una línea de producción a partir de sus tiempos de ciclo y relaciones de precedencia, mediante la aplicación de métodos heurísticos y programación entera binaria. Como caso de referencia, se consideran los datos del proceso de ensamble automotriz reportados por Saurabh y Salman ^[20]. En particular, del estudio original se toman las 33 actividades del proceso, sus tiempos de ciclo y las relaciones de precedencia. Estos datos se utilizan como caso de referencia para desarrollar y evaluar el esquema de balanceo propuesto.

A partir de esta información se propone una solución al balanceo del proceso considerando el método heurístico de candidato más largo y, después, la solución encontrada se toma en cuenta para reducir el número de variables de decisión en un esquema de optimización basado en programación entera binaria. De esta manera, la aportación del estudio se centra en utilizar la solución heurística inicial para acotar la formulación de

programación entera binaria y posteriormente analizar la correspondencia entre ambas soluciones.

II. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología utilizada para analizar el balanceo del proceso. El procedimiento se desarrolla en tres etapas principales: caracterización del caso de referencia, obtención de una solución inicial mediante el método heurístico del candidato más largo y formulación del problema mediante programación entera binaria. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos con ambos enfoques. La secuencia general del procedimiento se muestra en la [Figura 1](#).

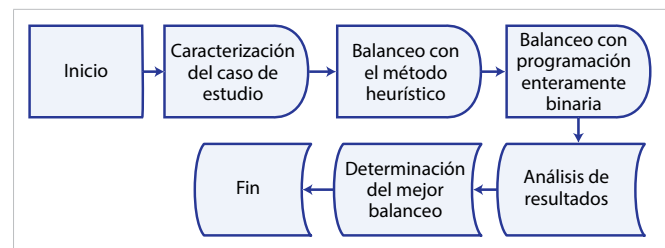


Figura 1. Diagrama del método propuesto.

A continuación, se describen los puntos que se desarrollan en esta metodología

1. **Caracterización del caso de estudio.** En este artículo se utilizaron los datos del proceso de ensamble automotriz publicados por Saurabh y Salman ^[20]. Del estudio original se tomaron las 33 actividades, los tiempos de ciclo y sus relaciones de precedencia. Por tanto, esta información abarca los datos de entrada para la aplicación de la estrategia de solución desarrollada en el presente trabajo. A partir de las relaciones de precedencia reportadas se estableció el diagrama correspondiente que fue utilizado tanto por el método heurístico como por el modelo de programación entera binaria.
2. **Balanceo con método heurístico.** Una vez establecido el diagrama de precedencias, se realizó el balanceo mediante el método del candidato más largo. Este procedimiento ordena las actividades de mayor a menor tiempo de operación y las asigna secuencialmente a las estaciones de trabajo, respetando las relaciones de precedencia y procurando que la carga total de cada estación no exceda el TT definido en [\(1\)](#). Cuando una actividad no puede ser asignada a la estación actual debido al límite de tiempo o a una

restricción de precedencia, se evalúa la siguiente actividad factible.

$$TT = \frac{\text{tiempo disponible}}{\text{demanda}} \quad (1)$$

En este método se ordenan las tareas con mayor a menor tiempo más largo al más pequeño. Se tiene que respetar las precedencias; hay tareas que tienen ciertas restricciones en la precedencia y otras no pueden iniciar hasta que las relaciones de precedencias se completen en dichas tareas.

El método heurístico se utiliza inicialmente para obtener una solución factible y establecer un límite superior para el número de estaciones del problema. Sea m_H el número de estaciones obtenido mediante el método del candidato más largo y m^* el número mínimo de estaciones. Debido a que la solución heurística satisface las restricciones de tiempo de ciclo y precedencia, se cumple $m^* \leq m_H$. Por otra parte, un límite inferior para el número de estaciones puede establecerse a partir del contenido total de trabajo como,

$$m_L = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{TT} \right\rceil$$

De esta manera, el número óptimo de estaciones se encuentra acotado por,

$$m_L \leq m^* \leq m_H$$

El límite superior m_H se utiliza para definir el número máximo de estaciones candidatas en el modelo de programación entera binaria. De esta manera, para n actividades, la formulación requiere como máximo $n \times m_H$ variables binarias, en lugar de considerar variables bajo el supuesto conservador de hasta una estación potencial por actividad. Por lo tanto, el método heurístico proporciona información para acotar su formulación.

3. Balanceo con programación entera binaria. En este paso se pretende balancear el proceso considerando programación entera binaria. Se consideró definir una función objetivo como en (2),

$$\text{mín: } Z = X_1 + 2X_2 + 3X_3 + \dots + kX_m \quad (2)$$

donde k indica el número de estaciones obtenidas en el paso 2 de la metodología propuesta, dado que esto permite reducir el número de variables de decisión. El

modelo considera cuatro tipos de restricciones: asignación, TT, precedencia y binariedad. A continuación, se presenta cada conjunto de restricciones. La primera de ellas, que es sobre la asignación de operaciones e implica que cada operación sea asignada solo una vez a una estación, tienen la forma que se presenta en (3):

$$X_1 + X_2 + \dots + X_k = 1 \quad (3)$$

Las siguientes restricciones son las de TT presentadas en (4), en las cuales se considerará que la suma de las operaciones asignadas a una estación no exceda el TT del proceso:

$$TC_1X_1 + TC_2X_2 + \dots + TC_kX_k \leq TT \quad (4)$$

donde TC_1 implica el tiempo de ciclo de la operación X_1 . El tercer conjunto de restricciones tiene que ver con las precedencias, en las cuales se asegura que una operación no sea asignada a una estación si sus precedencias no han sido asignadas anteriormente y tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} X_1 &\leq X_{1+k} \\ X_2 &\leq X_{1+k} + X_{2+k} \\ X_3 &\leq X_{1+k} + X_{2+k} + \dots + X_{m+k} \end{aligned}$$

Por último, la restricción que asegura que todas las variables de decisión sean variables binarias es $X_1, X_2, \dots, X_{m,k} = \text{binarias}(0,1)$, lo que implica que $X_i = 1$ cuando una actividad es asignada a una estación y $X_i = 0$ cuando la actividad no es asignada a la estación.

4. Análisis de resultados. El modelo de programación lineal entera binaria formulado en la etapa anterior fue implementado y resuelto mediante el lenguaje de programación R, utilizando RStudio Desktop como entorno de desarrollo integrado (IDE) y el paquete lpSolve para la solución del modelo. Se seleccionó lpSolve debido a que permite formular y resolver problemas de programación lineal entera y binaria dentro del entorno de R y sus capacidades resultan suficientes para el tamaño del problema analizado. En este caso, se tienen 198 variables binarias de decisión, además de las restricciones de asignación, *takt time* y precedencia.

Si bien solucionadores como Gurobi o CPLEX ofrecen capacidades computacionales avanzadas para problemas de mayor escala, dichas características no

son necesarias para la formulación en este estudio. Una vez obtenida la solución del modelo, se analizaron los valores de las variables de decisión y de la función objetivo, con el propósito de evaluar la solución obtenida.

- En esta etapa se evaluaron los resultados obtenidos mediante el método del candidato más largo y el modelo de programación entera binaria. Para ello, se compararon las soluciones considerando el número de estaciones de trabajo requeridas, la distribución de las tareas entre las estaciones y los tiempos de ocio resultantes. Esta comparación permitió determinar si la solución heurística alcanzó el número mínimo de estaciones establecido por el modelo exacto, así como identificar posibles mejoras en el balanceo de la línea. Asimismo, se analizó el efecto de utilizar la solución obtenida mediante el método del candidato más largo como límite superior para reducir el tamaño de la formulación del modelo de programación entera binaria y facilitar su proceso de solución.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente caso de referencia se basa en un proceso de la industria de automotriz, en donde se fabrican componentes de chapa metálica, con ensambles metálicos, como soldaduras y ensambles, y a la vez se monta en el chasis de la carrocería. Para evaluar la estrategia propuesta se utilizó el caso de referencia descrito anteriormente. La Figura 2 y la Tabla 1 presentan, respectivamente, las relaciones de precedencia y los tiempos de ciclo reportados para las 33 actividades del proceso. A partir de estos datos se desarrollaron en este trabajo dos etapas de solución: primera, el balanceo mediante el método heurístico del candidato más largo y, posteriormente, la formulación y solución del modelo de programación entera binaria.

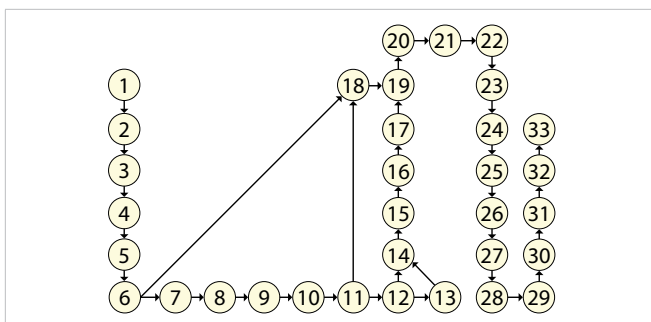


Figura 2. Diagrama de precedencias del caso de referencia, elaborado a partir de [20].

En la Tabla 1 se muestran los tiempos de ciclo de cada operación del proceso considerado, en la cual se puede ver la información relacionada a los elementos y precedencias de cada actividad.

TABLA 1
ACTIVIDADES, TIEMPOS DE CICLO Y RELACIONES DE PRECEDENCIA [20]

ACTIVIDAD	ELE- MENTOS	TIEMPO DE CICLO (min)	PRECE- DENCIA
Línea 1	1	2.46	---
Línea 2	2	2.58	1
Línea 3	3	3.15	2
Línea 4	4	2.37	3
Línea 5	5	3.2	4
Línea 6	6	2.03	5
Panel frontal	7	1.37	---
Geo de panel frontal	8	3.08	7
Mecanizado permanente puntual 1	9	2.5	8
Mecanizado permanente puntual 2	10	1.11	9
Accesorio de inversión 1	11	0.11	10
Panel lateral izquierdo	12	2.51	---
Panel lateral derecho	13	2.24	---
Mecanizado permanente puntual 1	14	1.15	12, 13
Mecanizado permanente puntual 2	15	1.1	14
Punto de fijado permanente	16	2.36	15
Accesorio de inversión 2	17	3.26	16
Línea principal 1	18	2.39	6,11
Línea principal 2	19	4.13	17, 18
Línea principal 3	20	3.18	19
Línea principal 4	21	4	20
Línea principal 5	22	3.47	21
Línea principal 6	23	3.32	22
Línea principal 7	24	3.1	23
Línea principal 8	25	2.37	24
Línea principal 9	26	2.33	25
Cubierta alta 1	27	2.39	26
Cubierta alta 2	28	2.3	27
Cubierta alta 3	29	2.38	28
Cubierta alta 4	30	2.1	29
Cubierta alta 5	31	3.24	30
Cubierta alta 6	32	2.53	31
Cubierta alta 7	33	9.47	32

En primera instancia se realizó un balanceo mediante el método heurístico de candidato más largo, para este

caso se consideró un TT de 18.018. Como resultado se obtuvo que el proceso se puede dividir en 6 respectivas estaciones, cada una respetando las precedencias del candidato más largo y sin exceder el TT, en total con

una suma de 89.28 minutos en total. Los resultados se muestran en la [Tabla 2](#). Mientras que en la [Figura 3](#) se presenta una ilustración del balanceo de las actividades por cada estación de trabajo.

TABLA 2
BALANCEO DEL PROCESO CON EL MÉTODO DEL CANDIDATO MÁS LARGO

ESTACIÓN	ACTIVIDAD	SUMA DE TIEMPOS	TC
1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	2.46 + 2.58 + 3.15 + 2.37 + 3.2 + 2.03 + 2.39	17.16
2	8, 9, 10, 11, 12, 18, 13, 14, 15	3.08 + 2.5 + 1.11 + 0.11 + 2.51 + 2.39 + 2.24 + 1.15 + 1.1	16.19
3	16, 17, 19, 20, 21	2.36 + 3.26 + 4.13 + 3.18 + 4	16.93
4	22, 23, 24, 25, 26, 27	3.47 + 3.32 + 3.1 + 2.37 + 2.33 + 2.39	16.98
5	28, 29, 30, 31, 32	2.3 + 2.38 + 2.1 + 3.24 + 2.53	12.55
6	33	9.47	9.47
Suma de tiempos			89.28

El balanceo obtenido a través método del candidato más largo resultó como se puede ver en la [Figura 3](#).

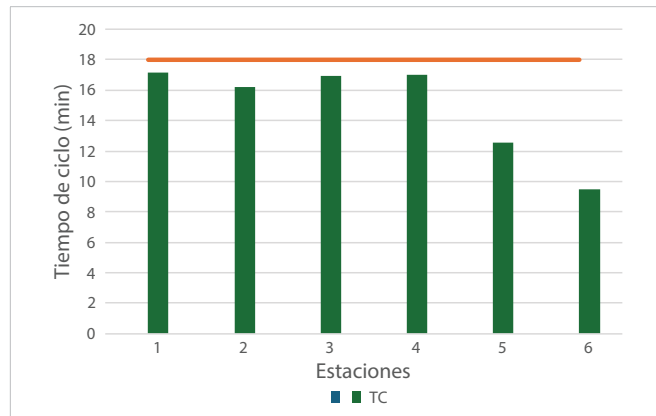


Figura 3. Tiempos de ciclo por estación.

El método del candidato más largo produjo una solución factible con seis estaciones, por lo que $m_H = 6$. Por otra parte, considerando el tiempo total de trabajo de 89.28 min y un TT de 18.018 min, el límite inferior resulta como $m_L = \lceil 89.28/18.018 \rceil = 5$.

Por ende, antes de aplicar el método exacto puede establecerse que $m_L \leq m^* \leq m_H$. La solución heurística permitió limitar la formulación exacta a un máximo de seis estaciones candidatas. Al considerar las 33 actividades del proceso, esto reduce el número de variables binarias potenciales de 1089 a 198, equivalente a una reducción de 81.82 %.

Una vez tomando esto en cuenta, se procedió a considerar el método exacto de programación entera binaria,

bajo las siguientes consideraciones: se tienen 33 (i) actividades, como se puede notar en la [Tabla 1](#), e inicialmente se considera una estación por actividad lo cual implica 33 (j) estaciones para un total de $33 \times 33 = 1089$ variables de decisión. Para este caso de estudio, dado que con el método del candidato más largo se obtuvieron 6 (j) estaciones, entonces se redujo el número de variables de decisión a $33 \times 6 = 198$. Por tanto, las variables de decisión están definidas como sigue:

$$X_{ij}: \left\{ \begin{array}{l} X_{1,1}, X_{1,2}, X_{1,3}, X_{1,4}, X_{1,5}, X_{1,6}, \\ X_{2,1}, X_{2,2}, X_{2,3}, X_{2,4}, X_{2,5}, X_{2,6}, \\ \vdots \\ X_{33,1}, X_{33,2}, X_{33,3}, X_{33,4}, X_{33,5}, X_{33,6} \end{array} \right\} \quad (5)$$

Dado que X_{ij} = binarias(0,1), cuando $X_{ij} = 1$ implica que la actividad i es asignada a la estación j , y cuando $X_{ij} = 0$ la actividad i no es asignada. En este sentido la función objetivo del problema de programación está definida de la siguiente manera:

$$\text{mín: } Z = X_{1,1} + 2X_{1,2} + 3X_{1,3} + 4X_{1,4} + 5X_{1,5} + 6X_{1,6} + \\ X_{2,1} + 2X_{2,2} + 3X_{2,3} + 4X_{2,4} + 5X_{2,5} + 6X_{2,6} + \dots + \\ X_{33,1} + 2X_{33,2} + 3X_{33,3} + 4X_{33,4} + 5X_{33,5} + 6X_{33,6} \quad (6)$$

con lo cual se buscó minimizar Z , que representa el número de estaciones para el proceso. De igual manera se consideraron pesos posicionales 1, 2, ..., 6 para cada grupo $X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,6}$; $i = 1, 2, \dots, 33$ con la intención de procurar que cada operación sea asignada inmediatamente a la primera estación disponible y evitar, por ejemplo, que la primera operación sea asignada hasta una estación muy posterior.

Con base en el paso 4 del método propuesto, a continuación se desarrollaron las restricciones de asignación, las cuales resultaron de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4} + X_{1,5} + X_{1,6} &= 1 \\ X_{2,1} + X_{2,2} + X_{2,3} + X_{2,4} + X_{2,5} + X_{2,6} &= 1 \\ X_{3,1} + X_{3,2} + X_{3,3} + X_{3,4} + X_{3,5} + X_{3,6} &= 1 \\ &\vdots \\ X_{33,1} + X_{33,2} + X_{33,3} + X_{33,4} + X_{33,5} + X_{33,6} &= 1 \end{aligned}$$

Con estas se aseguró que cada operación fuera asignada solo una vez a cada estación para obtener un total de 33 restricciones de este tipo. A continuación, se muestran las restricciones relacionadas con el TT, en las cuales se tomó en cuenta los tiempos de ciclo de cada actividad de la [Tabla 1](#) y se buscó que la suma de los tiempos de ciclo de cada actividad que es asignada a las estaciones no excediera el tiempo de 18.018 minutos. Estas restricciones resultaron de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} 2.46X_{1,1} + 2.58X_{2,1} + 3.15X_{3,1} + \dots + 9.47X_{33,1} &\leq 18.018 \\ 2.46X_{1,2} + 2.58X_{2,2} + 3.15X_{3,2} + \dots + 9.47X_{33,2} &\leq 18.018 \\ 2.46X_{1,3} + 2.58X_{2,3} + 3.15X_{3,3} + \dots + 9.47X_{33,3} &\leq 18.018 \\ 2.46X_{1,4} + 2.58X_{2,4} + 3.15X_{3,4} + \dots + 9.47X_{33,4} &\leq 18.018 \\ 2.46X_{1,5} + 2.58X_{2,5} + 3.15X_{3,5} + \dots + 9.47X_{33,5} &\leq 18.018 \\ 2.46X_{1,6} + 2.58X_{2,6} + 3.15X_{3,6} + \dots + 9.47X_{33,6} &\leq 18.018 \end{aligned}$$

Por último, las restricciones de precedencias, en el diagrama de la [Figura 2](#) se tienen un total de 35 relaciones de precedencia y para cada una de ellas fue necesario definir un conjunto de restricciones de manera que se asegure que una actividad inicial se asigna primeramente antes de la actividad después de ella.

En este sentido, a continuación se presentan los conjuntos de restricciones para las primeras 5 relaciones de precedencia.

Restricciones para la precedencia entre la actividad 1 y 2:

$$\begin{aligned} X_{1,1} &\leq X_{2,1} + X_{2,2} + X_{2,3} + X_{2,4} + X_{2,5} + X_{2,6} \\ X_{1,2} &\leq X_{2,2} + X_{2,3} + X_{2,4} + X_{2,5} + X_{2,6} \\ X_{1,3} &\leq X_{2,3} + X_{2,4} + X_{2,5} + X_{2,6} \\ X_{1,4} &\leq X_{2,4} + X_{2,5} + X_{2,6} \\ X_{1,5} &\leq X_{2,5} + X_{2,6} \\ X_{1,6} &\leq X_{2,6} \end{aligned}$$

Restricciones para la precedencia entre la actividad 2 y 3:

$$\begin{aligned} X_{2,1} &\leq X_{3,1} + X_{3,2} + X_{3,3} + X_{3,4} + X_{3,5} + X_{3,6} \\ X_{2,2} &\leq X_{3,2} + X_{3,3} + X_{3,4} + X_{3,5} + X_{3,6} \\ X_{2,3} &\leq X_{3,3} + X_{3,4} + X_{3,5} + X_{3,6} \\ X_{2,4} &\leq X_{3,4} + X_{3,5} + X_{3,6} \\ X_{2,5} &\leq X_{3,5} + X_{3,6} \\ X_{2,6} &\leq X_{3,6} \end{aligned}$$

Restricciones para la precedencia entre la actividad 3 y 4:

$$\begin{aligned} X_{3,1} &\leq X_{4,1} + X_{4,2} + X_{4,3} + X_{4,4} + X_{4,5} + X_{4,6} \\ X_{3,2} &\leq X_{4,2} + X_{4,3} + X_{4,4} + X_{4,5} + X_{4,6} \\ X_{3,3} &\leq X_{4,3} + X_{4,4} + X_{4,5} + X_{4,6} \\ X_{3,4} &\leq X_{4,4} + X_{4,5} + X_{4,6} \\ X_{3,5} &\leq X_{4,5} + X_{4,6} \\ X_{3,6} &\leq X_{4,6} \end{aligned}$$

Restricciones para la precedencia entre la actividad 4 y 5:

$$\begin{aligned} X_{4,1} &\leq X_{5,1} + X_{5,2} + X_{5,3} + X_{5,4} + X_{5,5} + X_{5,6} \\ X_{4,2} &\leq X_{5,2} + X_{5,3} + X_{5,4} + X_{5,5} + X_{5,6} \\ X_{4,3} &\leq X_{5,3} + X_{5,4} + X_{5,5} + X_{5,6} \\ X_{4,4} &\leq X_{5,4} + X_{5,5} + X_{5,6} \\ X_{4,5} &\leq X_{5,5} + X_{5,6} \\ X_{4,6} &\leq X_{5,6} \end{aligned}$$

Restricciones para la precedencia entre la actividad 5 y 6:

$$\begin{aligned} X_{5,1} &\leq X_{6,1} + X_{6,2} + X_{6,3} + X_{6,4} + X_{6,5} + X_{6,6} \\ X_{5,2} &\leq X_{6,2} + X_{6,3} + X_{6,4} + X_{6,5} + X_{6,6} \\ X_{5,3} &\leq X_{6,3} + X_{6,4} + X_{6,5} + X_{6,6} \\ X_{5,4} &\leq X_{6,4} + X_{6,5} + X_{6,6} \\ X_{5,5} &\leq X_{6,5} + X_{6,6} \\ X_{5,6} &\leq X_{6,6} \end{aligned}$$

De esta manera se estableció las restricciones para el resto de las 30 relaciones de precedencia que se puede observar tanto en la [Figura 2](#) como en la [Tabla 1](#).

Si se considera que por cada relación de precedencia se tienen 6 restricciones, entonces se dispone de un total de $35 \times 6 = 210$ restricciones solo para las precedencias.

El problema de optimización descrito anteriormente se solucionó en el software R versión 4.5.1, considerando el paquete “lpSolve”. El código consiste en diferentes componentes que a continuación se describen.

En la parte 1 se declaran los coeficientes de la función objetivo de acuerdo con (6). De esta manera, la función resultó como sigue:

```
f.obj <- c(1,2,3,4,5,6,1,2,3,4,5,6,1,2,3,4,5,6,
..)
```

En la siguiente parte del código se consideraron los coeficientes de todas las restricciones del problema de optimización, tomando en cuenta las 6 restricciones de TT, las 210 de precedencias y las 33 de asignación. En general se conformó un arreglo de coeficientes en la siguiente función:

```
f.con <- matrix(c("Coeficientes de las
restricciones", nrow = 249, byrow = TRUE)
```

En las siguientes líneas de código se plantean las desigualdades de todas las restricciones, así como el lado derecho de las mismas, de la siguiente manera:

```
f.dir <- c("<=", "<=", ...)
f.rhs <- c(18.018, 18.018, ...)
```

Al final, el problema es resuelto a través de la siguiente función:

```
lp("min", f.obj, f.con, f.dir, f.rhs, int.vec
= 1:198, all.bin = TRUE, num.bin.solns=1)
```

Al final, el problema fue resuelto a través de la siguiente función:

```
lp("min", f.obj, f.con, f.dir, f.rhs, int.vec
= 1:198, all.bin = TRUE, num.bin.solns=1)
```

Note que se considera la función lp, la cual forma parte del paquete "lpSolve". Se indica el objetivo de minimizar, dado que se desea obtener el menor número posible de estaciones.

También se consideraron los elementos del problema de optimización descritos anteriormente como f.obj, f.con, f.dir, f.rhs.

Se declaró que todas las variables de decisión son enteras y binarias en int.vec = 1:198 y all.bin = TRUE, respectivamente. Al correr el código se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA 3
SOLUCIÓN OBTENIDA MEDIANTE PROGRAMACIÓN ENTERA BINARIA EN R

1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	1																		

Como se puede observar en la Tabla 3, el esquema de optimización arrojó que los resultados obtenidos son iguales al candidato más largo en la Tabla 2. Específicamente, el modelo de programación entera binaria obtuvo como solución óptima seis estaciones, por lo que $m^* = 6$. Este resultado permitió cerrar el intervalo establecido previamente $5 \leq m^* \leq 6$, y confirmó que la solución de seis estaciones obtenida mediante el candidato más largo alcanza el número mínimo de estaciones para las condiciones del caso analizado.

En consecuencia, la utilidad de la estrategia secuencial no radica en que el modelo exacto genere necesariamente una asignación diferente de la heurística, sino en utilizar una solución heurística factible para acotar la formulación y posteriormente verificar la optimalidad mediante programación entera binaria. En la Tabla 4 se presenta un resumen de las actividades y sus respectivos tiempos de ciclo. Al final de cada estación se muestra la suma de los tiempos de las actividades, por lo que se puede notar que ninguna excede el TT establecido.

TABLA 4
ASIGNACIÓN DE ACTIVIDADES POR ESTACIONES

ESTACIÓN											
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	2.46	8	3.08	16	2.36	22	3.47	28	2.3	33	9.47
2	2.58	9	2.5	17	3.26	23	3.32	29	2.38		
3	3.15	10	1.11	19	4.13	24	3.1	30	2.1		
4	2.37	11	0.11	20	3.18	25	2.37	31	3.24		
5	3.2	12	2.51	21	4	26	2.33	32	2.53		
6	2.03	13	2.24			27	2.39				
7	1.37	14	1.15								
		15	1.1								
		18	2.39								
17.16	16.19	16.93	16.98	12.55	9.47						

Los resultados de balanceo obtenidos deben interpretarse en función de las características del problema bajo estudio y no como evidencia de superioridad de alguno de los métodos. En el caso analizado, tanto el candidato más largo como Helgeson-Birnie y la programación entera binaria conducen a una solución de seis estaciones, aunque las dos estrategias heurísticas no producen exactamente la misma asignación de actividades (solución a través de Helgeson-Birnie reportada por [20]). El método de Helgeson-Birnie incorpora explícitamente la estructura de precedencias mediante el cálculo de pesos posicionales, por lo que puede generar prioridades de asignación diferentes a las del candidato más largo [21].

Por otra parte, la literatura reciente muestra que los problemas de balanceo de líneas han evolucionado hacia modelos con restricciones adicionales, múltiples objetivos y configuraciones productivas más complejas, lo que ha motivado el desarrollo de métodos híbridos, exactos y metaheurísticos [22]. En particular, los algoritmos genéticos han mostrado utilidad para explorar espacios de solución de gran tamaño y manejar restricciones industriales específicas, incluyendo aplicaciones recientes en líneas automotrices [23]. De manera similar, se han desarrollado algoritmos genéticos mejorados para problemas de balanceo con restricciones de recursos y configuraciones de dos lados [24].

En contraste, los modelos de programación entera permiten representar explícitamente las restricciones de asignación, tiempo de ciclo y precedencia, aunque el tamaño de la formulación puede incrementarse conforme crece el número de actividades y estaciones consideradas. En este sentido, los resultados del presente caso muestran que diferentes estrategias pueden converger al mismo número de estaciones, pero con estructuras de asignación distintas.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se llevó a cabo un balanceo de línea de ensamble sobre un caso de referencia correspondiente a un proceso de ensamble automotriz. Se consideró inicialmente un método heurístico para después llevar a cabo un esquema de optimización basado en programación entera binaria.

La aplicación inicial del método del candidato más largo permitió obtener una solución factible de seis esta-

ciones y, con ello, establecer un límite superior para la formulación exacta. En conjunto con el límite inferior de cinco estaciones obtenido a partir del tiempo total de trabajo y el TT, se estableció que la solución óptima debía encontrarse entre cinco y seis estaciones. El uso del límite superior heurístico permitió reducir la formulación de 1089 a 198 variables binarias, equivalente a una reducción del 81.82 %. Posteriormente, el modelo de programación entera binaria determinó un mínimo de seis estaciones, confirmando que la solución heurística alcanzaba el número mínimo de estaciones para las condiciones y restricciones del caso analizado.

El problema fue resuelto mediante programación entera binaria utilizando el software R, obteniéndose una solución de seis estaciones. Este resultado coincide con la solución obtenida previamente mediante el método heurístico del candidato más largo, lo que muestra que, para las condiciones del caso analizado, la solución heurística y la obtenida mediante el modelo exacto presentan el mismo número de estaciones y la misma asignación de actividades.

Por supuesto, las condiciones de balanceo dependen de múltiples factores, por ejemplo, la variación de los tiempos de ciclo de las estaciones (algunas con tiempos muy pequeños y otras con tiempos de ciclo muy grandes) y las relaciones de precedencia. En este caso se notó que la última actividad del proceso, llamada Cubierta ala 7, cubre más del 50 % del TT. Si resultara necesario mejorar aún más el balanceo del proceso, sería necesario reducir el tiempo de ciclo de esta última actividad. Para esto se pueden considerar diversas herramientas de manufactura esbelta, con la intención de reducir directamente el tiempo a través de la reducción de desperdicios y a través de la subdivisión de la actividad en múltiples operaciones con menores tiempos de ciclo.

Como trabajo futuro, se puede explorar la estrategia analizada en líneas de producción de mayor tamaño y con condiciones operativas más dinámicas, incluyendo variaciones en la demanda, tiempos de operación variables, líneas flexibles y configuraciones con múltiples productos. También sería pertinente comparar experimentalmente el desempeño de la formulación binaria con otros métodos heurísticos y metaheurísticos en términos de calidad de la solución, tiempo computacional y escalabilidad.

REFERENCIAS

- [1] E. I. Borja-Salinas, M. Ortuño-Delgado y L. Giraldo-Ceballos, “Prioridades competitivas en la producción: configuración en las industrias del Ecuador”, *Sinergia Académica*, vol. 7, n.º 4, pp. 621-633, oct. 2024, doi: [10.51736/8qt7yd90](https://doi.org/10.51736/8qt7yd90).
- [2] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Registro Administrativo de la Industria Automotriz de Vehículos Ligeros (RAIAVL)”, INEGI. [En línea]. Disponible: <https://www.inegi.org.mx/datosprimarios/iavl/>
- [3] J. A. Valdebenito, “Implementación de Lean Manufacturing y Metodologías de Mejora Continua: Adaptación de Estándares Globales para la Industria Nacional”, tesis de maestría, Universidad del Desarrollo, 2025. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.udd.cl/items/2c569ff9-acad-4b21-953a-d12f59759ea2>
- [4] L. C. Palacios, *Ingeniería de métodos movimientos y tiempos*. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2016.
- [5] J. P. Acevedo, “Aplicación de filosofía Lean Manufacturing para optimización de tiempo de ciclo en la industria textil”, tesis de maestría, ITESO, 2016. [En línea]. Disponible: <https://rei.iteso.mx/items/740d651c-6d10-446e-9809-de1523bde32b>
- [6] L. C. Arbós, *Procesos en flujo flexible Lean: Organización de la producción y dirección de operaciones*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- [7] R. Muñoz, “Técnicas de optimización para resolver un problema de programación de producción de una línea de ensamble”, tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, mar. 2018. [En línea]. Disponible: <https://redia.uanl.mx/Record/eprints-16373>
- [8] R. W. Man, D. Ning y T. H. Tin, “A Mixed-Integer Linear Programming (MILP) for Garment Line Balancing”, *IJSRMT*, vol. 4, n.º 2, 2025, doi: [10.5281/zenodo.14942910](https://zenodo.14942910).
- [9] E. G. Vaca, “Balanceo de líneas de producción para la optimización de los procesos productivos en la empresa Alonsso: análisis del proceso productivo de la empresa”, trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, jul. 2025. [En línea]. Disponible: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26836>
- [10] J. J. Pachay, “Costos de producción en la empresa ANAMACORP S.A., Cantón Salinas, Provincia de Santa Elena, año 2022”, trabajo de grado, jun. 2024, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador, 2024. Accedido: oct. 20, 2025. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/11639>
- [11] M. G. Céspedes y W. L. Alcazar, “Mejora continua del proceso de producción aplicando Lean Manufacturing para incrementar la tasa de producción real de una planta embotelladora de agua de mesa”, trabajo de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, nov. 2023. [En línea]. Disponible: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/entities/publication/16007fa9-824b-54e3-84ad-a6293406f286>
- [12] J. C. Seck-Tuoh-Mora, G. E. Anaya-Fuentes, N. Hernández-Romero, J. Medina-Marín, I. Barragan-Vite, and M. A. López-Cabrera, “Optimización de trabajadores y estaciones de trabajo en líneas de ensamble, mediante la adaptación de algoritmos genéticos”, *Inter disciplina*, vol. 12, n.º 33, pp. 59-83, 2024. doi: [10.22201/ceiich.24485705e.2024.33.88239](https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2024.33.88239).
- [13] J. H. Patterson y J. J. Albracht, “Technical Note—Assembly-Line Balancing: Zero-One Programming with Fibonacci Search”, *Oper. Res.*, vol. 23, n.º 1, pp. 166-172, feb. 1975, doi: [10.1287/opre.23.1.166](https://doi.org/10.1287/opre.23.1.166).
- [14] N. B. Camussi, “Métodos basados en ‘slots’ para la programación cíclica de líneas de ensamble multiproducto”, tesis doctoral, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 2018. Accedido: oct. 27, 2025. [En línea]. Disponible: <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/handle/11185/5459>
- [15] Y. Bukchin y T. Raviv, “Constraint programming for solving various assembly line balancing problems”, *Omega*, vol. 78, n.º C, pp. 57-68, jul. 2018, doi: [10.1016/J.OMEGA.2017.06.008](https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2017.06.008).
- [16] J. D. Mora y J. F. Torres, “Programación lineal entera mixta para el problema de balanceo de línea en U (UALBP-E) minimizando el costo de proceso de las tareas y maximizando la eficiencia de la línea”, tesis de maestría, Universidad de los Andes, 2015. Accedido: sept. 8, 2025. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/08fc9d30-11bb-4db3-b494-8eefc15d2115>

- [17] L. Huang *et al.*, “Branch and Bound in Mixed Integer Linear Programming Problems: A Survey of Techniques and Trends”, 2021, [arXiv:2111.06257](https://arxiv.org/abs/2111.06257)
- [18] Y. Jiao, N. Cao, J. Li, L. Li y X. Deng, “Balancing a U-Shaped Assembly Line with a Heuristic Algorithm Based on a Comprehensive Rank Value”, *Sustainability* 2022, vol. 14, n.º 2, p. 775, en. 2022, doi: [10.3390/su14020775](https://doi.org/10.3390/su14020775).
- [19] A. Scholl y S. Voß, “Simple assembly line balancing—Heuristic approaches”, *Heuristics*, vol. 2, pp. 217-244, 1997, doi: [10.1007/BF00127358](https://doi.org/10.1007/BF00127358).
- [20] P. Saurabh y M. Salman, “An experimental study on the automotive production line using assembly line balancing techniques”, *IJMET*, vol. 8, n.º 3, pp. 22-33, mar. 2017. [En línea]. Disponible: https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_8_ISSUE_3/IJMET_08_03_003.pdf
- [21] M. T. Çelik y S. Arslankaya, “Solution of the assembly line balancing problem using the rank positional weight method and Kilbridge and Wester heuristics method: An application in the cable industry”, *J. Eng. Res.*, vol. 11, n.º 3, pp. 182-191, 2023, doi: [10.1016/j.jer.2023.100082](https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100082).
- [22] O. Battaia y A. Dolgui, “Hybridizations in line balancing problems: A comprehensive review on new trends and formulations”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 250, p. 108673, 2022, doi: [10.1016/j.ijpe.2022.108673](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108673).
- [23] J. B. H. C. Didden, E. Lefebvre, I. J. B. F. Adan e I. W. F. Panhuijzen, “Genetic algorithm and decision support for assembly line balancing in the automotive industry”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 61, n.º 10, pp. 3377-3395, 2023, doi: [10.1080/00207543.2022.2081630](https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2081630).
- [24] L. Feng, Y. Wang, X. Fang, H. Yu y S. Zhang, “Two-sided resource-constrained assembly line balancing problem: A new mathematical model and an improved genetic algorithm”, *Swarm Evol. Comput.*, vol. 90, p. 101662, 2024, doi: [10.1016/j.swevo.2024.101662](https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101662).

Identificación algebraica de parámetros en un sistema térmico descrito por la ley de enfriamiento de Newton

Algebraic Parameter Identification in a Thermal System Described by Newton's Law of Cooling

José Gabriel Mendoza Larios¹ ✉ , Eduardo Barredo Hernández² , Luis Vázquez Sánchez³ , Miguel Alberto Domínguez Gurría⁴ , Demetrio Pérez Viguera¹ 

¹ Instituto de Ingeniería Industrial y Automotriz, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México

² Departamento de Ingeniería en Sistemas Automotrices, Universidad Politécnica de Tapachula, Tapachula - Puerto de San Benito, Chiapas, México

³ SECIHTI - Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México

⁴ División de Estudios de Posgrado, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México

RESUMEN

En este trabajo se propone implementar la técnica de identificación algebraica para desarrollar identificadores de los parámetros físicos de un sistema térmico gobernado por la ley de enfriamiento de Newton. Los identificadores algebraicos se derivan a partir del modelo dinámico del sistema térmico y se emplean para estimar el parámetro de enfriamiento k , la temperatura ambiente T_a y la temperatura inicial del cuerpo T_0 , utilizando únicamente la señal de temperatura en función del tiempo como dato de entrada. Los resultados obtenidos muestran que los identificadores algebraicos propuestos permiten determinar adecuadamente los parámetros físicos del sistema térmico, incluso en presencia de ruido en la señal de alimentación. Asimismo, se observa que el filtro invariante implementado favorece la convergencia del proceso de identificación cuando la señal de temperatura está afectada por ruido.

PALABRAS CLAVE: identificación algebraica; sistema térmico; ley de enfriamiento de Newton; estimación paramétrica; parámetros físicos.

ABSTRACT

This work presents the implementation of an algebraic identification technique to develop identifiers for the physical parameters of a thermal system governed by Newton's law of cooling. The algebraic identifiers are derived from the dynamic model of the thermal system and are used to estimate the cooling parameter k , the ambient temperature T_a , and the initial body temperature T_0 , using only the time-varying temperature signal as input. The results show that the proposed algebraic identifiers can accurately determine the physical parameters of the thermal system, even in the presence of input-signal noise. In addition, the implemented invariant filter enhances the convergence of the identification process when the temperature signal is corrupted by noise.

KEYWORDS: algebraic identification; thermal system; Newton's law of cooling; parameter estimation; physical parameters.

Correspondencia:

DESTINATARIO: José Gabriel Mendoza Larios

INSTITUCIÓN: Universidad Tecnológica de la Mixteca / Instituto de Ingeniería Industrial y Automotriz

DIRECCIÓN: Av. Dr. Modesto Seara Vázquez n.º 1, C. P. 69004, Acatlma, Heroica Ciudad de Huajuapán de León, Oax., México

CORREO ELECTRÓNICO: jgml@mixteco.utm.mx

Fecha de recepción: 25 de mayo de 2026. **Fecha de aceptación:** 10 de agosto de 2026. **Fecha de publicación:** 29 de agosto de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

La ley de enfriamiento de Newton es un modelo térmico que describe el enfriamiento de un cuerpo que intercambia calor con un ambiente a temperatura constante. En su forma clásica, establece una relación exponencial entre la temperatura del cuerpo y el tiempo de enfriamiento, lo cual resulta útil para determinar las propiedades térmicas de los materiales ^[1]. Por esta razón, conocer los parámetros físicos del sistema térmico resulta necesario para caracterizar completamente su comportamiento térmico.

Para determinar los parámetros desconocidos de un sistema dinámico, se puede utilizar una técnica de identificación. La identificación es el proceso mediante el cual se determinan las características o parámetros de un sistema a partir de datos medidos. En la literatura se pueden encontrar diversos enfoques para este propósito, abarcando desde teorías generales de estimación ^[2], ^[3], hasta técnicas específicas de identificación recursiva e integración numérica ^[4], ^[5]. Sin embargo, la mayoría de estos métodos son esencialmente asintóticos, recursivos o complejos, lo que impide su aplicación a sistemas más realistas.

Recientemente, Ševčík *et al.* emplearon técnicas de aprendizaje profundo para identificar la temperatura de unión en dispositivos semiconductores ^[6]. Wang *et al.* utilizaron los métodos de mínimos cuadrados e inferencia bayesiana para la estimación de parámetros desconocidos en el modelo de red térmica de un edificio con calefacción por suelo radiante ventilado ^[7]. Por su parte, Wang *et al.* proponen una metodología de identificación paramétrica basada en un algoritmo mejorado de polinización de flores para la determinación de los parámetros físicos de condensadores ^[8]. A su vez, Liu *et al.* identificaron parámetros térmicos de edificios residenciales que utilizan calefacción eléctrica en invierno mediante redes neuronales basadas en la física ^[9].

Por otro lado, existe en la literatura una técnica de identificación novedosa denominada técnica de identificación algebraica ^[10]. Esta técnica está fundamentada en los principios del álgebra diferencial y el cálculo operacional. Asimismo, se basa en el modelo matemático de un sistema para el desarrollo de modelos de identificación paramétrica totalmente independientes de las condiciones iniciales del sistema. La técnica de identificación algebraica se puede emplear para la estimación

de parámetros tanto en sistemas dinámicos lineales como en sistemas dinámicos no lineales. Además, esta técnica es atractiva en el ámbito científico debido a su rapidez de identificación y su robustez frente a dinámicas no modeladas, incertidumbres paramétricas y ruido aditivo de alta frecuencia.

La técnica de identificación algebraica ya se ha utilizado para identificar parámetros en diversos sistemas mecánicos, tales como estimación de parámetros de desbalance ^[11], ^[12], ^[13], identificación de coeficientes rotodinámicos de cojinetes ^[14], ^[15], estimación de parámetros físicos en sistemas rotodinámicos ^[16], identificación de parámetros de una suspensión con amortiguador regenerativo ^[17], y la determinación de parámetros térmicos en edificaciones ^[18], entre otros.

En comparación con otros métodos, la técnica de identificación algebraica permite estimar parámetros mediante expresiones explícitas y en intervalos de tiempo reducidos, sin requerir procesos iterativos de optimización. Métodos como mínimos cuadrados, inferencia bayesiana, aprendizaje profundo y redes neuronales también han mostrado buenos resultados en sistemas térmicos, aunque pueden requerir mayor cantidad de datos, etapas de entrenamiento o mayor costo computacional. Por ello, la identificación algebraica constituye una alternativa atractiva por su rapidez y fácil implementación, sin embargo, su desempeño depende de la validez del modelo matemático y puede verse afectado por el ruido.

En esta investigación se plantea aplicar la técnica de identificación algebraica con el fin de desarrollar identificadores que permitan estimar los parámetros físicos de un sistema térmico descrito por la ley de enfriamiento de Newton.

II. METODOLOGÍA

La metodología propuesta parte de la formulación del sistema térmico mediante la ley del enfriamiento de Newton. Posteriormente, se aplica la técnica de identificación algebraica con el propósito de obtener identificadores algebraicos para los parámetros físicos del sistema térmico. Una vez obtenidos, dichos identificadores se implementan computacionalmente y se evalúan mediante simulaciones con datos temporales de temperatura generados a partir de la solución exacta y de la solución numérica de la ley del enfriamiento de Newton. Finalmente, se analizan y discuten los resulta-

dos obtenidos, para después presentar las conclusiones derivadas de la investigación.

2.1. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático considerado se obtiene a partir de la ley de enfriamiento de Newton, que establece que la rapidez de cambio de la temperatura de un cuerpo es proporcional a la diferencia entre su temperatura instantánea y la temperatura del medio que lo rodea. Bajo esta consideración, el modelo dinámico del sistema térmico se expresa mediante la ecuación diferencial ordinaria [19] siguiente:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_a) \quad (1)$$

donde $T = T(t)$ representa la temperatura del cuerpo en función del tiempo, T_a es la temperatura ambiente y k es la constante de proporcionalidad conocida como parámetro de enfriamiento.

Bajo la hipótesis de sistemas térmicos concentrados [20], se asume que la temperatura interna del cuerpo permanece uniformemente distribuida en todo instante, por lo que se puede considerar que la temperatura de dicho cuerpo solo depende del tiempo $T(t)$. En consecuencia, el proceso de transferencia de calor puede describirse mediante una sola variable de estado. En este caso, la constante de proporcionalidad k se relaciona con los parámetros físicos del sistema a través de (2):

$$k = \frac{hA}{mc_p} \quad (2)$$

siendo h el coeficiente convectivo de transferencia de calor, A el área de intercambio térmico, m la masa del cuerpo y c_p el calor específico del material. Por lo tanto, k representa un parámetro global que integra tanto la capacidad del sistema para intercambiar calor con el entorno como su inercia térmica. Por otro lado, la ecuación diferencial asociada a la ley de enfriamiento de Newton tiene solución exacta y puede resolverse por distintos métodos, entre los que destacan la separación de variables, el método del factor integrante para ecuaciones lineales de primer orden y la transformada de Laplace. Al aplicar cualquiera de estos métodos es posible obtener la siguiente solución:

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt} \quad (3)$$

donde T_0 es la temperatura inicial del cuerpo.

2.2. IDENTIFICADOR ALGEBRAICO

Una vez establecido el modelo matemático del sistema térmico, se procede al desarrollo de los identificadores algebraicos que permiten estimar los parámetros físicos involucrados en la ley de enfriamiento de Newton. En este caso, k , T_a y T_0 son los parámetros del sistema a identificar.

Con el propósito de facilitar el desarrollo del esquema de identificación, la ley de enfriamiento de Newton se reescribe como sigue:

$$\dot{T} = -k(T - T_a) \quad (4)$$

La técnica de identificación algebraica puede implementarse tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia y, dado que la ecuación (4) es lineal, se pueden emplear ambos esquemas. En este trabajo, inicialmente se desarrollarán los identificadores de k y T_a en el dominio del tiempo.

Identificación algebraica de los parámetros k y T_a

Con el fin de desarrollar el identificador, se multiplica la ecuación (4) por $(t - t_0)$ y luego se integra el resultado una vez con respecto al tiempo t , obteniendo:

$$\int (t - t_0) \dot{T} = -k \int (t - t_0)(T - T_a) \quad (5)$$

Para desarrollar el lado izquierdo de la ecuación (5), se aplica el método de integración por partes $\int u dv = uv - \int v du$, definiendo $u = (t - t_0)$ y $dv = \dot{T} dt$, lo que resulta en:

$$\int (t - t_0) \dot{T} = (t - t_0)T - \int T \quad (6)$$

Al sustituir este resultado en la ecuación (5) y resolver la integral asociada al término constante T_a , se obtiene la ecuación (7), reagrupando en el lado izquierdo los términos que contienen los parámetros por identificar.

$$k \int (t - t_0)(T) - \frac{1}{2} k T_a (t - t_0)^2 = \int T - (t - t_0)(T) \quad (7)$$

La ecuación (7) contiene los parámetros k y T_a que se pretenden identificar; sin embargo, solo se dispone de una ecuación. Por ello, es necesario integrar una vez más la ecuación (7), con la finalidad de construir un sistema de ecuaciones lineales cuyo número de ecuaciones

sea igual al de parámetros por determinar. La ecuación resultante se expresa como sigue:

$$k \int (t - t_0)(T) - \frac{1}{6} k T_a (t - t_0)^3 = \int^{(2)} T - \int (t - t_0)(T) \quad (8)$$

donde las integrales presentes en las ecuaciones (7) y (8) son integrales iteradas en el tiempo t de esta forma:

$$\int_{t_0}^{(n)} (t - t_0)^i \varphi(t) = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{\sigma_1} \dots \int_{t_0}^{\sigma_{n-1}} (\sigma_n)^i \varphi(\sigma_n) d\sigma_n d\sigma_{n-1} \dots d\sigma_1$$

Además, $t_0 \geq 0$ representa el instante inicial de la ventana de observación y no puede tomar un valor negativo.

A continuación, a partir de las ecuaciones (7) y (8), puede formularse un sistema de ecuaciones simultáneas con dos incógnitas, cuya expresión queda dada por

$$Q(t)\theta = R(t) \quad (9)$$

donde $\theta = \{k, T_a\}^T$ es el vector de parámetros físicos del sistema térmico que se desea identificar, mientras que $Q(t)$ y $R(t)$ son matrices de dimensiones 2×2 y 2×1 , respectivamente, definidas por

$$Q(t) = \begin{bmatrix} q_{11}(t) & q_{12}(t) \\ q_{21}(t) & q_{22}(t) \end{bmatrix}, \quad R(t) = \begin{bmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \end{bmatrix}$$

Por último, al resolver el sistema de ecuaciones lineales (9) se obtienen los identificadores paramétricos que estiman los valores para k y T_a . Los identificadores propuestos se pueden representar como

$$\begin{cases} \hat{k} = \frac{\Delta_1(t)}{\det[Q(t)]} \\ \hat{T}_a = \frac{\Delta_2(t)}{\Delta_1(t)} \end{cases} \forall t \in (t_0, t_0 + \kappa) \quad (10)$$

Es pertinente destacar que tanto la matriz $Q(t)$ como el vector $R(t)$ dependen únicamente de la respuesta térmica del sistema, es decir, $T(t)$. Además, la identificabilidad algebraica del vector de parámetros $\{\theta\}$ queda garantizada siempre que se cumpla la condición de no singularidad de $Q(t)$, esto es, $\det[Q(t)] \neq 0$ [10].

Estudios previos han demostrado que esta condición se satisface en un intervalo temporal corto definido por $(t_0, t_0 + \kappa]$, con $\kappa > 0$ suficientemente pequeño. Por otro lado, la solución del sistema de ecuaciones se realizó utilizan-

do la regla de Cramer debido a que el sistema algebraico resultante es de dimensión 2×2 , lo que permite obtener expresiones cerradas para los identificadores y hacer explícita la condición de identificabilidad. Adicionalmente, los determinantes presentes en el identificador algebraico (10) se proporcionan en el [Apéndice](#).

Identificación algebraica del parámetro T_0

Con el fin de desarrollar el identificador algebraico de la temperatura inicial del cuerpo, T_0 , se retoma el modelo dinámico del sistema térmico dado por la ecuación (4) y, posteriormente, se aplica la transformada de Laplace, obteniendo la expresión en el dominio de la frecuencia:

$$sT(s) - T(0) = -kT(s) + \frac{kT_a}{s} \quad (11)$$

Como puede observarse en la ecuación (11), aparece el término $T(0)$, que representa la condición inicial del sistema, es decir, la temperatura inicial del cuerpo T_0 . Para determinar el identificador algebraico de T_0 , es necesario despejar el valor de $T(0)$ de la ecuación (11) y, posteriormente, dividir toda la expresión entre la variable s , obteniéndose

$$\frac{T(0)}{s} = T(s) + k \frac{T(s)}{s} - \frac{kT_a}{s^2} \quad (12)$$

Al aplicar la transformada inversa de Laplace a la ecuación (12), se regresa al dominio del tiempo. Por lo tanto, el identificador de T_0 queda definido a partir de

$$\hat{T}_0 = T(t) + k \int_{t_0}^t (T(\sigma) - T_a) d\sigma \quad \forall t \in (t_0, t_0 + \kappa) \quad (13)$$

2.3. FILTRO INVARIANTE

Para mejorar la implementación del identificador algebraico, se propone la incorporación de un filtro invariante [21]. Esta integración permite trabajar con señales más suaves y, al mismo tiempo, disminuir la influencia del ruido presente en la medición, en este caso de la temperatura. Este procedimiento no modifica los valores de los parámetros desconocidos por identificar, ya que el filtrado se realiza de manera uniforme sobre todo el sistema de ecuaciones algebraicas.

De acuerdo con [21], se pueden aplicar filtros invariantes a los identificadores algebraicos desarrollados en este trabajo, como se muestra a continuación:

$$\int_0^w Q(t)\theta = \int_0^w R(t), \quad t > \kappa > 0 \quad (14)$$

$$\int_0^w T_0 = \int_0^w \left[T(t) + k \int_{t_0}^t (T(\sigma) - T_a) d\sigma \right], \quad t > \kappa > 0 \quad (15)$$

donde w representa la cantidad de integrales anidadas necesarias para mitigar el efecto del ruido. En teoría, entre mayor sea el valor de w mejor será el desempeño del filtro invariante, sin embargo, tomar valores relativamente grandes para w tiene el efecto negativo de incrementar el costo computacional.

Si en las ecuaciones (14) y (15) se considera que el término w toma un valor de 1, los identificadores algebraicos con filtro invariante se pueden expresar de la siguiente forma

$$Q_f(t)\theta = R_f(t) \quad (16)$$

donde $\theta = \{k, T_a\}^T$ es el vector de parámetros a identificar. Por lo tanto, después de resolver el sistema de ecuaciones se obtienen los identificadores paramétricos:

$$\left. \begin{aligned} \hat{k} &= \frac{\Delta_3(t)}{\det[Q_f(t)]} \\ \hat{T}_a &= \frac{\Delta_4(t)}{\Delta_3(t)} \end{aligned} \right\} \forall t \in (t_0, t_0 + \kappa) \quad (17)$$

donde

$$Q_f(t) = \begin{bmatrix} q_{f11}(t) & q_{f12}(t) \\ q_{f21}(t) & q_{f22}(t) \end{bmatrix} \text{ y } R_f(t) = \begin{bmatrix} r_{f1}(t) \\ r_{f2}(t) \end{bmatrix}$$

Los determinantes y sus coeficientes se proporcionan en el apéndice.

Además,

$$\int T_0 = T_0 t = \int \left[T(t) + k \int_{t_0}^t (T(\sigma) - T_a) d\sigma \right]$$

Como resultado el estimador algebraico de T_0 se expresa como

$$\hat{T}_0 = \frac{\int T(t) + k \int_{t_0}^t (T(\sigma) - T_a) d\sigma}{t} \forall t \in (t_0, t_0 + \kappa) \quad (18)$$

En el apéndice se presentan los estimadores algebraicos correspondientes a la aplicación de un filtro invariante con $w = 2$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de los identificadores algebraicos se llevó a cabo a partir de datos temporales de temperatura generados tanto con la solución exacta como con la solución numérica del modelo térmico. Asimismo, se analizó el efecto del filtro invariante en los identificadores en presencia de ruido en la señal de temperatura.

3.1. VERIFICACIÓN ANALÍTICA DE LOS IDENTIFICADORES MEDIANTE LA SOLUCIÓN EXACTA

Dado que los estimadores algebraicos del vector de parámetros θ descritos en la Sección 2.2, dependen únicamente de la temperatura $T(t)$, en este primer caso se emplea la solución exacta de la ley de enfriamiento de Newton expresada mediante la ecuación (3) para evaluar dichos identificadores algebraicos. Después de sustituir $T(t)$ en la ecuación (10) y de realizar las operaciones correspondientes se obtienen los resultados para la estimación de k y T_a como sigue

$$\hat{k} = \frac{\Delta_1(t)}{\det[Q(t)]} = \frac{\frac{1}{6k^2}(T_0 - T_a)(k^2 t^2 + 4kt + 6)t^2 e^{-kt}}{\frac{1}{6k^3}(T_0 - T_a)(k^2 t^2 + 4kt + 6)t^2 e^{-kt}} = k$$

$$\hat{T}_a = \frac{\frac{1}{6k^2}T_a(T_0 - T_a)(k^2 t^2 + 4kt + 6)t^2 e^{-kt}}{\frac{1}{6k^3}(T_0 - T_a)(k^2 t^2 + 4kt + 6)t^2 e^{-kt}} = T_a$$

Por otro lado, la identificación de T_0 se lleva a cabo al sustituir $T(t)$ en la ecuación (13) y realizar el tratamiento matemático correspondiente

$$\hat{T}_0 = T(t) + k \int_{t_0=0}^t (T(\sigma) - T_a) d\sigma = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt} - (T_0 - T_a)(e^{-kt} - 1) = T_0$$

La sustitución de la solución exacta del modelo térmico en las expresiones de identificación conduce analíticamente a k , T_a y T_0 . Por lo tanto, este resultado constituye una verificación de consistencia matemática de los identificadores propuestos, ya que demuestra que, en ausencia de errores numéricos y perturbaciones, las expresiones desarrolladas recuperan exactamente los valores empleados en el modelo.

3.2. VERIFICACIÓN NUMÉRICA DE LOS IDENTIFICADORES

En este segundo caso, la evaluación del desempeño de los identificadores paramétricos se llevó a cabo toman-

do como datos de entrada el vector de temperaturas $\{T(t)\}$, obtenido a partir de la solución numérica de la ecuación (1) al considerar tres conjuntos de parámetros. En la [Tabla 1](#) se muestran los parámetros utilizados en las simulaciones de los identificadores, mientras que en la [Figura 1](#) se presentan las respuestas del sistema térmico empleadas como señal de entrada.

TABLA 1

PARÁMETROS FÍSICOS DEL SISTEMA TÉRMICO

PARÁMETROS	VALOR
k	$[0.02, 0.05, 0.08] \text{ s}^{-1}$
T_a	$[15, 25, 35] \text{ }^\circ\text{C}$
T_0	$[80, 100, 120] \text{ }^\circ\text{C}$

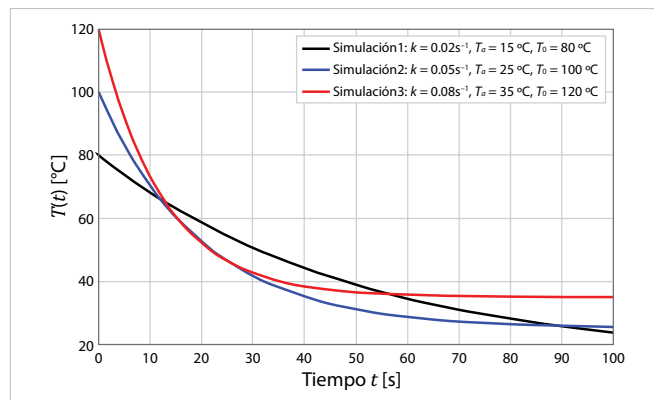


Figura 1. Respuestas del sistema térmico utilizadas como datos de entrada de los identificadores algebraicos.

En las [Figuras 2 a 4](#) se muestran los resultados de la evaluación de los identificadores algebraicos desarrollados para la determinación de los parámetros físicos del sistema térmico, k , T_a y T_0 , empleando como datos de entrada los valores numéricos $T(t)$ presentados en la [Figura 1](#).

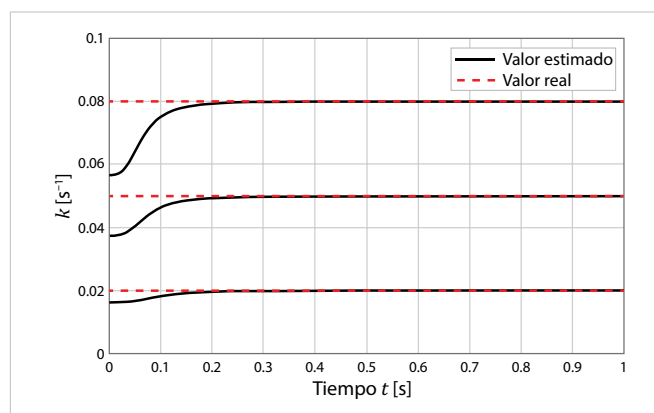


Figura 2. Identificación algebraica del parámetro de enfriamiento k .

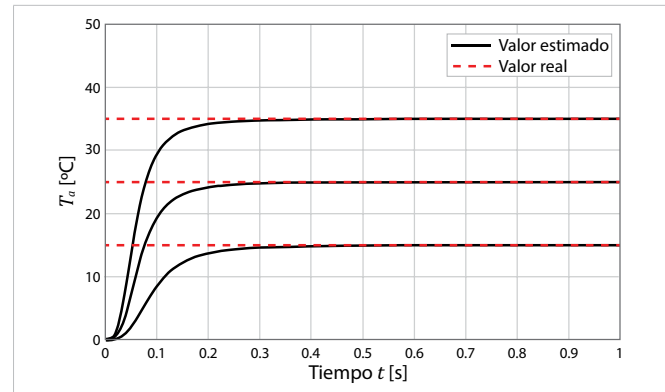


Figura 3. Identificación algebraica de la temperatura ambiente T_a .

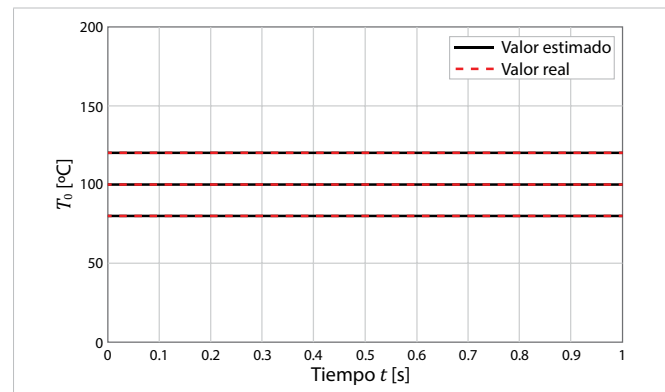


Figura 4. Identificación algebraica de la temperatura inicial del cuerpo T_0 .

Los resultados de la evaluación de los identificadores algebraicos propuestos muestran un desempeño favorable en la determinación de los parámetros físicos del sistema térmico. En las [Figuras 2 a 4](#) se observa la evolución temporal de los identificadores asociados a los parámetros del sistema k , T_a y T_0 , respectivamente. Asimismo, los parámetros del sistema son identificados en un tiempo menor a un segundo, lo que concuerda con los tiempos de identificación reportados en la literatura para aplicaciones de identificación algebraica.

3.3. EVALUACIÓN DE LOS IDENTIFICADORES EN PRESENCIA DE RUIDO ADITIVO

Se evaluó el desempeño de los identificadores algebraicos cuando la señal de temperatura empleada como dato de entrada se encuentra contaminada con ruido para evaluar la sensibilidad de los identificadores ante perturbaciones en la señal utilizada para la estimación. Para ello, se incorpora artificialmente ruido aditivo a la respuesta térmica, generando un escenario controlado que permite analizar el efecto de las perturbaciones de medición sobre la estimación paramétrica.

Para lo anterior, se considera una señal de temperatura contaminada con ruido la cual se define como

$$T_m(t) = T(t) + \eta(t) \quad (19)$$

donde $T_m(t)$ representa la respuesta del sistema térmico con ruido, mientras que $\eta(t)$ corresponde al término de ruido aditivo introducido artificialmente en la señal de temperatura.

A partir de la señal perturbada de temperatura, se aplican los identificadores algebraicos propuestos en este trabajo para la estimación de los parámetros físicos del sistema térmico k , T_a y T_0 . Adicionalmente, debido a la presencia de ruido en la señal de temperatura, se incorpora además el filtro invariante en los identificadores, con el fin de atenuar las componentes de alta frecuencia y mejorar el proceso de identificación.

Una de las señales de temperatura con ruido utilizada como datos de entrada para los identificadores algebraicos se muestra en la [Figura 5](#).

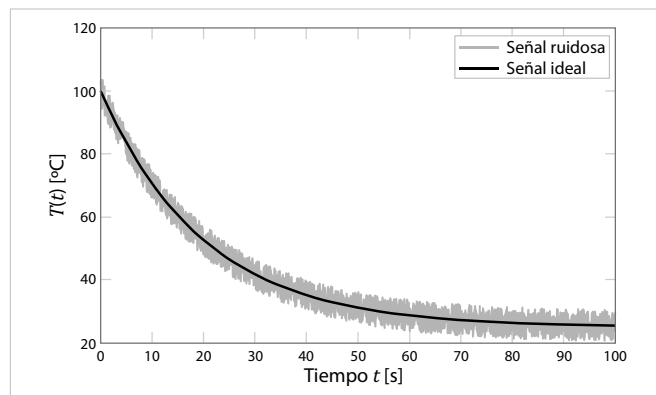


Figura 5. Respuesta del sistema térmico con ruido $\eta(t) \in [-5, 5]$.

En esta figura puede observarse que la perturbación introducida produce pequeñas oscilaciones sobre la tendencia exponencial característica del enfriamiento. Además, el ruido que se sumó a la señal de temperatura corresponde a un proceso estocástico de media cero. Asimismo, la señal artificial de ruido generada sigue una distribución uniforme dentro del intervalo seleccionado. Para el análisis de sensibilidad se consideraron tres niveles de ruido, $[-1, 1]$, $[-2.5, 2.5]$ y $[-5, 5]$, con el propósito de evaluar el comportamiento de los identificadores algebraicos ante diferentes intensidades de perturbación en la señal de entrada.

Adicionalmente, en la [Tabla 2](#) se muestran los valores de los parámetros físicos del sistema térmico utilizado.

TABLA 2

PARÁMETROS FÍSICOS DEL SISTEMA TÉRMICO Y NIVELES DE RUIDO

PARÁMETROS	VALOR
k	0.05 s^{-1}
T_a	$25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
T_0	$100 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$\eta(t)$	$[-1, 1], [-2.5, 2.5], [-5, 5] \text{ }^{\circ}\text{C}$

Por otro lado, en las [Figuras 6 a 8](#) se presenta de forma gráfica el desempeño de los identificadores algebraicos en la determinación de los parámetros físicos del sistema térmico k , T_a y T_0 , obtenidos a partir de la señal de temperatura con los tres niveles de ruido presentados en la [Tabla 2](#). Asimismo, los modelos de identificación con filtro invariante utilizados en este apartado son los presentados en las ecuaciones (14) y (15).

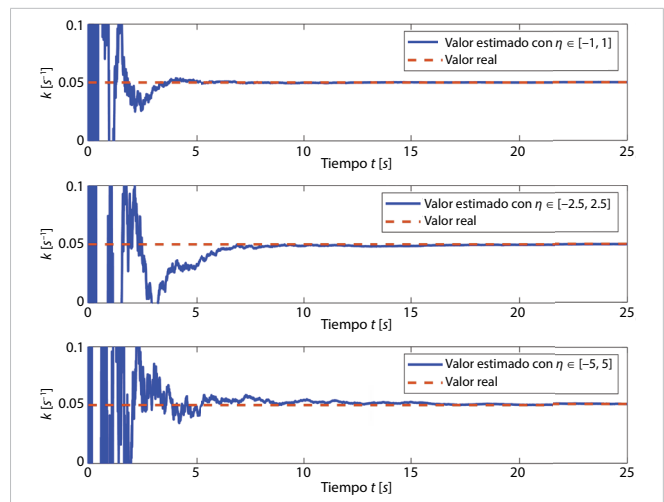


Figura 6. Identificación algebraica del parámetro de enfriamiento k a partir de la señal de temperatura con ruido $T_m(t)$

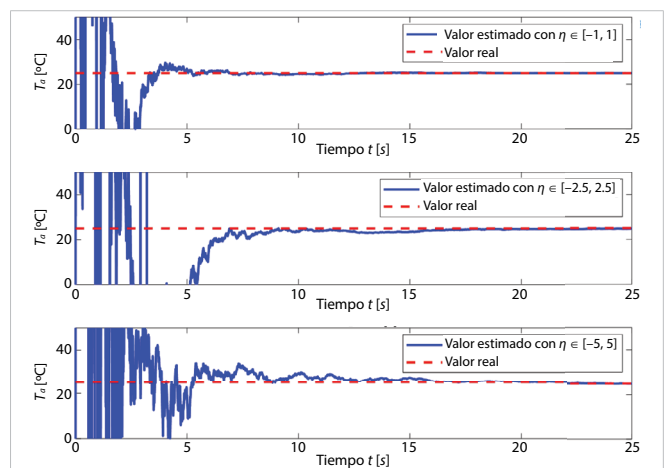


Figura 7. Identificación algebraica de la temperatura ambiente T_a a partir de la señal de temperatura con ruido $T_m(t)$

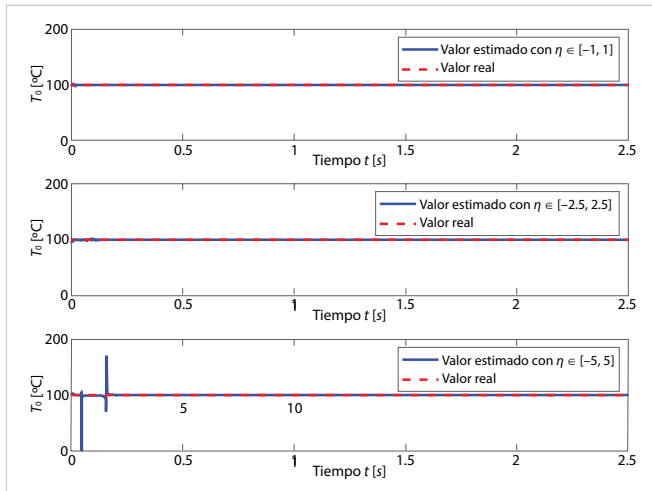


Figura 8. Identificación algebraica de la temperatura inicial del cuerpo T_0 a partir de la señal de temperatura con ruido $T_m(t)$.

En las Figuras 6 a 8 se observa que, a pesar de que la señal de temperatura que alimenta a los identificadores algebraicos contiene ruido, estos logran determinar los parámetros físicos del sistema. En comparación con los resultados obtenidos en ausencia de ruido, se observa que la inclusión de perturbaciones en la señal de entrada incrementa el tiempo necesario para identificar los parámetros del sistema k , T_a y T_0 . Mientras mayor sea la amplitud del ruido, mayor es el tiempo que requiere el identificador para alcanzar los valores reales de los parámetros.

Asimismo, los estimadores exhiben oscilaciones transitorias asociadas a la presencia de ruido y al comportamiento del sistema de identificación durante los primeros instantes de integración, cuando la matriz $Q(t)$ puede encontrarse próxima a una condición singular. Conforme avanza el proceso de identificación y se satisface la condición $\det[Q(t)] \neq 0$, se garantiza la identificabilidad algebraica de los parámetros y las estimaciones tienden hacia sus valores de referencia.

Por otro lado, en la Figura 9 se muestra el comportamiento de los identificadores algebraicos asociados al vector de parámetros θ del sistema térmico. En la simulación se emplearon los identificadores algebraicos sin la incorporación del filtro invariante y se añadió ruido aditivo a la señal de temperatura de entrada $T(t)$. Como puede observarse, la presencia de ruido afecta de manera significativa la estimación del parámetro de enfriamiento k y de la temperatura ambiente T_a , cuyos estimadores presentan oscilaciones de amplitud considerable durante los primeros instantes y disminuyen progresivamente

conforme avanza el tiempo. No obstante, aun después de 100 s de simulación, las estimaciones de k y T_a solo se aproximan a sus respectivos valores de referencia, sin alcanzar una coincidencia estable con ellos. En contraste, el estimador de la temperatura inicial T_0 presenta una menor sensibilidad al ruido y permanece próximo a su valor de referencia. Estos resultados permiten apreciar con mayor claridad la influencia del ruido sobre los identificadores algebraicos y justifican la incorporación del filtro invariante para mejorar el desempeño de la estimación paramétrica cuando la señal de entrada se encuentra contaminada con ruido.

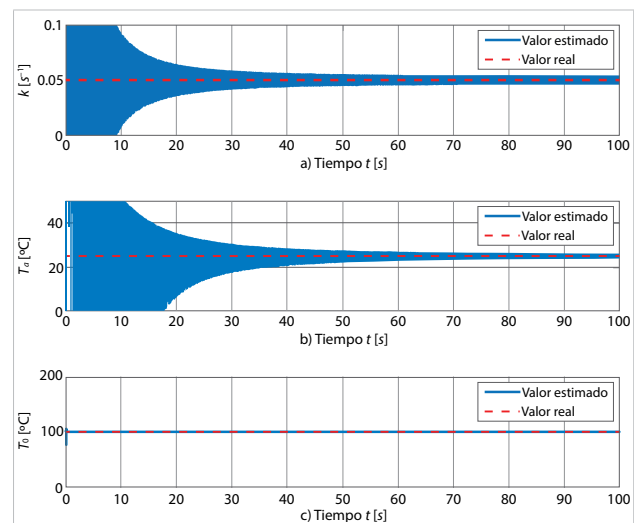


Figura 9. Identificación algebraica de los parámetros del sistema térmico sin filtro invariante y con un nivel de ruido de $\eta(t) = [-1, 1]$: a) parámetro de enfriamiento k , b) temperatura ambiente T_a y c) temperatura inicial T_0 .

Finalmente, en la Figura 10 se presenta el comportamiento de los estimadores algebraicos considerando filtros invariantes con $w = 1$ y $w = 2$. Los resultados muestran que, aunque ambos esquemas presentan oscilaciones durante los primeros instantes del proceso de identificación, el filtro con $w = 2$ atenúa con mayor rapidez dichas variaciones y permite que las estimaciones del parámetro de enfriamiento k y de la temperatura ambiente T_a alcancen sus respectivos valores de referencia en un menor intervalo de tiempo.

Por su parte, la estimación de la temperatura inicial T_0 presenta una rápida convergencia para ambos valores de w . Estos resultados indican que el incremento del número de integraciones del filtro puede mejorar la atenuación de las perturbaciones presentes en la señal de entrada y favorecer la convergencia de los estimadores.

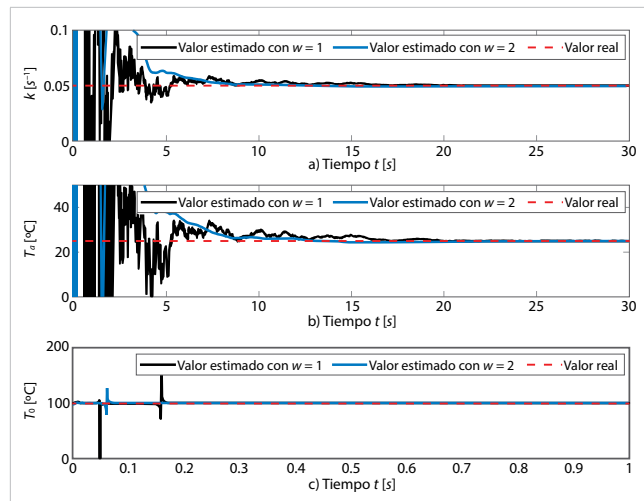


Figura 10. Identificación algebraica de los parámetros del sistema térmico con filtros invariantes $w = 1, 2$ y con un nivel de ruido de $\eta(t) = [-5, 5]$: a) parámetro de enfriamiento k , b) temperatura ambiente T_a y c) temperatura inicial T_0 .

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología basada en la técnica de identificación algebraica para determinar los parámetros físicos de un sistema térmico gobernado por la ley de enfriamiento de Newton. A partir del modelo dinámico del sistema y la técnica de identificación algebraica, fue posible formular estimadores algebraicos para determinar el vector de parámetros físicos del sistema θ , utilizando únicamente la señal de temperatura en función del tiempo $T(t)$.

Los resultados evidencian que el esquema algebraico propuesto estima con alta precisión y rapidez la dinámica paramétrica del sistema térmico. En particular, se observó que, los identificadores en ausencia de ruido en la señal de entrada convergen de manera adecuada hacia sus valores reales en tiempos reducidos. De hecho, los tres parámetros del sistema k , T_a y T_0 , se estimaron satisfactoriamente en menos de un segundo.

Por otro lado, se comprobó que los identificadores algebraicos con filtro invariante, pueden identificar los valores de los parámetros físicos del sistema térmico, aún con la presencia de ruido en la señal de temperatura de entrada. Aunque en estas condiciones el tiempo de identificación aumenta y los identificadores presentan un comportamiento más irregular antes de converger, los identificadores algebraicos desarrollados conservan la capacidad de determinar los parámetros del sistema. Asimismo, la incorporación del filtro invariante permi-

tió mejorar la robustez de los identificadores frente a perturbaciones en la señal de entrada debidas al ruido.

Por lo tanto, los resultados obtenidos permiten concluir que la identificación algebraica constituye una alternativa viable para la estimación de parámetros en sistemas térmicos gobernados por la ley de enfriamiento de Newton. Finalmente, esta metodología puede extenderse a modelos térmicos más complejos o a sistemas con parámetros variables en el tiempo.

Como trabajo futuro, se plantea validar experimentalmente los identificadores algebraicos desarrollados mediante la implementación de un banco de pruebas térmico cuyo comportamiento pueda aproximarse mediante la ley de enfriamiento de Newton. Para ello, se registrará la evolución temporal de la temperatura de un cuerpo sólido durante su proceso de enfriamiento, y la señal experimental $T(t)$ se utilizará como dato de entrada de los identificadores para estimar el parámetro de enfriamiento k , la temperatura ambiente T_a y la temperatura inicial T_0 . Las estimaciones obtenidas se compararán con valores de referencia determinados mediante mediciones con sensores de temperatura. Asimismo, se prevé realizar ensayos bajo diferentes temperaturas iniciales y condiciones ambientales con el propósito de evaluar la sensibilidad y robustez de los identificadores frente al ruido de medición, las dinámicas no modeladas y las incertidumbres propias del sistema térmico. Estos estudios permitirán evaluar el alcance práctico de la metodología propuesta y establecer sus limitaciones bajo condiciones experimentales.

REFERENCIAS

- [1] S. S. Sazhin, V. A. Gol'dshtein, M. R. Heikal, "A Transient Formulation of Newton's Cooling Law for Spherical Bodies", *J. Heat Transfer*, vol. 123, n.º 1, pp. 63-64, feb. 2001, doi: [10.1115/1.1337650](https://doi.org/10.1115/1.1337650).
- [2] L. Ljung, *Systems Identification: Theory for the User*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice-Hall, 1987.
- [3] T. Söderström y P. Stoica, *System Identification*. Nueva York: Prentice-Hall, 1989.
- [4] S. Sagara y Z.-Y. Zhao, "Recursive identification of transfer function matrix in continuous systems via linear integral filter", *Int. J. Control*, vol. 50, n.º 2, pp. 457-477, 1989, doi: [10.1080/00207178908953377](https://doi.org/10.1080/00207178908953377).

- [5] S. Sagara y Z.-Y. Zhao, "Numerical integration approach to on-line identification of continuous-time systems", *Automatica*, vol. 26, n.º 1, pp. 63-74, en. 1990, doi: [10.1016/0005-1098\(90\)90158-E](https://doi.org/10.1016/0005-1098(90)90158-E).
- [6] J. Ševčík, V. Šmídl y M. Votava, "Identification of Thermal Model Parameters Using Deep Learning Techniques", *2022 IEEE 31st International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Anchorage, AK, EUA, 2022, pp. 978-981, doi: [10.1109/ISIE51582.2022.9831641](https://doi.org/10.1109/ISIE51582.2022.9831641).
- [7] F. Wang, J. Guo, Y. Jiang y C. Sun, "Parameter identification framework of thermal network model for ventilated heating floor", *Energy and Buildings*, vol. 311, p. 114138, may. 2024, doi: [10.1016/j.enbuild.2024.114138](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114138).
- [8] G. Wang, M. Zhang, J. Huang, X. Liu, Q. Wang y D. Shen, "Parameter identification of condenser heat transfer model based on improved flower pollination algorithm", *Sci Rep*, vol. 15, p. 39310, nov. 2025, doi: [10.1038/s41598-025-23041-8](https://doi.org/10.1038/s41598-025-23041-8).
- [9] S. Liu, Q. An, Z. Yuan y P. Lei, "Physics-Informed Neural Networks for Parameter Identification of Equivalent Thermal Parameters in Residential Buildings During Winter Electric Heating", *Processes*, vol. 13, n.º 19, p. 2860, sept. 2025, doi: [10.3390/pr13092860](https://doi.org/10.3390/pr13092860).
- [10] M. Fliess y H. Sira-Ramírez, "An algebraic frame work for linear identification", *ESAIM: COCV*, vol. 9, pp. 151-168, feb. 2003, doi: [10.1051/cocv:2003008](https://doi.org/10.1051/cocv:2003008).
- [11] L. A. Baltazar-Tadeo et al., "An Integrated Balancing Method for Asymmetric Rotor-Bearing Systems: Algebraic Identification, Modal Balancing, and Active Balancing Disks", *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 11, n.º 2, pp. 619-645, jul. 2022, doi: [10.1007/s42417-022-00598-6](https://doi.org/10.1007/s42417-022-00598-6).
- [12] L. A. Baltazar-Tadeo, J. Colín-Ocampo, A. Abúndez-Pliego, J. G. Mendoza-Larios, E. Martínez-Rayón y A. García-Villalobos, "Balancing of Asymmetric Rotor-Bearing Systems Using Modal Masses Array Calculated by Algebraic Identification of Modal Unbalance", *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 12, n.º 3, pp. 4765-4788, oct. 2023, doi: [10.1007/s42417-023-01151-9](https://doi.org/10.1007/s42417-023-01151-9).
- [13] J. U. Quiroz-Bautista, M. Arias-Montiel, J. G. Mendoza-Larios y L. Vázquez-Sánchez, "Experimental implementation of algebraic identifier for unbalance parameters in a rotor-bearing system", *Front. Mech. Eng.*, vol. 11, art. 1553759, pp. 1-11, mar. 2025, doi: [10.3389/fmech.2025.1553759](https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1553759).
- [14] J. G. Mendoza-Larios et al., "An Algebraic Approach for Identification of Rotordynamic Parameters in Bearings with Linearized Force Coefficients", *Mathematics*, vol. 9, n.º 21, p. 2747, oct. 2021, doi: [10.3390/math9212747](https://doi.org/10.3390/math9212747).
- [15] S. J. Landa-Damas et al., "A simplified Model for the On-Line Identification of Bearing Direct-Dynamic Parameters Based on Algebraic Identification (AI)", *Mathematics*, vol. 11, n.º 14, p. 3131, jul. 2023, doi: [10.3390/math11143131](https://doi.org/10.3390/math11143131).
- [16] E. Barredo, J. G. Mendoza, L. A. Baltazar y S. J. Landa, "Identificación algebraica de los parámetros físicos de un sistema rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad", *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 21, n.º 1, pp. 4-12, feb. 2024, doi: [10.20983/culcyt.2024.1.2.1](https://doi.org/10.20983/culcyt.2024.1.2.1).
- [17] J. E. Martínez, M. A. Domínguez, J. G. Mendoza y E. Barredo, "Identificación paramétrica para un amortiguador regenerativo electromecánico", *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 23, n.º 1, pp. 5-17, mar. 2026, doi: [10.20983/culcyt.2026.1.2.1](https://doi.org/10.20983/culcyt.2026.1.2.1).
- [18] O. A. Hasan, H. Abouaissa y D. Defer, "On-line fast parametric estimation of building thermal behavior using algebraic methods", *2015 IEEE International Conference on Building Efficiency and Sustainable Technologies*, Singapur, 2015, pp. 5-10, doi: [10.1109/ICBEST.2015.7435856](https://doi.org/10.1109/ICBEST.2015.7435856).
- [19] P. Moreira y O. Ortega, "Ley de enfriamiento de Newton con temperatura variable", *Rev. Mex. Fis. E*, vol. 22, n.º 1 en.-jun., p. 010218, en. 2025, doi: [10.31349/RevMexFis.22.010218](https://doi.org/10.31349/RevMexFis.22.010218).
- [20] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones*, 6.ª ed. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2020.
- [21] C. Aguilar-Ibanez, J. Sanchez, M. S. Suárez y J. C. Martínez, "On the algebraic reconstruction of the Duffing's mechanical system", *Physics Letters A*, vol. 372, n.º 25, pp. 4569-4573, jun. 2008, doi: [10.1016/j.physleta.2008.04.047](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2008.04.047).

APÉNDICE

$$\Delta_1(t) = q_{22}(t)r_1(t) - q_{12}(t)r_2(t)$$

$$\Delta_2(t) = q_{11}(t)r_2(t) - q_{21}(t)r_1(t)$$

$$\det[Q(t)] = q_{11}(t)q_{22}(t) - q_{12}(t)q_{21}(t)$$

donde

$$q_{11}(t) = \int (t - t_0)(T)$$

$$q_{12}(t) = -\frac{1}{2}(t - t_0)^2$$

$$q_{21}(t) = \int^{(2)} (t - t_0)(T)$$

$$q_{22}(t) = -\frac{1}{6}(t - t_0)^3$$

$$r_1(t) = \int T - (t - t_0)(T)$$

$$r_2(t) = \int^{(2)} T - \int (t - t_0)(T)$$

Además,

$$\Delta_3(t) = q_{f_{22}}(t)r_{f_1}(t) - q_{f_{12}}(t)r_{f_2}(t)$$

$$\Delta_4(t) = q_{f_{11}}(t)r_{f_2}(t) - q_{f_{21}}(t)r_{f_1}(t)$$

$$\det[Q_f(t)] = q_{f_{11}}(t)q_{f_{22}}(t) - q_{f_{12}}(t)q_{f_{21}}(t)$$

donde

$$q_{f_{11}}(t) = \int^{(2)} (t - t_0)(T)$$

$$q_{f_{12}}(t) = -\frac{1}{6}(t - t_0)^3$$

$$q_{f_{21}}(t) = \int^{(3)} (t - t_0)(T)$$

$$q_{f_{22}}(t) = -\frac{1}{24}(t - t_0)^4$$

$$r_{f_1}(t) = \int^{(2)} T - \int (t - t_0)(T)$$

$$r_{f_2}(t) = \int^{(3)} T - \int^{(2)} (t - t_0)(T)$$

Identificadores con filtro invariante correspondiente a $w = 2$:

$$\int_{w=2} Q(t)\theta = \int_{w=2} R(t), \quad t > \kappa > 0$$

Esto genera el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Q_g(t)\theta = R_g(t)$$

En el sistema de ecuaciones $\theta = \{k, T_a\}^T$, representa el vector de parámetros a identificar. Por tanto, los estimadores algebraicos se expresan como:

$$\left. \begin{aligned} \hat{k} &= \frac{\Delta_5(t)}{\det[Q_g(t)]} \\ \hat{T}_a &= \frac{\Delta_6(t)}{\Delta_5(t)} \end{aligned} \right\} \forall t \in (t_0, t_0 + \kappa)$$

donde

$$Q_g(t) = \begin{bmatrix} q_{g_{11}}(t) & q_{g_{12}}(t) \\ q_{g_{21}}(t) & q_{g_{22}}(t) \end{bmatrix} \text{ y } R_g(t) = \begin{bmatrix} r_{g_1}(t) \\ r_{g_2}(t) \end{bmatrix}$$

$$\Delta_5(t) = q_{g_{22}}(t)r_{g_1}(t) - q_{g_{12}}(t)r_{g_2}(t)$$

$$\Delta_6(t) = q_{g_{11}}(t)r_{g_2}(t) - q_{g_{21}}(t)r_{g_1}(t)$$

$$\det[Q_g(t)] = q_{g_{11}}(t)q_{g_{22}}(t) - q_{g_{12}}(t)q_{g_{21}}(t)$$

Coefficientes de los determinantes

$$q_{g_{11}}(t) = \int^{(3)} (t - t_0)(T)$$

$$q_{g_{12}}(t) = -\frac{1}{24}(t - t_0)^4$$

$$q_{g_{21}}(t) = \int^{(4)} (t - t_0)(T)$$

$$q_{g_{22}}(t) = -\frac{1}{120}(t - t_0)^5$$

$$r_{g_1}(t) = \int^{(3)} T - \int^{(2)} (t - t_0)(T)$$

$$r_{g_2}(t) = \int^{(4)} T - \int^{(3)} (t - t_0)(T)$$

Adicionalmente,

$$\int_{w=2} T_0 = \int_{w=2} \left[T(t) + k \int_{t_0}^t (T(\sigma) - T_a) d\sigma \right]$$

dando como resultado el estimador algebraico para T_0 :

$$\hat{T}_0 = \frac{2 \left[\int^2 T(t) + k \int^3 (T(t) - T_a) \right]}{t^2} \Bigg\} \forall t \in (t_0, t_0 + \kappa)$$

Agitación y producción de cefalosporina C en CSTR mediante simulación computacional

Agitation and Cephalosporin C Production in CSTR via Computational Simulation

Esteban Ignacio Sánchez Cazarez¹ , Roberto Domingo Mares Navarro¹ 

¹ Maestría en Ingeniería de Procesos, Centro de Estudios Superiores Isla del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche, México

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo evaluar, mediante simulación computacional, el efecto de la velocidad de agitación sobre la producción de cefalosporina C (CPC) en un biorreactor continuo de tanque agitado. Se desarrolló un modelo en COPASI basado en las ecuaciones de Monod y Luedeking-Piret y se evaluaron cuatro escenarios de operación: 300, 400, 500 y 600 rpm, asociados con valores de kLa de 50, 80, 120 y 160 h^{-1} , respectivamente. Los resultados de simulación mostraron un incremento de la producción máxima de CPC de 31.45 a 36.00 g/L al aumentar la agitación de 300 a 600 rpm. La regresión polinomial de tercer orden presentó un ajuste alto dentro del intervalo estudiado ($R^2 = 0.9975$). No se aplicaron pruebas inferenciales sobre los 101 puntos temporales por corrida debido a que estos corresponden a una misma serie temporal determinística y no constituyen réplicas independientes. La principal limitación del estudio es la ausencia de validación experimental y la necesidad de calibrar experimentalmente los parámetros del modelo antes de su aplicación en procesos reales. La simulación se propone como herramienta exploratoria para orientar futuras pruebas experimentales.

PALABRAS CLAVE: cefalosporina C; COPASI; CSTR; fermentación; transferencia de oxígeno.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate, through computational simulation, the effect of agitation speed on cephalosporin C (CPC) production in a continuous stirred-tank bioreactor. A COPASI model based on Monod and Luedeking-Piret equations was developed and four operating scenarios were evaluated: 300, 400, 500, and 600 rpm, associated with kLa values of 50, 80, 120, and 160 h^{-1} , respectively. The simulated maximum CPC production increased from 31.45 to 36.00 g/L as agitation increased from 300 to 600 rpm. A third-order polynomial regression showed a high fit within the studied interval ($R^2 = 0.9975$). Inferential tests were not applied to the 101 time points per run because these points belong to the same deterministic time series and do not constitute independent replicates. The main limitations are the lack of experimental validation and the need to experimentally calibrate the model parameters before applying them to real processes. The simulation is presented as an exploratory tool to guide future experimental studies.

KEYWORDS: cephalosporin C; COPASI; CSTR; fermentation; oxygen transfer.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Esteban Ignacio Sánchez Cazarez
INSTITUCIÓN: Centro de Estudios Superiores Isla del Carmen /
Maestría en Ingeniería de Procesos
DIRECCIÓN: Calle 40 núm. 252 entre 31c y 33, col. Cuauhtémoc,
C. P. 24170, Ciudad del Carmen, Campeche, México
CORREO ELECTRÓNICO: 24mip007@cesic.edu.mx

Fecha de recepción: 26 de junio de 2026. **Fecha de aceptación:**
10 de agosto de 2026. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de
2026.



I. INTRODUCCIÓN

La cefalosporina C (CPC) es un metabolito secundario producido por *Acremonium chrysogenum* y constituye un precursor clave para la obtención semisintética del ácido 7-aminocefalosporánico, base de distintas generaciones de cefalosporinas [1], [2]. Su producción industrial depende de procesos fermentativos aerobios, en los cuales la disponibilidad de oxígeno, la morfología fúngica, el consumo de sustrato y el control de variables de operación influyen directamente en la productividad del sistema [3], [4]. La optimización de la producción de antibióticos β -lactámicos mantiene además relevancia en el contexto actual de resistencia antimicrobiana [5].

Los antecedentes recientes muestran que la optimización de la fermentación de CPC requiere controlar de forma conjunta la agitación, la aireación, el pH y las características fisiológicas del cultivo. Liu *et al.* [3] revisaron los avances en biosíntesis y optimización de la fermentación de CPC en *Acremonium chrysogenum*, mientras que trabajos experimentales más recientes han mostrado que el suministro de oxígeno, el pH y la agitación pueden modificar de manera importante la producción del antibiótico. En un fermentador de 14 L, Ibrahim *et al.* [6] reportaron una concentración máxima de 399.52 $\mu\text{g/mL}$ a 400 rpm, 1 vvm y pH controlado en 4. Asimismo, estudios de 2025 han profundizado en la relación entre el estado fisiológico del hongo, el oxígeno y la biosíntesis de CPC [7]. Estos antecedentes muestran que la variable de agitación no debe interpretarse de manera aislada y que los resultados de simulación requieren contraste con sistemas experimentales reales [3], [8], [6], [9], [10].

En biorreactores continuos de tanque agitado (CSTR), la velocidad de agitación regula la homogeneización del medio, la transferencia de oxígeno y las fuerzas de cizalla sobre el microorganismo. Una agitación insuficiente limita la transferencia de oxígeno y reduce la biosíntesis de metabolitos secundarios, mientras que una agitación excesiva puede incrementar el consumo energético y provocar estrés mecánico celular [11], [12]. Por ello, el ajuste de este parámetro representa un problema técnico relevante en bioprocesos farmacéuticos, ya que afecta simultáneamente la productividad, la eficiencia operativa y la viabilidad del cultivo.

A partir de este panorama, el interés del presente trabajo no se plantea como la introducción de un modelo ci-

nético nuevo, sino como la integración reproducible de un esquema cinético sencillo con simulación temporal en COPASI para explorar, bajo un conjunto definido de supuestos, cómo cambia la respuesta de CPC al variar la agitación y el kLa. Esta delimitación es importante porque los modelos de Monod y Luedeking-Piret son ampliamente conocidos y la simulación, por sí sola, no constituye una validación experimental. El valor del estudio reside en generar una referencia cuantitativa preliminar que pueda compararse con datos experimentales y utilizarse para diseñar posteriores ensayos de laboratorio.

La pregunta de investigación es la siguiente: ¿qué relación existe entre la velocidad de agitación y la concentración de cefalosporina C producida en un biorreactor tipo CSTR durante la fermentación aerobia de *Acremonium chrysogenum*?

En este contexto, el objetivo del presente artículo fue evaluar mediante simulación computacional la relación entre velocidad de agitación, transferencia de oxígeno y producción de cefalosporina C en un CSTR, identificando tendencias operativas dentro del intervalo de 300 a 600 rpm. La relevancia del estudio se limita a su carácter predictivo y exploratorio; los resultados no se consideran una demostración experimental de un intervalo óptimo, sino una hipótesis cuantitativa que debe validarse mediante fermentaciones independientes.

II. METODOLOGÍA

A. DISEÑO DEL ESTUDIO

Se realizó un estudio cuantitativo, aplicado y de alcance correlacional-explicativo, basado en simulación computacional. El sistema modelado correspondió a la fermentación aerobia de *Acremonium chrysogenum* para la producción de cefalosporina C en un CSTR. El análisis se delimitó al comportamiento teórico del proceso, sin ejecución de experimentos físicos; por tanto, los resultados se interpretaron como una aproximación predictiva útil para orientar pruebas de laboratorio y no como una validación experimental definitiva.

B. SIMULADOR EMPLEADO Y CONFIGURACIÓN GENERAL

Se utilizó COPASI como plataforma de simulación porque está orientado específicamente al modelado y análisis de sistemas bioquímicos y permite representar

especies, compartimentos, reacciones cinéticas y ecuaciones diferenciales, además de ejecutar simulaciones temporales y tareas de análisis. Esta orientación resulta pertinente para un modelo que integra crecimiento microbiano y formación de producto. A diferencia de plataformas generales de ingeniería de procesos, como Aspen Plus, o de entornos de modelado multipropósito, COPASI está diseñado para la simulación de redes bioquímicas y ofrece una interfaz accesible y reproducible para este tipo de modelos. Su elección se justifica metodológicamente por la naturaleza bioquímica del sistema y no únicamente por su disponibilidad gratuita [13], [14].

La configuración del modelo incluyó las especies principales del sistema: sustrato (S), biomasa (X), producto (P, cefalosporina C) y oxígeno disuelto (O). Para cada corrida se asignaron los parámetros cinéticos correspondientes, el valor de kLa asociado a la velocidad de agitación y las condiciones iniciales del proceso. Las simulaciones se ejecutaron bajo el mismo esquema numérico para asegurar comparabilidad entre escenarios, y posteriormente los resultados se exportaron para su depuración y análisis estadístico.

La implementación práctica se realizó mediante la tarea de simulación temporal (Time Course) en entorno determinista, con el método de integración LSODA (tolerancia absoluta de 10^{-6} y relativa de 10^{-3}). El sistema se representó en un compartimento único de 1 L con mezcla ideal y cuatro especies: sustrato (S), biomasa (X), producto (P) y oxígeno disuelto (O), expresadas en g/L. Las ecuaciones de Monod y Luedeking-Piret se codificaron en el motor de reacciones como funciones cinéticas definidas por el usuario, junto con el balance de oxígeno disuelto, que incluye el término de transferencia $kLa \cdot (C^* - O)$ y el consumo asociado a la biomasa. Cada corrida se simuló durante 120 h con un intervalo de muestreo de 1.2 h, lo que generó 101 puntos temporales por escenario, exportados en formato CSV para su análisis.

C. MODELO CINÉTICO Y CONDICIONES DE SIMULACIÓN

Para garantizar la reproducibilidad, en la [Tabla 1](#) se reportan los parámetros cinéticos y las condiciones iniciales empleados en las simulaciones.

El crecimiento microbiano se representó mediante el modelo de Monod y la formación de producto mediante el modelo de Luedeking-Piret. El modelo integró con-

sumo de sustrato, crecimiento de biomasa y producción de CPC, considerando temperatura de 26 °C, pH 6.5 y aireación de 1.0 vvm como condiciones constantes.

TABLA 1
ESCENARIOS OPERATIVOS EVALUADOS

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	Origen
Velocidad específica máxima	Mmax	0.25	h ⁻¹	Modelo COPASI
Constante de saturación	Ks	1	g/L	Modelo COPASI
Coefficiente asociado al crecimiento	A	0.3	g CPC/g biomasa	Modelo COPASI
Coefficiente no asociado al crecimiento	B	0.02	g CPC/(g biomasa·h)	Modelo COPASI
Sustrato inicial	S ₀	30	g/L	Modelo COPASI
Biomasa inicial	X ₀	0.5	g/L	Modelo COPASI
Producto inicial	P ₀	0	g/L	Modelo COPASI

Nota: los valores reportados corresponden a los parámetros y condiciones iniciales definidos en el modelo de COPASI empleado para las simulaciones. Dado que el estudio tiene carácter exploratorio, estos parámetros deberán ser calibrados experimentalmente antes de emplearse en escalamiento.

El efecto de la agitación se incorporó mediante el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno (kLa), de modo que cada escenario reflejara una condición distinta de disponibilidad de oxígeno. Las ecuaciones generales empleadas fueron:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{(K_s + S)} \quad (1)$$

$$dP/dt = \alpha(dX/dt) + \beta X \quad (2)$$

donde μ representa la tasa específica de crecimiento, S la concentración de sustrato, X la biomasa, P la concentración de Cefalosporina C (CPC), y α y β los parámetros asociados y no asociados al crecimiento, respectivamente.

Respecto al oxígeno disuelto, el balance se resolvió explícitamente en COPASI como una variable de estado adicional, con un término de transferencia dependiente de kLa y un término de consumo asociado a la biomasa. Bajo las condiciones simuladas, el oxígeno alcanza rápidamente un estado cuasi estacionario cercano al valor de saturación, por lo que su perfil permanece prácticamente constante ([Figura 1](#)).

Las diferencias cuasi estacionarias entre escenarios modulan el crecimiento y, en consecuencia, la formación de CPC.

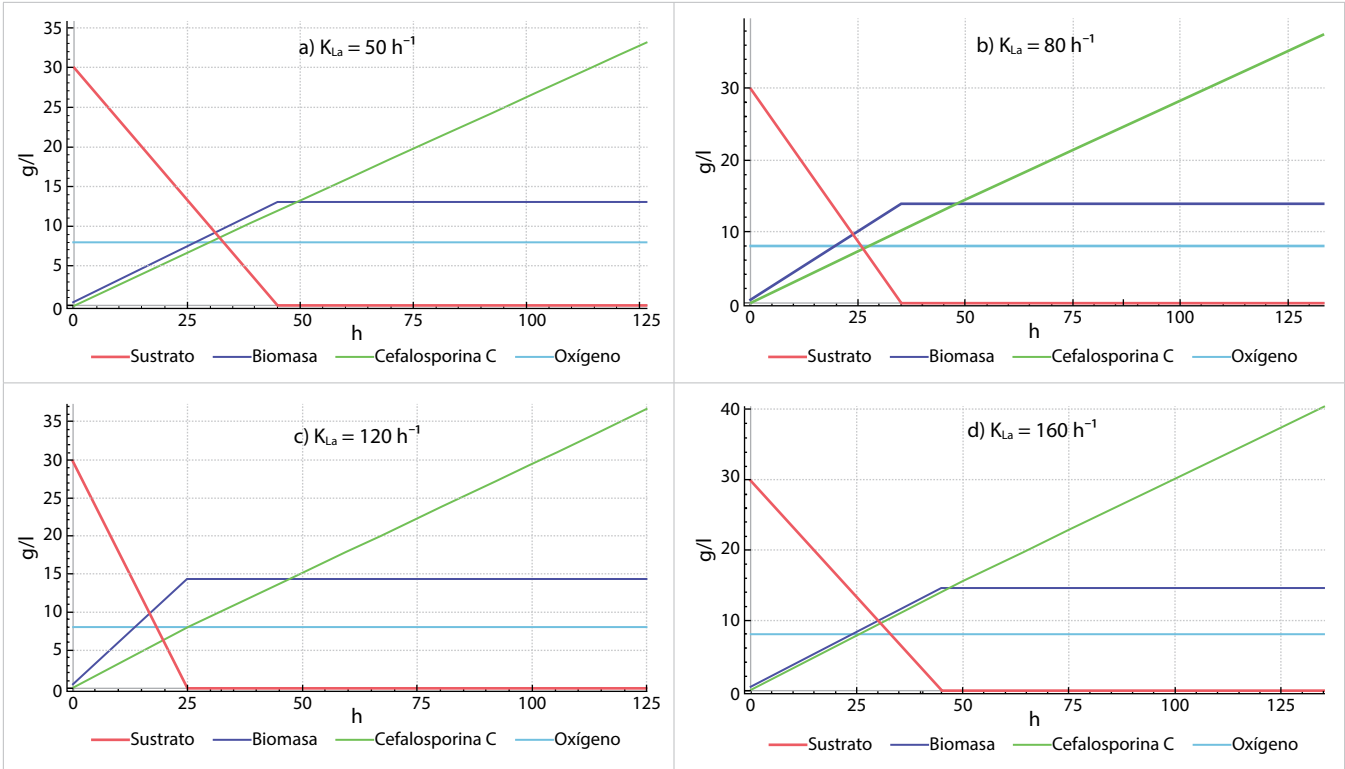


Figura 1. Comportamiento dinámico simulado de sustrato, biomasa, oxígeno disuelto y cefalosporina C para los escenarios de $k_L a = 50$ (a), 80 (b), 120 (c) y 160 h^{-1} (d).

D. ESCENARIOS DE OPERACIÓN Y PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN

Los valores de $k_L a$ se trataron como condiciones de escenario: 50, 80, 120 y 160 h^{-1} para 300, 400, 500 y 600 rpm, respectivamente. Estos valores se consideran entradas del escenario de simulación y no provienen de una correlación universal entre rpm y $k_L a$, dado que dicha relación depende de la geometría del reactor y de las propiedades del medio [15]; por tanto, su relación con la velocidad de agitación deberá validarse experimentalmente antes de utilizarse como correlación de escalamiento.

Para cada escenario se creó una copia del modelo, se asignaron los valores correspondientes de rpm y $k_L a$, se ejecutó la simulación temporal y se exportaron los perfiles de concentración de CPC, biomasa y sustrato. Los datos fueron depurados para conservar unidades homogéneas y una misma estructura de observaciones por corrida antes de su procesamiento estadístico.

Los resultados exportados desde COPASI se organizaron en una hoja de cálculo para obtener estadística descriptiva por escenario, incluyendo media, varianza, desviación estándar y concentración máxima.

No se aplicaron pruebas inferenciales (ANOVA de un factor o prueba de Tukey) debido a que los 101 puntos por corrida corresponden a observaciones consecutivas de una misma simulación determinística y no a réplicas independientes. Además, se consideró que tratar dichos puntos como réplicas inflaría artificialmente los grados de libertad y produciría valores p que no representan evidencia independiente.

En consecuencia, el análisis entre escenarios se limita a estadística descriptiva y regresión polinomial dentro del intervalo estudiado, y la inferencia estadística requerirá réplicas independientes de simulación o experimentos independientes.

TABLA 2
ESCENARIOS OPERATIVOS EVALUADOS

CORRIDA	VELOCIDAD (rpm)	$k_L a \text{ (h}^{-1}\text{)}$	TEMPERATURA	pH	AIREACIÓN (vvm)
1	300	50	26 °C	6.5	1.0
2	400	80	26 °C	6.5	1.0
3	500	120	26 °C	6.5	1.0
4	600	160	26 °C	6.5	1.0

Fuente: elaboración propia con datos de simulación.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. EFECTO DE LA AGITACIÓN SOBRE LA PRODUCCIÓN DE CPC

La [Tabla 3](#) muestra la producción máxima de cefalosporina C en función de la velocidad de agitación.

TABLE 3
PRODUCCIÓN MÁXIMA DE CEFALOSPORINA C SEGÚN LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN

CORRIDA	rpm	kLa (h ⁻¹)	CPC máxima (g/L)
1	300	50	31.45
2	400	80	33.79
3	500	120	35.24
4	600	160	36.00

Fuente: elaboración propia con datos de simulación en COPASI.

La respuesta observada se explica por la relación directa entre la agitación y la transferencia de oxígeno. A bajas velocidades de agitación, el sistema presenta menor disponibilidad de oxígeno disuelto, lo que puede limitar la actividad metabólica del microorganismo y reducir la formación de cefalosporina C. En cambio, a velocidades intermedias y altas, el aumento de kLa mejora la transferencia de oxígeno y favorece la producción del antibiótico. Sin embargo, el incremento de productividad entre 500 y 600 rpm fue menor que el observado entre 300 y 400 rpm, lo cual sugiere una tendencia de rendimientos decrecientes a velocidades elevadas de agitación.

La [Figura 1](#) presenta los perfiles temporales simulados de sustrato, biomasa, oxígeno disuelto y CPC para los cuatro escenarios. En todos los casos se observa el consumo completo del sustrato durante las primeras ~20 h, un crecimiento sigmoideo de la biomasa que alcanza un *plateau* dependiente del kLa ($\approx 13\text{--}14.7$ g/L), y una formación de CPC en dos fases: una asociada al crecimiento y una fase lineal posterior gobernada por el término no asociado al crecimiento (βX). Los escenarios con mayor kLa alcanzan mayores concentraciones finales de CPC, lo cual es consistente con los valores máximos reportados en la [Tabla 3](#).

B. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS ESCENARIOS EVALUADOS

Para caracterizar el comportamiento dinámico de cada escenario, se calcularon estadísticos descriptivos sobre los 101 puntos temporales exportados de cada simulación. Las medias de concentración de CPC aumentaron de 30.15 g/L a 34.54 g/L conforme la velocidad de agita-

ción se incrementó de 300 a 600 rpm. La [Tabla 4](#) resume los estadísticos principales de cada corrida.

TABLE 4
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE CPC POR CORRIDA

CORRIDA	rpm	kLa (h ⁻¹)	PUNTOS TEMPORALES	MEDIA CPC (g/L)	VARIANZA	DESV. EST.
1	300	50	101	30.1542	0.5803	0.7618
2	400	80	101	32.4094	0.6571	0.8106
3	500	120	101	33.8033	0.7068	0.8407
4	600	160	101	34.5429	0.7338	0.8566

Dado que los 101 puntos temporales por corrida corresponden a una misma serie determinística y no a réplicas experimentales independientes, el análisis entre escenarios se limita a una comparación descriptiva. La inferencia estadística formal requerirá la generación de réplicas independientes de simulación o la validación con datos experimentales de laboratorio.

La comparación con literatura experimental permite dimensionar los resultados. Duan *et al.* ^[8] reportaron 31.9 g/L de CPC en un fermentador de 7 L mediante una estrategia de alimentación basada en DO-Stat, mientras que otro estudio de Duan *et al.* ^[16] obtuvo 35.77 g/L utilizando una combinación de impulsores y CFD para mejorar la transferencia de oxígeno. Estos valores son cercanos al intervalo simulado de 31.45–36.00 g/L, pero la coincidencia numérica no constituye validación, ya que se utilizaron configuraciones de reactor, estrategias de alimentación y condiciones de cultivo diferentes.

En contraste, Ibrahim *et al.* ^[6] reportaron 399.52 µg/mL (0.39952 g/L) en un fermentador de 14 L con *A. chrysogenum* W42-I, 400 rpm, 1 vvm y pH 4 controlado. La diferencia de uno a dos órdenes de magnitud frente a la simulación resalta la necesidad de revisar unidades, parámetros cinéticos, condiciones iniciales y definición de producto antes de interpretar los valores simulados como concentraciones físicamente realistas ^{[6], [16], [17]}.

La comparación entre escenarios se interpreta de manera descriptiva. La diferencia entre 500 y 600 rpm en la CPC máxima es menor que la diferencia entre 300 y 400 rpm, lo que sugiere una reducción de la ganancia marginal dentro del intervalo simulado. Esta interpretación es coherente con estudios experimentales que muestran que la agitación y la transferencia de oxígeno pueden favorecer la producción de CPC, aunque el valor óptimo depende del sistema, la cepa y las demás condiciones de

cultivo [6], [16]. Estos hallazgos coinciden con estudios previos de modelado de la producción continua de CPC que destacan el papel de las condiciones de operación [18].

C. MODELO POLINOMIAL rpm-CPC

La relación entre velocidad de agitación y producción de CPC se ajustó mediante una regresión polinomial de tercer orden, expresada en la Ecuación (3). El modelo presentó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9975$, indicando alta concordancia con los valores simulados dentro del intervalo evaluado.

$$\text{CPC} = 0.00000004N^3 - 0.00009N^2 + 0.0715N + 16.925 \quad (3)$$

Se seleccionó un polinomio de tercer orden por ser el modelo empírico más simple capaz de representar la curvatura observada y la tendencia de saturación (rendimientos decrecientes) dentro del intervalo evaluado. Dado que solo se dispone de cuatro puntos operativos (300, 400, 500 y 600 rpm), el ajuste debe considerarse estrictamente descriptivo y no constituye un modelo mecanicista ni predictivo para extrapolación fuera del rango estudiado. Este enfoque empírico es coherente con estrategias de modelado y optimización reportadas para procesos de fermentación [19].

La Figura 2 muestra que la producción de CPC aumentó con la velocidad de agitación, aunque la pendiente de la curva disminuyó hacia el extremo superior del intervalo. Esto confirma que la mejora por transferencia de oxígeno no es indefinida y que incrementos adicionales de rpm podrían no justificar el aumento de consumo energético ni el riesgo de daño por cizalla. Por tanto, el modelo polinomial debe utilizarse como herramienta descriptiva dentro del intervalo 300-600 rpm y no como base de extrapolación fuera de dichas condiciones.

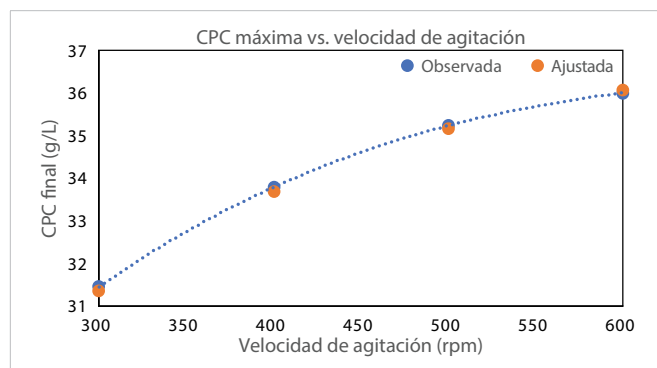


Figura 2. Regresión polinomial entre velocidad de agitación y producción final de cefalosporina C.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de la regresión polinomial.

TABLA 5
RESULTADOS DE LA REGRESIÓN POLINOMIAL

rpm	CPC (g/L)		RESIDUO	RESIDUO CUADRADO
	OBSERVADA	AJUSTADA		
300	31.4542	31.3550	0.0992	0.0098
400	33.7928	33.6850	0.1078	0.0116
500	35.2379	35.1750	0.0629	0.0040
600	36.0047	36.0650	-0.0603	0.0036

IV. CONCLUSIONES

La simulación computacional en COPASI mostró una tendencia ascendente de la producción máxima de CPC al aumentar la velocidad de agitación de 300 a 600 rpm bajo los supuestos definidos en el modelo. La CPC máxima pasó de 31.45 a 36.00 g/L y el ajuste polinomial presentó $R^2 = 0.9975$ dentro del intervalo evaluado. Estos resultados deben interpretarse como predicciones del modelo y no como evidencia experimental de un intervalo óptimo.

La delimitación del análisis a una descripción de tendencias dentro del intervalo simulado se debe a que los datos corresponden a una serie determinística sin réplicas independientes. La comparación con literatura experimental muestra que valores del orden de 31–36 g/L han sido reportados bajo condiciones específicas de fermentación, pero también existen procesos con concentraciones considerablemente menores; por ello, la transferencia directa de los resultados simulados a un proceso real requiere validación experimental.

Como trabajo futuro se recomienda generar réplicas independientes de simulación o experimentos de laboratorio, realizar análisis de sensibilidad de parámetros y validar experimentalmente los escenarios de 300-600 rpm, con atención a oxígeno disuelto, consumo energético, biomasa, sustrato residual y morfología fúngica.

REFERENCIAS

- [1] A. L. Demain y R. P. Elander, "The β -lactam antibiotics: Past, present, and future", *Antonie van Leeuwenhoek*, vol. 75, n.º 1-2, pp. 519, 1999, doi: [10.1023/a:1001738823146](https://doi.org/10.1023/a:1001738823146).

- [2] R. P. Elander, "Industrial production of beta-lactam antibiotics", *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 61, n.º 5-6, pp. 385-392, 2003, doi: [10.1007/s00253-003-1274-9](https://doi.org/10.1007/s00253-003-1274-9).
- [3] L. Liu, Z. Chen, W. Liu, X. Ke, X. Tian y J. Chu, "Cephalosporin C biosynthesis and fermentation in *Acremonium chrysogenum*", *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 106, n.º 19-20, pp. 6413-6426, 2022, doi: [10.1007/s00253-022-12181-w](https://doi.org/10.1007/s00253-022-12181-w).
- [4] Y. Yang *et al.*, "A novel impeller configuration to improve fungal physiology performance and energy conservation for cephalosporin C production", *J Biotechnol*, vol. 161, n.º 3, pp. 250-256, 2012, doi: [10.1016/j.jbiotec.2012.07.007](https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2012.07.007).
- [5] World Health Organization, *Tackling Antimicrobial Resistance (AMR) Together: Working Paper 5.0*. Ginebra, Suiza: WHO, 2018.
- [6] A. A. Ibrahim, G. S. El-Housseiny, K. M. Aboshanab, A. Stratmann, M. A. Yassien y N. A. Hassouna, "Scaling up production of cephalosporin C by *Acremonium chrysogenum* W42-I in a fermenter using submerged fermentation", *AMB Express*, vol. 14, art. 121, 2024, doi: [10.1186/s13568-024-01778-1](https://doi.org/10.1186/s13568-024-01778-1).
- [7] L. Liu, Z. Chen, X. Tian y J. Chu, "Effect of catalase on CPC production during fermentation of *Acremonium chrysogenum*", *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 12, art. 1, 2025, doi: [10.1186/s40643-024-00831-y](https://doi.org/10.1186/s40643-024-00831-y).
- [8] S. Duan, W. Ni, G. Yuan, Y. Zhao y F. Liu, "Enhanced cephalosporin C production with a novel DO-Stat based carbon resources co-feeding strategy", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 89, n.º 5, pp. 743-749, 2014, doi: [10.1002/jctb.4181](https://doi.org/10.1002/jctb.4181).
- [9] Y. Li, Z. Chen, W. Hong, T. Feng, X. Tian y J. Chu, "Application of Transcriptome Analysis for the Exploration of the Mechanism of Methionine Promoting the Synthesis of Cephalosporin C in *Acremonium chrysogenum* by Employing a Chemically Defined Medium", *Fermentation*, vol. 11, n.º 6, art. 325, 2025, doi: [10.3390/fermentation11060325](https://doi.org/10.3390/fermentation11060325).
- [10] Z. Chen *et al.*, "Enhancing Cephalosporin C Biosynthesis through a 2A Peptide-Based Multigene Coexpression System", *ACS Synth. Biol.*, vol. 14, n.º 11, pp. 4547-4562, 2025, doi: [10.1021/acssynbio.5c00543](https://doi.org/10.1021/acssynbio.5c00543).
- [11] M. Papagianni, "Fungal morphology and metabolite production in submerged mycelial fermentations", *Biotechnol Adv*, vol. 22, n.º 3, pp. 189-259, 2004, doi: [10.1016/j.biotechadv.2003.09.005](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.09.005).
- [12] P. M. Doran, *Bioprocess Engineering Principles*, 2.^a ed. Amsterdam, Países Bajos: Academic Press, 2013.
- [13] S. Hoops *et al.*, "COPASI—a COMplex Pathway Simulator", *Bioinformatics*, vol. 22, n.º 24, pp. 3067-3074, 2006, doi: [10.1093/bioinformatics/btl485](https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btl485).
- [14] F. T. Bergmann, S. Hoops, B. Klahn, U. Kummer, P. Mendes, J. Pahle y S. Sahle, "COPASI and its applications in biotechnology", *J Biotechnol*, vol. 261, pp. 215-220, 2017, doi: [10.1016/j.jbiotec.2017.06.1200](https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2017.06.1200).
- [15] F. García-Ochoa y E. Gómez, "Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview", *Biotechnol Adv*, vol. 27, n.º 2, pp. 153-176, 2009, doi: [10.1016/j.biotechadv.2008.10.006](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.10.006).
- [16] S. Duan *et al.*, "Simulation of computational fluid dynamics and comparison of cephalosporin C fermentation performance with different impeller combinations", *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 30, n.º 5, pp. 1097-1104, 2013, doi: [10.1007/s11814-013-0010-2](https://doi.org/10.1007/s11814-013-0010-2).
- [17] Z. Hou *et al.*, "Engineering Industrial Strain of *Acremonium chrysogenum* for Deacetoxycephalosporin C Overproduction Using CRISPR/Cas9", *Antibiotics*, vol. 15, n.º 2, art. 202, 2026, doi: [10.3390/antibiotics15020202](https://doi.org/10.3390/antibiotics15020202).
- [18] C. S. Chin y J. Nandong, "Modeling, optimization and control of continuous two-stage cephalosporin C production", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1195, n.º 1, art. 012037, 2021, doi: [10.1088/1757-899X/1195/1/012037](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1195/1/012037).
- [19] F. Abunde, N. Asiedu y A. Addo, "Modeling, simulation and optimal control strategy for batch fermentation processes", *Int J Ind Chem*, vol. 10, n.º 1, pp. 1-15, 2019, doi: [10.1007/s40090-019-0172-9](https://doi.org/10.1007/s40090-019-0172-9).

Enfoque y alcance

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

La revista CULCYT solo aceptará publicar aquellos trabajos cuyos resultados contribuyan al estado del arte del campo de estudio. No deben arrojar conclusiones ya aceptadas por la comunidad científica, por lo que debe ser un trabajo de innovación, original y que aporte conocimientos nuevos a la comunidad científica internacional.

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

Proceso de evaluación por pares

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

Todo manuscrito enviado a CULCYT se considera un documento confidencial y nadie está autorizado a compararlo sin el permiso explícito del Editor en Jefe, quien, si es necesario, previamente deberá solicitar el permiso del/los autor/es.

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

Al terminar, el evaluador llena un formulario de revisión en línea o carga en el sitio de la revista una carta con su dictamen o inserta comentarios en el manuscrito del autor.

Específicamente, cada revisor presentará una apreciación sobre la novedad, originalidad y la calidad del trabajo, y también evaluará el cumplimiento de las normas fijadas

por el comité editorial referentes a las políticas editoriales y al formato de presentación de los manuscritos.

Cada ronda de revisión de un artículo debe tardar tres semanas, salvo que ocurran imponderables que alarguen este plazo. CULCYT envía una solicitud al revisor seleccionado y este debe responder si acepta, en un plazo no mayor a tres días naturales. Si la respuesta es positiva, él descarga el manuscrito e inicia la evaluación y si es negativa, se invita a otro experto.

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

Política de acceso abierto

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

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

El acceso a la revista CULCYT Cultura Científica y Tecnológica es libre, sin requerimientos, bajo lo establecido en la normatividad mexicana de acceso abierto, y se da a través de su sitio: revistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/index o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ: ri.uacj.mx/vufind/

El contenido de los artículos, así como las imágenes, son responsabilidad exclusiva de los autores. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

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

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

Código de ética

La revista CULCYT establece su código ético a partir de las recomendaciones del Committee on Publication Ethics (COPE).

Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros o para su uso con otros fines.

Frecuencia de publicación y tipo de manuscritos

Las ediciones de la revista CULCYT Cultura Científica y Tecnológica se publican cada cuatro meses, en la modalidad de publicación continua. Los trabajos se pueden redactar en idioma español o inglés, los cuales se someterán a una prueba de plagio y de uso de inteligencia artificial utilizando herramientas electrónicas (Turnitin y/o iThenticate) y a un proceso de revisión por pares doble ciego.

Los tipos de publicaciones que acepta CULCYT pueden ser artículos de investigación, artículos de revisión, notas de información técnica, cartas al editor o trabajos de excelencia que hayan sido galardonados con premios en congresos nacionales o internacionales.

Artículos de investigación. Estos trabajos presentan un conocimiento original o bien, el desarrollo de un dispositivo innovador, enmarcado por un análisis crítico de la bibliografía actual, las técnicas existentes y la problemática en particular. Esta presentación incluye: método experimental o de evaluación, los resultados obtenidos, una discusión de su significado y conclusiones en el área.

Artículos de revisión. Es un estudio detallado, selectivo y crítico que examina la bibliografía publicada y la sitúa en cierta perspectiva. Su finalidad es realizar una investigación de revisión sobre un tema determinado, en la que se

reúne, analiza y discute la información más relevante relacionada con el problema de investigación que se desea abordar, con una visión crítica de los desarrollos recientes y/o puntos de vista originales. El objetivo fundamental del artículo de revisión es el de identificar qué se conoce del tema, qué se ha investigado, así como conocer los avances más destacados que dicho tema ha tenido en un periodo de tiempo determinado y qué aspectos permanecen desconocidos. No deben limitarse a una revisión de la literatura. Pueden ser artículos de revisión exhaustiva, descriptiva o evaluativa.

Notas técnicas. Presentación concisa centrada en la ilustración gráfica, con un enfoque práctico de un método, maniobra, proceso o implementación instrumental de utilidad o de interés general; incluye referencias bibliográficas. Aunque no se considera como un artículo científico completo, una nota técnica permite a los lectores beneficiarse del ingenio y la creatividad de los autores.

Cartas al editor. Proporciona un medio de comunicación entre el lector y el autor de un artículo, permitiendo un diálogo continuo sobre el contenido de la revista. Aunque no es una investigación original por sí misma, una carta puede proporcionar una nueva visión, hacer comentarios, sugerencias, correcciones, ofrecer respuestas alternativas o solicitar aclaraciones sobre el contenido impreso en la revista. Al proporcionar información adicional, la evidencia puede ser reforzada.

Siempre que sea necesario, daremos la oportunidad de responder a los autores, organizaciones o individuos, mencionados en la carta. Las cartas no se someten a revisión por pares y se publican a discreción del Comité Editorial.

Trabajos de excelencia que hayan sido galardonados con premios en congresos nacionales o internacionales. Dichos trabajos no se someterán a revisión por pares, únicamente el comité editorial de CULCYT evaluará que el artículo esté redactado conforme a la plantilla y cumpla con todas las especificaciones de formato emitidas por la revista.

Edición especial

Fronteras de la Ingeniería y Transformación Tecnológica

Fiel a su compromiso institucional con la difusión científica en acceso abierto, la revista CULCYT se ha consolidado como un espacio fundamental para la difusión, la discusión y la divulgación de las ciencias aplicadas. Es en este marco donde nos complacemos en presentar el número especial titulado "Fronteras de la Ingeniería y Transformación Tecnológica", una iniciativa diseñada para explorar cómo las metodologías y las tecnologías están reconfigurando las dinámicas industriales, urbanas y sociales actuales. En una era definida por la complejidad y la necesidad de respuestas operativas ágiles, el desarrollo sostenible y el bienestar humano.

Este volumen reúne una selección de investigaciones que abordan la transformación tecnológica desde una perspectiva multidisciplinaria, articulando la optimización de la infraestructura, la gobernanza de innovaciones y el factor humano en la formación científica. Las contribuciones de este número demuestran el poder de los algoritmos y la toma de decisiones estructurada. Un claro ejemplo es la integración del algoritmo Floyd-Warshall, junto con métodos de toma de decisiones multicriterio que ofrece un enfoque metodológico robusto para la optimización sostenible de rutas en la gestión de desechos urbanos. Complementando esta visión, también se examinan los sistemas inteligentes de gestión de transporte, herramientas críticas para la optimización logística en rutas urbanas que transforman los flujos tradicionales en redes de distribución dinámicas, predictivas y resilientes.

Por otro lado, el éxito de la transformación tecnológica no radica únicamente en el desarrollo técnico aislado, sino en la capacidad de las organizaciones y sociedades para integrarlo de manera efectiva. Para profundizar en este fenómeno, la edición incluye un trabajo dedicado al análisis de los modelos de evaluación y adopción tecnológica. A través de un análisis comparativo en contextos de tecnologías emergentes, estas investigación proveen marcos analíticos para comprender las variables críticas que aceleran o frenan la asimilación de nuevas herramientas en entornos competitivos.

Finalmente, el avance tecnológico resulta insostenible si se descuidan las bases humanas que lo hacen posible. Por ello, este volumen presenta un análisis de la relación entre el bienestar académico y el *burnout* en estudiantes de ingeniería.

Los editores extendemos nuestro sincero agradecimiento a los autores y revisores participantes en esta edición de CULCYT, confiando en que estos hallazgos serán de utilidad para la comunidad académica.

Dr. Iván Juan Carlos Pérez Olguín
Dr. Luis Alberto Rodríguez Picón
Dr. Luis Asunción Pérez Domínguez
Dr. Javier Molina Salazar
Editores Invitados

Optimización sostenible de rutas para la gestión de desechos urbanos mediante la implementación del algoritmo Floyd-Warshall y métodos MCDM

Sustainable Optimization of Routes for Urban Waste Management through the Implementation of the Floyd–Warshall Algorithm and MCDM Methods

Uriel Angel Gómez Rivera¹ , Johana Medina Zárate¹, Luis Carlos Méndez González¹ , Iván Juan Carlos Pérez Olguín¹ 

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

RESUMEN

La gestión de residuos reciclables constituye uno de los mayores desafíos urbanos en la actualidad debido al crecimiento poblacional y al incremento en el consumo de productos envasados. De esta manera, esta gestión exige decidir qué ruta conviene cuando intervienen el tiempo, el costo, el riesgo, las emisiones y la cobertura del servicio. Este artículo describe una herramienta desarrollada en C# que combina el algoritmo Floyd-Warshall, para obtener caminos mínimos entre todos los pares de nodos, con métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM), en particular TOPSIS y VIKOR, para ordenar alternativas mediante criterios ponderados. La propuesta se probó con un escenario piloto construido a partir de ubicaciones de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), interpretadas como posibles puntos de generación o acopio. El sistema calcula la matriz de distancias mínimas y exporta las trayectorias en formato KML para su inspección cartográfica. Los resultados corresponden a una prueba de concepto basada en la distancia; por tanto, la evaluación multicriterio con datos operativos y su validación en campo constituyen la siguiente etapa del estudio. La contribución principal es una arquitectura modular que vincula optimización de rutas, análisis multicriterio y visualización geográfica para apoyar la planeación de la recolección de reciclables.

PALABRAS CLAVE: residuos reciclables; Floyd-Warshall; TOPSIS; VIKOR; sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

Recyclable waste management represents one of today's major urban challenges due to population growth and the increasing consumption of packaged products. In this context, managing these materials requires determining the most suitable route when factors such as travel time, cost, risk, emissions, and service coverage are considered. This article describes a tool developed in C# that combines the Floyd–Warshall algorithm, used to calculate shortest paths between all pairs of nodes, with multiple-criteria decision-making (MCDM) methods, particularly TOPSIS and VIKOR, to rank alternatives based on weighted criteria. The proposal was tested in a pilot scenario constructed using locations from the Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), which were interpreted as potential waste generation or collection points. The system calculates the shortest-distance matrix and exports the resulting routes in KML format for cartographic inspection. The results represent a distance-based proof of concept; therefore, multicriteria evaluation using operational data and subsequent field validation constitute the next stage of the study. The main contribution is a modular architecture that integrates route optimization, multicriteria analysis, and geographic visualization to support recyclable waste collection planning.

KEYWORDS: recyclable waste; Floyd-Warshall; TOPSIS; VIKOR; geographic information systems.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Uriel Angel Gómez Rivera
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez /
Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, C. P. 23320, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: uriel.gomez@uacj.mx

Fecha de recepción: 9 de agosto de 2026. **Fecha de aceptación:** 23 de agosto de 2026. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2026.



Licencia Creative Commons



I. INTRODUCCIÓN

La recolección y gestión de residuos reciclables ha adquirido un papel estratégico en las políticas de sostenibilidad de las ciudades modernas. Sin embargo, los sistemas tradicionales de logística de residuos suelen presentar limitaciones relacionadas con rutas poco optimizadas, escasa integración tecnológica en la toma de decisiones y cuando las rutas se definen por costumbre o con información incompleta, aumentan los recorridos, el consumo de combustible y los tiempos de servicio [1], [2].

El crecimiento urbano y el consumo de productos envasados incrementan la presión sobre los sistemas municipales de residuos [3]. Esta situación se relaciona con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 11, orientado a ciudades sostenibles, y con el ODS 12, relativo a la producción y el consumo responsables [4].

En este sentido, la digitalización permite registrar el nivel de llenado de los contenedores, ubicar los puntos o nodos de recolección y actualizar las condiciones de operación. Sensores, Sistemas de Información Geográfica (GIS), Internet de las Cosas (IoT) y herramientas de análisis convierten esos datos en insumos para programar recorridos [5], [6].

En una red urbana, los nodos representan puntos de recolección, centros de acopio o plantas de reciclaje, mientras que las aristas representan los tramos que los conectan. El algoritmo Floyd-Warshall calcula los caminos mínimos entre todos los pares de nodos, por lo que resulta útil cuando deben consultarse múltiples orígenes y destinos dentro de una misma red [7].

La distancia, sin embargo, no describe por sí sola la conveniencia de una ruta. El tiempo de viaje, el costo operativo, el riesgo, el impacto ambiental y la cobertura pueden conducir a una decisión distinta. Por ello, el problema requiere separar dos tareas: calcular trayectorias factibles y comparar las alternativas resultantes [8].

Los métodos MCDM permiten efectuar esa comparación mediante criterios con unidades diferentes. TOPSIS ordena las alternativas según su cercanía a una solución ideal, mientras que VIKOR identifica soluciones de compromiso cuando existen criterios en conflicto [9], [10].

La literatura reciente confirma que la optimización de la recolección se apoya principalmente en herramientas

de ruteo, GIS, sensores y modelos matemáticos. Una revisión sistemática publicada en 2024 advierte, además, que muchos trabajos priorizan la distancia y el costo, mientras que las dimensiones ambientales todavía se incorporan con menor frecuencia [8].

En aplicaciones recientes, Das *et al.* [11] combinaron datos GPS, trabajo de campo y análisis de redes en GIS para contrastar recorridos existentes con rutas optimizadas. Por su parte, Idrissi *et al.* [6] integraron contenedores inteligentes y un problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo, nivel de llenado y capacidad del vehículo.

Estos antecedentes muestran el avance hacia sistemas dinámicos apoyados en datos operativos. A diferencia de esas aplicaciones, la propuesta de este artículo se concentra en una arquitectura modular en C# que integra caminos mínimos entre todos los pares de nodos, evaluación MCDM y exportación KML. Su validación operativa con mediciones de campo se plantea como una etapa posterior.

Para la prueba de concepto se utilizaron ubicaciones de la UACJ. Rectoría, el Instituto de Ciencias Sociales y Administración (ICSA), el Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) y el Instituto de Ciencias Biomédicas (ICB) se interpretaron como posibles puntos de generación o acopio de reciclables, no como destinos independientes del problema ambiental. En una aplicación operativa, esos nodos formarían parte de un recorrido que inicia en la base de recolección y termina en un centro de acopio o una recicladora.

El objetivo general del presente trabajo fue integrar Floyd-Warshall y métodos MCDM en una herramienta computacional para apoyar la planeación de rutas de recolección de residuos reciclables.

Los objetivos específicos fueron:

1. Implementar Floyd-Warshall para calcular los caminos mínimos entre todos los nodos de una red de recolección.
2. Definir un conjunto consistente de criterios para comparar rutas mediante TOPSIS y VIKOR.
3. Incorporar la captura de la red, la consulta de resultados y la exportación cartográfica en una interfaz desarrollada en C#.

4. Realizar una prueba de concepto con ubicaciones institucionales y delimitar los datos necesarios para una validación operativa posterior.

II. METODOLOGÍA

La metodología integra Floyd-Warshall con TOPSIS y VIKOR. El flujo de trabajo comprende la definición de criterios, el modelado de la red, el cálculo de caminos mínimos, la evaluación multicriterio y la visualización geográfica.

2.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y CRITERIOS DE DECISIÓN

Se adoptó el siguiente conjunto de criterios: distancia, tiempo de viaje, costo operativo, impacto ambiental, riesgo y cobertura del servicio. Los cinco primeros se minimizan; la cobertura se maximiza [12], [8].

Los pesos deben sumar 1. Como ejemplo de captura, se utilizaron los valores 0.25 para distancia, 0.20 para tiempo, 0.20 para costo, 0.15 para impacto ambiental, 0.10 para riesgo y 0.10 para cobertura. El usuario puede modificarlos según el contexto, siempre que documente su procedencia.

2.2. MODELADO DE LA RED DE RECOLECCIÓN

El área urbana se representa como un grafo dirigido y ponderado, donde los *nod*os son base de recolección, puntos de generación o acopio, estaciones de transferencia y planta de reciclaje, y *aristas* son tramos de la red caracterizados por distancia y, cuando se dispone de datos, por tiempo, costo, emisiones o riesgo.

El modelado considera una red dirigida y ponderada. Floyd-Warshall evalúa los nodos intermedios y genera una matriz completa de distancias mínimas entre todos los pares de nodos. La matriz permite consultar trayectorias desde distintos orígenes y facilita la comparación posterior de alternativas de recorrido [7].

2.3. IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

La herramienta se desarrolló en C# con Windows Forms. La interfaz permite capturar nodos y conexiones, ejecutar Floyd-Warshall, consultar matrices y rutas, definir los valores de los criterios MCDM y exportar trayectorias en formato KML.

2.4. ESTRUCTURACIÓN DE LOS DATOS

Los datos de entrada corresponden a lo siguiente:

- Nodos: puntos de generación o acopio, base de recolección y destino final.
- Aristas: conexiones entre nodos con pesos definidos por el usuario; la distancia es obligatoria y los demás atributos dependen de la disponibilidad de datos.
- Matriz de adyacencia: representación inicial del grafo, donde cada celda $[i, j]$ contiene el peso asignado entre los nodos i y j .

La interfaz utiliza cuadros de texto y tablas DataGridView para registrar los datos y revisar los resultados antes de ejecutar la evaluación.

2.5. ALGORITMO IMPLEMENTADO

El algoritmo Floyd-Warshall calculará todas las distancias mínimas entre pares de nodos.

Pseudocódigo de Floyd-Warshall en C#:

```
for (k = 0; k < n; k++)  
    for (i = 0; i < n; i++)  
        for (j = 0; j < n; j++)  
            if (matriz[i,j] > matriz[i,k] + matriz[k,j])  
                matriz[i,j] = matriz[i,k] + matriz[k,j];  
for (k = 0; k < n; k++)
```

Se recorre cada nodo intermedio posible en el grafo.

La idea de Floyd-Warshall es pasar por cada nodo k y analizar la posibilidad de llegar de i a j con un camino más corto que el que ya se tiene registrado.

```
for (i = 0; i < n; i++)
```

Ahora se fija un nodo origen (i).

```
for (j = 0; j < n; j++)
```

Y también un nodo destino (j).

En este punto se tienen tres componentes: origen (i) a intermedio (k) a destino (j).

```
if (matriz[i,j] > matriz[i,k] + matriz[k,j])
```

Aquí se compara:

- $matriz[i,j]$: la distancia actual conocida de i a j .
- $matriz[i,k] + matriz[k,j]$: la distancia si se pasa por el nodo intermedio k .

Si usar el nodo intermedio da un camino más corto, entonces se actualiza.

```
matriz[i,j] = matriz[i,k] + matriz[k,j];
```

Se guarda la nueva distancia mínima entre i y j .

Ejemplo:

Se tienen 3 nodos iniciales: A, B y C:

A a B = 5

B a C = 2

A a C = 10

La matriz inicial es:

TABLA 1
MATRIZ INICIAL

	A	B	C
A	0	5	10
B	∞	0	2
C	∞	∞	0

Cuando $k = B$, el algoritmo prueba:

¿Si el punto A a C es más corto pasando por B?

A a B + B a C = 5 + 2 = 7

Como $7 < 10$, se actualiza A a C = 7.

Resultado final: la ruta más corta A a C no es 10, sino 7 pasando por B.

Tres ciclos for anidados recorren, respectivamente, el nodo intermedio k , el origen i y el destino j . La condi-

ción actualiza la distancia cuando el trayecto que pasa por k es menor que el valor almacenado. Esta estructura calcula los caminos mínimos entre todos los pares de nodos [7].

2.6. ALGORITMO MATEMÁTICO

Sea un grafo $G = (V, E, w)$ con matriz de pesos $W[n][n]$.

El algoritmo Floyd-Warshall calcula la matriz $D[n][n]$ de distancias mínimas entre todos los nodos:

Inicialización:

$D^{(0)}[i,j] = W[i,j]$, para todo $i, j \in V$

Iteración:

Para $k = 1$ hasta n :

Para todo $i, j \in V$:

$D^{(k)}[i,j] = \min(D^{(k-1)}[i,j], D^{(k-1)}[i,k] + D^{(k-1)}[k,j])$

Resultado:

$D^{(n)}$ contiene las distancias mínimas entre todos los pares de nodos [7].

2.7. INTEGRACIÓN CON MÉTODOS MCDM

El módulo MCDM compara las rutas obtenidas mediante los seis criterios definidos en la sección 2.1. Primero se verifica que los pesos sumen 1 y después se normalizan los valores para hacer comparables las unidades de medida.

TOPSIS y VIKOR generan una clasificación de las alternativas. La herramienta conserva, junto con el resultado, los pesos y valores utilizados para que la recomendación pueda interpretarse y reproducirse.

El método TOPSIS propone seleccionar alternativas con base en la cercanía al ideal positivo y la lejanía del ideal negativo [9].

Los pasos por seguir son los siguientes:

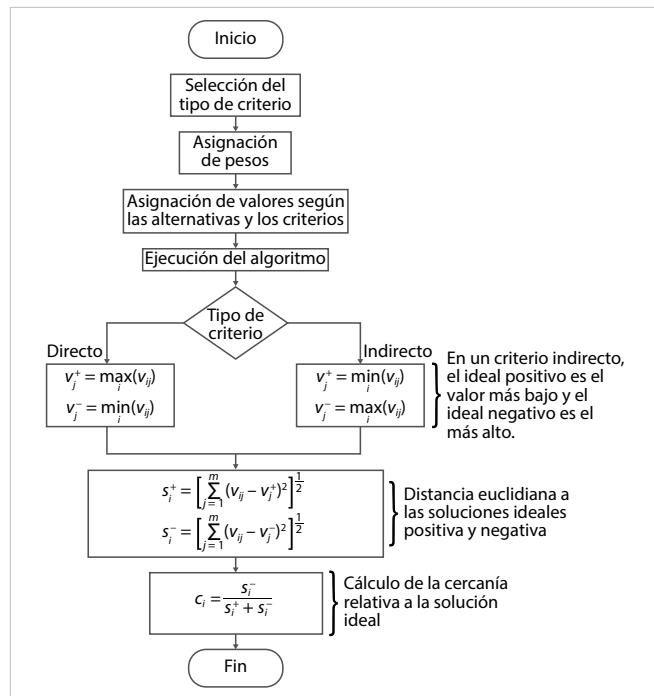


Figura 1. Diagrama de metodología TOPSIS.

La Figura 1 resume el procedimiento de TOPSIS, desde la construcción de la matriz de decisión hasta el ordenamiento de las alternativas por su cercanía a la solución ideal.

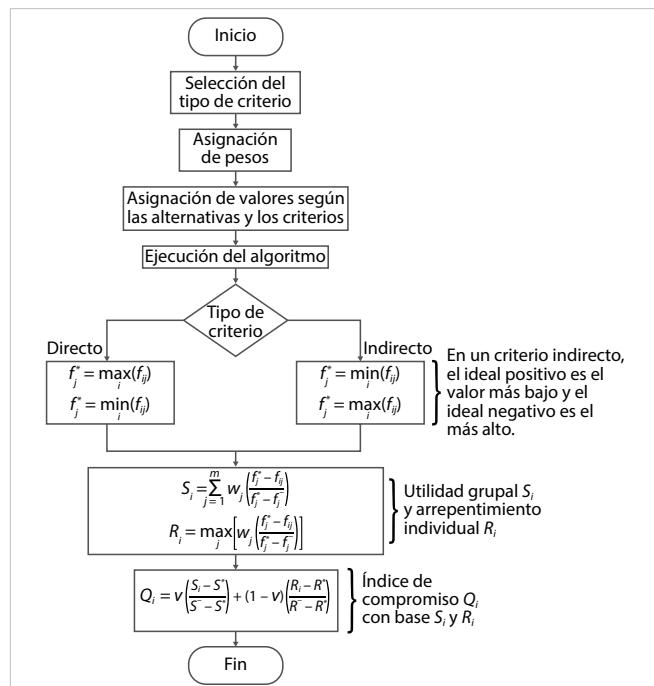


Figura 1. Diagrama de metodología VIKOR.

La Figura 2 presenta el flujo de VIKOR. A diferencia de TOPSIS, VIKOR calcula una solución de compromiso a

partir de la utilidad grupal y del mayor arrepentimiento individual [10]. Ambos métodos utilizan la misma matriz de alternativas, criterios y pesos. Esta equivalencia evita comparar resultados construidos con supuestos distintos.

En este estudio, la sostenibilidad no se registra como un criterio aislado: se representa mediante el impacto ambiental y la cobertura del servicio. Así se mantiene correspondencia entre la definición del problema, la captura de datos y la validación [13].

La comparación entre TOPSIS y VIKOR permite identificar si la recomendación permanece estable o cambia según la lógica de agregación [14].

2.8. MÓDULO DE VISUALIZACIÓN GIS (GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM)

El módulo GIS representa las trayectorias calculadas y exporta un archivo KML. La visualización facilita la revisión espacial de los nodos, las conexiones y el orden del recorrido antes de utilizar la ruta en un escenario operativo [11].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La versión evaluada generó la matriz de caminos mínimos y las trayectorias cartográficas a partir de la red capturada. Los resultados que se presentan corresponden al criterio de distancia y deben interpretarse como una prueba de concepto del componente de ruteo.

3.1. ESCENARIO PILOTO Y ALCANCE DE LA VALIDACIÓN

El escenario incluyó Rectoría, ICSA, IIT e ICB como nodos institucionales. Para mantener la relación con el problema estudiado, cada ubicación se interpretó como un posible punto de generación o acopio de residuos reciclables.

La prueba se realizó en cuatro pasos:

1. Registro de nodos, coordenadas y conexiones de la red.
2. Ejecución de Floyd-Warshall para obtener la matriz de distancias mínimas.
3. Reconstrucción de las trayectorias entre los nodos seleccionados.
4. Exportación del resultado en formato KML y revisión en un visor cartográfico.

Los institutos universitarios no representan rutas ajenas a la gestión de residuos: funcionan como nodos demostrativos de una red institucional de recolección. En una aplicación completa, el vehículo partiría de una base, visitaría únicamente los puntos con demanda de recolección y trasladaría el material a un centro de acopio o a una recicladora. Las Figuras 3 y 4 muestran la conectividad y las rutas mínimas entre los nodos; no constituyen todavía un programa definitivo de recolección.



Figura 3. Vista ampliada de los nodos y de la trayectoria calculada por Floyd-Warshall (elaboración propia con base en datos de Google Maps).



Figura 4. Detalle de las polilíneas exportadas a Google Earth; se identifican los nodos y se resalta la traza para facilitar su inspección. Fuente: elaboración propia con base en datos de Google Earth.

IV. CONCLUSIONES

Floyd-Warshall resultó adecuado para obtener, en una sola ejecución, las distancias mínimas entre todos los pares de nodos de la red. Esta propiedad es útil cuando una operación debe consultar diferentes orígenes, destinos y puntos intermedios.

La prueba con ubicaciones de la UACJ verificó la captura de la red, el cálculo de caminos y la exportación KML. Asimismo, permitió aclarar la función de los institutos: en el modelo representan posibles puntos de generación o acopio dentro de un recorrido de recolección de reciclables.

La evaluación presentada se limitó a la distancia. Aunque la herramienta incorpora TOPSIS y VIKOR, todavía se requieren datos operativos para comparar rutas por tiempo, costo, impacto ambiental, riesgo y cobertura. Por ello, los resultados no deben interpretarse como una validación integral del componente MCDM.

La contribución del trabajo es la integración modular del cálculo de rutas, la evaluación multicriterio y la visualización geográfica. La siguiente etapa deberá medir demanda y desempeño en campo, incluir la base y el destino final de los reciclables, y comparar la recomendación con el recorrido utilizado habitualmente.

REFERENCIAS

- [1] G. Marseglia, J. A. Mesa, F. A. Ortega y R. Piedra-de-la-Cuadra, "A heuristic for the deployment of collecting routes for urban recycle stations (eco-points)", *Socio-Econ. Plan. Sci.*, vol. 82, parte A, art. 101222, ag. 2022, doi: [10.1016/j.seps.2021.101222](https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101222).
- [2] J. Beliën, L. De Boeck y J. Van Ackere, "Municipal solid waste collection and management problems: A literature review", *Transp. Sci.*, vol. 48, n.º 1, pp. 78-102, 2014, doi: [10.1287/trsc.1120.0448](https://doi.org/10.1287/trsc.1120.0448).
- [3] L. Abarca, G. Maas y W. Hogland, "Solid waste management challenges for cities in developing countries", *Waste Manag.*, vol. 33, n.º 1, pp. 220-232, en. 2013, doi: [10.1016/j.wasman.2012.09.008](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008).
- [4] United Nations. "Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development". UN.org. [En línea]. Disponible: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [5] T. Anagnostopoulos, K. Kolomvatsos, C. Anagnostopoulos, A. B. Zaslavsky y S. Hadjiefthymiades, "Assessing dynamic models for high priority waste collection in smart cities", *J. Syst. Softw.*, vol. 110, pp. 178-192, dic. 2015, doi: [10.1016/j.jss.2015.08.049](https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.08.049).
- [6] A. Idrissi, R. Benabbou, J. Benhra y M. El Haji, "Smart waste collection based on vehicle routing optimization: Case of Casablanca City", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 236, n.º C, pp. 194-201, 2024, doi: [10.1016/j.procs.2024.05.021](https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.021).

- [7] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest y C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 4th ed. Cambridge, MA, EUA: MIT Press, 2022.
- [8] A. B. P. Santos, C. L. Simões y R. Simões, "Optimization of municipal solid waste collection system: systematic review with bibliometric literature analysis", *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 26, pp. 1906-1917, may. 2024, doi: [10.1007/s10163-024-01966-y](https://doi.org/10.1007/s10163-024-01966-y).
- [9] C. L. Hwang y K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlín, Alemania: Springer, 1981.
- [10] S. Opricovic y G.-H. Tzeng, "Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 156, n.º. 2, pp. 445-455, jul. 2004, doi: [10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1).
- [11] S. Das, A. Baral, I. M. Rafizul y S. Berner, "Efficiency enhancement in waste management through GIS-based route optimization", *Cleaner Eng. Technol.*, vol. 21, art. 100775, 2024, doi: [10.1016/j.clet.2024.100775](https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100775).
- [12] I. Mavlutova, D. Atstaja, J. Grasis, J. Kuzmina, I. Uvarova, y D. Roga, "Urban transportation concept and sustainable urban mobility in smart cities: A review", *Energies*, vol. 16, n.º 8, art. 3585, 2023, doi: [10.3390/en16083585](https://doi.org/10.3390/en16083585).
- [13] L. M. Goulart, L. C. Lange y H. M. Coelho, "Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods", *Waste Manag. Res.*, vol. 35, n.º 1, pp. 3-28, 2017, doi: [10.1177/0734242X16664024](https://doi.org/10.1177/0734242X16664024).
- [14] S. S. Sohail et al., "Multi-criteria decision making-based waste management: A bibliometric analysis", *Heliyon*, vol. 9, n.º 11, art. e21261, 2023, doi: [10.1016/j.heliyon.2023.e21261](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21261).

RECONOCIMIENTOS

Un agradecimiento a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por el apoyo brindado y las facilidades otorgadas durante el desarrollo de mi estancia posdoctoral, lo cual fue fundamental para la realización de este trabajo.

Sistema inteligente de gestión de transporte para la optimización logística en rutas urbanas

Intelligent Transport Management System for Logistics Optimization in Urban Routes

Fausto Leyva Salazar¹ , Iván Juan Carlos Pérez Olguín¹ , Georgina Elizabeth Riosvelasco Monroy¹ 

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

RESUMEN

La falta de sistemas accesibles para monitorear métricas clave en los sistemas de gestión de transporte, tales como el desempeño de rutas, la gestión de activos y los indicadores de rendimiento del personal, genera ineficiencias operativas, elevados costos y reduce la competitividad. El presente artículo analiza el potencial de las herramientas tecnológicas de fácil acceso en el diseño de *dashboards*, como Power BI, para abordar los desafíos de eficiencia que enfrentan las pequeñas y medianas empresas del sector logístico en México. El objetivo es analizar el desarrollo teórico en esta área del conocimiento y presentar una propuesta metodológica para el desarrollo del Sistema Inteligente de Gestión de Transporte (SiGeTra). Mediante el análisis de correlación entre diferentes conjuntos de datos, el sistema facilita la identificación de áreas de mejora y apoya una toma de decisiones informada. La solución propuesta es escalable, económicamente viable y de rápida adopción, potenciando la supervivencia empresarial a mediano plazo y fortalece la capacidad logística del sector de transporte.

PALABRAS CLAVE: Sistemas de Gestión de Transporte (TMS); pymes; optimización de rutas; KPIs logísticos; reducción de costos.

ABSTRACT

The lack of accessible systems to monitor key metrics in transport management systems, such as route performance, asset management, and staff performance indicators generates operational inefficiencies, high costs, and reduced competitiveness. This article analyzes the potential of easily accessible technological tools, such as Power BI, in designing dashboards to address the efficiency challenges faced by small and medium-sized enterprises in the logistics sector in Mexico. The objective is to analyze theoretical development in this area of knowledge and present a methodological proposal for the development of the Intelligent Transport Management System (SiGeTra). Through the analysis of correlations between different datasets, the system facilitates the identification of improvement areas and supports informed decision-making. The proposed solution is scalable, economically viable, and rapidly adoptable, enhancing business survival in the medium term and strengthening the logistics capacity of the transport sector.

KEYWORDS: Transport Management Systems (TMS); SMEs; route optimization; logistics KPIs; cost reduction.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Fausto Leyva Salazar
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez /
Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, C. P. 23320, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: al251481@alumnos.uacj.mx

Fecha de recepción: 9 de agosto de 2026. **Fecha de aceptación:** 23 de agosto de 2026. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

La administración eficiente de los elementos clave en los Sistemas de Gestión de Transporte (TMS, por sus siglas en inglés) representa un desafío crítico para las pymes, particularmente en contextos logísticos intensivos como los que se presentan en Ciudad Juárez, Chihuahua. La literatura identifica consistentemente que la falta de herramientas accesibles limita la capacidad de estas empresas para monitorear métricas esenciales, como el tiempo estimado de llegada (ETA, por sus siglas en inglés), la utilización de flota y el consumo de combustible [1], [2].

Esta brecha tecnológica genera ineficiencias operativas y costos elevados, además de que reduce significativamente la competitividad en un sector caracterizado por márgenes estrechos y alta demanda de servicios logísticos transfronterizos.

Estudios previos han intentado abordar esta problemática mediante diferentes enfoques, por ejemplo, [3] demostró cómo la integración de bases de SQL con *dashboards* en Power BI permite visualizar datos operativos; [4] desarrolló soluciones basadas en Microsoft Access para el seguimiento de rutas en pequeñas organizaciones y en [1] se implementó una plataforma de inteligencia de servicios de transporte que documentó una reducción del 12 % en costos operativos y un aumento del 8 % en la utilización de activos, gracias al monitoreo sistemático de los indicadores claves de rendimiento (KPIs, por sus siglas en inglés) críticos y a la optimización de rutas. Estos beneficios económicos justifican la inversión en sistemas de gestión, particularmente para pymes que operan en entornos competitivos.

Este potencial de mejora, sustentado en una visualización estratégica de la información, adquiere especial relevancia en el contexto de las pymes de Ciudad Juárez, Chihuahua, donde la optimización de recursos logísticos es fundamental para la supervivencia empresarial. Sin embargo, la limitada infraestructura tecnológica y los presupuestos restringidos característicos de estas empresas exigen soluciones que prioricen la funcionalidad esencial sobre la complejidad tecnológica. Por ello, la propuesta de valor de esta investigación radica en el desarrollo de SiGeTra, un Sistema de Gestión de Transporte que integra herramientas de bajo costo para visualizar estratégicamente los factores críticos consensuados en la literatura: KPIs de desempeño, ETA, inte-

gración de información, rentabilidad y gestión eficiente de activos y costos. Este enfoque se centra específicamente en las necesidades del contexto juarense, donde la optimización de recursos logísticos representa un factor determinante para la supervivencia y competitividad de las pymes locales [5].

II. METODOLOGÍA

La revisión sistemática de la literatura se realizó bajo la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que consiste en un marco metodológico estandarizado diseñado para garantizar transparencia y exhaustividad en revisiones de literatura. Tal como se muestra en la [Figura 1](#), el proceso se estructuró a partir de cuatro preguntas de investigación, cada una con sus respectivos filtros y conjuntos de palabras clave. Para ilustrar el procedimiento, una de las preguntas clave fue: ¿Cuál es el impacto de la digitalización en la transparencia y trazabilidad de la cadena de suministro?, Para lo cual se aplicó la cadena de búsqueda: "TMS" AND "logistics digitalization", con el filtro de idioma inglés en Google Scholar. Este mismo procedimiento se repitió para cada una de las preguntas restantes, lo que permitió identificar inicialmente 37 artículos que, tras un proceso de depuración, se redujeron a 32 estudios elegibles para el análisis.

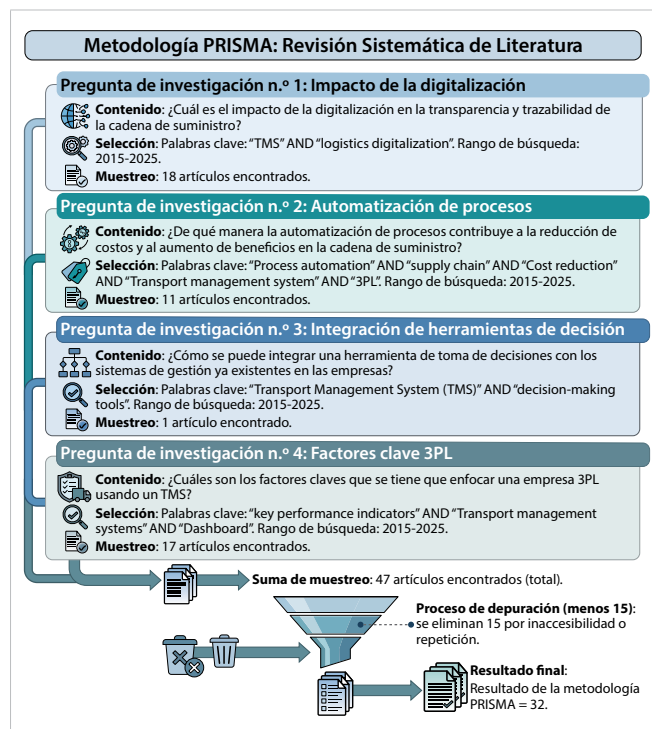


Figura 1. Diagrama de flujo aplicando la metodología PRISMA

Un principio fundamental dentro de la gestión de métricas es el de las “pocas métricas esenciales”, popularizado por [6], quien enfatiza que un número limitado de indicadores permite a los gerentes mantener una visión clara del desempeño general y concentrarse en lo verdaderamente crítico, balanceando perspectivas financieras y operativas para evitar la ceguera por información. A partir de la revisión de los 32 artículos, se identificaron los factores dominantes asociados al TMS, donde solo el 12.5 % de los artículos revisados mencionan datos cuantificables, los cuales se sistematizaron en la [Tabla 1](#).

TABLA 1
FACTORES DOMINANTES IDENTIFICADOS EN LA REVISIÓN

FACTORES	REFERENCIA
ETA (Estimated Time of Arrival)	[1], [2], [3], [4]
Rentabilidad	[1], [2], [3], [4]
Agilidad	[1], [2], [3], [4]
KPIs (Key Performance Indicator)	[1], [3], [4]
Detección de anomalías	[1], [3], [4]
Integración de información	[1], [2], [4]
Gestión eficiente de activos	[1], [2], [3]
Tiempos de maniobra	[1], [2]
Vehículos cargados - calendarizados	[1], [2]
Vehículos detenidos	[1], [2]
Información de la carga	[1], [2]
Inventario en tránsito y en proceso	[1], [2]
Responsabilidad	[1], [3]
Chat integrado al TMS	[1]
Tasa de impacto productivo	[2]
Tiempo de espera en conferencias	[2]
Tiempo de empeño	[2]
Descargas desde navío	[2]

Con el fin de priorizar los factores críticos relevantes, se procedió a sintetizar la información de la [Tabla 1](#), en una tabla de frecuencia según la mención de los factores en los artículos revisados. La [Tabla 2](#), despliega los seis factores de mayor relevancia identificados en las investigaciones y que evidencian las tendencias predominantes en el campo de estudio.

TABLA 2
FACTORES DE MAYOR FRECUENCIA EN LA LITERATURA

FACTORES RELEVANTES	FRECUENCIA
ETA (Estimated time of arrival)	4
Rentabilidad	4
Agilidad	4
KPIs (Key performance indicator)	3
Detección de Anomalías	3
Integración de Información	3
Gestión Eficiente de Activos y Costos	3

Por último, se procedió a unificar algunos de los factores de mayor frecuencia, con la finalidad de obtener los factores críticos de mayor relevancia para implementarlos en SiGeTra. Esta unificación se centró en factores que convergían en un mismo ámbito operativo, como la gestión de activos, de tal manera que los factores *detección de anomalías*, *agilidad* y *gestión eficiente de activos y costos*, se unificaron en el término Gestión Eficiente de Activos y Costos. La [Tabla 3](#) muestra la lista final de los factores críticos determinantes a implementar en el desarrollo del sistema de gestión de transportes.

TABLA 3
FACTORES DETERMINANTES DE UN TMS

FACTORES CRÍTICOS DETERMINANTES DE UN TMS
KPIs (Key Performance Indicator)
ETA (Estimated Time of Arrival)
Integración de Información
Rentabilidad
Gestión Eficiente de Activos y Costos

La identificación de los factores críticos determinantes mediante la metodología PRISMA permite establecer una jerarquía clara de las prioridades operativas dentro del campo de estudio. El hecho de que variables como los KPIs y el ETA registren la máxima frecuencia subraya el papel determinante de la previsibilidad y la precisión en la cadena de valor actual. Por ello, el monitoreo en tiempo real de estos factores no solo impacta la satisfacción del cliente, sino que también permite mitigar los costos asociados a cuellos de botella y demoras logísticas.

Por otro lado, factores como Integración de Información, Rentabilidad y Gestión Eficiente de Activos y Costos evidencia que la eficiencia no depende de esfuerzos aislados, sino de la visibilidad de los datos. Centralizar la información permite una monitorización continua para reaccionar ante imprevistos antes de que escalen a fallos críticos. Por lo tanto, mapear estos factores críticos determinantes constituye un eje estratégico para que las organizaciones dirijan sus recursos tecnológicos hacia las áreas que garantizan la ventaja competitiva en el mercado.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La materialización del Sistema Inteligente de Gestión de Transporte (SiGeTra) se concreta en el desarrollo de un *dashboard* interactivo construido en Power BI, cuya

arquitectura de integración y diseño visual se deriva directamente de los factores identificados en la revisión de literatura. La integración de datos sigue el siguiente flujo, donde la Base de Datos Central, alimentada por un Formulario Web, consolida la información operativa y financiera. Esta integración es el sustento técnico que permite transformar datos crudos en los cinco factores críticos, pasando de la recolección a la visualización estratégica. La [Figura 2](#) presenta el método utilizado para el diseño del *dashboard* SiGetra.

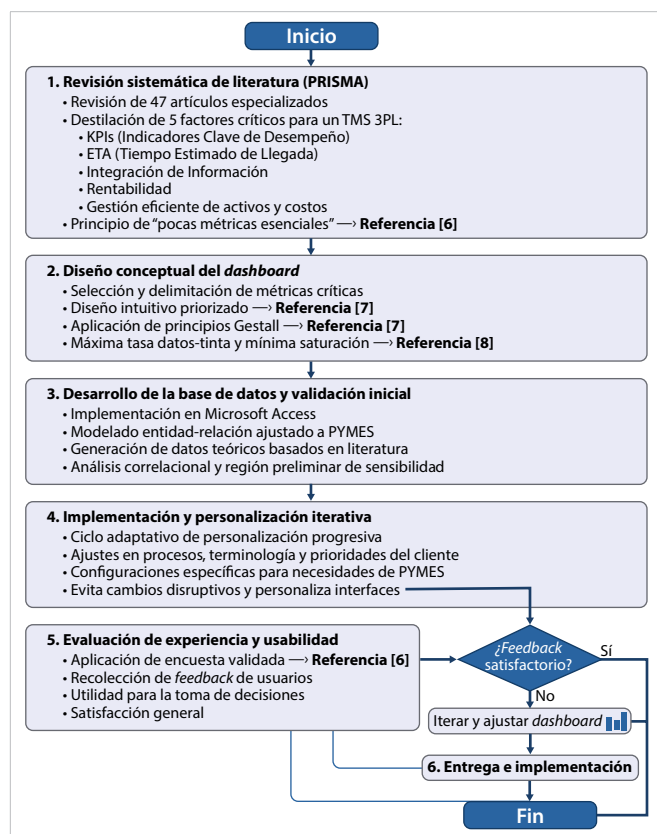


Figura 2. Método para el diseño del *dashboard* SiGetra.

Un punto relevante consiste en generar una estructura que permita visualizar la información de forma simultánea, cohesionada, priorizando la usabilidad y la toma de decisiones ágil, tal como recomienda el principio de “las pocas métricas esenciales” planteado en [6] y los “cuadrantes mágicos para la inteligencia del negocio” establecido en [9].

Por ello, se decidió aplicar la estrategia del diseño progresivo para así integrar los puntos extraídos de la literatura y cubrir las necesidades de las pymes del sector logístico mexicano localizado en Ciudad Juárez. Por lo tanto, el proceso no consistió solamente en hacer una

interfaz gráfica en Power BI, también se tomaron ideas de manera ordenada con el fin de poder encontrar el punto óptimo para la interpretación de los datos y obtener los mejores resultados posibles en la toma de decisiones. Considerando lo anterior, la primera fase del diseño consistió en establecer la estructura general del panel de control. En esta etapa se definieron los elementos principales que el *dashboard* debía contener, tomando como base los cinco factores críticos identificados. La [Figura 3](#) presenta la estructura inicial del *dashboard*.

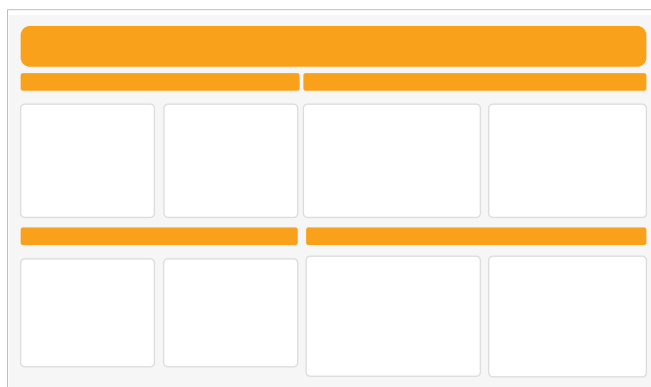


Figura 3. Primera estructura conceptual del *dashboard* SiGetra.

La [Figura 4](#) muestra la organización visual inicial de los factores críticos, donde es importante indicar que la disposición de los componentes no es arbitraria; responde a una lógica operativa donde la información más dinámica y táctica ocupa un lugar prominente, mientras que los indicadores financieros y de gestión estratégica complementan el panorama general.

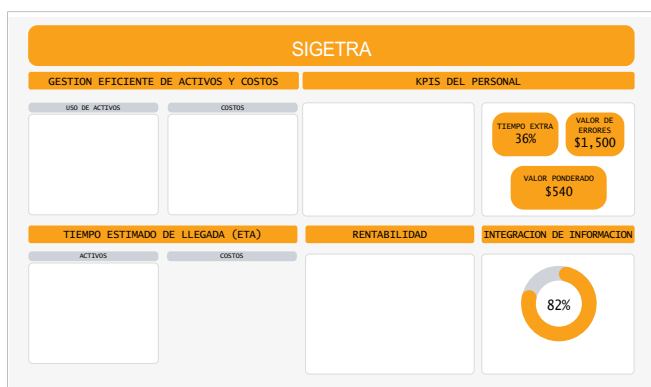


Figura 4. Organización visual inicial de los factores críticos.

Una vez definida la estructura general del *dashboard*, la segunda etapa se enfocó en organizar visualmente los distintos componentes del panel. En esta fase se aplicaron los principios de diseño recomendados por [10], quienes señalan que la coordinación entre diferentes vistas

permite mejorar la exploración de los datos por parte del usuario. Además, se aplicaron principios de la psicología analizados en [11], particularmente los relacionados con la proximidad y la similitud. Estos principios permitieron agrupar elementos visuales relacionados, facilitando la comprensión de la información y reduciendo la carga cognitiva del usuario. De esta manera, indicadores pertenecientes a una misma categoría fueron colocados en zonas visualmente cercanas dentro del *dashboard*.

La tercera etapa del diseño consistió en seleccionar los tipos de gráficos adecuados para representar cada variable del sistema. Esta selección se realizó considerando las recomendaciones de [12], donde se destaca la importancia de adaptar las visualizaciones a la audiencia y al tipo de información que se desea analizar. En este contexto, se eligieron diferentes tipos de gráficos disponibles en Power BI, tales como gráficos de barras, gráficos de líneas, tarjetas de indicadores y tablas dinámicas. Cada uno de estos elementos fue seleccionado en función del tipo de dato a representar y que permitieran agilizar la interpretación de la información. Ejemplo de lo anterior son los indicadores de desempeño general que se representaron mediante tarjetas de valor único, ya que este tipo de visualización permite identificar rápidamente el estado de una métrica específica.

Por otra parte, las tendencias temporales, como el uso de activos o el KPIs del personal, se representaron mediante gráficos de línea que facilitan el análisis de cambios a lo largo del tiempo. Por su parte, en [13] los autores demostraron que la visualización explícita de relaciones entre múltiples gráficos permite a los usuarios comprender mejor cómo se conectan diferentes variables operativas, un principio aplicado en SiGeTra para correlacionar tiempos de entrega, consumo de combustible y utilización de flota (Figura 5).



Figura 5. Implementación de las primeras visualizaciones en Power BI.

Una vez integradas las visualizaciones principales, se realizó una etapa de optimización orientada a mejorar la claridad del *dashboard*. En esta fase se consideraron las recomendaciones de [14] y [8], cuyos autores destacan la importancia de reducir el ruido visual y utilizar el color de manera estratégica. Complementariamente, en [15] se identificaron patrones de diseño recurrentes en *dashboards* y confirmaron que estos patrones se replican sistemáticamente en la práctica profesional, lo que valida las decisiones de diseño adoptadas en SiGeTra.

Siguiendo estas recomendaciones, se realizaron ajustes en la paleta de colores, el tamaño de los elementos y la distribución de los gráficos dentro del panel, para evitar la saturación visual y facilitar que el usuario pueda identificar rápidamente la información más relevante. Finalmente, con el propósito de facilitar la interpretación de los datos por parte de los tomadores de decisiones, se realizaron ajustes visuales y estructurales, mediante lo cual se obtuvo una versión consolidada del *dashboard* SiGeTra. Esta versión integra los distintos indicadores y visualizaciones dentro de una interfaz coherente que permite analizar el desempeño logístico de la empresa desde diferentes perspectivas (Figura 6).



Figura 6. Prototipo del *dashboard* interactivo SiGeTra.

En la Figura 6 se observa que la sección de KPIs de Desempeño del Operador se sitúa en la posición de mayor jerarquía visual, presentando métricas como Horas Promedio de Manejo y Puntuación de Seguridad. Esta disposición se justifica porque el operador es el actor principal en la ejecución logística y monitorear su desempeño directamente, como se demostró en [1], permite identificar mejores prácticas y corregir malos hábitos de manejo que incrementan costos, impactando positivamente en la Gestión Eficiente de Activos y Costos. Adyacente a esto, la sección de Tiempo Estimado de Llegada (ETA) muestra una lista en tiempo real de las

rutas con su estado, permitiendo una supervisión continua del cumplimiento.

Como se identificó en [16], esta visualización es fundamental para la Agilidad operativa, permitiendo a los gestores anticipar retrasos y mantener informados a los clientes, lo que se traduce directamente en una mejora de la Rentabilidad. Complementando esta visión operativa, la sección de Rentabilidad centraliza los resultados financieros, mostrando la Ganancia Mensual y desglosando Ingresos versus Costos Operativos. La decisión de incluirla de forma destacada se basa en los hallazgos de [1], donde se documentó una reducción del 12 % en costos operativos tras la implementación de un sistema de inteligencia, posibilitando a los gestores correlacionar directamente el desempeño en ruta con los resultados financieros.

Al mismo tiempo, el componente de Información Digital (Integración de Información) cuantifica el éxito de la in-

tegración al mostrar el porcentaje global de procesos digitalizados y su desglose. En [17], los autores, enfatizan que este es el primer paso para una inteligencia de negocio efectiva, donde un alto porcentaje indica que el sistema SiGeTra está logrando su objetivo de eliminar silos de información y crear una base de datos única y confiable.

Finalmente, la sección de Gestión de Costos y Activos proporciona una visión detallada de la estructura de costos y la tasa de utilización de la flota. Esta visualización es fundamental para la Gestión Eficiente de Activos y Costos, permitiendo, como se demostró en [18], identificar los principales generadores de gasto y optimizar el uso de los recursos más valiosos de la empresa a través de una asignación más eficiente. La [Tabla 4](#) sintetiza el tipo de información presentada en el *dashboard* y las características cualitativas o ventajas que aporta cada una, fundamentando su valor en el contexto de las pymes logísticas.

TABLA 4
CARACTERÍSTICAS CUALITATIVAS Y VENTAJAS DE LA INFORMACIÓN EN EL *DASHBOARD* SiGeTra

FACTOR CRÍTICO / TIPO DE INFORMACIÓN	CARACTERÍSTICAS CUALITATIVAS Y VENTAJAS
KPIs (Desempeño del Operador) / Métricas individuales y agregadas (horas de manejo, seguridad, calificación).	• Relevancia: información directa sobre el recurso humano clave. • Accionabilidad: permite reconocimiento, capacitación específica y corrección de malas prácticas. • Comparabilidad: facilita la evaluación entre operadores.
ETA (Tiempo Estimado de Llegada) / Lista de rutas activas con hora ETA y estado (a tiempo, retrasado).	• Oportunidad: permite una gestión proactiva de incidencias. • Transparencia: mejora la comunicación con el cliente. • Confiabilidad: se basa en datos de GPS y registros en tiempo real.
Rentabilidad / Ganancia mensual, margen, desglose de ingresos y costos operativos.	• Esencialidad: muestra el resultado financiero final. • Predictibilidad: ayuda a proyectar tendencias financieras. • Contextualización: relaciona el desempeño operativo con el resultado económico.
Integración de Información / Porcentaje de digitalización general y por proceso específico.	• Medibilidad: cuantifica el grado de implementación del sistema. • Diagnóstico: identifica áreas donde persiste la dependencia de procesos manuales. • Eficiencia: un alto porcentaje se correlaciona con menor reproceso y errores.
Gestión Eficiente de Activos y Costos / Valor de activos, costos mensuales desglosados, tasa de utilización de flota.	• Control: permite un control detallado de los gastos principales. • Optimización: la tasa de utilización indica la eficiencia en el uso de la flota. • Planificación: sirve de base para presupuestos y decisiones de inversión.

IV. CONCLUSIONES

El presente artículo analizó el potencial de las herramientas tecnológicas de fácil acceso para abordar las ineficiencias logísticas que afectan a las pymes del sector transporte en Ciudad Juárez. A través de una revisión sistemática de literatura, se identificaron cinco factores críticos determinantes para un Sistema de Gestión de Transporte (TMS): KPIs de desempeño del operador, tiempo estimado de llegada (ETA), integración de información, rentabilidad y gestión eficiente de activos y

costos. Sobre esta base, se propuso el Sistema Inteligente de Gestión de Transporte (SiGeTra), cuya arquitectura híbrida fue fundamentada como la más adecuada para el contexto de recursos limitados característico de estas empresas.

Los resultados de este trabajo demuestran que es posible materializar estos factores en un *dashboard* interactivo desarrollado en Power BI, una herramienta de bajo costo y alta adopción. El prototipo presentado evidencia cómo la visualización estratégica y unificada de la

información transforma datos operativos dispersos en *insights* accionables, permitiendo una toma de decisiones informada y ágil. La viabilidad de SiGeTra radica precisamente en su enfoque práctico, que prioriza la funcionalidad esencial sobre la complejidad tecnológica, cerrando la brecha entre las capacidades limitadas de las pymes y los beneficios documentados de la digitalización logística, tales como la reducción de costos operativos y el aumento en la utilización de activos reportados. En consecuencia, se concluye que la implementación de un sistema como SiGeTra representa una oportunidad significativa para incrementar la competitividad y la supervivencia empresarial de las pymes transportistas de la región. Al proporcionar visibilidad sobre las operaciones y su impacto financiero, se fortalece la capacidad logística del sector y se sientan las bases para una mejora continua.

Como resultado esperado de la implementación de esta propuesta, se visualiza una mejora del 12 % en la reducción de costos operativos, alineándose con los hallazgos de la literatura revisada, lo cual será objeto de validación y análisis en publicaciones futuras.

Con base en lo anterior, se formulan las siguientes recomendaciones:

- Para los gestores de pymes logísticas: Se recomienda adoptar un enfoque gradual hacia la digitalización, comenzando por la implementación de *dashboards* centrados en los factores críticos aquí identificados. La inversión inicial en herramientas accesibles como Power BI y Microsoft Access puede generar retornos significativos en eficiencia y control de costos.
- Para futuras investigaciones: Se sugiere profundizar en la fase de implementación empírica de SiGeTra, realizando un estudio de caso para cuantificar su impacto real en los indicadores de rendimiento de una pyme transportista de Ciudad Juárez. Asimismo, se recomienda explorar la integración de técnicas de inteligencia artificial para la predicción proactiva de fallos en vehículos y la optimización dinámica de rutas.
- Para el desarrollo tecnológico: Si bien el prototipo se centró en Power BI por su accesibilidad, se recomienda explorar el uso de herramientas de código abierto para futuras iteraciones, con el fin

de aumentar la escalabilidad y reducir aún más los costos de licencias, facilitando la adopción a mayor escala.

REFERENCIAS

- [1] C. Heinbach, P. Meier y O. Thomas, “Designing a shared freight service intelligence platform for transport stakeholders using mobile telematics”, *Inf Syst E-Bus Manage*, vol. 20, n.º 4, pp. 847-888, 2022, doi: [10.1007/s10257-022-00572-5](https://doi.org/10.1007/s10257-022-00572-5).
- [2] A. C. Corrêa, “Supply Chain Control Tower: Definitions and Gaps Between Literature and Application in Industries”, tesis de maestría, Federal University of Santa Catarina, Joinville, 2023. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/252988>
- [3] J. van der Steen, “Shell Chemicals Supply Chain Performance Dashboard”, tesis de maestría, Eindhoven University of Technology, Rotterdam, 2019. [En línea]. Disponible: https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/140000761/Master_Thesis_Jasper_van_der_Steen_.pdf
- [4] V. Kortian, S. Pal, N. Ghevondian y S. Harrison, “Challenges and Issues in Implementing & Operationalising Big Data Analytics Capabilities in a major Australian Railway Organisation: A Case Study”, *SN Comput. Sci.*, vol. 5, n.º 6, art. 639, 2024, doi: [10.1007/s42979-024-02953-8](https://doi.org/10.1007/s42979-024-02953-8).
- [5] F. Leyva, I. J. C. Pérez-Olguín y G. E. Riosvelasco, “Diseño y puesta en marcha del sistema de gestión de transporte (SiGeTra) para la optimización de rutas urbanas”, *Mem. Científ. Tecnol.*, vol. 4, n.º 2 ed. esp., pp. 91-92, 2025, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32562.16326>.
- [6] M. G. Brown, *Keeping score: Using the right metrics to drive world-class performance*. Productivity Press, 1996.
- [7] C. J. Costa y M. Aparicio, “Supporting the decision on dashboard design charts”, en *Proc. of 254th The IIER Int. Conf.*, San Petersburgo, Rusia, sept. 9-10, 2019. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10362/85057>
- [8] O. Yigitbasioglu y O. Velcu, “Dashboards in performance management: The foundations and research opportunities for their effective use”, en *Proc. of the 5th Int. Conf.: Accounting and Management Information Systems*,

AMIS 2010, Rumania, 2010, pp. 1004-1022. [En línea].
Disponible: <https://eprints.qut.edu.au/90047/>

- [9] Gartner. “Gartner Magic Quadrant for Analytics and Business Intelligence Platforms”. Gartner.com. Accedido: nov. 9, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.gartner.com/en/documents/6576602>
- [10] Y. Lin, H. Li, A. Wu, Y. Wang Y H. Qu, “DMiner: Dashboard Design Mining and Recommendation”, en *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 30, n.º 7, pp. 4108-4121, jul. 2024, doi: [10.1109/TVCG.2023.3251344](https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3251344).
- [11] J. Ma, “A Study on Perceptual Design of Hierarchical Graphic Information in Interfaces Based on Gestalt Principles”, *Appl. Sci.*, vol. 15, n.º 21, art. 11327, 2025, doi: [10.3390/app152111327](https://doi.org/10.3390/app152111327).
- [12] G. Sedrakyan, E. Mannens y K. Verbert, “Guiding the choice of learning dashboard visualizations: Linking dashboard design and data visualization concepts”, *J. Vis. Lang. Comput.*, vol. 50, pp. 19-38, 2019, doi: [10.1016/J.JVLC.2018.11.002](https://doi.org/10.1016/J.JVLC.2018.11.002).
- [13] C. Viau y M. J. McGuffin, “ConnectedCharts: Explicit Visualization of Relationships between Data Graphics”, *Comput. Graph. Forum.*, vol. 31, n.º 3pt4, pp. 1285-1294, 2012 doi: [10.1111/J.1467-8659.2012.03121.X](https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2012.03121.X).
- [14] S. S. J. Alhadad, “Visualizing Data to Support Judgement, Inference, and Decision Making in Learning Analytics: Insights from Cognitive Psychology and Visualization Science”, *J. Learn. Anal.*, vol. 5, n.º 2, pp. 60-85, 2018, doi: [10.18608/JLA.2018.52.5](https://doi.org/10.18608/JLA.2018.52.5).
- [15] B. Bach *et al.*, “Dashboard Design Patterns”, en *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 29, n.º 1, pp. 342-352, en. 2023, doi: [10.1109/TVCG.2022.3209448](https://doi.org/10.1109/TVCG.2022.3209448).
- [16] D. Gurdür, K. Raizer y J. El-Khoury, “Data visualization support for complex logistics operations and cyber-physical systems”, en *Proc. of the 13th Int. Joint Conf. on Comput. Vis., Imag. and Comp. Graphics Theory and Appl.*, vol. 2, pp. 200-211, 2018, doi: [10.5220/0006569402000211](https://doi.org/10.5220/0006569402000211).
- [17] P. Shelar, A. Parandkar y S. Panchal, “Enhancing Business Intelligence with Real-Time Sales Dashboards: Integrating SQL Databases and Power BI”, *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 12 n.º V, pp. 1368-1374, may. 2024, doi: [10.22214/ijraset.2024.61318](https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.61318).
- [18] S. Y. Khoury, “Route activity tracking and management using available technology”, *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 3, n.º 1, pp. 35-42, 2012, doi: [10.5267/J.IJIEC.2011.08.014](https://doi.org/10.5267/J.IJIEC.2011.08.014).

RECONOCIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo brindado durante la realización de este documento, mediante la beca otorgada bajo el CVU 2052449.

Modelos de evaluación y adopción tecnológica: un análisis comparativo en contextos de tecnologías emergentes

Technology Assessment and Adoption Models: A Comparative Analysis in Emerging Technology Contexts

Beatriz Alvarado Robles^{1a} , Víctor Manuel Alonso Mendoza^{1b} , Francesco García^{1a} , Alma Guadalupe Rodríguez Ramírez^{1a}  

¹ {^aDepartamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología}, {^bSubdirección de Formación Integral, Dirección General de Formación y Profesionalización}, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez; Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es comparar los alcances y limitaciones de cuatro enfoques utilizados en la evaluación y adopción de tecnologías: Technology Acceptance Model (TAM), System Usability Scale (SUS), Technology Readiness Levels (TRL) y el modelo motivacional ARCS. Se realizó un estudio documental descriptivo-comparativo, considerando propósito, dimensiones, ventajas, limitaciones y utilidad de cada enfoque frente a tecnologías emergentes. Los resultados muestran diferencias en los aspectos evaluados. TRL se centra en la madurez técnica; TAM, en la aceptación por parte de los usuarios; SUS, en la usabilidad percibida; y ARCS, en factores relacionados con la motivación. También se identificaron áreas de complementariedad, ya que una sola perspectiva puede ser insuficiente para valorar una tecnología. A partir de la comparación se propone un esquema conceptual que organiza los aportes de los cuatro enfoques y su relación con la toma de decisiones sobre la adopción tecnológica. Al tratarse de un análisis conceptual, fue necesario valorar su aplicación en contextos reales y tecnologías específicas. Los resultados sugieren que la selección o combinación de estos enfoques puede ampliar la información disponible para evaluar tecnologías emergentes y apoyar decisiones relacionadas con su selección, implementación y adopción.

PALABRAS CLAVE: tecnologías emergentes; adopción tecnológica; madurez tecnológica; usabilidad; motivación.

ABSTRACT

The objective of this research is to compare the scope and limitations of four approaches used in technology evaluation and adoption: the Technology Acceptance Model (TAM), the System Usability Scale (SUS), Technology Readiness Levels (TRL), and the ARCS motivational model. A descriptive-comparative documentary study was conducted, considering the purpose, dimensions, advantages, limitations, and utility of each approach regarding emerging technologies. The results highlight key differences in the aspects evaluated: TRL focuses on technical readiness; TAM, on user acceptance; SUS, on perceived usability; and ARCS, on motivation-related factors. Areas of complementarity were also identified, as relying on a single perspective may be insufficient to fully evaluate a technology. Based on this comparison, a conceptual framework is proposed to organize the contributions of all four approaches and their relationship with decision making in technology adoption. As this was a conceptual analysis, it was necessary to evaluate its application in real-world contexts and specific technologies. Ultimately, the findings suggest that selecting or combining these approaches can broaden the insights available for evaluating emerging technologies and better support decisions regarding their selection, implementation, and adoption.

KEYWORDS: emerging technologies; technology adoption; technology readiness; usability; motivation.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Alma Guadalupe Rodríguez Ramírez
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez /
Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, C. P. 23320, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: alma.rodriguez.ram@uacj.mx

Fecha de recepción: 9 de agosto de 2026. **Fecha de aceptación:** 23 de agosto de 2026. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

La evaluación de una tecnología emergente plantea una dificultad que va más allá de determinar si esta funciona o ha alcanzado un nivel suficiente de desarrollo. Una tecnología puede mostrar avances importantes desde el punto de vista técnico y, al mismo tiempo, presentar dificultades para ser utilizada, aceptada o incorporada de manera sostenida por sus usuarios. Estas diferencias adquieren relevancia cuando la evaluación se utiliza como apoyo para decidir sobre su selección, implementación o continuidad.

1.1. ENFOQUES PARA LA EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS EMERGENTES

Los Technology Readiness Levels (TRL) permiten establecer el grado de madurez alcanzado por una tecnología durante su desarrollo [1]. Sin embargo, este indicador no determina por sí mismo su posibilidad de adopción. Östlund *et al.* encontraron, al analizar tecnologías robóticas aplicadas al ámbito de la salud, que el potencial de adopción de una tecnología técnicamente madura no puede valorarse de manera independiente del contexto social en el que será utilizada [2]. De manera similar, Trump *et al.* señalan que la evaluación de tecnologías emergentes requiere incorporar criterios adicionales a la madurez técnica y proponen complementar los TRL con aspectos relacionados con la seguridad durante las distintas etapas de desarrollo [3].

La respuesta de los usuarios constituye otra parte del proceso de evaluación. El Technology Acceptance Model (TAM) analiza la aceptación principalmente a partir de la utilidad y facilidad de uso percibidas [4]. Su aplicación continúa vigente frente a tecnologías recientes. Lee *et al.* documentaron su utilización en educación médica para estudiar diferentes tecnologías de aprendizaje, incluidas alternativas como realidad aumentada, realidad virtual e impresión 3D [5]. La misma revisión muestra un incremento sostenido en las publicaciones que utilizan TAM en este ámbito durante los últimos años.

La aceptación tampoco equivale necesariamente a usabilidad. La System Usability Scale (SUS), propuesta originalmente por Brooke [6], permite valorar la usabilidad percibida mediante un instrumento breve y estandarizado. Su utilización se mantiene vigente en diferentes soluciones digitales. En una evaluación psicométrica

publicada en 2025, Åvik Persson *et al.* reportaron una consistencia interna de $\alpha = 0.852$ y evidencia favorable de validez de constructo [7]. En contextos formativos, además, puede ser necesario considerar los factores que favorecen el interés y la participación del usuario durante una experiencia apoyada por tecnología.

El modelo ARCS aborda este componente mediante cuatro elementos: atención, relevancia, confianza y satisfacción [8]. Una aplicación reciente del modelo en educación superior utilizó estos componentes para analizar la motivación y el aprendizaje en experiencias con animación 3D, realidad virtual y simulación [9].

1.2. NECESIDAD DE UN ANÁLISIS COMPARATIVO

En conjunto, TRL, TAM, SUS y ARCS no evalúan el mismo fenómeno ni fueron desarrollados con un propósito común. Esta diferencia constituye precisamente el punto de partida de la comparación: TRL aporta información sobre madurez tecnológica; TAM, sobre aceptación; SUS, sobre usabilidad percibida; y ARCS, sobre aspectos motivacionales. Analizarlos desde criterios comunes permite reconocer no solo sus aportaciones individuales, sino también aquello que queda fuera del alcance de cada enfoque cuando se utiliza de manera aislada.

Por ello, el objetivo de este estudio es comparar los alcances, dimensiones, ventajas y limitaciones de TAM, SUS, TRL y ARCS en el contexto de las tecnologías emergentes, e identificar sus diferencias y posibles áreas de complementariedad. El análisis busca aportar criterios que faciliten una valoración más amplia de estas tecnologías y representar, mediante un esquema conceptual, la contribución específica de cada enfoque dentro del proceso de evaluación.

II. METODOLOGÍA

Se realizó un estudio documental con enfoque cualitativo y alcance descriptivo-comparativo, orientado al análisis de enfoques empleados para valorar diferentes aspectos relacionados con el desarrollo, uso y adopción de tecnologías. El procedimiento se organizó en tres etapas: selección y caracterización de los enfoques, definición de criterios comunes de comparación y análisis de sus diferencias y posibles áreas de complementariedad.

2.1. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS ENFOQUES

Se seleccionaron el Technology Acceptance Model (TAM), la System Usability Scale (SUS), los Technology Readiness Levels (TRL) y el modelo motivacional ARCS. La selección consideró que cada enfoque aborda un componente diferente relacionado con la evaluación tecnológica: aceptación, usabilidad, madurez tecnológica y motivación, respectivamente. Esta diversidad permitió analizar el fenómeno desde perspectivas centradas tanto en las características de la tecnología como en la respuesta de sus usuarios.

Para caracterizar cada enfoque, se consultaron las publicaciones originales en las que fueron propuestos, así como estudios relacionados con su desarrollo, aplicación y uso frente a tecnologías emergentes. Asimismo, se incorporaron trabajos recientes que permitieran contrastar los planteamientos originales con aplicaciones y discusiones actuales. La información recuperada se utilizó como sustento para identificar el propósito, los componentes y el alcance de cada enfoque.

2.2. CRITERIOS DE COMPARACIÓN

La comparación se realizó mediante cinco criterios comunes: propósito de evaluación, dimensiones o componentes, ventajas, limitaciones y utilidad frente a tecnologías emergentes. Estos criterios se aplicaron de manera equivalente a TAM, SUS, TRL y ARCS con el fin de identificar qué aspecto de la evaluación aborda cada uno de los enfoques, qué información proporciona y cuáles son sus principales restricciones cuando se utiliza de forma independiente.

La información obtenida se organizó bajo una misma estructura para facilitar el análisis de los enfoques de acuerdo con los criterios establecidos.

2.3. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

A partir de la información recopilada, se realizó un análisis transversal de los cuatro enfoques. Primero se examinaron sus diferencias de acuerdo con los criterios establecidos y, posteriormente, se identificaron relaciones de complementariedad entre las dimensiones evaluadas. También se revisaron los aspectos que quedan fuera del alcance de un enfoque y que pueden ser considerados desde otro de los enfoques seleccionados.

Finalmente, las relaciones identificadas se organizaron en un esquema conceptual para representar la contribución de TAM, SUS, TRL y ARCS en la evaluación tecnológica. Para su elaboración se consideró el propósito principal de cada enfoque y las relaciones de complementariedad identificadas durante el análisis.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación permitió identificar diferencias en el propósito, alcance y tipo de información que aporta cada enfoque. TAM, SUS, TRL y ARCS abordan distintos aspectos de la evaluación tecnológica y, por lo tanto, no pueden considerarse alternativas equivalentes. Mientras algunos se centran en las características o el grado de desarrollo de la tecnología, otros consideran la percepción y respuesta de los usuarios. Estas diferencias permiten analizar qué aporta cada enfoque y qué aspectos quedan fuera de su alcance cuando se utiliza de manera individual.

3.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO

La [Tabla 1](#) presenta los resultados de la comparación de acuerdo con los cinco criterios establecidos: propósito de evaluación, dimensiones o componentes, ventajas, limitaciones y utilidad frente a tecnologías emergentes.

TABLA 1
COMPARACIÓN DE LOS ENFOQUES TAM, SUS, TRL Y ARCS

ENFOQUE	PROPÓSITO DE EVALUACIÓN	DIMENSIONES O COMPONENTES	VENTAJAS	LIMITACIONES	UTILIDAD FRENTE A TECNOLOGÍAS EMERGENTES
TAM [4] , [5]	Analizar la aceptación y la intención de uso de una tecnología.	Utilidad percibida y facilidad de uso percibida.	Permite identificar factores asociados con la disposición del usuario para utilizar una tecnología.	En su formulación básica no incorpora de manera amplia factores contextuales, sociales o afectivos.	Permite explorar la aceptación de tecnologías nuevas desde las primeras experiencias de los usuarios.

TABLA 1 (CONT.)
COMPARACIÓN DE LOS ENFOQUES TAM, SUS, TRL Y ARCS

ENFOQUE	PROPÓSITO DE EVALUACIÓN	DIMENSIONES O COMPONENTES	VENTAJAS	LIMITACIONES	UTILIDAD FRENTE A TECNOLOGÍAS EMERGENTES
SUS [6], [7]	Valorar la usabilidad percibida de un sistema o producto.	Diez ítems que generan una puntuación global de usabilidad.	Es breve, de aplicación sencilla y permite comparar la percepción de usabilidad entre sistemas.	Ofrece una valoración global y no explica por sí sola las causas de los problemas identificados.	Facilita una valoración rápida de la interacción del usuario con sistemas y soluciones tecnológicas emergentes.
TRL [1], [2], [3]	Determinar el nivel de madurez alcanzado por una tecnología.	Nueve niveles progresivos de madurez tecnológica.	Permite ubicar el desarrollo técnico y dar seguimiento a su avance.	La madurez técnica no permite determinar por sí misma la aceptación, usabilidad o respuesta del usuario.	Ayuda a establecer si una tecnología cuenta con un nivel de desarrollo suficiente para avanzar hacia pruebas o implementación.
ARCS [8], [9]	Analizar los factores motivacionales asociados con una experiencia de aprendizaje.	Atención, relevancia, confianza y satisfacción.	Incorpora una dimensión motivacional que no está considerada directamente en los otros enfoques.	Su origen educativo limita su aplicación directa a contextos en los que la motivación no constituye un componente relevante de la interacción.	Resulta especialmente útil cuando la tecnología se incorpora en procesos educativos o de formación.

La comparación muestra una primera diferencia entre los enfoques. TRL se centra en el grado de desarrollo de la tecnología [1], mientras que TAM, SUS y ARCS consideran aspectos relacionados con los usuarios [4], [6], [8]. Esta diferencia es importante porque una tecnología puede alcanzar un nivel alto de madurez sin que esto garantice su aceptación o adopción. Östlund *et al.* observaron esta diferencia al analizar tecnologías robóticas aplicadas al ámbito de la salud, donde la madurez tecnológica y el potencial de adopción no necesariamente avanzaron de la misma manera [2]. Esto coincide con planteamientos recientes que proponen complementar TRL con otros criterios cuando se requiere una valoración más amplia de tecnologías emergentes [3].

También existen diferencias entre TAM y SUS, aunque ambos consideran la perspectiva del usuario. TAM permite analizar la aceptación de una tecnología a partir de su utilidad y facilidad de uso percibidas [4]. Posteriormente, el modelo fue ampliado para incorporar otros factores relacionados con la aceptación y la intención de uso [10]. Por su parte, SUS se enfoca en la usabilidad percibida [6].

Por ello, considerar una tecnología útil no significa necesariamente que la experiencia al utilizarla sea favo-

orable. Estudios recientes muestran que TAM continúa utilizándose para analizar la aceptación de tecnologías actuales en educación médica [5], mientras que SUS cuenta con evidencia previa sobre su aplicación e interpretación [11] y con evaluaciones recientes que continúan respaldando sus propiedades psicométricas [7].

ARCS aporta un aspecto diferente al análisis, ya que se enfoca en la motivación durante una experiencia de aprendizaje [8], [12]. Esto hace que su aplicación sea especialmente útil en contextos educativos o de formación. Su uso con realidad virtual, animación 3D y simulación muestra que sus componentes pueden emplearse para analizar la motivación ante tecnologías actuales [9]. Sin embargo, esta característica también delimita su alcance, ya que la motivación no necesariamente tiene la misma importancia en todos los contextos de aplicación tecnológica.

3.2. COMPLEMENTARIEDAD DE LOS ENFOQUES

La comparación muestra que la complementariedad entre los cuatro enfoques se debe a que cada uno analiza un aspecto diferente de la evaluación tecnológica. TRL permite conocer el grado de desarrollo de una tecnología [1], mientras que TAM considera su aceptación por parte de

los usuarios [4]. SUS aporta información sobre la usabilidad percibida [6] y ARCS incorpora la motivación cuando la tecnología se utiliza en un contexto de aprendizaje [8]. La ampliación del TAM propuesta por Venkatesh y Davis también muestra que la aceptación puede estar influida por factores adicionales a los considerados en su formulación inicial [10]. De manera similar, Sauser *et al.* propusieron el concepto de System Readiness Level (SRL), que amplía la valoración de la madurez al considerar tanto los TRL individuales como la integración entre las tecnologías que forman parte de un sistema [13]. Por esta razón, utilizar más de un enfoque puede ampliar la información disponible para valorar una tecnología, sin que esto implique que uno sustituya a otro.

Esta complementariedad también permite considerar diferentes preguntas durante la evaluación. Una tecnología puede contar con un nivel adecuado de madurez, pero presentar dificultades de uso o una baja aceptación. De la misma manera, una tecnología percibida como útil y fácil de usar puede no generar el interés o la motivación esperados cuando se incorpora a una experiencia educativa. Por ello, los resultados obtenidos mediante un enfoque deben interpretarse de acuerdo con la dimensión que evalúa y no como una valoración general de la tecnología.

A partir de estas relaciones se elaboró el esquema conceptual presentado en la [Figura 1](#), que organiza los cuatro enfoques de acuerdo con su principal contribución a la evaluación tecnológica y permite visualizar las dimensiones consideradas y los puntos en los que la información obtenida mediante un enfoque puede complementarse con la aportada por otro para apoyar decisiones relacionadas con la adopción de la tecnología.

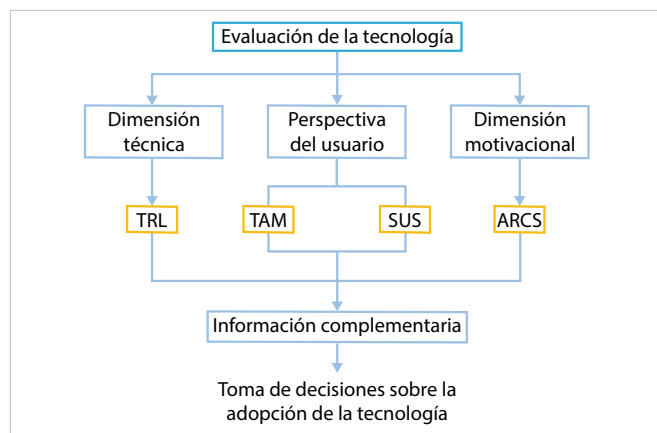


Figura 1. Complementariedad de los enfoques analizados en la evaluación tecnológica.

La elección del enfoque depende de lo que se necesite conocer sobre la tecnología. TRL permite establecer su grado de desarrollo técnico [1], [2], [3], mientras que TAM se orienta al análisis de la aceptación por parte de los usuarios [4], [5]. Cuando el interés se centra en la experiencia de uso, SUS permite valorar la usabilidad percibida [6], [7]. En el ámbito educativo, ARCS añade el componente motivacional a través de la atención, relevancia, confianza y satisfacción [8], [9].

Esto no significa que los cuatro enfoques deban utilizarse en todos los casos. La elección puede hacerse de acuerdo con el propósito de la evaluación y con la información que se necesita para tomar una decisión. Así, más que proponer el uso conjunto de TAM, SUS, TRL y ARCS, el análisis permite reconocer qué puede aportar cada uno y en qué situaciones puede ser útil complementar la evaluación con otro enfoque.

En las tecnologías emergentes, el contexto también debe considerarse al momento de definir qué aspectos se van a evaluar. Estudios sobre tecnologías inteligentes muestran que su adopción no depende únicamente de sus características técnicas, sino también de factores relacionados con los usuarios y las organizaciones [14]. De manera similar, el análisis de tecnologías emergentes en distintos procesos muestra que las condiciones en las que se integran pueden influir en sus resultados y en la forma en que son utilizadas [15].

IV. CONCLUSIONES

El análisis comparativo permitió reconocer que TAM, SUS, TRL y ARCS aportan información diferente al evaluar una tecnología. Esto muestra que recurrir a un solo enfoque puede dejar fuera aspectos importantes, sobre todo cuando se requiere considerar el desarrollo técnico y la experiencia de quienes utilizarán la tecnología.

La madurez tecnológica no garantiza por sí misma que una tecnología será aceptada o fácil de utilizar. De igual forma, una valoración favorable de los usuarios no permite conocer su grado de desarrollo técnico. En el ámbito educativo, además, la motivación puede ser un elemento relevante para comprender la experiencia de uso. Estas diferencias explican el valor de considerar más de una perspectiva durante la evaluación.

Esto no significa que los cuatro enfoques deban aplicarse de manera conjunta. Su elección dependerá de lo que

se necesite evaluar, de las características de la tecnología y del contexto en el que se pretende utilizar. El esquema conceptual propuesto resume estas relaciones y permite reconocer qué información puede aportar cada enfoque para apoyar decisiones sobre la adopción tecnológica.

Como siguiente paso, será necesario aplicar este esquema en contextos específicos y con diferentes tipos de tecnologías emergentes. Esto permitirá valorar su utilidad en situaciones reales de evaluación e identificar los ajustes que puedan requerirse, según el contexto de aplicación.

REFERENCIAS

- [1] J. C. Mankins, "Technology readiness levels: A white paper", NASA, 1995.
- [2] B. Östlund et al., "Interactive robots for health in Europe: Technology readiness and adoption potential", *Front. Public Health*, vol. 11, art. 979225, 2023, doi: [10.3389/fpubh.2023.979225](https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.979225).
- [3] B. D. Trump, J. Trump, D. Antunes, J. Palma-Oliveira y J. Keisler, "Fusing technology readiness levels (TRLs) and safe-by-design (SbB) for guiding investment in emerging technologies", *Environ. Syst. Decis.*, vol. 45, art. 45, 2025, doi: [10.1007/s10669-025-10027-0](https://doi.org/10.1007/s10669-025-10027-0).
- [4] F. D. Davis, "Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology", *MIS Q.*, vol. 13, n.º 3, pp. 319-340, sept. 1989, doi: [10.2307/249008](https://doi.org/10.2307/249008).
- [5] J. W. Y. Lee, J. Y. Tan y F. Bello, "Technology Acceptance Model in medical education: Systematic review", *JMIR Med. Educ.*, vol. 11, art. e67873, 2025, doi: [10.2196/67873](https://doi.org/10.2196/67873).
- [6] J. Brooke, "SUS: A 'quick and dirty' usability scale", en *Usability Evaluation in Industry*, P. W. Jordan, B. Thomas, B. Weerdmeester y I. L. McClelland, eds. Londres: Taylor & Francis, 1996, pp. 189-194.
- [7] H. Åvik Persson, C. Castor, N. Andersson y M. Hylén, "Swedish version of the System Usability Scale: Translation, adaption, and psychometric evaluation", *JMIR Hum. Factors*, vol. 12, art. e64210, 2025, doi: [10.2196/64210](https://doi.org/10.2196/64210).
- [8] J. M. Keller, "Development and use of the ARCS model of instructional design", *J. Instr. Dev.*, vol. 10, n.º 3, pp. 2-10, 1987, doi: [10.1007/BF02905780](https://doi.org/10.1007/BF02905780).
- [9] A. Kumar et al., "Gamified learning and assessment using ARCS with next-generation AIO/MT integrated 3D animation and virtual reality simulation", *Electronics*, vol. 12, n.º 4, Art. n.º 835, 2023, doi: [10.3390/electronics12040835](https://doi.org/10.3390/electronics12040835).
- [10] V. Venkatesh y F. D. Davis, "A theoretical extension of the Technology Acceptance Model: Four longitudinal field studies", *Manage. Sci.*, vol. 46, n.º 2, pp. 186-204, 2000, doi: [10.1287/mnsc.46.2.186.11926](https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926).
- [11] A. Bangor, P. T. Kortum y J. T. Miller, "An empirical evaluation of the System Usability Scale", *Int. J. Hum.-Comput. Interact.*, vol. 24, n.º 6, pp. 574-594, 2008, doi: [10.1080/10447310802205776](https://doi.org/10.1080/10447310802205776).
- [12] J. M. Keller, *Motivational Design for Learning and Performance: The ARCS Model Approach*. Nueva York, NY, EUA: Springer, 2010, doi: [10.1007/978-1-4419-1250-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1250-3).
- [13] B. Sauser, D. Verma, J. Ramirez-Marquez y R. Gove, "From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels", presentado en Conf. Syst. Eng. Res. (CSER), Los Angeles, CA, EUA, abr. 7-8, 2006, art. 126.
- [14] S. K. Sharma et al., "Unlocking the potential of smart technologies: Addressing adoption challenges", *Inf. Syst. Front.*, vol. 25, n.º 4, pp. 1293-1298, 2023, doi: [10.1007/s10796-023-10408-3](https://doi.org/10.1007/s10796-023-10408-3).
- [15] M. M. Queiroz y S. Fosso, "A structured literature review on the interplay between emerging technologies and COVID-19—Insights and directions to operations fields", *Ann. Oper. Res.*, vol. 335, n.º 3, pp. 937-963, 2024, doi: [10.1007/s10479-021-04107-y](https://doi.org/10.1007/s10479-021-04107-y).

Relación entre el bienestar académico y el *burnout* en estudiantes de ingeniería

Relationship between Academic Well-Being and Burnout among Engineering Students

Karla Gabriela Gómez Bull^{1a} ✉ , Alejandra Flores Sánchez^{1a} , Margarita Portillo Reyes^{1a} , Deysi Guadalupe Márquez Gayosso^{1a} , David Atayde Campos^{1b} 

¹ {^aPrograma de Ingeniería Industrial y de Sistemas}, {^bPrograma de Ingeniería en Manufactura}, Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez; Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo identificar los niveles de las dimensiones del *burnout* académico y analizar su relación con el bienestar académico en estudiantes de ingeniería. Se desarrolló una investigación cuantitativa, descriptiva y transversal con 352 participantes seleccionados mediante muestreo no probabilístico por conveniencia. Se aplicaron el Maslach Burnout Inventory-General Survey for Students y la Utrecht Work Engagement Scale-Student; los datos se examinaron mediante estadística descriptiva, correlaciones de Pearson y ANOVA. El agotamiento registró una media de 3.19, el cinismo de 1.69 y la eficacia académica de 4.08. El agotamiento y el cinismo se asociaron negativamente con vigor, dedicación y absorción, mientras que la eficacia académica mostró correlaciones positivas con las tres dimensiones del bienestar. No se observaron diferencias significativas según el semestre. El diseño transversal y el muestreo por conveniencia limitan la inferencia causal y la generalización. El estudio aporta evidencia situada en una universidad de la frontera norte de México y permite orientar acciones preventivas continuas. Se concluye que fortalecer los recursos académicos y personales puede contribuir a contener el desgaste sin debilitar el compromiso estudiantil.

PALABRAS CLAVE: *burnout* académico; bienestar académico; estudiantes de ingeniería; agotamiento; compromiso académico.

ABSTRACT

This study aimed to identify the levels of academic burnout dimensions and analyze their relationship with academic well-being among engineering students. A quantitative, descriptive, cross-sectional study was conducted with 352 participants selected through non-probability convenience sampling. The Maslach Burnout Inventory-General Survey for Students and the Utrecht Work Engagement Scale-Student were administered; data were examined using descriptive statistics, Pearson correlations, and ANOVA. Mean scores were 3.19 for exhaustion, 1.69 for cynicism, and 4.08 for academic efficacy. Exhaustion and cynicism were negatively associated with vigor, dedication, and absorption, whereas academic efficacy correlated positively with all three well-being dimensions. No significant differences were observed by semester. The cross-sectional design and convenience sampling limit causal inference and generalizability. The study provides context-specific evidence from a university on Mexico's northern border and supports continuous preventive action. Strengthening academic and personal resources may help contain exhaustion without weakening students' engagement with their studies.

KEYWORDS: academic burnout; academic well-being; engineering students; exhaustion; academic engagement.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Karla Gabriela Gómez Bull
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez /
Campus Ciudad Universitaria
DIRECCIÓN: C. José de Jesús Macías Delgado núm. 18100,
Paraje de San Juan, C. P. 32575, Ciudad Juárez, Chihuahua,
México
CORREO ELECTRÓNICO: karla.gomez@uacj.mx

Fecha de recepción: 24 de marzo de 2026. **Fecha de aceptación:**
23 de agosto de 2026. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de
2026.



I. INTRODUCCIÓN

El *burnout* fue descrito inicialmente como una respuesta al estrés laboral crónico caracterizada por agotamiento emocional, despersonalización y disminución de la realización personal [1]. Su adaptación al ámbito universitario reconoce que el estudio también impone demandas sostenidas: evaluaciones frecuentes, cargas de trabajo acumuladas, plazos simultáneos y expectativas de desempeño. Cuando estas exigencias exceden de forma persistente los recursos disponibles, pueden aparecer agotamiento, distanciamiento respecto de los estudios y una percepción reducida de eficacia académica [2], [3].

En estudiantes, el *burnout* académico se examina mediante tres dimensiones relacionadas, aunque conceptualmente distintas. El agotamiento expresa cansancio físico y mental asociado con las obligaciones escolares; el cinismo alude al distanciamiento, la indiferencia o la pérdida de sentido frente a los estudios; y la eficacia académica representa la percepción de competencia para responder a las tareas formativas [4]. En esta última dimensión, una puntuación alta constituye un recurso favorable, mientras que una puntuación baja forma parte del perfil de mayor desgaste.

La literatura vincula el *burnout* académico con dificultades de motivación, rendimiento, permanencia y salud mental [2], [5]. En población universitaria mexicana se han documentado manifestaciones de desgaste que justifican su vigilancia institucional [5]. Asimismo, en estudiantes de ingeniería se ha estudiado la relación del *burnout* con la resiliencia y con indicadores de éxito y fracaso académico [6], [7], [8]. Estos antecedentes no permiten asumir que toda persona sometida a altas exigencias desarrollará el síndrome; muestran, más bien, que el resultado depende del equilibrio entre demandas, recursos personales, apoyo social y condiciones del entorno educativo.

El bienestar académico, operacionalizado en este estudio como *engagement* o vinculación positiva con los estudios, comprende vigor, dedicación y absorción. El vigor se refiere a energía, persistencia y disposición para invertir esfuerzo; la dedicación incluye entusiasmo, inspiración, orgullo y significado; y la absorción describe concentración e involucramiento profundo en las tareas [4], [9], [10], [11]. Lejos de ser el simple opuesto del *burnout*, el bienestar ofrece información complementaria sobre los recursos que sostienen la participación académica.

La evidencia previa indica que los obstáculos y recursos del contexto académico se relacionan tanto con el *burnout* como con el *engagement*, y que ambos pueden intervenir en el desempeño [12], [13]. También se han observado asociaciones negativas entre *burnout* y bienestar psicológico, así como un papel protector de recursos como la resiliencia [14]. Por ello, analizar conjuntamente desgaste y bienestar permite distinguir perfiles en los que el alumnado conserva compromiso y autoeficacia, pero afronta simultáneamente niveles relevantes de agotamiento.

Este análisis resulta pertinente en programas de ingeniería, donde convergen asignaturas de alta complejidad, prácticas de laboratorio, proyectos y cargas horarias extensas. En una institución ubicada en la frontera norte de México, además, parte del estudiantado combina sus estudios con empleo y otras responsabilidades. Sin embargo, existe evidencia limitada sobre la forma en que las dimensiones del *burnout* se relacionan con el vigor, la dedicación y la absorción en este contexto específico.

En consecuencia, el objetivo de la investigación fue identificar los niveles de las dimensiones del *burnout* académico y analizar su relación con el bienestar académico en estudiantes universitarios de programas de ingeniería. De manera complementaria, se exploró si estas dimensiones diferían según el semestre cursado. Esta formulación se mantiene en el resumen, la metodología y las conclusiones para asegurar coherencia entre el propósito, los análisis y los alcances del estudio.

II. METODOLOGÍA

2.1. DISEÑO

Se realizó un estudio cuantitativo, descriptivo, correlacional y de corte transversal. Las variables no fueron manipuladas y la información se obtuvo en un único periodo. Por esta razón, los resultados describen asociaciones entre dimensiones y no permiten establecer relaciones causales.

2.2. PARTICIPANTES

Participaron 352 estudiantes inscritos en programas de ingeniería. Se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia debido al acceso a la población. Los criterios de inclusión fueron estar inscrito en un programa de ingeniería, cursar cualquier semestre y aceptar participar de forma voluntaria. El formulario exigió respon-

der todos los reactivos antes del envío; por ello, no se registraron cuestionarios incompletos. La edad media fue de 21 años ($DE = 2.48$); 162 participantes fueron mujeres y 190 hombres.

2.3. INSTRUMENTOS

El formulario inició con el consentimiento informado, donde se explicó el propósito del estudio, la participación voluntaria, la confidencialidad y el uso académico de los datos. La primera sección reunió información sociodemográfica, entre ellas edad, género, estado civil, semestre, situación laboral y presencia de hijos.

El *burnout* académico se evaluó con el Maslach Burnout Inventory-General Survey for Students (MBI-GS[S]) [4]. Sus 15 reactivos se distribuyen en agotamiento (5), cinismo (4) y eficacia académica (6). Las respuestas se registraron en una escala Likert de siete categorías, de 0 (nunca/ninguna vez) a 6 (siempre/todos los días). Para el bienestar académico se empleó la Utrecht Work Engagement Scale-Student de 17 reactivos (UWES-17), integrada por vigor (6), dedicación (5) y absorción (6), con el mismo rango de respuesta [10].

2.4. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS

El cuestionario se implementó en Google Forms y se difundió mediante Microsoft Teams. Tras cerrar la recopilación, las respuestas se depuraron y analizaron con IBM SPSS Statistics 25 y RStudio. Se calcularon frecuencias, porcentajes, medias y desviaciones estándar. La asociación entre las dimensiones del *burnout* y del bienestar académico se examinó con el coeficiente de correlación de Pearson. Para explorar diferencias por semestre se aplicó un ANOVA de un factor y, como contraste posterior, el procedimiento de Tukey. Se utilizó un nivel de significancia de 0.05.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA

La [Tabla 1](#) resume las características de los participantes. El 54.0 % fueron hombres y el 46.0 % mujeres. La mayoría declaró estar solteros (95.5 %); 4.3 % tenía hijos y 49.1 % trabajaba. En cuanto al avance curricular, 16.2 % se encontraba en los primeros tres semestres, 50.6 % entre cuarto y sexto, y 33.2 % en séptimo semestre o posterior. Esta composición muestra que los resul-

tados proceden principalmente de estudiantes en etapas intermedias y avanzadas y deben interpretarse considerando el carácter no probabilístico de la muestra.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DE LOS PARTICIPANTES

CARACTERÍSTICA		FRECUENCIA	%
Género	Mujeres	162	46
	Hombres	190	54
Estado civil	Soltero	336	95.5
	Casado	7	2.0
	Unión libre	9	2.6
¿Tiene hijos?	No	337	95.7
	Si	15	4.3
¿Trabaja?	No	179	50.9
	Si	173	49.1
Nivel de avance	Principiante	57	16.2
	Intermedio	178	50.6
	Avanzado	117	33.2

3.2. DIMENSIONES DEL BURNOUT ACADÉMICO

Como se observa en la [Tabla 2](#), la eficacia académica obtuvo la media más alta ($\bar{x} = 4.08$, $\sigma = 0.99$), seguida del agotamiento ($\bar{x} = 3.19$, $\sigma = 1.23$) y el cinismo ($\bar{x} = 1.69$, $\sigma = 1.33$). En el análisis por niveles, 37.78 % se ubicó en el nivel alto de agotamiento, 34.66 % en el nivel alto de cinismo y 40.34 % en el nivel alto de eficacia académica. Esta última proporción no representa mayor *burnout*, sino una percepción favorable de competencia académica.

TABLA 2
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL BURNOUT ACADÉMICO

DIMENSIÓN	PORCENTAJE			$\bar{x}$	σ
	BAJO	MEDIO	ALTO		
Agotamiento	335.80	226.42	337.78	33.19	11.23
Cinismo	440.06	225.28	334.66	11.69	11.33
Eficacia académica	335.51	224.15	440.34	44.08	00.99

El perfil combina desgaste con recursos todavía conservados: una proporción relevante reportó agotamiento alto, pero el cinismo promedio fue bajo y la eficacia académica se mantuvo elevada. Esta coexistencia es compatible con el planteamiento de que *burnout* y *engagement* son constructos relacionados, pero no extremos idénticos de una sola escala [10]. También coincide con investigaciones que muestran que los estudian-

tes pueden mantener rendimiento o compromiso aun cuando presentan cansancio emocional [9]. En ingeniería, la eficacia académica ha mostrado vínculos con indicadores de desempeño, lo que ayuda a interpretar su posible función protectora [6].

No obstante, los datos transversales no permiten afirmar que los participantes emplean estrategias específicas de afrontamiento ni que la carga académica sea la causa directa del agotamiento. Tales explicaciones requieren medición explícita de demandas, recursos y estrategias. El hallazgo sí señala una oportunidad preventiva: intervenir mientras la eficacia y el interés permanecen presentes, antes de que el agotamiento sostenido se acompañe de mayor distanciamiento.

3.3. DIMENSIONES DEL BIENESTAR ACADÉMICO

La dedicación presentó la media más alta ($\bar{x} = 4.13$, $\sigma = 1.20$), seguida de absorción ($\bar{x} = 3.15$, $\sigma = 1.06$) y vigor ($\bar{x} = 3.05$, $\sigma = 1.10$). Las proporciones en el nivel alto fueron semejantes: 37.50 % en vigor, 37.22 % en dedicación y 35.80 % en absorción (Tabla 3). El mayor valor de dedicación indica que el sentido y el entusiasmo vinculados con la formación pueden permanecer elevados, incluso cuando la energía disponible es menor.

TABLA 3
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL BIENESTAR ACADÉMICO

DIMENSIÓN	PORCENTAJE			$\bar{x}$	σ
	BAJO	MEDIO	ALTO		
Vigor	33.24	29.26	37.50	33.05	11.10
Dedicación	34.94	27.84	37.22	44.13	11.20
Absorción	36.93	27.27	35.80	33.15	11.06

Este patrón es coherente con la conceptualización del *engagement* estudiantil, en la que vigor, dedicación y absorción son dimensiones diferenciables [10], [11]. También permite matizar el hallazgo de agotamiento: el cansancio no equivale necesariamente a pérdida inmediata de significado. Para la gestión universitaria, esta combinación sugiere que las acciones preventivas deberían proteger el compromiso existente y, al mismo tiempo, reducir demandas evitables y ampliar recursos de apoyo.

3.4. RELACIÓN ENTRE BURNOUT Y BIENESTAR ACADÉMICO

La Tabla 4 muestra un patrón consistente. El agotamiento se relacionó de forma negativa y débil con vigor ($r =$

-0.227 , $p < .001$), dedicación ($r = -0.117$, $p < 0.05$) y absorción ($r = -0.126$, $p < 0.05$). El cinismo presentó asociaciones negativas de mayor magnitud con vigor ($r = -0.372$, $p < 0.001$), dedicación ($r = -0.490$, $p < 0.001$) y absorción ($r = -0.300$, $p < 0.001$). Por su parte, la eficacia académica se asoció positivamente con vigor ($r = 0.586$), dedicación ($r = 0.603$) y absorción ($r = 0.569$), en todos los casos con $p < 0.001$.

TABLA 4
CORRELACIÓN ENTRE BURNOUT Y BIENESTAR ACADÉMICO

	AG	C	EA	V	D	AB
AG	-----	0.515***	-0.115*	-0.227***	-0.117*	-0.126*
C		-----	-0.387***	-0.372***	-0.490***	-0.300***
EA			-----	0.586***	0.603***	0.569***
V				-----	0.597***	0.795***
D					-----	0.626***
AB						-----

Notas. AG = agotamiento; C = cinismo; EA = eficacia académica; V = vigor; D = dedicación; AB = absorción; * $p < 0.05$; *** $p < 0.001$.

Las correlaciones respaldan la relación teórica entre desgaste y vinculación académica descrita en estudios previos [4], [12]. En particular, la asociación más intensa se observó entre eficacia académica y dedicación, seguida por eficacia y vigor. Esto sugiere que sentirse capaz de responder a las exigencias se vincula estrechamente con energía y significado académico. A su vez, el cinismo mostró una relación negativa más marcada con la dedicación que el agotamiento, lo cual es razonable porque ambas dimensiones involucran la conexión subjetiva con los estudios, aunque en direcciones opuestas.

Los hallazgos también convergen con evidencia que relaciona el *burnout* con menor bienestar psicológico [14]. Sin embargo, el diseño correlacional impide establecer si el deterioro del bienestar antecede al *burnout* o si el desgaste reduce posteriormente el bienestar. Por ello, los resultados deben describirse como asociaciones y no como efectos predictivos o causales. Esta precisión responde al alcance real del análisis efectuado.

3.5. DIFERENCIAS SEGÚN EL SEMESTRE

Los ANOVA no mostraron diferencias significativas entre semestres en agotamiento ($F = 1.60$, $p = 0.123$), cinismo ($F = 0.55$, $p = 0.815$), eficacia académica ($F = 1.27$, $p = 0.257$), vigor ($F = 1.56$, $p = 0.137$), dedicación ($F = 1.29$, $p = 0.246$) ni absorción ($F = 1.54$, $p = 0.141$).

Las comparaciones de Tukey tampoco identificaron pares de grupos significativamente distintos.

Este resultado no respalda, en la muestra analizada, la idea de que el avance curricular por sí solo determina el *burnout* o el bienestar. En lugar de concentrar la prevención en un semestre particular, parece razonable mantener apoyos durante toda la trayectoria. Aun así, la ausencia de significancia no demuestra equivalencia entre etapas: la agrupación en nueve semestres, los tamaños desiguales y el diseño transversal pueden reducir la sensibilidad para detectar cambios. Estudios longitudinales podrían evaluar periodos críticos, como cierres de semestre o entregas de proyectos, con mayor precisión.

IV. CONCLUSIONES

El estudio identificó los niveles de las dimensiones del *burnout* académico y examinó su relación con el bienestar académico en estudiantes de ingeniería. El agotamiento constituyó la manifestación de desgaste más relevante, mientras que el cinismo mostró una media menor y la eficacia académica se mantuvo elevada. En bienestar, la dedicación alcanzó la puntuación promedio más alta.

Las asociaciones observadas fueron coherentes: el agotamiento y el cinismo se relacionaron con menores niveles de vigor, dedicación y absorción, mientras que la eficacia académica se vinculó positivamente con las tres dimensiones del bienestar. Por tanto, el alumnado puede conservar compromiso y percepción de competencia a la vez que experimenta cansancio significativo. Esta combinación justifica acciones tempranas orientadas a gestionar la carga, fortalecer recursos académicos y facilitar el acceso a apoyo psicoeducativo.

No se encontraron diferencias significativas según el semestre cursado. En esta muestra, el desgaste y el bienestar no se concentraron en una etapa curricular específica, por lo que las estrategias preventivas deberían mantenerse a lo largo de la carrera y no limitarse a estudiantes de nuevo ingreso o próximos a egresar.

Los resultados deben interpretarse considerando tres limitaciones: el diseño transversal no permite establecer causalidad; el muestreo por conveniencia y la participación de una sola institución restringen la generalización; y los instrumentos de autoinforme pueden incorporar sesgos de percepción o deseabilidad

social. Futuras investigaciones deberían incluir otras disciplinas e instituciones, utilizar diseños longitudinales y complementar la medición cuantitativa con entrevistas o grupos focales que permitan comprender las experiencias y los recursos contextuales del estudiantado.

REFERENCIAS

- [1] C. Maslach y S. E. Jackson, "The measurement of experienced burnout", *J. Organ. Behav.*, vol. 2, n.º 2, pp. 99-113, abr. 1981, doi: [10.1002/job.4030020205](https://doi.org/10.1002/job.4030020205).
- [2] C. Caballero, R. Abello y J. E. Palacio, "Relación del *burnout* y el rendimiento académico con la satisfacción frente a los estudios en estudiantes universitarios", *Av. Psicol. Latinoam.*, vol. 25, n.º 2, pp. 98-111, 2007.
- [3] C. Vizoso-Gómez y O. Arias-Gundín, "Resiliencia, optimismo y *burnout* académico en estudiantes universitarios", *Eur. J. Educ. Psychol.*, vol. 11, n.º 1, pp. 47-59, 2018, doi: [10.30552/ejep.v11i1.185](https://doi.org/10.30552/ejep.v11i1.185).
- [4] W. B. Schaufeli, I. M. Martínez, A. M. Pinto, M. Salanova y A. B. Bakker, "Burnout and engagement in university students: A cross-national study", *J. Cross-Cult. Psychol.*, vol. 33, n.º 5, pp. 464-481, 2002, doi: [10.1177/0022022102033005003](https://doi.org/10.1177/0022022102033005003).
- [5] M. Osorio, S. Parrello y C. Prado, "Burnout académico en una muestra de estudiantes universitarios mexicanos", *Enseñanza e Investigación en Psicología*, vol. 2, n.º 1, pp. 27-37, 2020, doi: [10.62364/by4k8n05](https://doi.org/10.62364/by4k8n05).
- [6] D. J. Atencia, M. T. Plaza y H. E. Hernández, "Resiliencia, burnout y fracaso académico en estudiantes de ingeniería de la Universidad de Córdoba, Colombia", *Espacios*, vol. 41, n.º 11, art. 23, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.revistaespacios.com/a20v41n11/20411123.html>
- [7] J.-F. Espinosa-Castro, J. Hernández-Lalinde, J. E. Rodríguez, M. Chacín y V. Bermúdez-Pirela, "Influencia del estrés sobre el rendimiento académico", *Arch. Venez. Farmacol. Ter.*, vol. 39, n.º 1, pp. 63-69, 2020, doi: [10.5281/zenodo.4065032](https://doi.org/10.5281/zenodo.4065032).
- [8] A. Llanes-Castillo, P. Pérez-Rodríguez, M. L. Reyes-Valdéz y M. J. Cervantes-López, "Burnout: efectos del confinamiento en estudiantes universitarios en México", *Rev. Cienc. Soc.*, vol. 28, n.º 3, pp. 69-81,

2022. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/journal/280/28071865005/html/>
- [9] L. Ferrel, F. Ferrel y K. Bracho, “Impacto del síndrome de burnout académico en el bajo rendimiento y la salud mental en estudiantes universitarios”, *Conocimiento, Investigación y Educación CIE*, vol. 2, n.º 6, pp. 45-53, 2018. [En línea]. Disponible: <https://ojs.unipamplona.edu.co/cie/article/view/1762>
- [10] W. B. Schaufeli, M. Salanova, V. González-Romá y A. B. Bakker, “The measurement of engagement and burnout: A two sample confirmatory factor analytic approach”, *J. Happiness Stud.*, vol. 3, n.º 1, pp. 71-92, 2002, doi: [10.1023/A:1015630930326](https://doi.org/10.1023/A:1015630930326).
- [11] M. A. Carmona-Halty, W. B. Schaufeli y M. Salanova, “The Utrecht Work Engagement Scale for Students (UWES-9S): Factorial validity, reliability, and measurement invariance in a Chilean sample of undergraduate university students”, *Front. Psychol.*, vol. 10, art. 1017, 2019, doi: [10.3389/fpsyg.2019.01017](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01017).
- [12] M. Salanova, W. Schaufeli, I. Martínez y E. Bresó, “How obstacles and facilitators predict academic performance: The mediating role of study burnout and engagement”, *Anxiety Stress Coping*, vol. 23, n.º 1, pp. 53-70, 2010, doi: [10.1080/10615800802609965](https://doi.org/10.1080/10615800802609965).
- [13] D. J. Madigan y T. Curran, “Does burnout affect academic achievement? A meta-analysis of over 100,000 students”, *Educ. Psychol. Rev.*, vol. 33, n.º 2, pp. 387-405, 2021, doi: [10.1007/s10648-020-09533-1](https://doi.org/10.1007/s10648-020-09533-1).
- [14] J. Yu y S. Chae, “The mediating effect of resilience on the relationship between academic burnout and psychological well-being of medical students”, *Korean J. Med. Educ.*, vol. 32, n.º 1, pp. 13-21, 2020, doi: [10.3946/kjme.2020.149](https://doi.org/10.3946/kjme.2020.149).