ISSN: 2992-7447

Año 6. Vol. 4 Núm. 3 Noviembre 2026 - Febrero 2027

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México



Optimización factorial de redes neuronales convolucionales para la detección de pulgones (Aphidinae) en cultivos de rosal

Mecanismo articulado de barras para desplazamiento lineal inspirado en la marcha de un pereiópodo de Gecarcinus

Cooperación en la cadena de suministro mediante PAR y reducción de variabilidad

Análisis de la distancia focal en un concentrador solar de disco parabólico utilizando trazado de rayos

Enfoque experimental óptico para la emulación del comportamiento direccional del beamforming de radiofrecuencia para el estudio de la captación inalámbrica de energía

Tratamiento biotecnológico de lactosuero con Kluyveromyces marxianus: reducción de la carga orgánica y valorización de subproductos

Universidad Autónoma del Estado de México

Consejo Editorial

Directora editorial

Dra. Rosa María Valdovinos Rosas

Universidad Autónoma del Estado de México, México. ORCID 0000-0001-9954-0653

Editoras científicas:

Dra. Angélica Guzmán Ponce

Universidad Católica de Murcia, España. ORCID 0000-0002-7844-1266.

Dra. Laura Cleofas Sánchez

Tecnológico Nacional de México campus Tianguistenco. ORCID 0000-0002-6666-0461

Editores técnicos

Dra. Mireya Salgado Gallegos

Universidad Autónoma del Estado de México, México. ORCID 0000-0003-2675-9456

Dr. Javier Salas García

Universidad Autónoma del Estado de México, México. ORCID 0000-0002-1297-7893

M.C. Miguel Ángel López Pérez

Tecnológico Nacional de México, México. ORCID 0000-0002-3424-8704

Editora invitada

Dra. Lucero de Montserrat Ortiz Aguilar

Comité Científico

Ingeniería y tecnología civil y en arquitectura

Dr. Francisco Héctor Bañuelos García – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-8231-6599

Dr. Héctor Rodrigo Amezcua Rivera – Facultad de Ingeniería UNAM, México ORCID 0000-0002-5991-0020

Dr. Marco Antonio Escamilla García – Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México ORCID 0000-0001-5276-4369

Ingeniería y tecnología en Ciencias Computacionales e Inteligencia Artificial

Dra. Juana Canul Reich – Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México ORCID 0000-0003-1893-1332

Dr. Daniel Valero Carreras – Universidad Católica de Murcia, España ORCID 0000-0002-9025-9950

Dr. Antonio Jesús Banegas Luna – Centro Universitario de la Defensa de San Javier, España ORCID 0000-0003-1158-8877

Ingeniería y tecnología en Mecánica y Sistemas Energéticos

Dra. María Dolores Durán García – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-7569-249X

Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera – Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México ORCID 0009-0008-9460-2251

Ingeniería y tecnología en Ciencias del Agua

Dr. Juan Manuel Esquivel Martínez – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0003-1864-4501

Dra. Edith Rosalba Salcedo Sánchez – Universidad Autónoma de Guerrero, México ORCID 0000-0003-2559-5306

Dra. Laura Conde Baéz - Universidad Autónoma de Guerrero, México ORCID 0000-0003-0250-7916

Ingeniería y tecnología en Cadena de Suministro

Dra. Lourdes Loza Hernández – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0001-5107-7110

Dr. Manuel González de la Rosa – Tecnológico Nacional Campus Toluca, México ORCID 0009-0000-6558-6493

Dr. Agustín Bustos Rosales – Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, México ORCID 0000-0001-5074-0355

Dr. Rodolfo Mendoza Gómez – Tecnológico de Monterrey Campus León, México ORCID 0000-0002-9119-3412

Ingeniería y tecnología en Robótica, Mecatrónica, Industria 4.0 y Biomédica

Dr. Juan Manuel Jacinto Villegas – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-0964-4844

Dra. Nadia Vanessa García Hernández – CINVESTAV, Unidad Saltillo, México ORCID 0000-0003-1944-0519

Dr. Oscar Osvaldo Sandoval González – Instituto Tecnológico de Orizaba, México ORCID 0000-0002-0309-5231

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, Año 6 , Vol. 4, Núm. 3, 2026, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100 Ote., Colonia Centro, Toluca, Estado de México, C.P. 50000, Tels. 7222-14-08-55, https://hemeroteca.uaemex.mx/index.php/ideasingenieria, ideasencienciai_fi@uaemex.mx. Directora: Rosa María Valdovinos Rosas, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Cerro de Coatepec s/n, Toluca, Estado de México, C.P. 50130, Tel. 7222140855. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo no. 04-2023-033108322300-102, ISSN: 2992-7447, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsables de la última actualización de este número, Mireya Salgado Gallegos y Javier Salas García, Facultad de Ingeniería. Diseño de portada y Diseño Editorial, Javier Salas García. Fecha de última modificación: 1 de noviembre de 2026. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido aquí publicado sin fines de lucro, siempre y cuando no se modifique, se cite la fuente completa y su dirección electrónica en términos de licencia aplicable. Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional (CC BY-NC).Hecho en México, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), 2026.

Revisores

Allan Antonio Flores Fuentes – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-6233-1708

Alfonso Martínez Cruz – Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, México ORCID 0000-0002-1968-0785

Ana Luisa Velázquez Torres – Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, México ORCID 0000-0002-6483-2573

Andrés Hernández Gutiérrez – Universidad de Monterrey, México ORCID no proporcionado

Beatriz González Gutiérrez – Adscripción no proporcionada ORCID 0000-0002-8679-9807

Carlos Castorena – Universidad de Valencia, España ORCID 0000-0002-4202-1008

David Hernández – Universidad Tecnológica de Morelia, México ORCID no proporcionado

Ernesto Sifuentes de la Hoya – Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México ORCID 0000-0003-1739-3317

Felipe Raymundo Serrano Domínguez – Tecnológico de Villa Guerrero, México ORCID 0009-0004-4582-1491

Francisco Quiroz Aguilar – Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco, México ORCID 0000-0001-8801-6872

Hugo Yáñez Badillo – Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, México ORCID 0000-0002-2433-1475

Iván Francisco Valencia – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-8736-4338

Jacobo Leonardo González Ruíz – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0003-4691-8426

Joanna Juárez Michua – Facultad de Ingeniería, UAEMéx, México ORCID 0009-0007-2869-4250

José de Jesús Agustín Flores Cuautle – Tecnológico de Orizaba, México ORCID 0000-0003-0468-4764

Josué Domínguez Guerrero – Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México ORCID 0000-0002-6252-9781

Juan Alberto Antonio Velázquez – Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, México ORCID 0000-0003-3052-3171

Juan Manuel Jacinto Villegas – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-0964-4844

Juan Nabor Balderas Gutiérrez – Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, México ORCID 0000-0003-4174-3006

Juan Pablo Francisco Posadas Durán – Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional (IPN), México ORCID 0000-0001-9496-1328

Juan Sánchez García – Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Culhuacán, Instituto Politécnico Nacional (IPN), México ORCID 0000-0001-9746-7157

Karina Valencia Sandoval – Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México ORCID 0000-0002-7029-9779

Lourdes Loza Hernández – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0001-5107-7110

Luis García Espinosa – Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional (IPN), México ORCID no proporcionado

Lucero de Montserrat Ortiz Aguilar – Tecnológico Nacional de México, México ORCID 0000-0002-4528-6247

Maribel González Torres – Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, México ORCID 0009-0005-8174-2288

Miguel Ángel López Pérez – Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso, México ORCID 0000-0002-3424-8704

Pedro Carmona – Universidad de Burgos, España ORCID 0000-0002-9979-2727

Rafael Augusto Rocha Angulo – Universidad Tecnológica de León, México ORCID no proporcionado

Raúl Porras Alanis – Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México ORCID 0000-0002-6772-5351

Ramiro Aquino García – Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, México ORCID 0000-0003-3718-5881

Roberto Alejo Eleuterio – Instituto Tecnológico de Toluca, México ORCID 0000-0002-7580-3305

Rubén Fernández Beltrán – Universidad de Murcia, España ORCID 0000-0003-1374-8416

Silvia Liliana Bucio – Universidad Tecnológica de Morelia, México ORCID 0000-0002-2583-8884

Vianney Muñoz Jiménez – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0003-2180-6743

CONTENIDO

Pág.

Carta del editor 4

Dra. Lucero de Montserrat Ortiz Aguilar

Optimización factorial de redes neuronales convolucionales para la detección de pulgones (*Aphidinae*) en cultivos de rosal 6

J. Hernández, E. Rendón, R. Alejo, F. del Razo, E. Granda, D. Cervantes

Mecanismo articulado de barras para desplazamiento lineal inspirado en la marcha de un pereiópodo de *Gecarcinus* 26

G. Castro, Á. Anzueto, A. Sánchez, G. Solís

Cooperación en la cadena de suministro mediante PAR y reducción de variabilidad 48

U. Mercado-Valenzuela, M. S. Hernández-Bonilla, O. Cruz-Mejia

Análisis de la distancia focal en un concentrador solar de disco parabólico utilizando trazado de rayos 66

D. Rojas-Valdez, M. Sánchez-Pozos, M. D. Durán-García, I. G. Martínez-Cienfuegos, M. F. Mohedano-Castillo

Enfoque experimental óptico para la emulación del comportamiento direccional del *beamforming* de radiofrecuencia para el estudio de la captación inalámbrica de energía 89

E. Gutiérrez, C. Castorena, J. A. De Rus, S. Roger, C. Botella-Mascarell

Tratamiento biotecnológico de lactosuero con *Kluyveromyces marxianus*: reducción de la carga orgánica y valorización de subproductos 106

L. Conde-Báez, C. A. Gómez-Aldapa, J. Castro-Rosas, C. F. Pineda-Muñoz

Carta del editor

Dra. Lucero de Montserrat Ortiz Aguilar

Estimadas lectoras y estimados lectores:

Es un gusto presentar el Volumen 4, Número 3 (noviembre de 2026 a febrero de 2027) de la Revista *Ideas en Ciencias de la Ingeniería*. Este número reúne seis trabajos que abordan problemas de agricultura de precisión, biónica y locomoción animal, cooperación en cadenas de suministro, energía solar, captación inalámbrica de energía y tratamiento de residuos. Desde distintas disciplinas, estos trabajos muestran cómo la investigación puede vincular el modelado matemático, la simulación y la experimentación con necesidades concretas de la sociedad y los sectores productivos.

En el ámbito de la agricultura de precisión, se presenta un estudio que propone una metodología basada en un diseño experimental factorial de tres factores para optimizar el rendimiento de las arquitecturas VGG16 y EfficientNetB0 en la detección de pulgones (*Aphidinae*) en cultivos de rosal, enfoque que demuestra que la aplicación de diseños factoriales elimina la incertidumbre del ajuste por prueba y error, favoreciendo así modelos más robustos, reproducibles y escalables para el monitoreo de plagas.

Asimismo, en el área de biónica y análisis de organismos biológicos, se analiza cinemáticamente el pereiópodo del cangrejo terrestre *Gecarcinus lateralis* para obtener los parámetros que describen su marcha. A partir de ellos se construye un modelo matemático del ciclo de marcha mediante una red neuronal multicapa, que se emplea para diseñar y construir un mecanismo de barras tipo Klann capaz de imitar su desplazamiento lineal. Los autores lograron obtener una semejanza global del 73 % y del 65 % en condiciones de terreno irregular.

El tercer trabajo propone un marco híbrido que integra el Proceso Analítico en Red (PAR) y la simulación, y documenta una metodología que identifica los principales factores de variabilidad y evalúa mecanismos de cooperación como el intercambio de información, los contratos de incentivos, la generación de confianza y la toma conjunta de decisiones. En dicho trabajo se resalta la cooperación en la cadena de suministro mediante PAR y reducción de variabilidad.

Por otra parte, en el área de física se presenta un trabajo centrado en el análisis de la distribución del flujo de energía en el receptor para tres configuraciones correspondientes a distancias focales de 2.0 m, 2.2 m y 2.4 m, utilizando el método Monte Carlo para simular el comportamiento de los rayos solares. Este trabajo contribuye significativamente al campo de la energía solar, ya que ofrece un enfoque metodológico para la optimización del rendimiento de concentradores solares parabólicos.

Finalmente, cerramos con dos trabajos: el primero, enfocado en la generación de haces de radiofrecuencia mediante *beamforming*; y el segundo, en el tratamiento biotecnológico de lactosuero con *Kluyveromyces marxianus*. El primero de ellos presenta una propuesta que no busca reproducir la transferencia de energía ni la física electromagnética del haz de radiofrecuencia, sino proporcionar una representación experimental de su potencia recibida equiva-

lente. Para ello, las lecturas del receptor óptico se relacionan mediante una función empírica con la potencia proporcionada por un modelo matemático de radiofrecuencia.

Por su parte, la importancia del tratamiento biotecnológico de lactosuero con *Kluyveromyces marxianus* demuestra que la fermentación con dicho componente constituye una alternativa de tratamiento de bajo costo y alto beneficio para efluentes lácteos de elevada carga orgánica, con potencial de escalamiento en otras regiones queseras del país.

Agradecemos a las autoras y autores que confiaron en esta revista para difundir sus resultados, así como al cuerpo de revisores, cuya labor garantiza la calidad y el rigor de cada contribución. Confiamos en que este número sea de utilidad e inspiración para la comunidad de ciencias de la ingeniería.

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Optimización Factorial de Redes Neuronales Convolucionales para la Detección de Pulgones (Aphidinae) en Cultivos de Rosal

Factorial Optimization of Convolutional Neural Networks for Aphid (Aphidinae) Detection in Rose Crops

José Hernández[1], Eréndira Rendón [1], Roberto Alejo [1], Federico del Razo [1], Everardo Granda [2],

Daniel Cervantes [1] *
(*dd26280389@toluca.tecnm.mx)

Recibido: 30 de agosto de 2026 Aceptado: 09 de octubre de 2026

Resumen

La implementación de redes neuronales convolucionales en la agricultura de precisión enfrenta el desafío de la configuración empírica de sus hiperparámetros, lo que deriva en un uso ineficiente de recursos computacionales y en tiempos de entrenamiento prolongados. Para abordar esta limitación, el presente estudio propone una metodología basada en un diseño experimental factorial de tres factores para optimizar el rendimiento de las arquitecturas VGG16 y EfficientNetB0 en la clasificación de pulgones (Aphidinae) en cultivos de rosal. Para ello, se empleó un conjunto de datos conformado por 1438 imágenes, particionado en 1222 instancias para la fase de entrenamiento y 216 para el conjunto de prueba. El entrenamiento de las arquitecturas se ejecutó mediante niveles fijos de épocas, prescindiendo deliberadamente de mecanismos de detención temprana con el propósito de cuantificar de manera aislada el impacto de la convergencia dentro del diseño factorial. Se evaluaron el tamaño de lote, el número de épocas y la función de activación, analizando tanto sus efectos principales como sus interacciones sobre la exactitud del modelo. Los resultados del análisis de varianza mostraron que la función de activación es el factor con mayor influencia estadística en ambas arquitecturas. Como hallazgo principal, EfficientNetB0 superó a VGG16, alcanzando una Accuracy del 94.42 % bajo la configuración óptima de lote de 32, 30 épocas y activación *softmax*. Este enfoque demuestra que la aplicación de

[1]Departamento de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Toluca, Metepec, Estado de México, México.
[2]Centro Universitario UAEM Atlacomulco, Universidad Autónoma del Estado de México, Atlacomulco, Estado de México, México.

diseños factoriales elimina la incertidumbre del ajuste por prueba y error, lo que favorece modelos más robustos, reproducibles y escalables para el monitoreo de plagas. En esta investigación se han evaluado dos arquitecturas convolucionales representativas; no obstante, esta metodología es extensible a otras topologías con parámetros análogos y a diversas aplicaciones.

Palabras clave: CNN, clasificación, redes neuronales, diseño factorial, rosas, pulgones

Abstract

The implementation of convolutional neural networks in precision agriculture faces the challenge of empirically configuring hyperparameters, resulting in inefficient use of computational resources and prolonged training times. To address this limitation, the present study proposes a methodology based on a three-factor factorial experimental design to optimize the performance of the VGG16 and EfficientNetB0 architectures for detecting aphids (Aphidinae) in rose crops. To this end, a dataset comprising 1,438 images was used, partitioned into 1,222 instances for the training phase and 216 for the test set. The training of the architectures was executed using fixed epoch levels, deliberately dispensing with early stopping mechanisms to isolate and quantify the impact of convergence within the factorial design. We evaluated batch size, number of epochs, and activation function, analyzing both their main effects and interactions on model accuracy. The analysis of variance showed that the activation function had the greatest statistical influence on both architectures. As the main finding, EfficientNetB0 outperformed VGG16, achieving 94.42 % accuracy under the optimal configuration of a batch size of 32, 30 epochs, and the softmax activation function. This approach shows that the application of factorial designs eliminates the uncertainty of trial-and-error tuning, promoting more robust, reproducible, and scalable models for pest monitoring. Although this research evaluated two representative convolutional architectures, this methodology is extensible to other topologies with analogous parameters and to diverse applications.

Keywords: CNN, clasification, neural networks, factorial design, roses, aphids

Introducción

En la actualidad, diversas aplicaciones del aprendizaje automático, principalmente las redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés, *convolutional neural networks*) han generado un amplio campo de propuestas debido a su capacidad para analizar imágenes y extraer información relevante para tareas específicas. En el ámbito agrícola, estas herramientas han sido empleadas como una alternativa para identificar enfermedades y plagas en diferentes cultivos.

Por ejemplo, en [1] se empleó un modelo CNN para apoyar en la problemática causada por la presencia

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29396 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 6- 25

de plagas en plantas de papa. El tizón tardío fue detectado en su etapa temprana mediante análisis de imágenes de las hojas de los cultivos, obteniendo una precisión del 90 % en el diagnóstico de la presencia de la plaga. Asimismo, en el artículo [2] se compararon modelos como VGG16, CNNs de 8 y 12 capas, así como un modelo FCN (*fully connected networks*) de 2 capas para la clasificación de plagas y enfermedades presentes en cultivos de papa y maíz.

Otro ejemplo de aplicación de redes neuronales se expone en el artículo [3], donde a partir de imágenes de rosas, en un experimento controlado, se empleó una red neuronal con el fin de detectar la presencia de moho. Por otra parte, en la investigación realizada por [4] se expone un sistema de clasificación automática de insectos llamado InsectCV, a partir de imágenes de trampas Moericke para analizar plagas como el pulgón, parasitoides y *trips*, obteniendo niveles de confianza del 98.5 % en parasitoides y 97.6 % en pulgón.

Por otra parte, el procesamiento digital de imágenes permite extraer características esenciales para el análisis o la identificación de objetos de interés, través de técnicas (preprocesamiento, transformación, realce y segmentación) con la finalidad mejorar la calidad de la imagen, reduciendo el ruido (información sin importancia) o adaptarla para alguna aplicación.

En el contexto agrícola, los cultivos de rosas representan una importante actividad económica en México. La producción se concentra principalmente en el Estado de México, Puebla y Morelos, siendo el Estado de México el de mayor participación nacional [5]. Entre los principales municipios productores de rosa del Estado de México se encuentran Tenancingo, Villa Guerrero, Coatepec de Harinas, Zumpahuacán, Ixtapan de la Sal y Malinalco.

Las ganancias y producción son mermadas por plagas comunes en las rosas, además de requerirse una mayor inversión económica por parte de los productores en insumos como pesticidas, personal de inspección y tiempo para la eliminación de cultivos infectados. Cuando estas plantas no son atendidas en una etapa temprana, existe la posibilidad de propagación hacia plantas sanas. Además, puesto que la inspección de los cultivos es realizada por personal operativo en campo, existe la posibilidad de omitir plantas afectadas por pulgones debido al error humano [6].

Entre las plagas comunes de los rosales se encuentra el pulgón (*Aphidinae*), descrito como un insecto de aproximadamente 3 mm de longitud y color verdoso que se presenta principalmente en vástagos jóvenes o yemas florales, provocando manchas descoloridas y hundidas en los pétalos. Su desarrollo se presenta usualmente en ambientes secos y con temperaturas templadas a cálidas [7].

En el contexto de los párrafos precedentes, es importante destacar que que se eligió como caso de estudio esta plaga y cultivo, por dos razones principales: en primer lugar, por el impacto económico de la plaga, y además por el desafío que supone el desarrollo de herramientas para automatizar una inspección

visual sujeta a errores humanos, en donde las imágenes presentan variabilidad debido la iluminación y la composición del fondo, lo cual resulta particularmente idóneo para evaluar la robustez del método. Cabe aclarar que la metodología propuesta no presenta restricciones técncias o teóricas para su aplicación a otros cultivos o incluso en sectores diferentes a la agricultura.

Algunos de los modelos más utilizados para clasificación automática de imágenes en plantas, que se han identificado en la literatura, son VGG (en sus variantes), EfficientNet, ResNet y MobileNet, entre otros [8]. Sin embargo, la configuración de sus parámetros se realiza comúnmente de forma empírica, mediante prueba y error, y son pocos los trabajos que abordan esta problemática mediante un procedimiento sistemático de ajuste que permita incrementar la precisión de los modelos [9].

En el contexto del aprendizaje profundo, el ajuste de hiperparámetros constituye una de las etapas más críticas y costosas en el desarrollo de modelos, ya que comúnmente se realiza mediante enfoques empíricos como la búsqueda exhaustiva (*grid search*) o aleatoria (*random search*). Sin embargo, estos métodos pueden requerir un número combinatorio de experimentos conforme aumenta la cantidad de hiperparámetros y de valores considerados, lo que eleva el consumo de recursos computacionales y prolonga los tiempos de entrenamiento. Además, no aprovechan explícitamente la información obtenida en evaluaciones anteriores, por lo que pueden explorar de forma ineficiente el espacio de búsqueda [10].

Ante esta problemática, se ha propuesto utilizar un diseño factorial para analizar de manera estructurada y simultánea la influencia de múltiples factores y sus interacciones sobre el desempeño del modelo, reduciendo el número de experimentos necesarios. Además, este enfoque proporciona evidencia estadística que respalda la selección de configuraciones adecuadas, incrementando la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos [11].

En este sentido, el objetivo de esta investigación es evaluar los resultados de un diseño de experimentos factorial, de tres factores, para obtener los parámetros durante el entrenamiento de los modelos VGG16 y EfficientNetB0, con la finalidad de identificar la presencia de pulgón en imágenes de plantas de rosales con una exactitud (*accuracy*) mayor al 90 %. Los factores analizados son: tamaño de lote, número de épocas y función de activación, considerando también sus interacciones, donde la Accuracy obtenida por los modelos es la variable de respuesta.

La integración del diseño factorial en el proceso de ajuste de parámetros contribuye al desarrollo de una metodología para determinar las configuraciones con mayor influencia sobre el desempeño de los modelos VGG16 y EfficientNetB0, además de generar una alternativa para la identificación de pulgones mediante imágenes de plantas de rosales.

Finalmente, la principal aportación de este trabajo consiste en la propuesta de un método estadístico para el ajuste de parámetros en redes neuronales convolucionales, con el propósito de mejorar, en este

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29396 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 6- 25

caso, la clasificación de pulgones en rosales. A diferencia de enfoques tradicionales, como la búsqueda aleatoria, la metodología propuesta permite evaluar tanto el efecto individual de cada parámetro como sus interacciones simultáneas, reduciendo significativamente el número de experimentos requeridos y, al mismo tiempo, proporcionando una base estadística para la selección de la configuración óptima del modelo.

Materiales y métodos

Para establecer el enfoque propuesto y materializar los objetivos planteados, se diseñó una arquitectura experimental en la que convergen la ingeniería de datos, la selección de modelos de aprendizaje profundo y el sustento estadístico. Esta sección detalla los componentes fundamentales del estudio, iniciando con la conformación y el preprocesamiento del conjunto de imágenes para el entrenamiento. Posteriormente, se describen las topologías de las redes VGG16 y EfficientNetB0, destacando sus particularidades estructura-les. El apartado culmina con la formalización del diseño factorial que rige la exploración del espacio de hiperparámetros y la validación de su impacto en la Accuracy de los modelos.

Conjunto de datos

El conjunto de imágenes utilizado en esta investigación fue adquirido de diferentes fuentes: 1) de la base de datos Flowers Dataset [12], disponible en Kaggle, se identificaron imágenes de libre uso, 2) usando el motor de búsqueda Google se seleccionaron imágenes de rosales sin derechos de autor, y 3) imágenes tomadas de rosales en jardines.

Para conformar el conjunto de datos se utilizaron imágenes de rosales sanos y rosales con pulgones. Se consideraron imágenes de diferentes secciones de la planta, como tallos, hojas, botones y pétalos, así como imágenes tomadas desde distintos ángulos. Se eliminaron aquellas correspondientes a arreglos florales, ilustraciones, representaciones de rosas, plagas diferentes a los pulgones y elementos ajenos al objeto de estudio. Los archivos obtenidos mediante el motor de búsqueda Google fueron revisados para eliminar imágenes corruptas antes de ser utilizados en los modelos.

Posteriormente, las imágenes fueron clasificadas en dos grupos: rosales sanos y rosales afectados por pulgones, y la distribución del conjunto de datos se especifica en la Tabla 1. Con el propósito de garantizar la validez estadística de las métricas de evaluación empleadas, ambas clases se mantuvieron en una distribución estrictamente equiprobable. Esta decisión de diseño obedece a que, en conjuntos de datos balanceados, la exactitud global constituye un estimador fiable del rendimiento del clasificador, al no existir sesgo hacia la clase mayoritaria. Las imágenes fueron unificadas en formato JPG con dimensiones de $224 \times 224 \times 3$ píxeles. Las características consideradas para la clasificación de rosales sanos correspondieron principalmente a tallos, hojas, pétalos, flores y botones; mientras que para los rosales afectados se consideraron tallos, hojas, botones y la presencia de pulgones [7]. La tarea de clasificación consistió en

determinar, a partir de nuevas imágenes analizadas por los modelos de redes neuronales convolucionales, la presencia de pulgones o la ausencia de esta plaga.

Tabla 1. Distribución de imágenes por clase y subconjunto de datos.

Subconjunto	Rosas Sanas	Rosas Plagadas	Total
Entrenamiento	611	611	1222
Prueba	108	108	216
Total general	**719**	**719**	**1438**

Modelos propuestos de Deep Learning

El aprendizaje profundo (DL por las siglas en inglés de *Deep Learning*) es una rama de la inteligencia artificial (IA) que permite a los sistemas, a través de algoritmos, aprender de conjuntos de datos con la finalidad de mejorar su desempeño en tareas específicas. Es un enfoque basado a partir de modelos matemáticos (algoritmos) que identifican patrones en los datos, útiles para tareas de clasificación de nuevos datos [13, 14].

VGG16

El modelo VGG16 fue diseñado en 2015 por Simonyan y Zisserman, con una arquitectura simple [15]. Las imágenes de entrada tienen un tamaño fijo (224x224x3 píxeles) y pasan a través de una serie de capas convolucionales y de agrupación (*pooling*) para extraer características relevantes.

Cada capa convolucional aplica filtros (*kernels*) para detectar patrones como bordes, texturas y formas; las primeras capas extraen bordes y contornos básicos, las capas intermedias detectan texturas y partes del objeto, las capas finales identifican características específicas de la clase y asignan probabilidades a cada una.

En las capas de convolución, los filtros poseen tamaño fijo de 3x3 (filtros pasa bajo), con paso de 1 en los pixeles de la imagen. Por otro lado, la capa de agrupamiento emplea una función *max-pooling* de 2x2 que reduce la dimensionalidad de la matriz.

VGG16 consta de 16 capas con pesos entrenables: 13 capas convolucionales y 3 capas completamente conectadas [16,17]. La arquitectura se organiza en cinco bloques, cada uno con 2 o 3 capas convolucionales seguidas de una capa de agrupación (*max-pooling*). El número de filtros en las capas convolucionales comienza en 64 y se duplica en cada bloque hasta alcanzar 512. Las tres capas completamente conectadas

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29396 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 6- 25

al final de la red tienen 4,096, 4,096 y 1,000 nodos, respectivamente. En la capa de salida utiliza una función *softmax* para la clasificación de los datos entre 0 y 1. Esta red neuronal se ilustra en la Figura 1.

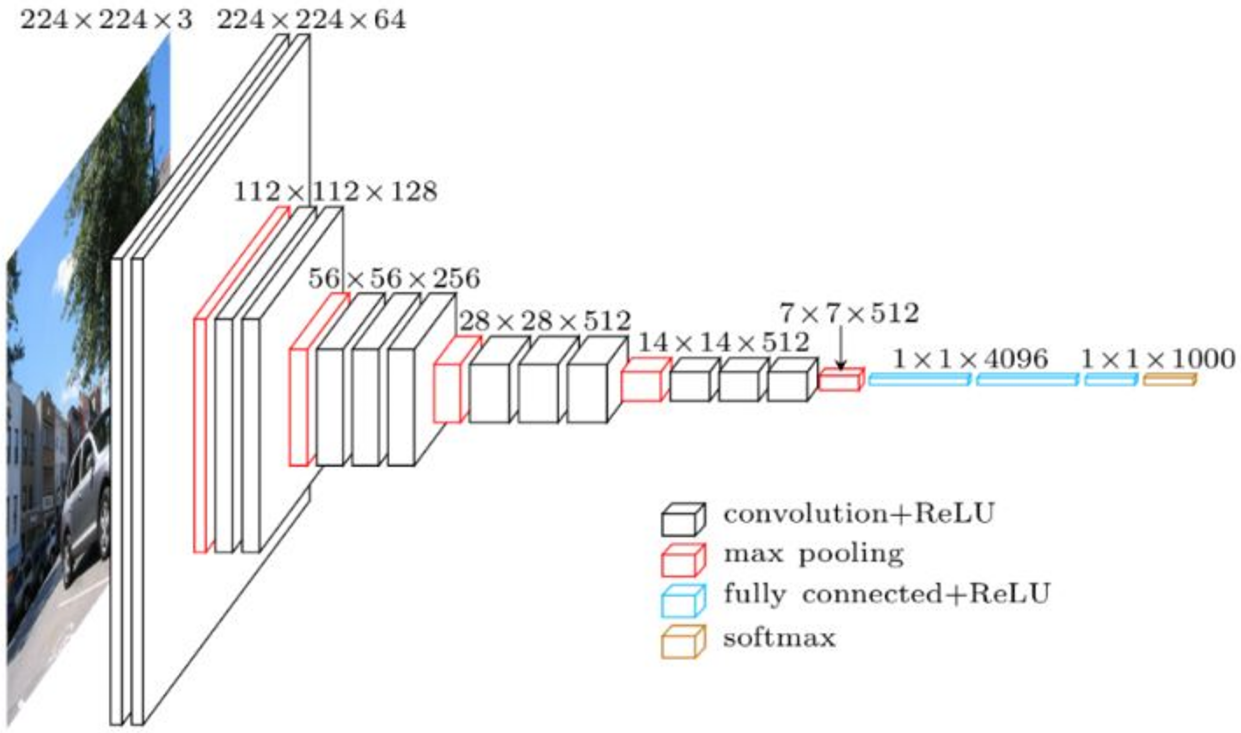


FIGURA 1. Arquitectura de una red VGG16. Imagen de la tesis doctoral [18].

EfficientNetB0

EfficientNetB0 es un modelo de red neuronal convolucional desarrollado por investigadores de Google en el 2019. Pertenece a la familia de EfficientNet, y su arquitectura se basa en un conjunto de capas iniciales (convolución y normalización de lotes con una función activación *Swish*), seguida de bloques *MBConv* que tiene diferentes tamaños de *kernel* y numero de filtros que dan paso a las capas finales donde hay una capa de convolución después una capa de agrupamiento y una capa completamente conectada con la función de activación *softmax* [19]. Su arquitectura se observa en la Figura 2.

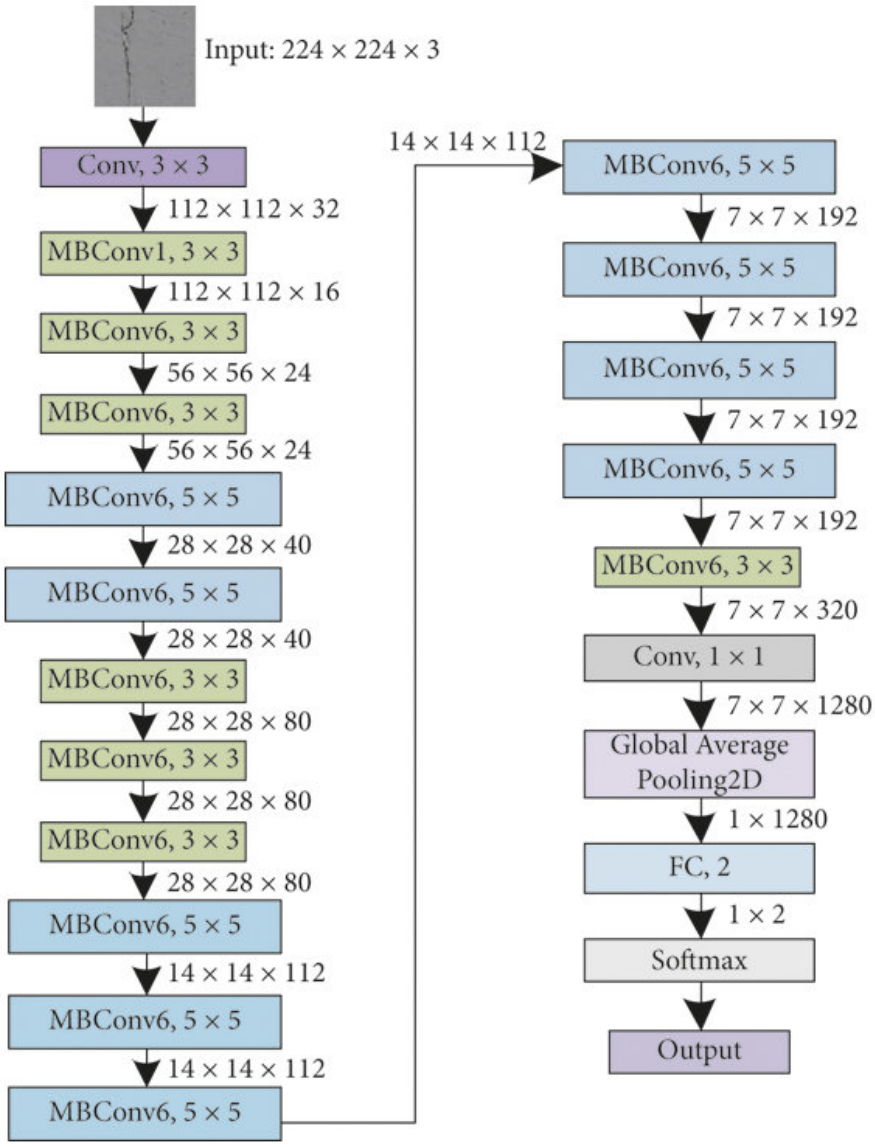


FIGURA 2. Arquitectura de una red EfficientNetB0. Imagen del articulo [20].

Posee tres puntos importantes enfocados en la maximización de la Accuracy: profundidad, ancho y resolución de la imagen de entrada, a través de un coeficiente ϕ. La Ec. (1) describe el escalado compuesto (*Compound Scaling*) de EfficientNet. Su propósito es determinar cómo aumentar el tamaño de la red neuronal de manera equilibrada, escalando simultáneamente la profundidad, el ancho y la resolución de entrada.

$$d = \alpha^{\phi}, \quad w = \beta^{\phi}, \quad r = \gamma^{\phi} \tag{1}$$

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29396 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 6- 25

Donde, ϕ es el coeficiente de escalado compuesto (determina cuántos recursos adicionales están disponibles), α, β, γ son los factores de balance para escalar profundidad d, ancho w y resolución r, respectivamente.

La función de pérdida para este modelo se expresa en la Ec. (2) [19].

$$\zeta = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{C} y_{ij}\log(\hat{y}_{ij}) \tag{2}$$

Donde, C es el número de clases, N es el número de entradas del conjunto de datos, y_{ij} es un valor binario que indica si la muestra i pertenece a la clase j, e $\hat{y}_{ij}$ es la probabilidad predicha de la clase j para la muestra i (salida de la función *softmax*).

Matriz de confusión

Una matriz de confusión es una herramienta utilizada para evaluar el desempeño de un modelo de clasificación mediante la comparación entre las clases predichas por el modelo y las etiquetas reales de los datos. Esta se representa mediante una tabla que permite identificar y cuantificar los aciertos y errores de clasificación.

En el caso de una clasificación binaria, se describe bajo la Ec. (3) [15], y se compone de cuatro categorías: Verdaderos Positivos (VP), que corresponden a los casos en los que el modelo predice correctamente la clase positiva; Falsos Positivos (FP), que representan los casos en los que el modelo predice la clase positiva cuando la clase real es negativa; Falsos Negativos (FN), que corresponden a los casos en los que el modelo predice la clase negativa cuando la clase real es positiva; y Verdaderos Negativos (VN), que representan los casos correctamente clasificados como pertenecientes a la clase negativa.

$$\text{Matriz de confusión} = \begin{bmatrix} VP & FP \\ FN & VN \end{bmatrix} \tag{3}$$

A partir de la matriz de confusión, se calcula la precisión del modelo mediante la Ec. (4), que define la Accuracy, y usualmente se representa mediante un porcentaje de clasificación correcta de los datos del conjunto de prueba [15]:

$$\text{Accuracy} = \frac{(VP + VN)}{(VP + FP + FN + VN)} \tag{4}$$

Dado que las topologías originales de VGG16 y EfficientNetB0 están concebidas para la clasificación de múltiples clases, fue necesario realizar una adaptación estructural en sus capas finales para atender la naturaleza binaria de la presente tarea. Específicamente, las capas completamente conectadas de salida

fueron reemplazadas por una nueva capa densa conformada por dos neuronas, correspondientes a las clases de interés. Esta topología de salida, en conjunto con la función de pérdida de entropía cruzada categórica, dicta el comportamiento matemático de las funciones de activación evaluadas. Mientras que la función *softmax* normaliza las salidas en una distribución de probabilidad conjunta idónea para clases mutuamente excluyentes, la función *sigmoide* trata cada neurona de manera independiente. Esta distinción arquitectónica es fundamental para comprender las divergencias en el rendimiento observadas durante el diseño factorial.

Diseño Factorial

Un diseño de experimentos factorial se enfoca en la influencia de cada uno de los factores principales y sus niveles en la respuesta resultante de un experimento. Para ello, cada experimento contempla la combinación de cada factor con sus respectivos niveles. Por ejemplo, si se tiene el factor A con a niveles, el factor B con b niveles y el factor C con c niveles, cada experimento contiene todas las combinaciones de abc. Los efectos que se producen de un factor son reflejados en la variable de respuesta como resultado del cambio en el nivel del factor. Si A,B y C son los efectos principales en el análisis del diseño factorial, la tabla de análisis de varianza del modelo de tres factores con efectos se representa en la Tabla 2 [11].

Para el análisis de los efectos es necesario un mínimo de dos replicas $(n \geq 2)$ con el fin de determinar la suma de cuadrados del error, si todas las interacciones posibles están incluidas en el diseño. El modelo del análisis de varianza de tres factores se representa mediante la Ec. (5).

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \ldots, a \\ j = 1, 2, \ldots, b \\ k = 1, 2, \ldots, c \\ l = 1, 2, \ldots, n \end{cases} \tag{5}$$

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29396 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 6- 25

Tabla 2. Análisis de varianza del modelo de tres factores [11].

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Cuadrado medio esperado	F_0
A	SS_A	$a-1$	MS_A	$\sigma + \frac{bcn\sum \tau_i^2}{a-1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b-1$	MS_B	$\sigma^2 + \frac{acn\sum \beta_i^2}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	$c-1$	MS_C	$\sigma^2 + \frac{abn\sum \gamma_i^2}{c-1}$	$\frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	MS_{AB}	$\sigma^2 + \frac{cn\sum\sum(\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	$(a-1)(c-1)$	MS_{AC}	$\sigma^2 + \frac{bn\sum\sum(\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$	$\frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	$(b-1)(c-1)$	MS_{BC}	$\sigma^2 + \frac{an\sum\sum(\beta\gamma)_{jk}^2}{(b-1)(c-1)}$	$\frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1)$	MS_{ABC}	$\sigma^2 + \frac{n\sum\sum(\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	$\frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	$abc(n-1)$	MS_E	σ^2	
Total	SS_T	$abcn-1$			

La suma de cuadrados total se calcula mediante la Ec. (6).

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\sum_{l=1}^{n} y_{ijkl}^2 - \frac{y^2}{abc...n} \tag{6}$$

Mientras que las sumas de cuadrados de los efectos principales se encuentran a partir de los totales de los factores $A(y_{i...})$, $B(y_{.j.})$ y $C(y_{..k.})$. En las Ec. (7, 8 y 9) se muestra cómo efectuar el cálculo.

$$SS_A = \frac{1}{bcn}\sum_{i=1}^{a} y_{i...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} \tag{7}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn}\sum_{j=1}^{b} y_{.j.}^2 \frac{y_{...}^2}{abcn} \tag{8}$$

$$SS_C = \frac{1}{abn}\sum_{k=1}^{c} y_{..k.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} \tag{9}$$

Para calcular las sumas de cuadrados de las interacciones entre dos factores, se utilizan los totales de las celdas $A \times B$, $A \times C$ y $B \times C$. Las Ec. (10, 11 y 12) muestran cómo realizar este cálculo.

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} y_{ij..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B = SS_{\text{subtotales}(AB)} - SS_A - SS_B \tag{10}$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{k=1}^{c} y_{i.k.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_C = SS_{\text{subtotales}(AC)} - SS_A - SS_C \tag{11}$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c} y_{.jk.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_B - SS_C = SS_{\text{subtotales}(BC)} - SS_B - SS_C \tag{12}$$

En un diseño factorial de tres factores, la suma de cuadrados de la interacción triple se calcula a partir de los totales de las celdas $\{y_{ijk.}\}$. Las Ec. (13 y 14) describen el proceso de cálculo.

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c} y_{ijk.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \tag{13}$$

$$SS_{ABC} = SS_{\text{subtotales}(ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \tag{14}$$

Por último, la suma de cuadrados del error puede calcularse con la Ec. (15).

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{subtotales}(ABC)} \tag{15}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el proceso de entrenamiento, se estableció un conjunto de hiperparámetros base que se mantuvieron constantes a lo largo de las pruebas, según la configuración por defecto de cada modelo, salvo aquellos factores que formaron parte del diseño experimental.

No obstante, se debe destacar la estrategia de entrenamiento respecto al número de épocas. A diferencia de las prácticas convencionales que recurren a mecanismos de detención temprana (*early stopping*)

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29396 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 6- 25

para prevenir el sobreajuste, en esta investigación se optó por entrenar las redes mediante niveles fijos de iteración. Esta decisión responde a la necesidad de cuantificar de manera aislada el impacto de la convergencia como un factor independiente dentro del diseño factorial. Al fijar el número de épocas, se evita que la detención temprana enmascare la verdadera influencia de esta variable sobre la varianza del modelo, garantizando que el análisis de varianza refleje el efecto real de cada nivel evaluado.

De este modo, y como resultado de partida, se presenta la Tabla 3, que muestra la configuración inicial y la Accuracy obtenida antes del ajuste estadístico.

Tabla 3. Configuración inicial de hiperparámetros y Accuracy obtenida antes del ajuste estadístico.

Modelo	**Tamaño de Lote**	**Épocas**	**Activación**	**Accuracy Inicial (%)**
VGG16	32	150	sigmoid	81.32
EfficientNetB0	16	150	softmax	92.09

Tras el análisis de varianza de los modelos EfficientNetB0 y VGG16, se obtuvieron los valores de p correspondientes a los factores utilizados en el diseño de experimentos factorial, correspondientes al tamaño de lote (factor A), número de épocas (factor B), función de activación (factor C) y sus interacciones.

Como se muestra en la Tabla 4, para EfficientNetB0 únicamente la función de activación C presentó un efecto significativo sobre la *accuracy*, con $p = 1{,}11 \times 10^{-16}$, mientras que el tamaño de lote A, el número de épocas B y las interacciones analizadas presentaron valores de p mayores a 0.025, considerándose que no existe una contribución estadísticamente significativa en el resultado.

En contraste, para el modelo VGG16, el tamaño de lote A y la función de activación C presentaron efectos significativos, con valores de $p = 0{,}00000006$ y $p = 1 \times 10^{-16}$, respectivamente. Asimismo, las interacciones $A \times B$ y $A \times C$ resultaron significativas, mientras que el número de épocas B, y las interacciones $B \times C$ y $A \times B \times C$ no mostraron evidencia estadística suficiente de influencia sobre la *accuracy*.

De acuerdo con estos resultados, se determina que la función de activación C fue el factor de mayor influencia en ambos modelos, siendo *softmax* la de mejor desempeño para EfficientNetB0 y *sigmoid* para VGG16.

Tabla 4. Síntesis de los resultados del diseño factorial para los modelos EfficientNetB0 y VGG16.

Modelo	Factor o interacción	Valor de p	Resultado estadístico	Interpretación
EfficientNetB0	Tamaño de lote (A)	0.171	No significativo	No se encontró evidencia suficiente de influencia sobre la *accuracy*.
	Número de épocas (B)	0.340	No significativo	No presentó un efecto significativo sobre la *accuracy*.
	Función de activación (C)	1.11×10^{-16}	Significativo	Fue el factor de mayor influencia; *softmax* presentó los mejores resultados.
	$A \times B$	0.733	No significativo	No se observó una interacción significativa.
	$A \times C$	0.222	No significativo	No se observó una interacción significativa.
	$B \times C$	0.385	No significativo	No se observó una interacción significativa.
	$A \times B \times C$	0.249	No significativo	No se observó una interacción significativa.
VGG16	Tamaño de lote (A)	0.00000006	Significativo	El tamaño de lote influyó significativamente en la *accuracy*.
	Número de épocas (B)	0.6355	No significativo	No presentó un efecto significativo sobre la *accuracy*.
	Función de activación (C)	1×10^{-16}	Significativo	Fue uno de los factores más relevantes; *sigmoid* presentó el mejor desempeño.

Continúa en la siguiente página

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29396 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 6- 25

Continuación de la Tabla 4.

Modelo	Factor o interacción	Valor de p	Resultado estadístico	Interpretación
	$A \times B$	0.0186	Significativo	Se observó una interacción significativa entre ambos factores.
	$A \times C$	0.000000147	Significativo	Se observó una interacción significativa entre ambos factores.
	$B \times C$	0.121	No significativo	No se observó una interacción significativa.
	$A \times B \times C$	0.566	No significativo	No se observó una interacción significativa.

De manera sintetizada, las configuraciones óptimas que materializaron estos hallazgos se detallan en la Tabla 5, donde se resalta la sinergia entre los niveles de los factores evaluados y la respuesta predictiva de cada red en la variable de salida (*Accuracy*).

Tabla 5. Mejores resultados obtenidos para los modelos EfficientNetB0 y VGG16, antes y después de la optimización con el diseño de experimentos factorial.

Modelo	Accuracy inicial	Accuracy final	Mejor configuración	Factores e interacciones relevantes
EfficientNetB0	92.09 %	94.42 %	Tamaño de lote: 32 Número de épocas: 30 Función de activación: *softmax*	La función de activación fue la variable más relevante;*softmax* presentó el mejor desempeño.
VGG16	81.32 %	90.70 %	Tamaño de lote: 16 Número de épocas: 30 Función de activación: *sigmoid*	Tamaño de lote (A), función de activación (C), interacción $A \times B$ e interacción $A \times C$.

El cumplimiento de la hipótesis inicial, que establecía un umbral de *accuracy* igual o superior a 90 %, no constituye un mero resultado empírico, sino la consecuencia del diseño experimental. Al superar

las barreras del ajuste heurístico, la exploración del espacio de hiperparámetros permitió identificar configuraciones que maximizan la capacidad de generalización de las redes neuronales convolucionales estudiadas. La validación estadística confirma que la selección de variables, particularmente la función de activación y el tamaño de lote, resulta determinante para obtener modelos robustos en tareas de visión artificial en aplicaciones agrícolas.

Si bien ambas arquitecturas fueron entrenadas con el mismo conjunto de datos, la divergencia en sus topologías determinó su desempeño final. EfficientNetB0 demostró una superioridad intrínseca, superando a VGG16 por un margen del 3.72 %. Esta ventaja puede asociarse a su mecanismo de escalado compuesto y a la implementación de bloques *MBConv*, los cuales optimizan el flujo de información y la extracción de características jerárquicas con una mayor eficiencia paramétrica [19].

En contraste, VGG16 se basa en una secuencia relativamente rígida de capas convolucionales de 3 × 3 y contiene un número considerablemente mayor de parámetros que EfficientNet-B0. Por ello, su desempeño puede depender de manera importante de la configuración de entrenamiento y de la capacidad de regularización disponible. Esta interpretación es compatible con estudios de optimización de hiperpará-metros que han demostrado que el efecto del tamaño de lote, la tasa de aprendizaje, el optimizador y otras variables dependen de la arquitectura empleada [21]. Esto queda evidenciado por la significancia estadística de las interacciones entre el tamaño de lote y las demás variables, lo que explica tanto su exactitud basal más reducida como su notable margen de mejora tras la optimización factorial.

El contraste entre ambos modelos estudiados permite determinar cuál es la arquitectura más idónea para la clasificación de pulgones en rosales, y establece un precedente metodológico que demuestra que la adopción de diseños factoriales en el entrenamiento de redes convolucionales mitiga la incertidumbre operativa, garantizando que los futuros despliegues en entornos de agricultura de precisión se sustenten en evidencias cuantitativas y no en la intuición del desarrollador.

También es importante señalar que a diferencia de la búsqueda exhaustiva o aleatoria, este método no se limita a arrojar el valor más alto de Accuracy. Esta diferencia es muy importante, ya que se garantiza que la configuración de parámetros obtenida corresponde a un patrón real y no a un golpe de suerte. Siendo como resultado, un modelo más fácil de reproducir y no se desperdicia tiempo de cómputo en variables que no impactan sobre el rendimiento del modelo.

Con el propósito de mayor claridad a los resultados de los mejores modelos obtenidos con base en la metodología propuesta, la Tabla 6 presenta las matrices de confusión de las configuraciones óptimas de VGG16 y EfficientNetB0. Esta representación complementa las métricas globales de desempeño al mostrar la distribución de las predicciones correctas y los errores de clasificación para cada clase, permitiendo observar con mayor detalle el comportamiento de ambas arquitecturas.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29396 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 6- 25

Tabla 6. Matrices de confusión obtenidas para los mejores modelos EfficientNetB0 y VGG16.

Clase real	EfficientNetB0 Clase predicha		VGG16 Clase predicha	
	Rosa Plagada	**Rosa Sana**	**Rosa Plagada**	**Rosa Sana**
Rosa Pulgón	102	6	94	14
Rosa Sana	6	101	6	101

La decisión de emplear la *accuracy* global como variable de respuesta en el diseño factorial se sustenta en la distribución equiprobable del conjunto de datos, condición bajo la cual esta métrica refleja la capacidad de generalización de los modelos sin verse distorsionada por la prevalencia de una clase sobre otra. Las matrices de confusión presentadas en la Tabla 6 corroboran esta interpretación, al evidenciar que los errores de clasificación se distribuyen de manera simétrica entre falsos positivos y falsos negativos en ambas arquitecturas.

Conclusiones y futuras lineas de investigación

Con el uso de modelos de redes neuronales convolucionales es factible atender las problemáticas relacionadas con la clasificación de plagas en cultivos de rosales, gracias a las bases datos (imágenes) con los que se entrenaron los modelos EfficientNetB0 y VGG16, logrando una Accuracy de 94.42 % y 90.70 %, respectivamente.

No obstante, las arquitecturas de los modelos deben ser ajustadas a las necesidades específicas de la tarea que se busca atender. Por lo tanto, en este trabajo se utilizó el diseño de experimentos factorial que permitió obtener buenos resultados sin recurrir a la experimentación empírica tradicional de prueba y error, utilizando en su lugar ensayos controlados donde se intercambiaron las uniones de parámetros, tamaño de lote, número de épocas y función de activación. Además, un diseño factorial con base en los niveles de significancia permite tomar elecciones fundamentadas sobre cómo influyen algunos parámetros más que otros y determinar los mejores arreglos de estos para cada modelo.

El proyecto de investigación se enfocó en determinar el mejor arreglo de parámetros a través de un diseño factorial de tres factores eliminando métodos empíricos para las pruebas, de tal modo cada combinación fue evaluada para determinar si esta influía o no en la respuesta de la variable de salida (*accuracy*); para que dichos modelos entrenados fueran capaces de realizar la clasificación de pulgones en rosales.

Los modelos de redes neuronales convolucionales ajustados en sus parámetros para la clasificación de pulgones en rosales muestran una alternativa diferente a los métodos tradicionales que son usados en los cultivos de los municipios del sur del Estado de México, además de ser potencialmente aplicables en otros tipos de cultivo de flores, como lo son: gerbera, margarita, clavel, lirio, entre otras de importancia

Estatal.

Como línea futura de investigación, se plantea la evaluación de las configuraciones óptimas obtenidas en este estudio sobre conjuntos de datos con distribuciones asimétricas que simulen las condiciones reales, donde la prevalencia de plantas sanas suele ser significativamente mayor que la de plantas afectadas. En tales escenarios, será necesario incorporar técnicas de balanceo, como el remuestreo sintético, así como métricas de evaluación más robustas ante el desbalance, con el fin de validar la transferibilidad de los hallazgos factoriales a entornos operativos.

Una vez ajustado los modelos de redes neuronales, la tarea de inspección por el agricultor o ingeniero agrónomo puede ser migrada a sistemas computacionales que pueden reducir tiempos, mano de obra, errores en la inspección de los cultivos o abuso de pesticidas.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

José Hernández: Conceptualización, Metodología, Software y Preparación del borrador original. **Daniel Cervantes**: Redacción, Edición e Investigación. **Roberto Alejo**: Supervisión e Investigación. **Federico Del Razo**: Revisión y Edición. **Everardo Granda**: Análisis de resultados y Corrección de estilo.

Referencias

[1] W. A. Lozada-Portilla, M. J. Suarez-Barón, and E. Avendaño-Fernández, "Aplicación de redes neuronales convolucionales para la detección del tizón tardío phytophthora infestans en papa solanum tuberosum," *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, vol. 24, no. 2, pp. 1–9, 2021. DOI: 10.31910/rudca.v24.n2.2021.1917

[2] S. Hemalatha and M. Sangeetha, "Identifying pests in precision agriculture using low-cost image data acquisition," *Brazilian Journal of Biology*, vol. 84, pp. 1–13, 2024. DOI: 10.1590/1519-6984.281671

[3] L. Torres, L. Romero, E. Aguirre, and R. Ferro, "Iot detection system for mildew disease in roses using neural networks and image analysis," *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, vol. 8, no. 4, pp. 105–116, 2023. DOI: 10.9781/ijimai.2023.07.001

[4] T. De Cesaro Júnior, R. Rieder, J. R. Di Domênico, and D. Lau, "Insectcv: A system for insect detection in the lab from trap images," *Ecological Informatics*, vol. 67, pp. 1–12, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101516

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29396 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 6- 25

[5] A. L. Velázquez-Torres, N. Callejas-Juárez, and F. E. Martínez-Castañeda, "Análisis de competitividad del sistema de rosa para corte (rosa sp) en el entorno mexiquense," *Terra Latinoamericana*, vol. 40, pp. 1–9, 2022. DOI: 10.28940/terra.v40i0.948

[6] T. Zhang, K. Li, X. Chen, C. Zhong, B. Luo, I. Grijalva, B. McCornack, D. Flippo, A. Sharda, and G. Wang, "Aphid cluster recognition and detection in the wild using deep learning models," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, pp. 1–12, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-38633-5

[7] R. R. Reyes Recalde, "Evaluación de inductores externos de la activación del sistema inmunológico en el cultivo de rosas (rosa sp.)," Trabajo de maestría, Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Ambato, Ecuador, 2016. [Online]. Available: https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/22666

[8] B. Duman, "Mobile Device-Based Detection System of Diseases and Pests in Rose Plants Using Deep Convolutional Neural Networks and Quantization," *Tarım Bilimleri Dergisi*, vol. 31, no. 2, pp. 302–318, Mar. 2025. DOI: 10.15832/ankutbd.1514972

[9] M. Subramanian, K. Shanmugavadivel, and P. S. Nandhini, "On fine-tuning deep learning models using transfer learning and hyper-parameters optimization for disease identification in maize leaves," *Neural Computing and Applications*, vol. 34, no. 16, pp. 13 951–13 968, Aug. 2022. DOI: 10.1007/s00521-022-07246-w

[10] B. Bischl, M. Binder, M. Lang, T. Pielok, J. Richter, S. Coors, J. Thomas, T. Ullmann, M. Becker, A.-L. Boulesteix, D. Deng, and M. Lindauer, "Hyperparameter optimization: Foundations, algorithms, best practices, and open challenges," *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 13, no. 2, pp. 1–43, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/widm.1484

[11] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. Wiley, 2021, ch. 5–6, pp. 191–315.

[12] Flowers Dataset, "Flowers dataset," Kaggle dataset, Feb. 2021, consultado en la tesis como repositorio de imágenes de libre uso. [Online]. Available: https://www.kaggle.com/datasets/imsparsh/flowers-dataset/data

[13] E. Raff, *Inside Deep Learning: Math, Algorithms, Models*. Manning Publications, 2022, ch. 1, pp. 1–15.

[14] L. Antiga, E. Stevens, H. Huang, and T. Viehmann, *Deep Learning with Pytorch, Second Edition: Training and Applying Deep Learning and Generative AI Models*, 2nd ed. Manning, 2026.

[15] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," in *3rd International Conference on Learning Representations*, 2015, pp. 1–14. DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556

[16] A. B. Naeem, B. Senapati, and A. Zaidi, "Enhancing brain tumor detection from mri-based images through deep transfer learning models," *AI*, vol. 6, no. 12, pp. 1–25, 2025.

[17] D. Pérez-Aguilar, R. Risco-Ramos, and L. Casaverde-Pacherrez, "Transfer learning en la clasificación binaria de imágenes térmicas," *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 26, pp. 71–86, 2021. DOI: 10.17163/ings.n26.2021.07

[18] D. G. Alonso, "Enfoque liviano para reconocimiento de gestos manuales híbridos con cámaras de profundidad," Ph.D. dissertation, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), 2020.

[19] M. Tan and Q. V. Le, "Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks," in *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning*, ser. Proceedings of Machine Learning Research, vol. 97. PMLR, 2020, pp. 6105–6114. [Online]. Available: https://proceedings.mlr.press/v97/tan19a.html

[20] C. Su and W. Wang, "Concrete cracks detection using convolutional neuralnetwork based on transfer learning," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, pp. 1–10, 10 2020. DOI: 10.1155/2020/7240129

[21] H. Xu, "Comparative Analysis of VGG16 and EfficientNet for Image-Based Cat Breed Classification:," in *Proceedings of the 1st International Conference on Modern Logistics and Supply Chain Management*. Singapore, Singapore: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2024, pp. 238–242. DOI: 10.5220/0013297100004558

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Mecanismo articulado de barras para desplazamiento lineal inspirado en la marcha de un pereiópodo de *Gecarcinus*

Linkage mechanism for linear displacement inspired by the march of a pereiopod of *Gecarcinus*

G. Castro-Daza[1] *, Á. Anzueto-Ríos[1], A. A. Sánchez-Ramírez[1], J. G. Solís-Villela[1]
(*guillermocastrodza@outlook.es)

Recibido: 29 de mayo de 2026 Aceptado: 20 de julio de 2026

Resumen

En este trabajo se analiza cinemáticamente el pereiópodo del cangrejo terrestre *Gecarcinus lateralis* para obtener los parámetros que describen su marcha. A partir de estos datos se construye un modelo matemático del ciclo de marcha promedio mediante una red neuronal multicapa, el cual se emplea para el diseño y construcción de un mecanismo de barras tipo Klann capaz de imitar su desplazamiento lineal. Finalmente, se compara el comportamiento del sistema mecánico con el del organismo biológico mediante métricas espaciales y angulares. Los resultados muestran una semejanza global del 73 % y del 65 % en condiciones de terreno irregular.

Palabras clave: Diseño biónico, Cinemática, Mecanismo de barras, Gecarcinus, Ciclo de marcha

Abstract

In this work, a kinematic analysis of the terrestrial crab *Gecarcinus lateralis* pereiopod is performed to obtain the parameters that describe its gait. Based on these data, a mathematical model of the average gait cycle is developed using a multilayer neural network, which is used to design and build a Klann-type linkage mechanism capable of reproducing its linear locomotion. The behavior of the mechanical system is then compared with the biological organism using spatial and angular metrics. The results show a global similarity of 73 % and 65 % under irregular terrain conditions.

Keywords: Bionic design, Kinematics, Linkage mechanism, Gecarcinus, gait cycle

[1] Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA), Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

INTRODUCCIÓN

La locomoción bioinspirada ha impulsado el desarrollo de mecanismos capaces de reproducir patrones de movimiento presentes en la naturaleza. En particular, los mecanismos de barras accionados por un único actuador han demostrado ser una alternativa eficiente para generar trayectorias de marcha en robots caminantes [1]. Asimismo, el análisis cinemático de organismos biológicos permite obtener trayectorias articulares, rangos angulares y relaciones geométricas que sirven como base para el diseño de mecanismos bioinspirados.

Los estudios sobre locomoción en crustáceos han mostrado que la coordinación de las articulaciones del pereiópodo les permite desplazarse eficientemente sobre distintos terrenos [2–4]. Estos resultados han motivado el desarrollo de robots inspirados en cangrejos y la optimización de sus mecanismos de locomoción [5–10].

Sin embargo, la aplicación de modelos matemáticos obtenidos a partir del análisis cinemático de crustáceos terrestres para el diseño de mecanismos de barras accionados por un único actuador sigue siendo limitada. En este trabajo se realiza el análisis cinemático de un pereiópodo de *Gecarcinus lateralis*, se obtiene un modelo matemático de su ciclo de marcha promedio mediante una red neuronal multicapa y se diseña un mecanismo con el propósito de utilizar un único actuador para todo el sistema, cuya semejanza con el sistema biológico se evalúa cuantitativamente.

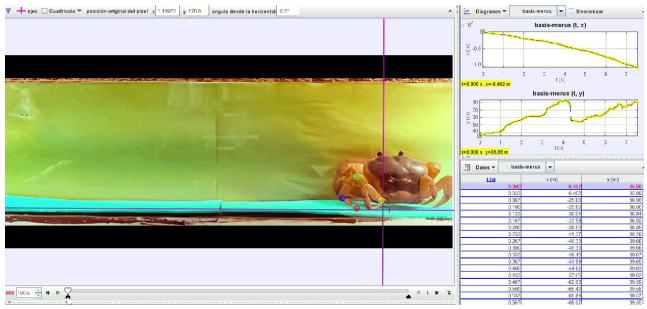
METODOLOGÍA

Análisis cinemático de cangrejo terrestre

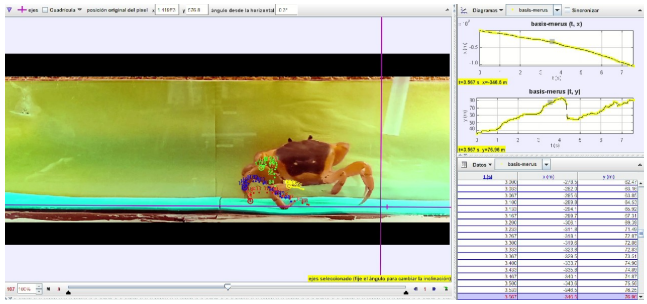
Como primera etapa del trabajo se realiza el análisis cinemático de la marcha de un ejemplar de *Gecarcinus lateralis*. Para ello se registran 12 videos del desplazamiento del organismo sobre una pista que restringe el movimiento lateral, obteniéndose 37 ciclos de marcha con una resolución de 1680×720 píxeles a 60 fps. El seguimiento se realiza sobre un pereiópodo izquierdo, considerando las articulaciones basis–merus, merus–carpus, propus–dactyl y la punta del dactyl, por ser las principales responsables del movimiento durante la marcha. La articulación carpus–propus se establece como un segmento rígido debido a que ambas estructuras se encuentran prácticamente fusionadas en el pereiópodo natural [11].

Posteriormente, los videos son procesados utilizando el software Tracker para obtener los datos de posición en el plano XY de las articulaciones basis–merus, merus–carpus, propus–dactyl y la punta del dactyl. El seguimiento se realiza fotograma por fotograma como lo mostrado en la Figura 1, generando trayectorias de cada articulación durante la marcha. Finalmente, los datos obtenidos se exportan en archivos .csv para su posterior procesamiento y análisis cinemático.

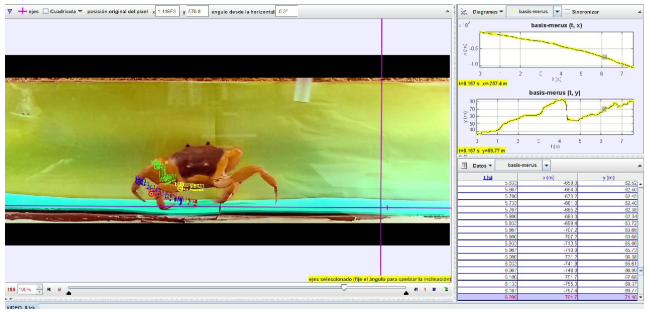
https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47



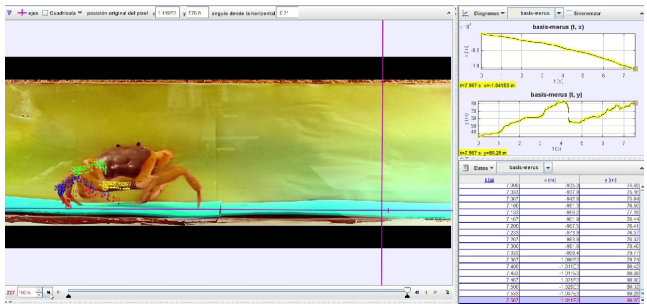
(a) Fotograma de ejemplo 1



(b) Fotograma de ejemplo 2



(c) Fotograma de ejemplo 3



(d) Fotograma de ejemplo 4

FIGURA 1. Secuencias de fotogramas de ejemplo correspondientes a una muestra de video de la marcha del ejemplar, la cual incluye varios ciclos de marcha.

Obtención de modelo matemático

Los datos de posición obtenidos del análisis cinemático son procesados mediante programas desarrollados en Python. Inicialmente, los archivos `.csv` son interpolados y filtrados para completar regiones sin datos y suavizar las trayectorias. Posteriormente, se segmentan los ciclos de marcha a partir del contacto de la punta del dactyl con el suelo, y cada ciclo es normalizado y escalado para obtener conjuntos de datos homogéneos. Finalmente, las trayectorias articulares se promedian, manteniendo constantes las longitudes entre segmentos y fijando la articulación basis–merus, con el fin de obtener un ciclo de marcha promedio cerrado y repetitivo.

Para representar matemáticamente las trayectorias del pereiópodo se implementa una red neuronal multicapa, capaz de aproximar funciones no lineales continuas a partir de datos experimentales sin imponer una forma funcional predeterminada para las trayectorias. El modelo utiliza como parámetro de entrada el porcentaje del ciclo de marcha $t \in [0, 100]$, normalizado como:

$$t' = \frac{t}{100} \in [0, 1]. \tag{1}$$

Debido a que la articulación basis–merus se mantiene fija en el origen, sus coordenadas se consideran constantes y no forman parte de las variables de salida del modelo. Por lo tanto, la red neuronal define una función:

$$f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^6, \tag{2}$$

cuyas salidas corresponden a las coordenadas $(x_i(t'), y_i(t'))$ de las articulaciones merus–carpus, propus–dactyl y la punta del dactyl.

La función se aproxima mediante una red neuronal conectada con tres capas ocultas de 128, 128 y 64 neuronas y funciones de activación tangente hiperbólica:

$$f(t') = W_4 \tanh\Big(W_3 \tanh\big(W_2 \tanh(W_1 t' + b_1) + b_2\big) + b_3\Big) + b_4. \tag{3}$$

El modelo se entrena mediante retropropagación utilizando el optimizador Adam con una tasa de aprendizaje de 10^{-3}. La función objetivo combina el error cuadrático medio (MSE) entre las coordenadas predichas y las experimentales con un término de cierre cíclico que fuerza la coincidencia entre el inicio y el final del ciclo de marcha. El entrenamiento se realiza durante 3000 épocas sobre los datos previamente normalizados. Se selecciona una red neuronal multicapa debido a que a diferencia de aproximaciones basadas en polinomios, splines o series de Fourier, la red neuronal permite aproximar directamente la función que relaciona el porcentaje del ciclo de marcha con la posición de las articulaciones sin imponer una forma funcional predefinida [12]. Además, una vez entrenado, el modelo genera de manera continua las coordenadas articulares a partir de un único parámetro de entrada, facilitando su implementación en el cálculo cinemático y en el diseño posterior del mecanismo.

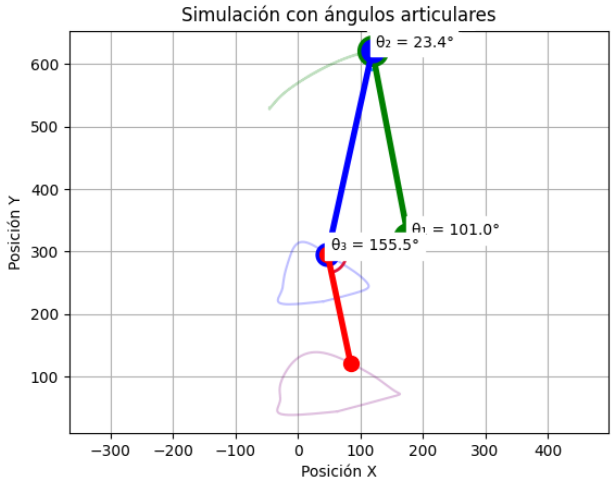
Obtención de ángulos de articulación y longitud de segmentos

Una vez entrenada la red neuronal, se emplea un programa desarrollado en Python para calcular los rangos articulares y las longitudes de los segmentos del pereiópodo mediante la formación de vectores entre articulaciones consecutivas. A partir de estos vectores se obtiene la variación de los ángulos del segmento merus respecto a la horizontal, de la articulación merus-carpus y de la articulación propus-dactyl durante el ciclo de marcha. Posteriormente, el modelo se representa gráficamente mediante una simulación desarrollada en Matplotlib (Figura 2), donde los segmentos merus, carpus-propus y dactyl se muestran en colores verde, azul y rojo, respectivamente.

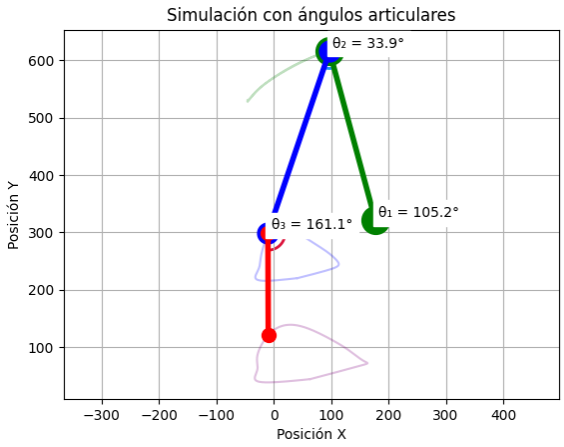
Diseño del mecanismo

Se propone una longitud de referencia de $L_{1prop} = 70$ mm para el segmento análogo al merus, a

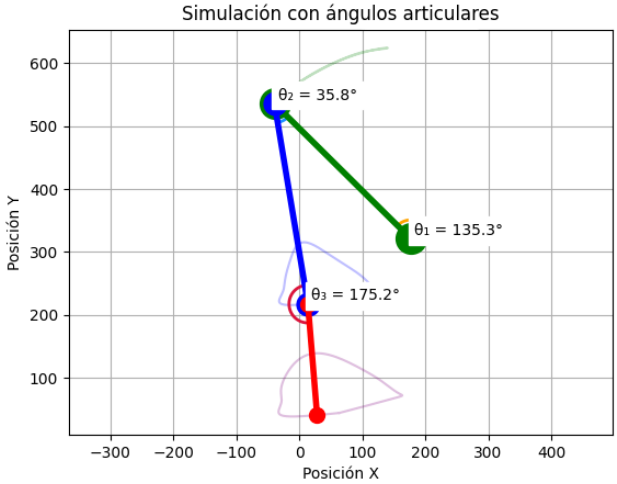
https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47



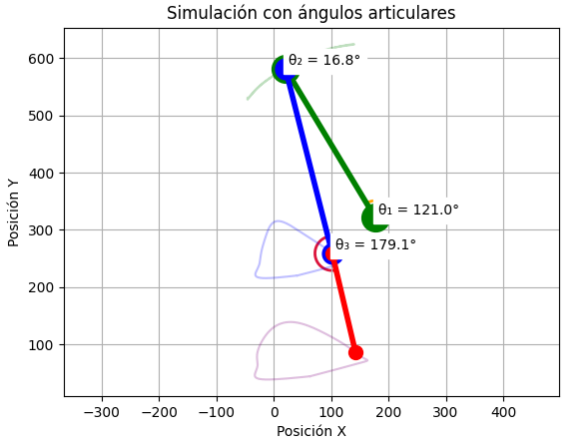
(a) Instante de ciclo de marcha 1



(b) Instante de ciclo de marcha 2



(c) Instante de ciclo de marcha 3

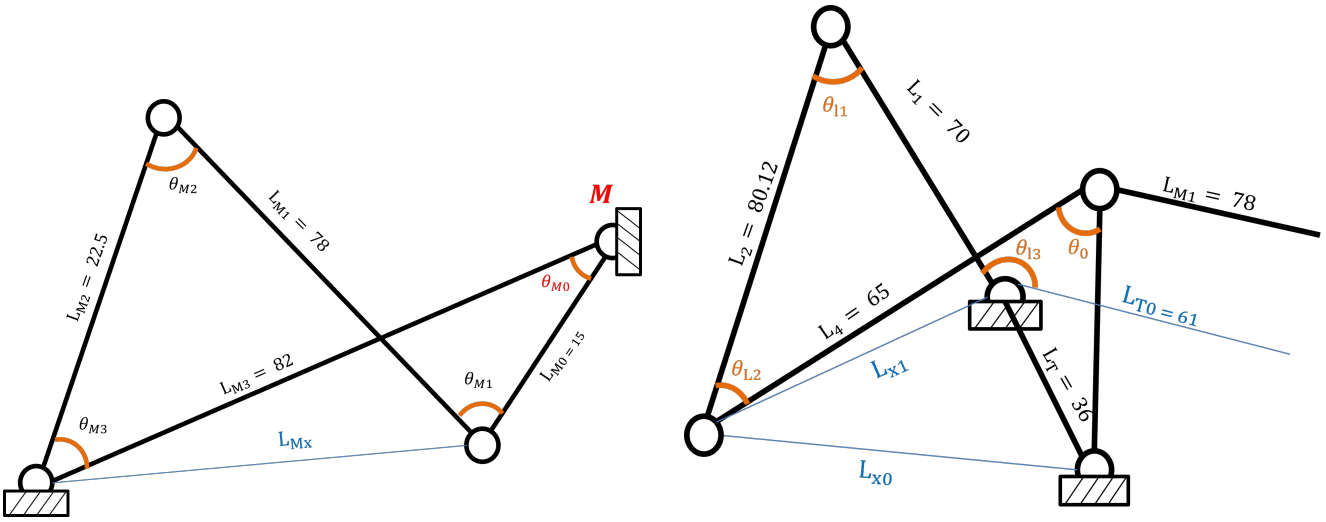


(d) Instante de ciclo de marcha 4

FIGURA 2. Secuencias de representación gráfica de la simulación del ciclo de marcha del ejemplar, modelado mediante la red neuronal entrenada con los datos promedio.

partir de la cual se calcula el factor de escala que determina las dimensiones finales del mecanismo. El diseño se sintetiza y ajusta en MotionGen utilizando como base un mecanismo de Klann modificado mediante la incorporación de una articulación móvil en el dactyl para imitar el rango articular observado experimentalmente. El mecanismo resultante está compuesto por un mecanismo de cuatro barras acoplado a un mecanismo de cinco barras (Figura 3).

El comportamiento cinemático del mecanismo se describe en función del ángulo de entrada del motor θ_{M0}.



(a) Primer mecanismo de cuatro barras (b) Mecanismo de cinco barras

FIGURA 3. Esquema dividido en dos partes del mecanismo planteado para el diseño del pereiópodo. A la izquierda se muestra el mecanismo de cuatro barras y a la derecha el mecanismo de cinco barras.

Mecanismo de cuatro barras

A partir del ángulo de entrada θ_{M0}, se define la longitud intermedia L_{Mx} como:

$$L_{Mx} = \sqrt{74{,}5 - 25{,}5\cos(\theta_{M0})} \tag{4}$$

Los ángulos internos del mecanismo se obtienen mediante:

$$\theta_{M1} = \arccos\left(\frac{L_{Mx}^2 - 64{,}99}{3L_{Mx}}\right) - \arccos\left(\frac{56 + L_{Mx}^2}{15{,}6L_{Mx}}\right) \tag{5}$$

$$\theta_{M2} = \arccos\left(\frac{65{,}68 - L_{Mx}^2}{34{,}32}\right) \tag{6}$$

$$\theta_{M3} = \arccos\left(\frac{L_{Mx}^2 - 56}{4{,}4L_{Mx}}\right) - \arccos\left(\frac{64{,}99 + L_{Mx}^2}{16{,}4L_{Mx}}\right) \tag{7}$$

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

Mecanismo de cinco barras

El mecanismo de cinco barras se define a partir de θ_{M2}, cuyo ángulo de entrada es:

$$\theta_0 = 215^\circ - \theta_{M2} \tag{8}$$

La longitud auxiliar L_{x0} se calcula mediante:

$$L_{x0} = \sqrt{47{,}09 - 28{,}6\cos(\theta_0)} \tag{9}$$

El ángulo auxiliar σ_2 se calcula como:

$$\sigma_2 = \arccos\left(\frac{L_{x0}^2 - 37{,}41}{4{,}4L_{x0}}\right) \tag{10}$$

Posteriormente, se define el ángulo:

$$\sigma_{x1} = \sigma_2 - 42{,}54^\circ + \theta_{M3} \tag{11}$$

La segunda longitud auxiliar L_{x1} se calcula mediante:

$$L_{x1} = \sqrt{12{,}96 + L_{x0}^2 - 7{,}2L_{x0}\cos(\sigma_{x1})} \tag{12}$$

Finalmente, los ángulos del mecanismo quedan definidos como:

$$\theta_{11} = \arccos\left(\frac{113{,}16 - L_{x1}^2}{112{,}14}\right) \tag{13}$$

$$\theta_{12} = \arccos\left(\frac{15{,}16 - L_{x1}^2}{16{,}02L_{x1}}\right) - \arccos\left(\frac{37{,}41 + L_{x0}^2}{13L_{x0}}\right) + \arccos\left(\frac{L_{x1}^2 + L_{x0}^2 - 12{,}96}{2L_{x0}L_{x1}}\right) \tag{14}$$

$$\theta_{13} = 246{,}1^\circ - \arccos\left(\frac{L_{x1}^2 - 15{,}16}{14L_{x1}}\right) - \arccos\left(\frac{12{,}96 - L_{x0}^2 + L_{x1}^2}{7{,}2L_{x1}}\right) \tag{15}$$

Se verifica además el cumplimiento de la ley de Grashof para el mecanismo principal de cuatro barras,

empleando las longitudes $S = 1{,}5$, $L = 8{,}5$, $P = 7{,}8$ y $Q = 8{,}06$ unidades. Como se satisface la condición

$$S + L \leq P + Q,$$

es decir,

$$10{,}0 \leq 15{,}86,$$

el eslabón de entrada puede realizar una rotación completa, garantizando un ciclo continuo de marcha.

El mecanismo posee un único grado de libertad, ya que el movimiento de todas las barras depende únicamente del ángulo de entrada del motor. En consecuencia, el estudio se centra en el análisis cinemático del sistema para reproducir la trayectoria del pereiópodo, mientras que los efectos dinámicos quedan fuera del alcance de este trabajo. La resistencia estructural se verifica posteriormente mediante simulaciones por elementos finitos.

Con el modelo cinemático definido, el sistema se diseña en CAD para establecer sus dimensiones, tolerancias y condiciones de ensamblaje, integrando cuatro mecanismos tipo pereiópodo en una misma estructura para evaluar la marcha lineal del prototipo.

Selección de componentes y materiales

Se seleccionan los componentes de accionamiento y control del sistema con base en criterios de compatibilidad geométrica, capacidad de control, disponibilidad y portabilidad. Su integración se define desde el modelo CAD en *SolidWorks*, donde el motor se fija mediante un soporte simétrico y la batería se ubica debajo de éste para optimizar el espacio destinado a los elementos de control.

El comportamiento estructural se evalúa mediante un análisis estático por elementos finitos utilizando *SolidWorks Simulation*. Todas las piezas se modelan con las propiedades mecánicas del PET-G, restringiendo las superficies de fijación del soporte principal y aplicando una carga de $9{,}81$ N sobre el eje de accionamiento para representar una condición estática de operación. El análisis permite obtener los esfuerzos equivalentes de von Mises, desplazamientos y deformaciones del mecanismo. Finalmente, se realiza un estudio de movimiento (CAE) para verificar el funcionamiento continuo del sistema sin colisiones empleando un único actuador.

Manufactura y ensamblaje

Las piezas del sistema se fabrican mediante impresión 3D en PET-G a partir de modelos CAD

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

exportados en formato STL y convertidos a código G. Posteriormente, se ensamblan junto con los componentes mecánicos y electrónicos, integrando el motor, los eslabones, elementos de separación y un tope mecánico para garantizar el movimiento del sistema y limitar su rango de operación. Finalmente, el mecanismo se controla mediante un programa desarrollado en Arduino, el cual acciona continuamente el motor para reproducir el ciclo de marcha.

Pruebas de funcionamiento y comparación de curvas

Se realizan pruebas experimentales para evaluar la capacidad del mecanismo de reproducir el ciclo de marcha del pereiópodo sobre seis superficies: loseta, césped, asfalto, tezontle, piedras y grava. En cada terreno se efectúan tres recorridos lineales independientes de aproximadamente 60 cm, clasificando el desempeño como *bueno*, *regular* o *no camina*. Para las superficies de loseta y grava se realiza un análisis cinemático mediante videos procesados con Tracker, obteniendo las coordenadas articulares del mecanismo. Los datos se segmentan, normalizan y promedian para construir un ciclo de marcha promedio experimental.

Para calcular la semejanza de las trayectorias espaciales se inicia calculando el RMSE, donde (x_i^{ref}, y_i^{ref}) es la trayectoria del pereiópodo y (x_i^{cmp}, y_i^{cmp}) la trayectoria del mecanismo, ambas muestreadas en N puntos igualmente distribuidos a lo largo del ciclo de marcha. El error cuadrático medio entre ambas trayectorias se calcula mediante

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[(x_i^{ref} - x_i^{cmp})^2 + (y_i^{ref} - y_i^{cmp})^2\right]}. \tag{16}$$

La semejanza espacial se calcula a partir del error cuadrático medio (RMSE) entre las trayectorias previamente alineadas en el plano XY, transformándolo posteriormente en un porcentaje mediante

$$S_{XY} = 100e^{-RMSE/k}, \tag{17}$$

donde $RMSE$ representa el error cuadrático medio entre ambas trayectorias y $k = 0{,}10\ \max(\Delta x, \Delta y)$ es un factor de normalización calculado a partir del mayor rango espacial de las trayectorias. Esta expresión produce una semejanza del $100\,\%$ cuando el error es nulo y disminuye exponencialmente conforme aumenta la diferencia entre ambas trayectorias.

La semejanza angular se determina comparando la tendencia de variación de cada ángulo articular durante el ciclo de marcha. Para ello se calcula

$$S_\theta = 100\left(\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1} I(s_i^{ref} = s_i^{cmp})\right), \tag{18}$$

donde N es el número de muestras del ciclo de marcha, s_i^{ref} y s_i^{cmp} representan el signo de la variación angular entre dos muestras consecutivas para el pereiópodo y el mecanismo, respectivamente, e $I(\cdot)$ es una función indicadora que toma el valor de 1 cuando ambos signos coinciden y 0 en caso contrario.

Finalmente, la semejanza global se obtiene como el promedio aritmético de ambas métricas,

$$S_{global} = \frac{S_{XY} + S_\theta}{2}, \tag{19}$$

RESULTADOS

Obtención de parámetros de marcha

A partir del análisis de videos mediante el software Tracker se obtuvieron las trayectorias de las articulaciones del pereiópodo en el plano XY durante la marcha. Estas trayectorias permiten identificar los ciclos de marcha, definidos por el movimiento de la punta del dactyl, la cual establece el inicio y el fin de cada ciclo. En la Figura 4, se muestra una gráfica de datos de posición obtenida a partir de la captura de los datos del video, donde se ven reflejados cinco ciclos de marcha para dicha captura.

Los datos de posición obtenidos constituyen la base para la formulación del modelo matemático del ciclo de marcha promedio, permitiendo identificar patrones repetitivos y zonas de contacto con el suelo.

Modelo matemático del ciclo de marcha

A partir del procesamiento de los datos de posición se obtuvo un ciclo de marcha promedio que describe el patrón de movimiento del pereiópodo. Este ciclo se utilizó para entrenar una red neuronal multicapa que modela las trayectorias articulares en función del porcentaje del ciclo de marcha. En la Figura 5, se muestra la trayectoria predicha por la red neuronal después de su entrenamiento con la trayectoria promedio de ciclo de marcha.

La función objetivo combinó el error cuadrático medio de los datos con un término de cierre cíclico ponderado por $\lambda_{cyc} = 0{,}5$. Durante el entrenamiento, la pérdida total disminuyó de $0{,}2832$ en la época inicial a $8{,}58 \times 10^{-5}$ en la época 2500, mostrando convergencia del modelo.

El error final se evaluó mediante el RMSE por coordenada, obteniendo valores de $0{,}0014$, $0{,}0022$, $0{,}7386$, $0{,}4195$, $3{,}1896$, $0{,}9054$, $3{,}4512$ y $0{,}9423$ para las variables x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4 y y_4, respectivamente. El RMSE combinado fue de $4{,}9511$. Estos valores indican que el modelo reproduce la

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

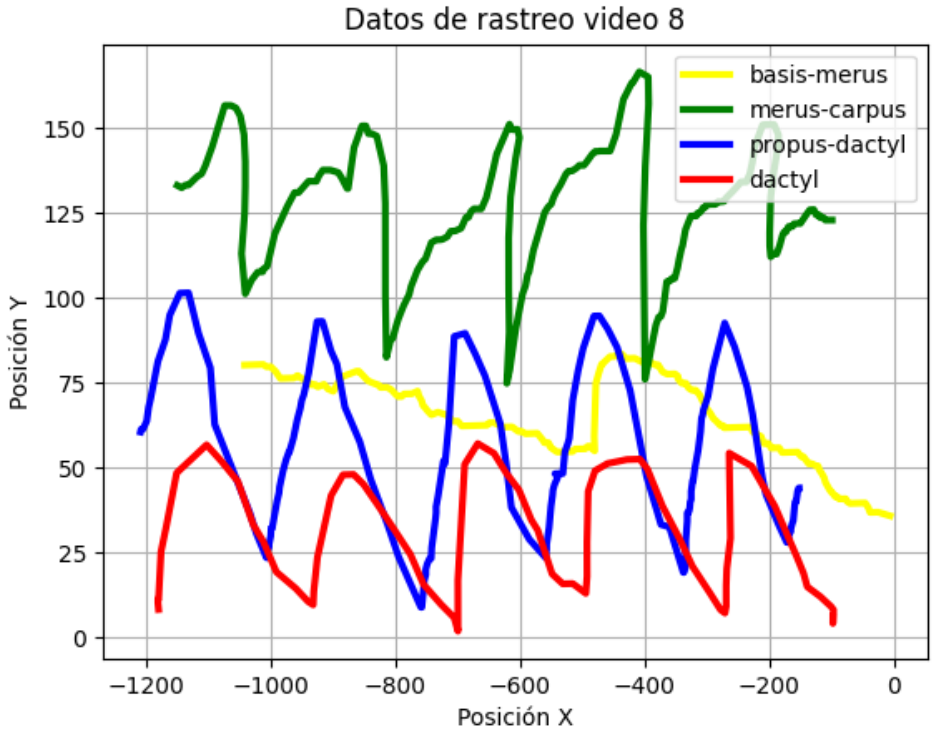


FIGURA 4. Gráfica de posiciones en el plano XY de video de muestra de marcha del pereiópodo del ejemplar.

trayectoria promedio del ciclo de marcha, especialmente considerando que las coordenadas se encuentran expresadas en unidades espaciales del sistema de análisis. En la Figura 6 se muestra el comportamiento del error durante el entrenamiento.

Simulación y obtención de parámetros geométricos

A partir del modelo matemático y de simulaciones cinemáticas se obtuvieron los rangos angulares de las articulaciones en función del porcentaje del ciclo de marcha. La Figura 7 muestra la variación de los ángulos articulares del pereiópodo durante un ciclo de marcha promedio. Se observa que cada articulación presenta un comportamiento periódico asociado a las fases de apoyo y oscilación del ciclo. La articulación *basis–merus* presenta la mayor amplitud de variación, alcanzando valores comprendidos entre $96{,}95°$ y $137{,}12°$. Por su parte, la articulación *merus–carpus* presenta un intervalo más reducido ($16{,}63°$–$42{,}09°$). Finalmente, la articulación *propus–dactyl* permanece cercana a la extensión completa durante la mayor parte del ciclo ($150{,}06°$–$179{,}96°$).

La separación observada entre las curvas se debe a que cada una representa una articulación diferente

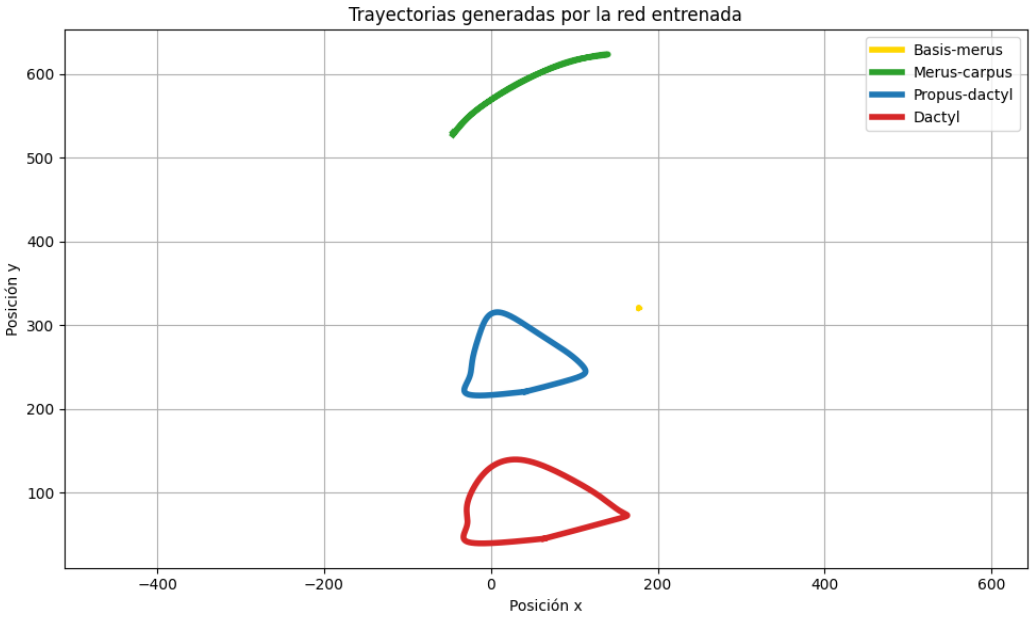


FIGURA 5. Ciclo de marcha proporcionado por la red neuronal entrenada.

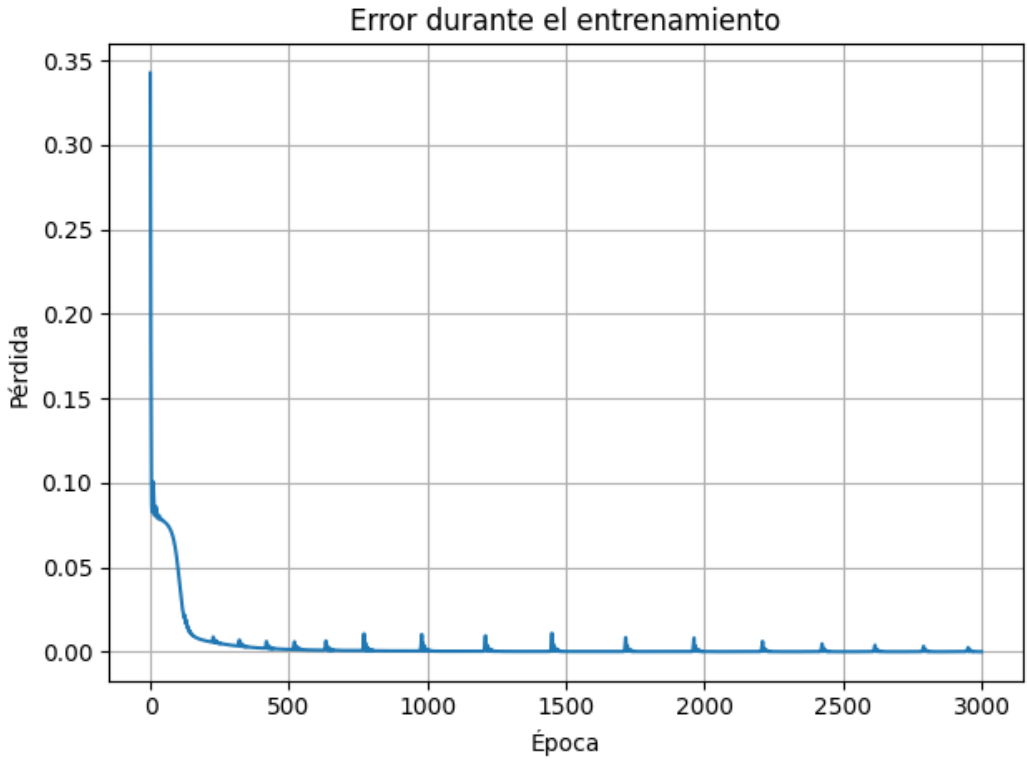


FIGURA 6. Error durante el entrenamiento de la red neuronal.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

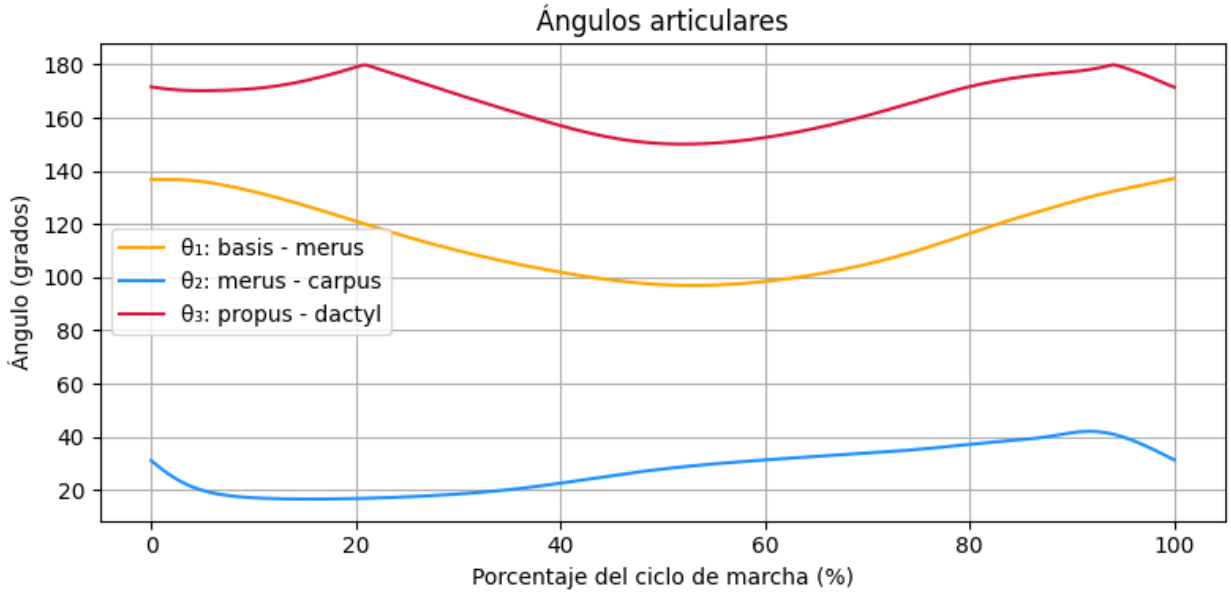


FIGURA 7. Cambio en amplitud angular de los segmentos del pereiópodo en función del porcentaje de ciclo de marcha.

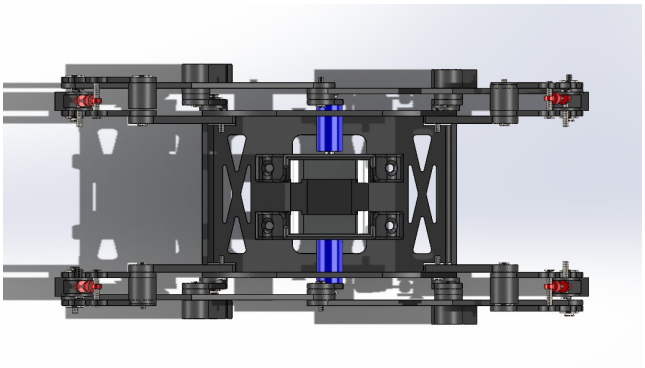
y, por tanto, un rango angular distinto determinado por la anatomía del pereiópodo. En consecuencia, los valores absolutos no son directamente comparables entre sí; sin embargo, la tendencia temporal de las tres curvas evidencia una coordinación entre las articulaciones durante el ciclo de marcha. Los máximos y mínimos de cada curva corresponden a los instantes de mayor extensión y mayor flexión de cada articulación, respectivamente, y constituyen los límites articulares empleados posteriormente para el diseño del mecanismo.

Asimismo, se obtuvieron longitudes de 314,21, 273,59 y 150,86 unidades para los segmentos carpus–propus, merus y dactyl, respectivamente. Estos parámetros definen las proporciones geométricas utilizadas en el diseño del mecanismo.

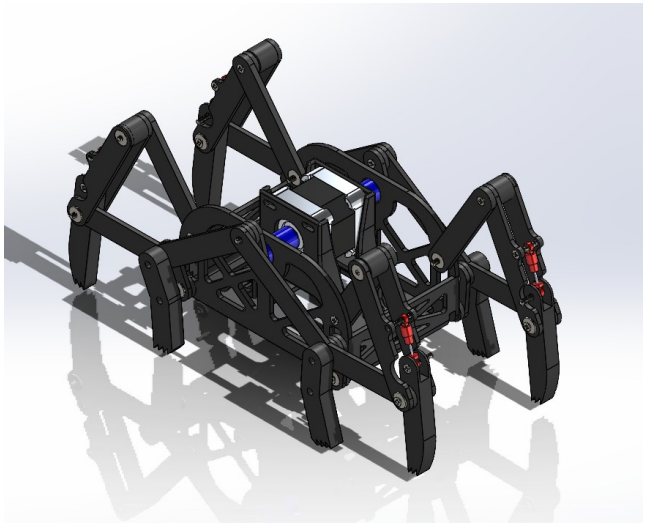
Diseño CAD y análisis estructural (CAE)

Con base en los parámetros obtenidos, se diseñó un mecanismo tipo Klann capaz de reproducir un movimiento cíclico mediante un único actuador. El sistema completo fue modelado y diseñado para que cuatro mecanismos de pereiópodos sean ensamblados y permitan la caminata de todo el sistema coordinándose entre sí. Este modelado se realizó en software CAD *Solidworks* integrando los componentes mecánicos y electrónicos, como se muestra en la Figura 8.

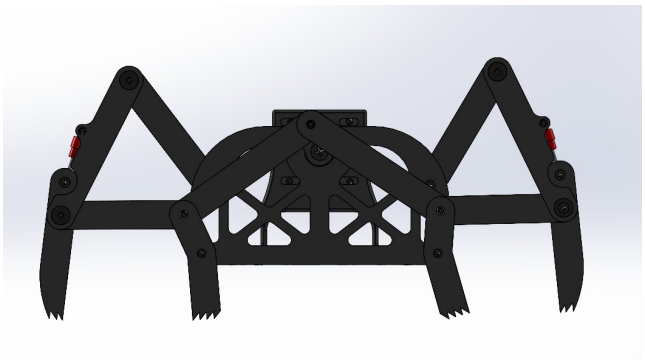
Los resultados del análisis estructural con software CAE *Solidworks* corresponden al caso de carga



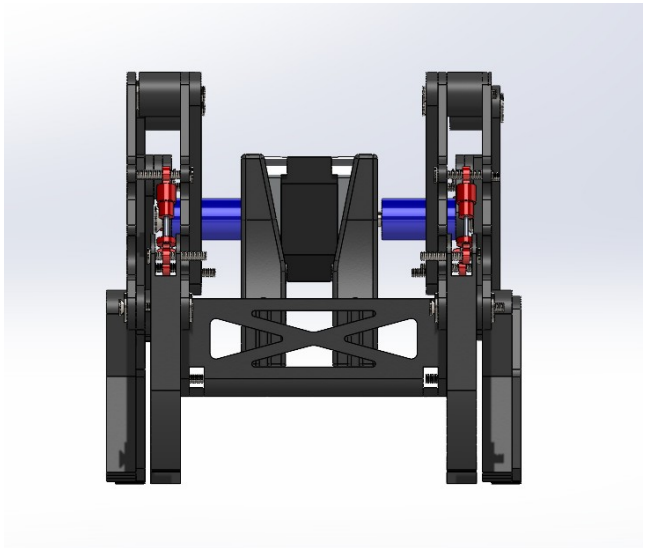
(a) Vista superior del sistema



(b) Vista en isométrico del sistema



(c) Vista frontal del sistema



(d) Vista lateral del sistema

FIGURA 8. Conjuntos de vistas del sistema diseñado en software CAD, incluyendo todas las barras y componentes mecánicos.

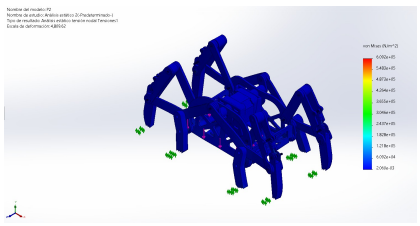
https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

estática descrito en la metodología, en el cual se aplicó una fuerza de $9{,}81$ N sobre el eje de accionamiento mientras las superficies de fijación permanecieron completamente restringidas. Este escenario representa la condición de operación del mecanismo bajo el peso aproximado del sistema y permite evaluar su resistencia mecánica antes de la fabricación.

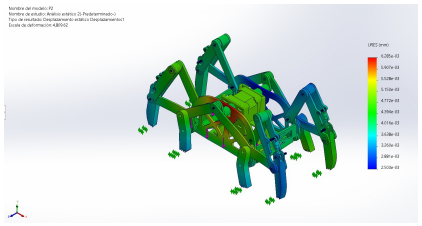
Los resultados del análisis de esfuerzos de von Mises muestran que el esfuerzo máximo obtenido fue de $\sigma_{vm} = 0{,}61$ MPa, localizado en la región cercana al eje de accionamiento, donde se concentran las mayores cargas transmitidas entre las barras del mecanismo. Este valor es inferior al esfuerzo de cedencia del PET-G (53 MPa) reportado por el fabricante [13], por lo que el mecanismo opera dentro del régimen elástico bajo las condiciones analizadas, sin riesgo de deformación permanente.

El análisis de desplazamientos indicó un valor máximo de $6{,}3 \times 10^{-3}$ mm, ubicado en los extremos libres de las barras del mecanismo. Debido a que este desplazamiento representa una fracción muy pequeña respecto a las dimensiones del sistema, no se esperan alteraciones apreciables en su comportamiento cinemático.

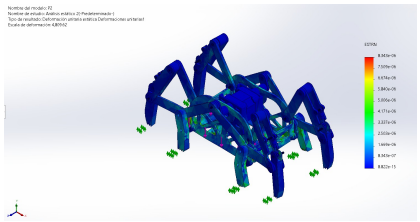
Las deformaciones unitarias máximas fueron del orden de $8{,}3 \times 10^{-6}$, concentrándose principalmente alrededor de las articulaciones y zonas de transmisión de carga. Estos valores son bajos y no indican la presencia de regiones críticas que comprometan la integridad estructural del mecanismo. En la Figura 9 se muestran los resultados gráficos de los estudios de anáisis de esfuerzos estáticos realizados en el sistema.



(a) Resultados de análisis de esfuerzos de Von Mises



(b) Resultados de análisis de esfuerzos de desplazamientos



(c) Resultados de análisis de esfuerzos de deformaciones unitarias

FIGURA 9. Resultados gráficos de los estudios de análisis de esfuerzos estáticos aplicados al sistema.

El prototipo construido integra cuatro mecanismos tipo pereiópodo montados sobre una carcasa central fabricada en PET-G mediante impresión 3D. El movimiento se transmite desde un motor NEMA 17 de doble eje hacia los mecanismos laterales, permitiendo accionar el sistema mediante un único actuador. La estructura incorpora separadores entre eslabones para evitar interferencias mecánicas, así como un tope en la articulación propus–dactyl para limitar el rango de movimiento y mejorar la estabilidad durante la marcha. El sistema electrónico se compone de una tarjeta Arduino Nano, un puente H L298N y una

batería de 12 V, integrados dentro de la carcasa. El sistema construído y ensamblado se muestra en la Figura10



FIGURA 10. Prototipo físico ensamblado, mostrando la carcasa central, los mecanismos tipo pereiópodo y los componentes de accionamiento.

Evaluación experimental del desempeño

Se realizaron pruebas experimentales del sistema en diferentes terrenos: superficie lisa, césped, asfalto, piedras, tezontle y grava.

Los resultados muestran que el sistema presenta un comportamiento estable en superficies rígidas como loseta, asfalto y piedras, mientras que en terrenos altamente deformables como arena o tezontle presenta limitaciones debido a la pérdida de soporte.

La Figura 11 presenta fotografías de algunas de las pruebas realizadas sobre diferentes superficies. En cada ensayo el prototipo recorrió una trayectoria rectilínea mientras se evaluó la continuidad del ciclo de marcha, la estabilidad del mecanismo y la capacidad de desplazamiento sobre el terreno correspondiente.

La comparación entre el mecanismo y el pereiópodo se realizó aplicando las métricas de semejanza espacial (S_{XY}), semejanza angular (S_θ) y semejanza global (S_{global}) definidas en la metodología. Para cada caso se calcularon las trayectorias y curvas angulares promedio correspondientes a un ciclo de marcha completo, obteniendo los porcentajes de semejanza presentados en la Tabla 3. La Figura 12 muestra la comparación del comportamiento angular utilizada para calcular la semejanza angular de cada articulación.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

Tabla 1. Evaluación del desempeño del sistema en diferentes tipos de terreno

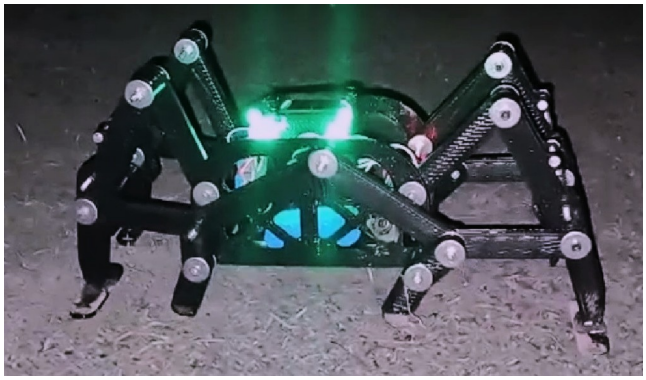
Terreno	**Desempeño**	**Comportamiento observado**	**Mejora propuesta**
Superficie lisa	Bueno	Marcha estable y continua.	Añadir material antideslizante en la punta del dactyl.
Césped	Bueno	Marcha estable y continua.	Evaluar el sistema sobre césped de mayor longitud.
Grava	Regular	Marcha funcional con interrupciones por atascamiento.	Modificar la geometría del dactyl para desplazar la grava.
Arena	No camina	Los pereiópodos se hunden e impiden completar el ciclo.	Aumentar el área de contacto con el terreno.
Piedras y concreto	Bueno	Marcha estable y continua.	Añadir material antideslizante en la punta del dactyl.
Asfalto	Bueno	Marcha estable y continua.	Añadir material antideslizante en la punta del dactyl.
Tezontle con piedras mayores a $1\,\mathrm{cm}^3$	No camina	El hundimiento y las piedras bloquean el movimiento.	Aumentar el área de contacto y adaptar el dactyl.

La Figura 12 muestra las curvas angulares empleadas para calcular la semejanza del comportamiento angular. La separación observada entre las curvas corresponde principalmente a diferencias en la amplitud de los ángulos, originadas por las restricciones geométricas del mecanismo de barras. No obstante, la tendencia general de incremento y decremento de los ángulos se conserva durante la mayor parte del ciclo de marcha, lo que explica los porcentajes de semejanza angular obtenidos.

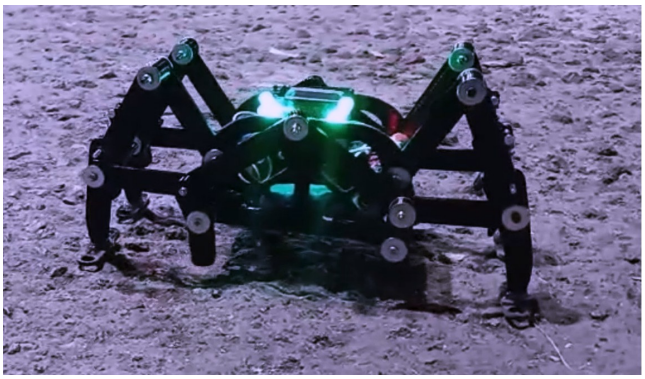
La aplicación de las métricas de semejanza mostró que el mecanismo imita las trayectorias del pereiópodo con una semejanza espacial del $75\,\%$ y un comportamiento angular del $71\,\%$, obteniéndose una semejanza global del $73\,\%$. Cuando el mecanismo se evaluó sobre grava, la semejanza espacial disminuyó al $50\,\%$, mientras que la semejanza angular aumentó al $80\,\%$, resultando en una semejanza global del $65\,\%$.



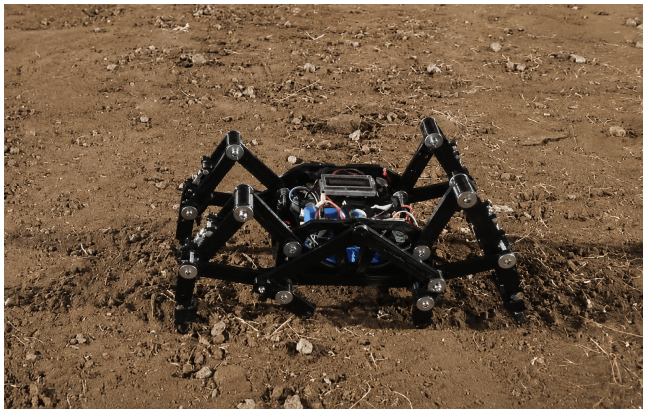
(a) Prueba sobre asfalto.



(b) Prueba sobre césped.

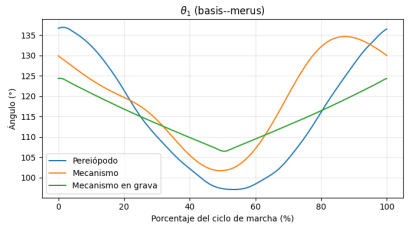


(c) Prueba sobre grava y piedras.

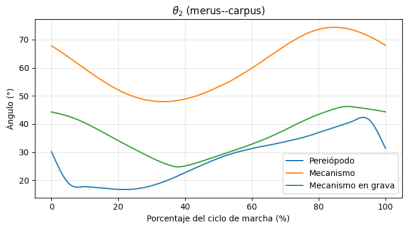


(d) Prueba sobre tezontle.

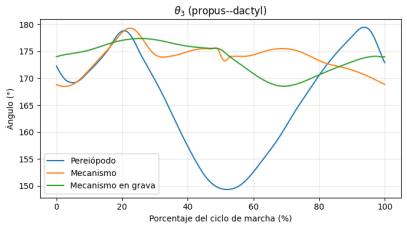
FIGURA 11. Fotografías del prototipo durante las pruebas de locomoción en diferentes superficies.



(a) Curva para articulación del basis-merus



(b) Curva para articulación del merus-carpus



(c) Curva para la articulación del propus-dactyl

FIGURA 12. Gráficas que muestran la comparación de las curvas del comportamiento angular del pereiópodo y del comportamiento angular del mecanismo.

La Tabla 3 muestra que la articulación *basis–merus* presenta la mayor semejanza angular, alcanzando

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

hasta un $96\,\%$ durante la marcha sobre grava, mientras que la articulación *propus–dactyl* registra las mayores diferencias. En conjunto, estos resultados demuestran que el mecanismo es capaz de aproximar el comportamiento locomotor promedio del pereiópodo natural utilizando un único actuador.

Tabla 3. Semejanza por tendencia de los ángulos articulares respecto al pereiópodo natural

Comparación	**basis–merus**	**merus–carpus**	**propus–dactyl**	**Semejanza promedio**
Pereiópodo vs Mecanismo	82.0 %	77.5 %	53.5 %	71.0 %
Pereiópodo vs Mecanismo en grava	96.0 %	77.0 %	67.0 %	80.0 %

Conclusiones

El análisis cinemático del pereiópodo mediante rastreo de video permitió obtener las trayectorias articulares en el plano XY, a partir de las cuales se construyó un modelo matemático del ciclo de marcha promedio. Este modelo, implementado mediante una red neuronal, logró representar el comportamiento cinemático promedio del sistema, permitiendo la estimación continua de las posiciones articulares en función del porcentaje del ciclo de marcha.

A partir de este modelo se obtuvieron parámetros geométricos relevantes para el diseño del mecanismo, incluyendo rangos articulares de $96{,}95°$–$137{,}12°$ para basis–merus, $16{,}63°$–$42{,}09°$ para merus–carpus y $150{,}06°$–$179{,}96°$ para propus–dactyl, así como longitudes de $314{,}21$, $273{,}59$ y $150{,}86$ unidades para los segmentos carpus–propus, merus y dactyl, respectivamente. Estos parámetros permitieron establecer las proporciones y restricciones necesarias para el diseño del mecanismo de barras.

El sistema mecánico desarrollado, basado en un mecanismo tipo Klann accionado por un único actuador, fue evaluado mediante simulaciones CAD y CAE, donde se obtuvo un esfuerzo máximo de von Mises de $0{,}61$ MPa, valor inferior al límite de cedencia del material PET-G (53 MPa), confirmando la capacidad estructural del diseño bajo las condiciones evaluadas.

Las pruebas experimentales demostraron que el sistema es capaz de generar un desplazamiento funcional en distintas superficies, particularmente en terrenos rígidos, donde se observó una marcha

continua y estable.

La comparación entre el ciclo de marcha del pereiópodo natural y el del mecanismo mostró una semejanza del 75 % en las trayectorias espaciales y del 71 % en el comportamiento angular, obteniéndose una semejanza global del 73 %. Cuando el mecanismo se evaluó sobre grava, la semejanza global fue del 65 %, lo que demuestra que el sistema conserva una parte importante del patrón de locomoción aun bajo condiciones de terreno irregular.

Finalmente, la metodología propuesta constituye una herramienta para el desarrollo de sistemas de locomoción bioinspirados, ya que integra el análisis cinemático de un organismo biológico, su representación mediante un modelo matemático y la síntesis de un mecanismo articulado capaz de aproximar su movimiento. Esta metodología puede emplearse como base para el diseño de robots caminantes destinados a la exploración de terrenos irregulares, como alternativa al uso de ruedas, aplicaciones en la industria agrícola o investigación en robótica bioinspirada. De igual manera, el procedimiento desarrollado puede extenderse al estudio de otras especies y patrones de locomoción, permitiendo obtener mecanismos diseñados a partir de parámetros experimentales del sistema biológico en lugar de aproximaciones geométricas empíricas.

Los resultados de este trabajo demuestran que es posible aproximar el ciclo de marcha de un pereiópodo del género *Gecarcinus* mediante un mecanismo articulado de barras accionado por un único actuador.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

Guillermo Castro Daza: Conceptualización, Metodología, Investigación, Curación de datos, evaluación, Análisis formal, Visualización, Redacción - Preparación del borrador original.

Dr. Álvaro Anzueto Ríos: Supervisión, Metodología, Validación, Redacción - Revisión y Edición.

M. en T.A. Alma Aidé Sánchez Ramírez: Supervisión, Metodología, Investigación, Validación, Redacción - Revisión y Edición.

Dr. José Gonzalo Solís Villela: Supervisión, Análisis formal, Validación, Redacción - Revisión y Edición.

Referencias

[1] J. K. Sheba, R. E. Mohan, E. Martínez-García, and L. Tan-Phuc, “Trajectory generation and stability analysis for reconfigurable klann mechanism based walking robot,” *Robotics*, vol. 5, p. 13, 2016. DOI: 10.3390/robotics5030013

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28368 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 26- 47

[2] C. A. Hui, "Walking of the shore crab pachygrapsus crassipes in its two natural environments," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 165, pp. 213–227, 1992.

[3] M. M. Martinez, R. Full, and M. Koehl, "Underwater punting by an intertidal crab: a novel gait revealed by the kinematics of pedestrian locomotion in air versus water," *The Journal of experimental biology*, vol. 201 (Pt 18), pp. 2609–23, 1998.

[4] C. F. Herreid and R. Full, "Locomotion of hermit crabs (coenobita compressus) on beach and treadmill," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 120, pp. 283–296, 1986.

[5] X. Chen *et al.*, "Prototype development and gait planning of biologically inspired multi-legged crab-like robot," *Mechatronics*, vol. 23, no. 4, pp. 429–444, 2013.

[6] C. Cui *et al.*, "Kinematic analysis and simulation of walking leg of bionic amphibious crab-like robot," in *IEEE International Conference on Control, Automation and Robotics*, 2020, pp. 762–767.

[7] S. Hu *et al.*, "Leg mechanism design and motion performance analysis for an amphibious crab-like robot," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 1, p. 10, 2023. DOI: 10.3390/jmse12010010

[8] J. Zhang *et al.*, "Crab-inspired compliant leg design method for adaptive locomotion of a multi-legged robot," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 17, no. 2, p. 025001, 2022. DOI: 10.1088/1748-3190/ac45e6

[9] Y. Chen *et al.*, "Optimal planar leg geometry in robots and crabs for idealized rocky terrain," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 17, no. 6, p. 066009, 2022.

[10] ——, "Sideways crab-walking is faster and more efficient than forward walking for a hexapod robot," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 17, no. 4, p. 046001, 2022. DOI: 10.1088/1748-3190/ac6847

[11] A. G. Vidal-Gadea and J. H. Belanger, "Muscular anatomy of the legs of the forward walking crab *Libinia emarginata*," *Arthropod Structure & Development*, vol. 38, no. 3, pp. 179–194, 2009. DOI: 10.1016/j.asd.2008.12.002

[12] J. S. Toquica, P. S. Oliveira, W. S. R. Souza, J. M. Motta, and D. Borges, "An analytical and a deep learning model for solving the inverse kinematic problem of an industrial parallel robot," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 151, p. 106682, 2020. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106682

[13] Eastman Chemical Company, "Petg copolyester technical data sheet," 2023, online. [Online]. Available: https://www.eastman.com

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Cooperación en la cadena de suministro mediante PAR y reducción de variabilidad

Supply chain cooperation through ANP and variability reduction

U. Mercado-Valenzuela[1] *, M. S. Hernández-Bonilla[1], O. Cruz-Mejia[1]
(*ulisesmv@comunidad.unam.mx)

Recibido: 05 de junio de 2026 Aceptado: 10 de agosto de 2026

Resumen

La cooperación en la cadena de suministro es un factor clave para mejorar el desempeño organizacional en entornos caracterizados por incertidumbre y volatilidad [1]. Sin embargo, la variabilidad del comportamiento, reflejada en prácticas como el agrupamiento de pedidos, errores de pronóstico, decisiones oportunistas y variabilidad en los tiempos de entrega, continúa generando inconsistencias tales como el efecto látigo, altos costos operativos y bajos niveles de servicio. Este estudio propone un marco híbrido que integra el Proceso Analítico en Red **(PAR)** y la **simulación** para evaluar cómo la reducción acordada de la variabilidad del comportamiento puede fortalecer la cooperación y mejorar el desempeño de la cadena de suministro.

La metodología identifica los principales factores de variabilidad y evalúa mecanismos de cooperación como el intercambio de información, contratos de incentivos, generación de confianza y toma conjunta de decisiones. El método PAR se utiliza para priorizar dichos mecanismos considerando las interdependencias entre factores conductuales, estrategias de cooperación y métricas de desempeño. Posteriormente, se desarrolla un modelo de simulación de eventos discretos para validar los resultados bajo condiciones estocásticas de demanda y tiempos de entrega.

Los resultados muestran que el intercambio de información y la planeación colaborativa son los mecanismos más efectivos para reducir la variabilidad y mejorar indicadores como nivel de servicio, costos totales, efecto látigo y estabilidad de tiempos de entrega. Además, los análisis de sensibilidad y Monte Carlo confirman la robustez del modelo propuesto.

Palabras clave: Cooperación en la Cadena de Suministro, Variabilidad del Comportamiento, Proceso Analítico de Redes (PAR)

[1]Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, Nezahualcóyotl, Estado de México, México.

Abstract

Supply chain cooperation is a key factor in improving organizational performance in environments characterized by uncertainty and volatility. However, behavioral variability, reflected in practices such as order bundling, forecasting errors, opportunistic decisions, and variability in delivery times, continues to generate inefficiencies such as the bullwhip effect, high operating costs, and low service levels. This study proposes a hybrid framework that integrates the Analytic Network Process (ANP) and simulation to evaluate how the agreed-upon reduction of behavioral variability can strengthen cooperation and improve supply chain performance.

The methodology identifies the main drivers of variability and evaluates cooperation mechanisms such as information sharing, incentive contracts, trust building, and joint decision-making. The ANP method is used to prioritize these mechanisms, considering the interdependencies between behavioral factors, cooperation strategies, and performance metrics. Subsequently, a discrete-event simulation model is developed to validate the results under stochastic demand and delivery time conditions.

The results show that information sharing and collaborative planning are the most effective mechanisms for reducing variability and improving indicators such as service level, total costs, bullwhip effect, and delivery time stability. Furthermore, sensitivity and Monte Carlo analyses confirm the robustness of the proposed model.

Keywords: Analytical Network Process (ANP), Behavioral Variability, Supply Chain Cooperation

Introducción

Las cadenas de suministro globales están cada vez más expuestas a la volatilidad, la incertidumbre, la complejidad y la ambigüedad [1]. En este contexto, la cooperación entre los socios de la cadena de suministro ya no es de carácter opcional, sino básica con la finalidad de obtener estándares aceptables de eficiencia, resiliencia y competitividad a largo plazo [2]. Las formas tradicionales de cooperación en la cadena de suministro suelen centrarse en acuerdos contractuales, tecnologías de la información avanzadas y mecanismos de coordinación como la Gestión de Inventario por el Proveedor (GIP) o la Planificación, Previsión y Reabastecimiento Colaborativos (PPRC) [3]. Si bien estas iniciativas han generado beneficios significativos, su implementación frecuentemente se limita a análisis de la variabilidad del comportamiento en la cadena de suministro [4].

De acuerdo con Goudarzi et al. [5] la variabilidad del comportamiento es un indicador evidente de las fluctuaciones en los procesos de la cadena de suministro que no son originados en incertidumbres técnicas o ambientales, sino en acciones y decisiones de los encargados de la cadena de suministro. Estos comportamientos incluyen la agrupación de pedidos, el sesgo en las previsiones, la manipulación

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28466 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 48- 65

estratégica de los plazos de entrega y las prácticas oportunistas orientadas al beneficio individual en lugar del colectivo [6]. Estas prácticas son frecuentes en las cadenas de suministro de múltiples niveles y contribuyen significativamente a ineficiencias como el exceso de inventario, los bajos niveles de servicio y la amplificación de las fluctuaciones de la demanda, un fenómeno conocido como el efecto látigo [7].

El efecto látigo ha sido ampliamente estudiado en la literatura sobre cadenas de suministro, con contribuciones fundamentales de Moreno-Baca et al. [8] y El-Beheiry et al. [9], quienes destacan cómo las reglas de decisión locales y las demoras en el procesamiento de la información generan ineficiencias en todo el sistema. Si bien gran parte de esta investigación se ha centrado en soluciones estructurales y técnicas —como mejores métodos de pronóstico, la reducción de las demoras en la información y la optimización de los procesos logísticos—, de acuerdo con Mohamed & Mandal [10] la variabilidad del comportamiento sigue desempeñando un papel fundamental en la perpetuación del problema.

Por ejemplo, la agrupación de pedidos se produce cuando las empresas acumulan demanda antes de realizar pedidos de reposición, ya sea para lograr economías de escala o para reducir los costos de transacción [11]. Aunque racional desde una perspectiva individual, esta práctica usualmente aumenta la volatilidad de la demanda en las etapas iniciales de la cadena de suministro [12]. De manera similar, la falta de precisión en los pronósticos surge cuando las empresas, intencional o involuntariamente, sesgan sus proyecciones de demanda, a menudo debido a la falta de intercambio de información o a la presión competitiva [13]. El oportunismo, como lo describe Klassen et al. [14], agrava aún más las ineficiencias de la cadena de suministro cuando las empresas actúan en su propio interés, aprovechando las lagunas en los contratos o las asimetrías de información. Finalmente, la variabilidad en los plazos de entrega frecuentemente consecuencia de prácticas de producción o distribución descoordinadas añade mayor inestabilidad a la dinámica de la cadena de suministro.

De acuerdo con Oyewole et al. [15] abordar la variabilidad del comportamiento requiere más que soluciones tecnológicas; necesita acuerdos entre los socios de la cadena de suministro para reducir o armonizar los comportamientos que generan ineficiencias. Dichos acuerdos pueden adoptar diversas formas:

- Intercambio de información, mediante el cual los socios intercambian pronósticos, datos de puntos de venta y niveles de inventario para armonizar las decisiones.
- Contratos de incentivos, incluidos los de reparto de ingresos, recompra o flexibilidad de cantidad, que armonizan los intereses económicos entre las empresas.
- Acuerdos que fomentan la confianza, como las alianzas a largo plazo y los acuerdos de reparto de riesgos, que reducen el comportamiento oportunista.

- Mecanismos de toma de decisiones conjuntas, como el CPFR, que institucionalizan la planificación colaborativa en múltiples niveles.

Si bien cada uno de estos mecanismos se ha analizado ampliamente en la literatura, su impacto combinado en la reducción de la variabilidad del comportamiento sigue sin explorarse lo suficiente. Los estudios existentes suelen examinarlos de forma aislada, sin lograr capturar las interdependencias entre las estrategias de cooperación, los factores de comportamiento y los resultados de desempeño.

Dada la complejidad y las interdependencias involucradas, el análisis de decisiones multicriterio (ADMC) da un enfoque de mayor nivel que evalúa de forma más atingente las estrategias de cooperación [16]. El Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), desarrollado por Saaty [17], se ha extendido de forma generalizada a los diversos problemas de la toma de decisiones en la cadena de suministro. Sin embargo, el PAJ presupone independencia entre criterios y alternativas, una suposición que no encaja con el contexto de la cooperación en la cadena de suministro [18]. Los mecanismos de cooperación, los factores de comportamiento y las métricas de desempeño son inherentemente interdependientes; Por ejemplo, la mejora en los niveles de servicio puede reforzar la confianza, lo que a su vez fortalece la cooperación.

Para abordar estas interdependencias, este estudio utiliza el Proceso Analítico de Redes (PAR), una extensión del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) que permite desarrollar bucles de retroalimentación y crea un marco para interacciones complejas. El PAR ha sido aplicado con éxito en áreas como la selección de proveedores, la gestión de riesgos y la estrategia logística, pero su aplicación a la cooperación en la cadena de suministro que involucre la reducción de la variabilidad del comportamiento sigue siendo escasa [19]. El modelado de las interdependencias entre mecanismos de cooperación no reduce por sí mismo la variabilidad del comportamiento; sin embargo, permite identificar qué mecanismos tienen mayor influencia potencial sobre los factores que generan dicha variabilidad. Con base en esta priorización, es posible orientar estrategias de intervención, tales como intercambio de información, toma conjunta de decisiones, contratos de incentivos y construcción de confianza.

En este sentido PAR ofrece información de gran valía sobre como establecer prioridades, su información descansa fundamentalmente en el juicio de expertos o comparaciones pareadas, lo que puede estar sujeto a sesgos importantes. Con la finalidad de obtener un resultado de mayor robustez, este estudio complementa el PAR con un análisis basado en la simulación. La simulación permite realizar pruebas dinámicas de estrategias cooperativas en ambientes controlados, lo cual permitirá reflejar la naturaleza estocástica de la demanda, los plazos de entrega y la variabilidad del comportamiento [20]. Al tener escenarios referenciados y cooperativos, la simulación permite obtener datos cuantitativos sobre las mejoras del rendimiento asociadas a cada estrategia en lo particular.

La integración de PAR y simulación permite crear una metodología hibrida; PAR dirige la selección

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28466 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 48- 65

y priorización de los mecanismos de cooperación, mientras que la simulación valida y cuantifica su impacto. Esta aproximación dual responde a la necesidad intrínseca de tener un sólido soporte a la complejidad de las decisiones y la validación empírica bajo incertidumbre.

Este artículo se estructura de la siguiente forma. La sección 2 describe el proceso metodológico que incluye el diseño del modelo PAR y el esquema de simulación. La sección 3 presenta los resultados de las priorizaciones del PAR y los experimentos de simulación. En la sección 4 se discuten las implicaciones de los hallazgos teóricos y prácticos. Finalmente, la sección 5 describe las conclusiones y se establece líneas de futuras investigaciones.

Materiales y métodos

Este estudio adopta un enfoque metodológico híbrido, que integra el Proceso Analítico de Redes (PAR) con el análisis basado en la simulación. El PAR se utiliza para evaluar los mecanismos de cooperación en condiciones de interdependencia, mientras que la simulación proporciona una validación cuantitativa de su impacto en el desempeño de la cadena de suministro. En conjunto, estos métodos permiten tanto la toma de decisiones estructurada como la verificación empírica en condiciones de incertidumbre.

Para la construcción del modelo PAR se consultó a un grupo de 8 expertos con experiencia en gestión de operaciones, cadena de suministro, planeación de la producción y logística. Los participantes fueron seleccionados considerando su experiencia académica o profesional en procesos de abastecimiento, inventarios, pronóstico de demanda y coordinación interorganizacional. Los juicios fueron obtenidos mediante comparaciones pareadas utilizando la escala fundamental de Saaty. Posteriormente, se calcularon los vectores de prioridad y se verificó la consistencia de las matrices mediante el índice de consistencia (CI) y la razón de consistencia (CR). Se consideraron aceptables las matrices con CR $\leq$ 0.10.

El diseño de esta investigación, básicamente se enfoca en 4 fases:

1. Identificación de los factores: Factores que influyen en la variabilidad del comportamiento, mecanismos de cooperación y métricas de rendimiento.
2. Construcción del modelo PAR: desarrollo de agrupaciones, nodos e interdependencias, seguido de comparaciones por pares.
3. Análisis de supermatrices: desarrollo de ponderaciones de prioridad para mecanismos de cooperación.
4. Experimentos de simulación: validación de los resultados del PAR mediante la evaluación de estrategias de cooperación en un modelo de cadena de suministro de múltiples niveles.

La utilización de este enfoque mixto permite la triangulación metodológica, dándole una solidez robusta en la parte teórica y práctica.

Los factores de variabilidad a considerar se enfocan en 4 criterios que son esenciales en la Cooperación de la Cadena de Suministro (CPR):

- Agrupación de pedidos (BFV_1): consolidación de varios pedidos para lograr economías de escala, lo que incrementa las fluctuaciones de la demanda [5].
- Inexactitud de los pronósticos (BFV_2): errores o sesgos en las previsiones de la demanda debidos a la distorsión de la información o a la falta de intercambio de datos [12].
- Oportunismo (BFV_3): acciones llevadas a cabo por los socios de la cadena de suministro en beneficio propio, a menudo a costa de la eficiencia general [14]
- Variabilidad en los plazos de entrega (BFV_4): incertidumbre en los ciclos de reabastecimiento provocada por retrasos o inconsistencias en la producción y entrega [7].

Este tipo de factores representan el comportamiento de las distintas dimensiones de la variabilidad en la cadena de suministro que se desea disminuir.

La selección de los factores de variabilidad se fundamenta en la literatura sobre comportamiento operativo y coordinación en cadenas de suministro, donde se reconoce que la agrupación de pedidos, los errores de pronóstico, el oportunismo y la variabilidad en los tiempos de entrega inciden en la amplificación de la demanda, la acumulación de inventarios y la pérdida de nivel de servicio. Asimismo, los mecanismos de cooperación seleccionados se relacionan con prácticas ampliamente discutidas en la literatura, como intercambio de información, alineación de incentivos, confianza interorganizacional y planeación colaborativa. Los indicadores de desempeño considerados tales como el nivel de servicio, costo total, efecto látigo y estabilidad del tiempo de entrega permiten evaluar tanto la eficiencia operativa como la estabilidad dinámica del sistema.

Cuatro mecanismos fueron seleccionados con la finalidad de abordar la variabilidad del comportamiento:

1. Intercambio de información (CM_1): intercambio de previsiones, datos de punto de venta (POS) y niveles de inventario para coordinar las decisiones.
2. Contratos de incentivos (CM_2): mecanismos como los acuerdos de recompra o de reparto de ingresos que armonizan los incentivos económicos.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28466 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 48- 65

3. Fomento de la confianza (CM_3): alianzas a largo plazo y acuerdos de colaboración que reducen los comportamientos oportunistas.
4. Toma de decisiones conjunta (CM_4): mecanismos de planificación colaborativa (por ejemplo, CPFR) que institucionalizan la coordinación.

Se eligieron estos mecanismos debido a que abordan tanto los aspectos técnicos (información, contratos) como los relacionales (confianza, planificación conjunta) de la CPR.

La efectividad de los mecanismos de cooperación se evaluó utilizando cuatro indicadores de desempeño:

- Nivel de servicio (PM_1): medido como tasa de cumplimiento de pedidos.
- Costo total (PM_2): incluye los costos de inventario, faltantes y pedidos.
- Reducción del efecto látigo (PM_3): se define como la relación entre la varianza de los pedidos y la varianza de la demanda.
- Estabilidad de los plazos de entrega (PM_4): variación en los tiempos de cumplimiento de los pedidos.

Estas métricas reflejan tanto la eficiencia operativa como la estabilidad de la cadena de suministro.

Para la construcción del modelo PAR se estructura una supermatriz como la mostrada en la Ec. (1), para realizar comparaciones por pares entre los elementos dentro de cada grupo y entre los distintos grupos.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1n} \\ \frac{1}{\alpha_{12}} & 1 & & \alpha_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\alpha_{1n}} & \frac{1}{\alpha_{2n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

Donde para *n* elementos, los expertos proveen los juicios α_{12} en donde se compara el elemento *i* con el *j*.

De manera corresponsal se adjunta el vector de normalización de pesos que se muestra en la Ec. (2)

$$w_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^{n} v_j} \tag{2}$$

Donde v_i es el i-esimo componente del eigenvector que corresponde al máximo eigenvalor de $\lambda_{\text{máx}}$

Con la finalidad de verificar la consistencia del juicio experto se aplican las fórmulas Ec. (3) y Ec. (4)

$$CI = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \tag{3}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{4}$$

Donde *CI* es el índice de consistencia, *CR* la ratio de consistencia y *RI* corresponde al índice aleatorio, considerando que $CR \leq 0.10$ es generalmente aceptable de acuerdo con Saaty [17].

Para la construcción de la supermatriz de PAR no ponderada *W* agrupa todos los vectores de prioridad locales que influencia de cada grupo sobre los demás. La supermatriz ponderada es obtenida mediante la multiplicación de cada bloque por la ponderación del conjunto. Por lo que el límite de la supermatriz se obtiene como se presenta en la Ec. (5).

$$W = \lim_{k \to \infty} W^k \tag{5}$$

Esta matriz da las prioridades globales finales de todos los elementos. Por otro lado, el efecto látigo se define en la Ec. (6).

$$BWR = \frac{Var\,(Q)}{Var\,(D)} \tag{6}$$

En donde, *VAR(Q)* es la variancia de los pedidos de los proveedores, *VAR(D)* es la variancia de la demanda, un valor de *BWR > 1* indica amplificación (efecto látigo). La Ec. (6) se utilizó para calcular la relación del efecto látigo en cada escenario de simulación, comparando la varianza de las órdenes emitidas con la varianza de la demanda observada.

Un elemento que usualmente esta interconectado con el efecto látigo y los inventarios es la tasa de llenado que es una métrica del nivel de servicio y que se representa como (ver Ec. (7)):

$$SL = \frac{Numero\ de\ unidades\ entregadas\ a\ tiempo}{Total\ de\ unidades\ demandadas}\ x\ 100 \tag{7}$$

La Ec. (7) permitió estimar el nivel de servicio como proporción de pedidos atendidos respecto al total de pedidos recibidos.

Que se encuentra estrechamente interconectado al cálculo del costo total de la cadena de suministro (C_{sc}) que se obtiene en la Ec. (8).

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28466 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 48- 65

$$C_{sc} = C_{inv} + C_{ord} + C_{faltante} \tag{8}$$

En donde:

C_{inv} corresponde al costo por llevar inventario,

C_{ord} es el costo por ordenar,

$C_{faltante}$ es el costo tener faltante.

La Ec. (8) se empleó para estimar el costo total relativo de cada escenario, considerando costos de inventario, emisión de pedidos y faltantes.

Esto va acompañado de la medición de la variabilidad en el tiempo de entrega que se mide en la Ec. (9).

$$\sigma_{LT} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(LT_i - \overline{LT}\right)^2} \tag{9}$$

En donde:

LT_i es el tiempo de entrega observado para la orden *i*.

$\overline{LT}$ es el tiempo de entrega promedio.

La Ec. (9) se utilizó para medir la dispersión de los tiempos de entrega observados durante cada réplica.

El modelo simulación de eventos discretos representa una cadena de suministro simplificada de múltiples niveles, integrada por cliente, minorista, distribuidor y proveedor. Las entidades principales del modelo son los pedidos, los lotes de producto y las órdenes de reabastecimiento. Los eventos considerados incluyen generación de demanda, emisión de pedido, recepción de pedido, actualización de inventario, generación de faltantes y entrega del producto. El reloj de simulación se definió en semanas, con un horizonte de 52 semanas por réplica. Las principales variables de estado fueron inventario disponible, pedidos pendientes, demanda observada, órdenes emitidas, tiempo de entrega y costo acumulado. Como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Prioridad de pesos de los mecanismos de cooperación de PAR.

Elemento	Descripción
Horizonte de simulación	52 semanas
Número de réplicas	30

Elemento	Descripción
Entidades	Pedidos, productos, órdenes de reabastecimiento
Eventos	Llegada de demanda, emisión de orden, recepción, entrega, actualización de inventario
Variables de estado	Inventario, pedidos pendientes, demanda, órdenes, costos, tiempos de entrega
Indicadores de salida	Nivel de servicio, costo total, efecto látigo, variabilidad del tiempo de entrega

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo PAR fue aplicado con la finalidad de evaluar la importancia relativa de los cuatro mecanismos de cooperación en relación con la mitigación de la variabilidad del comportamiento y mejora del desempeño de la cadena de suministro.

Se realizaron comparaciones pareadas entre los grupos identificados, y la supermatriz resultante se normaliza y se eleva a potencias límite para obtener las ponderaciones de prioridad finales. La Tabla 2 presenta la normalización de los pesos de los mecanismos de cooperación.

Tabla 2. Prioridad de pesos de los mecanismos de cooperación de PAR.

Mecanismos de cooperación	Peso PAR	Rango
CM_1	0.35	1
CM_2	0.28	2
CM_3	0.22	3
CM_4	0.15	4

Los resultados indican que CM_1 es el mecanismo mas efectivo para reducir la variabilidad del comportamiento, seguido de CM_2 , mientras que CM_3 y CM_4 tienen una contribución a considerar, no obstante, su relativa importancia es pequeña si la comparamos con las anteriores.

Estos resultados enfatizan la importancia de considerar que la transparencia y colaboración en el manejo de la información puedes traer grandes beneficios en la reducción de la variabilidad.

Por otro lado, se llevó a cabo la simulación experimental con la finalidad de validar los resultados de PAR. Cuatro escenarios fueron probados: (1) Línea base (sin cooperación), (2) intercambio de

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28466 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 48- 65

información, (3) incentivos más intercambio de información, (4) cooperación total. Cada escenario se replicó 30 veces con un horizonte de simulación de 52 semanas, el propósito de realizar las 30 réplicas por escenario tiene el objetivo de obtener una estimación estable de los indicadores de desempeño y reducir el efecto de la variabilidad aleatoria propia del modelo estocástico. Este número de réplicas permite aproximar el comportamiento promedio del sistema y facilita la comparación entre escenarios bajo condiciones homogéneas de simulación, los cuales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la simulación en distintos escenarios.

Métrica	Línea base	Escenario A: intercambio de la información.	Escenario B: Incentivos + intercambio de información	Escenario C: Cooperación total
PM_1	82.3	90.7	93.5	96.8
PM_2	1.00	0.88	0.82	0.75
PM_3	2.45	1.75	1.75	1.15
PM_4	5.2	3.8	3.8	2.4

Los resultados revelan una mejora progresiva en cuanto los mecanismos de cooperación son introducidos. El intercambio de información solo mejora los niveles de servicio por encima del 8 % y reduce la tasa del efecto látigo en aproximadamente un 29 %. La agregación de los incentivos ayuda de forma importante a mejorar su desempeño, particularmente en la reducción de costos. El escenario relacionado con la cooperación total tiene las mejoras más significativas con niveles de servicio aproximándose al 97 %, costos reducidos en un 25 % y una tasa de efecto látigo casi de la mitad de la línea base.

Los resultados de la simulación son bastante consistentes con la priorización del modelo PAR. El intercambio de información y la toma de decisiones conjunta emergen como los mecanismos más efectivos que mejoran el desempeño de la cadena de suministro, validado por la alta puntuación de sus pesos asignados en el modelo PAR. Los incentivos, aunque son de gran importancia se muestran con un efecto moderado especialmente en la reducción de costos. La construcción de la confianza juega un rol meramente de soporte, pero al parecer no es suficiente para reducir la variabilidad.

La Figura 1 muestra la comparación del desempeño multi-metrico, mediante una gráfica tipo radar que suma los cuatro desempeños desarrollados.

Claramente se muestra que el desempeño se expande, conforme los mecanismos de cooperación se

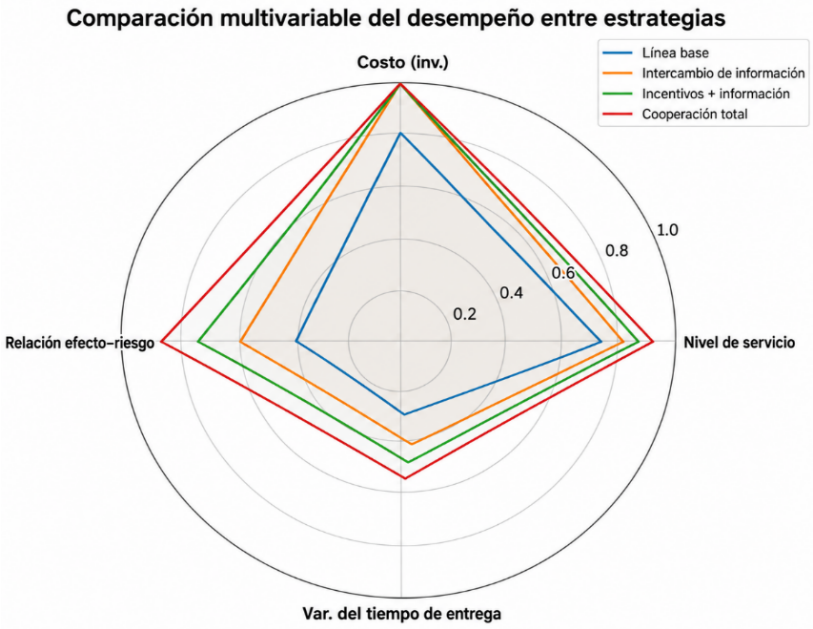


FIGURA 1. *Comparación del desempeño con múltiples métricas en distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.*

incrementan, con la cooperación total dominando todos los escenarios.

Se llevo a cabo un análisis de sensibilidad para medir la robustez del planteamiento, el cual descansa en tres escenarios.

1. Perturbaciones del juicio de PAR. Se alteraron todas las comparaciones por pares en un $\pm 10\,\%$ y un $\pm 20\,\%$ (siguiendo una distribución log-normal y conservando la reciprocidad). Con la utilización de 1000 corridas de simulación Montecarlo, la correlación del rango de Spearman entre las prioridades de la línea base y las prioridades perturbadas que se mantuvieron por encima del 0.95 y el rango de ordenes de los mecanismos que se mantuvo sin cambios en 97.8 % de las corridas. La distribución log-normal se utilizó para perturbar los juicios pareados debido a que garantiza valores positivos y permite conservar la naturaleza multiplicativa de la escala de comparación del PAR. Además, al aplicar las perturbaciones manteniendo la reciprocidad de las matrices, se evita generar comparaciones negativas o inconsistentes con la lógica del método.

2. Sensibilidad a la ponderación de los indicadores. Se llevo a cabo una reponderación de los indicadores de desempeño (Enfoque centrado en el costo: 0.5, 0.2, 0.2, 0.1; enfoque centrado en el servicio: 0.5,0.2,0.1,0.2 para el nivel de servicio, costo, tasa del efecto látigo y tiempo de entrega; Balanceado: 0.3, 0.3, 0.2,0.2). El rango PAR permaneció estable a través de todas las

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28466 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 48- 65

ponderaciones efectuadas; solo se presentaron cambios menores en CM_2 y CM_3 en condiciones en las cuales se considera un sesgo extremo en los costos.

3. Pruebas de estrés estocástica. Se ajusto la variabilidad de la demanda (CV = 0.2, 0.4,0.6) y una variación inesperada en los plazos de entrega del +50 % y se tiene que los escenarios cooperativos muestran una menor elasticidad de los costos ante la variabilidad. La estrategia relacionada con la cooperación total se mantuvo como la dominante a través de todos los indicadores; las ganancias absolutas se redujeron con un CV de 0,6, pero el orden relativo de los escenarios se mantuvo sin cambios.

Las Figuras 2 y 3 representan el análisis de sensibilidad llevado a cabo.

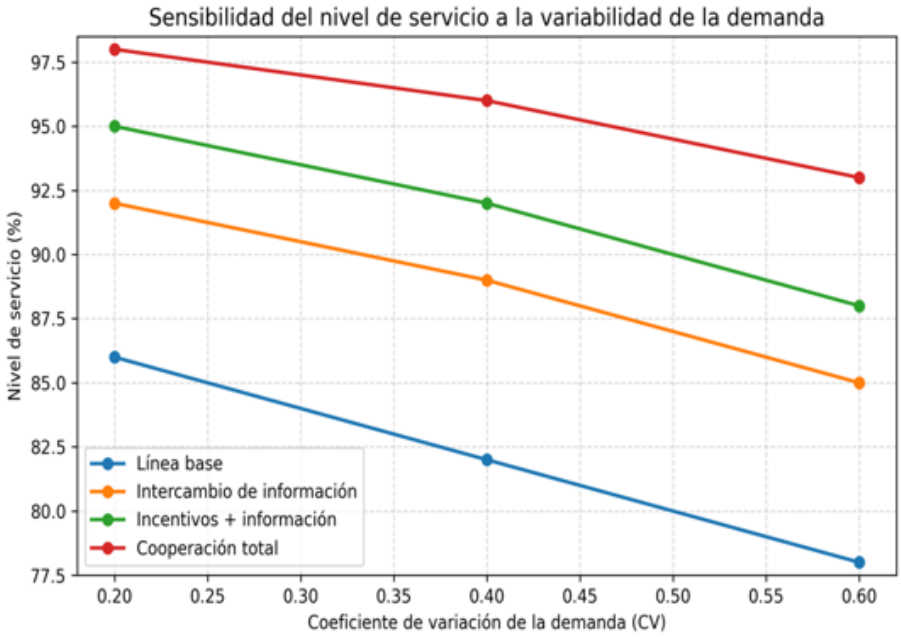


FIGURA 2. *Sensibilidad del nivel de servicio a la variabilidad de la demanda. Fuente: Elaboración propia.*

Se muestra una degradación del nivel de servicio con la demanda; los escenarios cooperativos se encuentran en pendiente descendente e intersección más alta.

Muestra los índices de costo total en una variación del 50 % en los tiempos de entrega; los distintos escenarios cooperativos presentan una menor elasticidad de los costos ante la variabilidad. Las evidencias son consistentes con lo encontrado en estudios previos [20], [21].

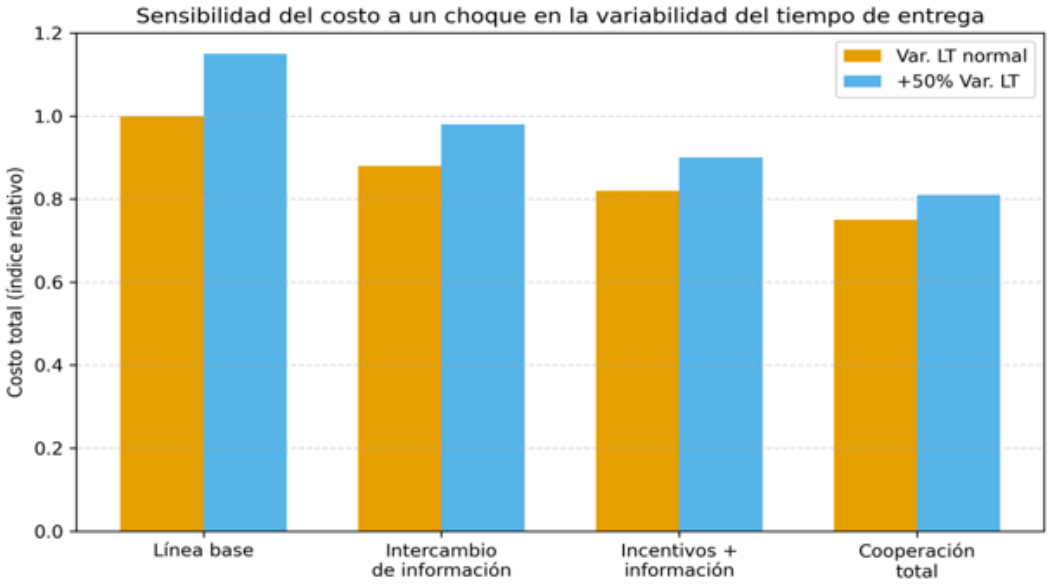


FIGURA 3. *Sensibilidad del costo total ante variabilidad del tiempo de entrega. Fuente: Elaboración propia.*

Discusión

Los resultados obtenidos a través del PAR indican que el intercambio de información es el mecanismo de cooperación más crítico para reducir la variabilidad en la cadena de suministro. Estos hallazgos son consistentes con, los resultados obtenidos en este estudio, en donde es de gran importancia puntualizar que la asimetría en la información y las demoras en la transmisión de datos son las mayores contribuciones al desarrollo del efecto látigo. La mejora en la visibilidad de la demanda y la coordinación de las decisiones de reabastecimiento contribuyen a disminuir la incertidumbre percibida por los actores de la cadena. En este sentido, el intercambio de información no elimina por sí mismo la lotificación de pedidos, pero puede reducir decisiones de acumulación o emisión irregular de órdenes cuando estas se originan en pronósticos incompletos, retrasos de información o falta de coordinación entre eslabones.

El segundo mecanismo asociado se refiere a la toma de decisiones conjunta el cual refuerza la importancia de darle peso a la planeación colaborativa, que involucra diversos factores relacionados con una toma de decisiones sincronizada, la planeación conjunta ayuda a reducir la variabilidad de los tiempos de entrega y el comportamiento oportunista, con lo cual se asegura un comportamiento más estable y una respuesta más coordinada de la cadena de suministro.

Los contratos con incentivos y la construcción de la confianza recibieron una puntuación menor en el análisis PAR. Esto no quiere decir que carezcan de importancia, pero su impacto es indirecto. Los

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28466 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 48- 65

incentivos en los contractos pueden influenciar los costos y proveer una adecuada alineación económica mientras se construye la confianza y esto lleva a una estabilidad relacional en el horizonte de tiempo. Estos mecanismos juegan un rol complementario.

Conclusiones y líneas abiertas

Este estudio pone de manifiesto como la cooperación en la cadena de suministro permite la reducción en la variabilidad de su comportamiento puede ayudar en la mejora de su desempeño. Con la combinación de PAR y la simulación, provee un marco dual de cooperación en la toma de decisiones y la validación empírica de la cooperación de las estrategias involucradas.

Los hallazgos revelan diversos elementos intrínsecos. En primer lugar, el intercambio de la información emergió como el mecanismo de cooperación más crítico, lo cual confirma que la transparencia y la visibilidad son fundamentales para reducir los errores en los lotes de fabricación ordenados y por consecuencia el efecto látigo. En segunda instancia los mecanismos de toma de decisiones conjunta tales como la planeación colaborativa, ayudan a complementar el intercambio de la información mediante la estabilización de los tiempos de entrega y reducción del oportunismo. En tercer lugar, mientras que los contratos con incentivos y los acuerdos de confianza construidos no tienen impacto de forma individual, estos proveen un soporte esencial en el alineamiento de los incentivos económicos. Juntos todos estos mecanismos permiten crear una estrategia cooperativa a distintos niveles que trae como consecuencia una significativa mejora en el nivel de servicio, reducción de costos y estabilidad en el desempeño de la cadena de suministro.

Metodológicamente la integración de PAR y simulación es un aporte de gran valía. PAR captura la interdependencia y el ciclo de retroalimentación entre diversos factores de comportamiento, mecanismos de cooperación, mientras que la simulación da validez a estos elementos mediante condiciones relacionadas con los tiempos de entrega y la demanda. Esta aproximación híbrida evidencia las limitaciones de una sola apreciación cualitativa o cuantitativa y demuestra la importancia de combinar el análisis de decisiones con el modelado del desempeño.

Desde un punto de vista gerencial, el estudio enfatiza que darle importancia al estudio de la variabilidad en el comportamiento es tan importante como implementar soluciones técnicas o contractuales. Los gerentes deben priorizar las soluciones y el intercambio de información en tiempo real, institucionalizar la planeación cooperativa y complementarlos con iniciativas que permitan tener incentivos económicos y construcción de confianza. Este tipo de aproximación de carácter comprensivo es esencial para mitigar la variabilidad y fomentar la cooperación sustentable a largo de toda la cadena de suministro.

Como limitación principal, el estudio se desarrolló a partir de un modelo simplificado de cadena de

suministro, por lo que los resultados deben interpretarse como una aproximación analítica y no como una generalización absoluta para todos los sectores industriales. Asimismo, los pesos derivados del PAR dependen de los juicios expertos considerados, por lo que futuras investigaciones podrían ampliar el número de participantes, incorporar empresas de distintos sectores y contrastar los resultados con datos empíricos longitudinales. También se recomienda profundizar en la calibración d

El modelado de las interdependencias con información operativa real, así como evaluar otros mecanismos de cooperación, tales como contratos flexibles, integración digital y esquemas de colaboración basados en plataformas de datos compartidos.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

Ulises Mercado Valenzuela: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Software, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción - Preparación del borrador original, Redacción - Revisión y edición.

María Susana Hernández Bonilla: Análisis formal, Supervisión, Redacción - Revisión y edición.

Oliverio Cruz Mejia: Análisis formal, Supervisión, Redacción - Revisión y edición.

Referencias

[1] d'Artis Kancs, "Uncertainty of supply chains: Risk and ambiguity," *World Econ.*, vol. 47, no. 5, pp. 2009–2033, May 2024, DOI: 10.1111/twec.13534.

[2] P. Fontoura and A. Coelho, "More cooperative ... more competitive? Improving competitiveness by sharing value through the supply chain," *Management Decision*, vol. 60, no. 3, pp. 758–783, Feb. 2022, DOI: 10.1108/MD-09-2020-1225.

[3] C. D. Pedron and F. B. Coelho, "Collaboration in the supply chain: challenges and opportunities of collaborative planning in the healthcare sector," *Gestão & Produção*, vol. 32, 2025, DOI: 10.1590/1806-9649-2025v32e10723.

[4] L. de C. Gomes, "Mitigation of Supply Chain Vulnerability Through Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment (CPFR)," 2022, pp. 95–119. DOI: 10.1007/978-3-031-09183-4_5.

[5] F. S. Goudarzi, P. Bergey, and D. Olaru, "Behavioral operations management and supply chain coordination mechanisms: a systematic review and classification of the literature," *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 28, no. 1, pp. 140–161, Jan. 2023, DOI: 10.1108/SCM-03-2021-0111.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28466 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 48- 65

[6] A. Manousiadou, "Behavioral theories in inventory management and forecasting: Driving supply chain resilience," *Journal of Supply Chain Management Science*, vol. 5, no. 3–4, pp. 143–158, Dec. 2024, DOI: 10.59490/jscms.2024.7758.

[7] M. Brauch, M. Mohaghegh, and A. Größler, "Causes of the bullwhip effect: a systematic review and categorization of its causes," *Management Research Review*, vol. 47, no. 7, pp. 1127–1149, May 2024, DOI: 10.1108/MRR-05-2023-0392.

[8] F. Moreno-Baca, P. Cano-Olivos, D. Sánchez-Partida, and J.-L. Martínez-Flores, "The Bullwhip Effect and Ripple Effect with Respect to Supply Chain Resilience: Challenges and Opportunities," *Logistics*, vol. 9, no. 2, p. 62, May 2025, DOI: 10.3390/logistics9020062.

[9] M. El-Beheiry, R. Taha, T. Ismail, and Y. Adel, "A novel study of the impact of supply chain complexity on the bullwhip effect," *Journal of Transport and Supply Chain Management*, vol. 18, no. 0, Dec. 2024, DOI: 10.4102/JTSCM.v18i0.1077.

[10] I. Mohammed and J. Mandal, "The Impact of Lead Time Variability on Supply Chain Management," *International Journal of Supply Chain Management*, vol. 8, no. 2, pp. 41–55, Oct. 2024, DOI: 10.47604/ijscm.3075.

[11] Sunil. Chopra and K. Saxena, *Supply chain management: strategy, planning and operation*, 7a. Pearson Education, 2019.

[12] J. Ralfs and G. P. Kiesmüller, "Inventory management with advance demand information and flexible shipment consolidation," *OR Spectrum*, vol. 44, no. 4, pp. 1009–1044, Dec. 2022, DOI: 10.1007/s00291-022-00686-9.

[13] D. Koutsandreas, E. Spiliotis, F. Petropoulos, and V. Assimakopoulos, "On the selection of forecasting accuracy measures," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 73, no. 5, pp. 937–954, May 2022, DOI: 10.1080/01605682.2021.1892464.

[14] R. D. Klassen, A. Shafiq, and P. Fraser Johnson, "Opportunism in supply chains: Dynamically building governance mechanisms to address sustainability-related challenges," *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.*, vol. 171, p. 103021, Mar. 2023, DOI: 10.1016/j.tre.2023.103021.

[15] Adedoyin Tolulope Oyewole, Chinwe Chinazo Okoye, Onyeka Chrisanctus Ofodile, and Emuesiri Ejairu, "Reviewing predictive analytics in supply chain management: Applications and benefits," *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 21, no. 3, pp. 568–574, Mar. 2024, DOI: 10.30574/wjarr.2024.21.3.0673.

[16] P. Digkoglou and J. Papathanasiou, "Application of multiple criteria decision aiding in environmental policy-making processes," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 22, no. 8, pp. 6967–6982, Apr. 2025, DOI: 10.1007/s13762-024-06101-w.

[17] T. L. Saaty, "What is the Analytic Hierarchy Process?," in *Mathematical Models for Decision Support*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988, pp. 109–121. DOI: 10.1007/978-3-642-83555-1_5.

[18] N. Akbarian-Saravi, T. Sowlati, and A. S. Milani, "A Robust Analytical Network Process for Biocomposites Supply Chain Design: Integrating Sustainability Dimensions into Feedstock Pre-Processing Decisions," *Sustainability*, vol. 17, no. 15, p. 7004, Aug. 2025, DOI: 10.3390/su17157004.

[19] H. Taherdoost and M. Madanchian, "Analytic Network Process (ANP) Method: A Comprehensive Review of Applications, Advantages, and Limitations," *Journal of Data Science and Intelligent Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 12–18, May 2023, DOI: 10.47852/bonviewJDSIS3202885.

[20] L. M. Evans, E. Sözümert, B. E. Keenan, C. E. Wood, and A. du Plessis, "A Review of Image-Based Simulation Applications in High-Value Manufacturing," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, no. 3, pp. 1495–1552, Apr. 2023, DOI: 10.1007/s11831-022-09836-2.

[21] C. Baah *et al.*, "Effect of information sharing in supply chains: understanding the roles of supply chain visibility, agility, collaboration on supply chain performance," *Benchmarking: An International Journal*, vol. 29, no. 2, pp. 434–455, Feb. 2022, DOI: 10.1108/BIJ-08-2020-0453.

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Análisis de la distancia focal en un concentrador solar de disco parabólico utilizando trazado de rayos

Analysis of focal length in a parabolic dish solar concentrator using ray tracing

D. Rojas-Valdez[1], M. Sánchez-Pozos[1] *, M. D. Durán-García[1], I. G. Martínez-Cienfuegos[1], M. F. Mohedano-Castillo[2]
(*msanchezpo@uaemex.mx)

Recibido: 16 de junio de 2026 Aceptado: 04 de agosto de 2026

Resumen

Este estudio investiga la influencia de la longitud focal en el rendimiento de un concentrador solar de disco parabólico (CDP) mediante el método de trazado de rayos. Se utilizaron el software SolTrace, Tonatiuh y un programa desarrollado en MATLAB para analizar cómo varía la energía concentrada en el receptor al modificar la longitud focal del paraboloide. Los concentradores solares parabólicos son fundamentales para aplicaciones de energía solar de alta temperatura, como la generación de electricidad, donde la eficiencia del sistema depende en gran medida de la correcta focalización de la energía solar. La investigación se centra en el análisis de la distribución del flujo de energía en el receptor para tres configuraciones correspondientes a distancias focales de 2.0 m, 2.2 m y 2.4 m, utilizando el método Monte Carlo para simular el comportamiento de los rayos solares. Los resultados muestran que existe una longitud focal óptima que maximiza la concentración de energía en el receptor, mejorando así la eficiencia del sistema. Además, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos con SolTrace, Tonatiuh y MATLAB, identificando diferencias mínimas en la uniformidad y la distribución de la energía concentrada. El estudio concluye que la correcta selección de la longitud focal es crucial para optimizar el rendimiento de los concentradores solares parabólicos. Estos hallazgos son de gran importancia tanto para el diseño de sistemas solares más eficientes como para la implementación de tecnologías de concentración solar en aplicaciones industriales. Este trabajo contribuye significativamente al campo de la energía solar, ofreciendo un enfoque metodológico para la optimización del rendimiento

[1]Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), Toluca, Estado de México.
[2]Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), Toluca, Estado de México.

de concentradores solares parabólicos.

Palabras clave: Trazado de rayos, energía, concentración solar, paraboloide

ABSTRACT

This study investigates the influence of focal length on the performance of a parabolic dish concentrator (PDC) using ray tracing methods. The analysis was conducted using SolTrace, Tonatiuh, and a MATLAB-based program to examine how the concentrated energy at the receiver varies with changes in the paraboloid's focal length. Parabolic solar concentrators are essential for high-temperature solar energy applications, such as electricity generation, where system efficiency heavily relies on the accurate focusing of solar energy. The research focuses on analyzing the energy flux distribution on the receiver for various focal lengths, employing the Monte Carlo method to simulate the behavior of solar rays. The results indicate that there is an optimal focal length that maximizes energy concentration at the receiver, thereby enhancing system efficiency. Additionally, a comparative analysis between the outputs from SolTrace, Tonatiuh, and MATLAB was conducted, revealing minimal differences in the uniformity and distribution of concentrated energy. The study concludes that selecting the appropriate focal length is crucial for optimizing the performance of parabolic solar concentrators. These findings are highly relevant for the design of more efficient solar systems and the implementation of solar concentration technologies in industrial applications. This work significantly contributes to the field of solar energy by providing a methodological approach for performance optimizing parabolic concentrators.

Keywords: Ray tracing, energy, solar concentration, paraboloid

INTRODUCCIÓN

La energía solar se ha posicionado como una de las alternativas renovables más importantes gracias a su amplia disponibilidad y carácter sustentable. Dentro de las tecnologías desarrolladas para aprovechar este recurso, los concentradores solares parabólicos sobresalen por su capacidad para concentrar la radiación solar y alcanzar elevadas temperaturas de operación con altos niveles de eficiencia, lo que favorece su implementación en sistemas de generación eléctrica y procesos industriales que demandan energía térmica de alta temperatura [1]. Los concentradores solares parabólicos concentran la radiación solar sobre un receptor focal, permitiendo su aprovechamiento en forma de energía térmica o eléctrica [2].

La eficiencia de estos sistemas depende de diversos factores, siendo uno de los más críticos la longitud focal del paraboloide, que define la distancia entre el reflector y el receptor. Esta longitud focal influye significativamente en la concentración y distribución del flujo de calor en el receptor, afectando

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

la eficiencia global del sistema. Un ajuste preciso de la longitud focal es esencial para maximizar la concentración de energía y minimizar las pérdidas ópticas y térmicas.

El trazado de rayos es una técnica efectiva para optimizar la geometría de los concentradores solares [3]. Esta técnica permite simular el comportamiento de los rayos solares al interactuar con las superficies reflectantes del concentrador y predecir la distribución del flujo de calor en el receptor. En este estudio, se utiliza SolTrace, Tonatiuh y un código generado en Matlab para llevar a cabo el trazado de rayos, esto con la finalidad de analizar cómo varía la energía concentrada en el receptor en función de la longitud focal del concentrador parabólico.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la influencia de la longitud focal sobre la distribución del flujo energético y el desempeño óptico de un CDP mediante técnicas de trazado de rayos. Al comparar los resultados obtenidos con SolTrace y el programa desarrollado con MATLAB, buscamos validar nuestros modelos y obtener información valiosa para el diseño y la optimización de estos sistemas. Este análisis no solo contribuirá al conocimiento académico, sino que también tendrá aplicaciones prácticas en el desarrollo de tecnologías solares más eficientes y económicas.

En la literatura, varios estudios han investigado la optimización de la longitud focal en concentradores solares parabólicos. Klepp (2025) [4] evaluó el desempeño de un sistema Dish Stirling para aplicaciones de multi generación energética mediante simulaciones realizadas con SAM. El sistema alcanzó una eficiencia eléctrica del 25 % y una eficiencia total del 78 %, demostrando el potencial de esta tecnología para la producción simultánea de energía térmica y eléctrica a partir de energía solar concentrada. Banitia et al., (2024) [5] realizaron un análisis óptico de un concentrador solar de disco parabólico empleando trazado de rayos Monte Carlo para optimizar el diseño de sus componentes ópticos. Los autores identificaron configuraciones geométricas que permitieron mejorar la concentración de energía sobre el receptor, evidenciando la importancia del diseño óptico en el desempeño de los concentradores solares parabólicos. Martins et al., (2026) [6] investigaron la influencia de diversos parámetros geométricos y ópticos en el desempeño de concentradores solares de disco parabólico utilizando trazado de rayos Monte Carlo. Los resultados mostraron que la longitud focal, el ángulo de borde y los errores de alineación afectan directamente la distribución del flujo energético sobre el receptor y la eficiencia óptica del sistema. Farhat et al., (2024) [7] analizaron el desempeño energético de un concentrador solar de disco parabólico mediante evaluaciones experimentales y numéricas. Los autores demostraron que la geometría del receptor y la reducción de pérdidas ópticas y térmicas influyen significativamente en la eficiencia global del sistema, resaltando la importancia de optimizar el diseño de los componentes receptores. Rahbari et al., (2025) [8] evaluaron experimentalmente un receptor de cavidad cónico incorporando un reflector secundario en un concentrador solar de disco parabólico. Los resultados mostraron que el uso del reflector incrementó la eficiencia térmica en 5.47 %, alcanzando una eficiencia

máxima del 46.95 % y reduciendo significativamente las pérdidas térmicas en el receptor. Además, se reportó una mejora en la eficiencia energética y una reducción del 21.5 % en las emisiones equivalentes de CO_2, demostrando el potencial de esta estrategia para optimizar el desempeño de los concentradores solares parabólicos.

Mitchell et al., (2025) [9] compararon las herramientas de trazado de rayos SolTrace, Solstice y TieSOL para modelar la distribución del flujo solar en sistemas de concentración de potencia. Los resultados evidenciaron pequeñas discrepancias entre las simulaciones y destacaron la necesidad de validar cuidadosamente estas herramientas para garantizar la precisión de los análisis ópticos y del diseño de receptores. Jadhav et al., (2022) [10] utilizaron el software SolTrace para analizar la distribución del flujo solar concentrado y optimizar la geometría de un receptor central en un sistema heliostático. Los resultados mostraron que el trazado de rayos es una herramienta eficaz para determinar el tamaño y la posición del receptor, mejorando la captación de energía y la distribución del flujo incidente. Richter & Hövelmann, (2022) [11] demostraron que SolTrace y Tonatiuh son ampliamente utilizados para modelar sistemas de receptor central, donde SolTrace es valorado por su capacidad para manejar sistemas ópticos complejos, mientras que Tonatiuh es preferido por su enfoque de código abierto y su flexibilidad en el diseño de experimentos

Este trabajo busca no solo contribuir al cuerpo de conocimiento existente, sino también proporcionar datos valiosos para ingenieros y diseñadores en el campo de la energía solar, facilitando el desarrollo de tecnologías más avanzadas y eficientes. Los resultados de este estudio podrán servir de base para futuras investigaciones y desarrollos en la optimización de concentradores solares y otros sistemas de energía renovable. Recientemente, Li et al., (2024) [12] propusieron una metodología de optimización para concentradores solares parabólicos empleando algoritmos evolutivos y herramientas de trazado de rayos, demostrando que pequeñas modificaciones geométricas pueden incrementar significativamente la eficiencia de concentración solar. Estos resultados resaltan la importancia de analizar parámetros geométricos específicos, como la longitud focal, para mejorar el desempeño óptico del sistema.

Materiales y métodos

La metodología de este estudio se centra en la simulación del comportamiento de la energía concentrada por un CDP mediante trazado de rayos. Se utilizó el software de trazado de rayos SolTrace, Tonatiuh y un programa desarrollado en MATLAB para analizar como varía la energía concentrada en el receptor en función de la longitud focal del paraboloide. En la Figura 1, se describe detalladamente el proceso seguido mediante un diagrama de flujo. Cabe destacar que el trazado de rayos se realizó para tres distancias focales diferentes empleando SolTrace, Tonatiuh y el código de Matlab.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

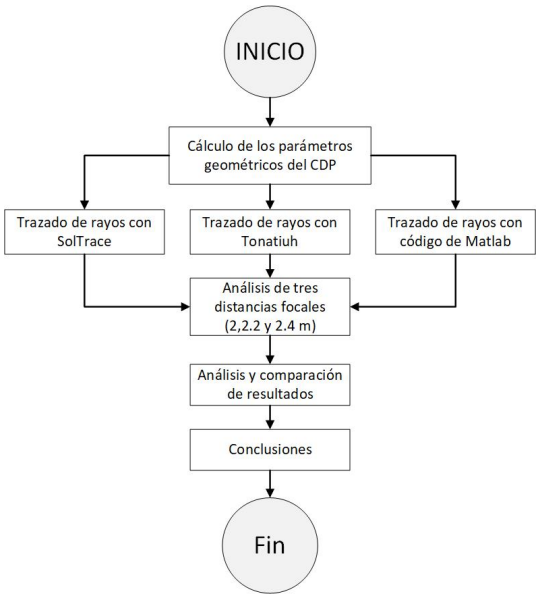


FIGURA 1. Diagrama de flujo del método empleado

En función de los alcances de esta investigación es importante considerar los parámetros geométricos para el dimensionamiento y diseño del CDP. Por este motivo, en la siguiente sección se describen estos parámetros.

Descripción de los Parámetros Geométricos del Disco

La concentración en el contexto de un concentrador solar se refiere a la relación entre el área de la apertura del concentrador y el área del receptor. Matemáticamente, se puede expresar como la Ec. (1):

$$C = \frac{A_{ap}}{A_r} \tag{1}$$

donde A_{ap} corresponde al área de apertura del concentrador solar y A_r al área del receptor. La Figura 2 describe este parámetro. Esta relación de concentración indica cuántas veces la energía solar es concentrada en el receptor en comparación con la energía captada directamente por la apertura del concentrador.

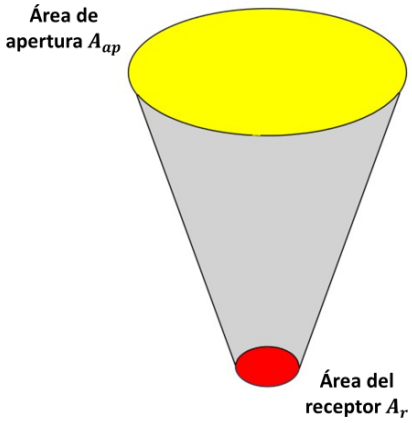


FIGURA 2. Principio de la concentración solar

En este sentido la relación de concentración para un concentrador de disco parabólico con absorbedor plano se puede calcular en función del área de apertura que corresponde a una sección circular y el área del receptor que se considera de igual manera una circunferencia, por lo tanto, la expresión que permite calcular dicha expresión es la Ec. (2):

$$C_{CDP} = \left(\frac{r_{ap}}{r_r}\right)^2 - 1 \tag{2}$$

Asimismo, el CDP empleado en este estudio se caracteriza por varios parámetros geométricos clave que determinan su capacidad para concentrar la luz solar hacia el receptor. Estos parámetros geométricos y sus relaciones de diseño han sido reportados previamente por Kumar et al., (2023) [13] y El-Gamal et al., (2022) [14]. Las ecuaciones empleadas para determinar la longitud focal, la altura del CDP y el diámetro del receptor corresponden a relaciones geométricas derivadas de la geometría del paraboloide de revolución y han sido ampliamente utilizadas en el diseño de concentradores solares de disco parabólico [13,14]. A continuación, se describen los parámetros antes mencionados:

Diámetro de apertura (D_a): Es el diámetro del área de apertura del CDP, como se visualiza en la Figura 3, que corresponde un círculo, cuyas dimensiones están sujetas a la magnitud de la concentración solar requerida.

Ángulo de Borde (θ_r): Es el ángulo subtendido por el reflector desde el vértice de la parábola. Este ángulo define la forma y el tamaño del paraboloide, y afecta la distribución de los rayos solares reflejados.

Longitud Focal (f): Es la distancia desde el vértice de la parábola hasta el punto focal (Ver Figura 3), donde se concentra la luz solar. La longitud focal es crucial para determinar la eficiencia de

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

la concentración de la energía solar. Con base en lo anterior, la longitud focal se establece a partir de la Ec. (3) [14]:

$$f = \frac{D_{ap}}{4\tan\left(\frac{\theta_r}{2}\right)} \tag{3}$$

Altura del CDP (*h*): Es la distancia desde el borde del reflector hasta el vértice de la parábola. Esta profundidad influye en el ángulo de concentración y la distribución del flujo de energía. La altura del concentrador se puede obtener a partir de la Ec. (4) [14]:

$$h = \frac{1}{4f}\left(\frac{D_{ap}}{2}\right)^2 \tag{4}$$

Diámetro del receptor (D_r): Es el diámetro que debe de tener el receptor para que la radiación solar reflejada por el CDP se concentre sobre la superficie del receptor. Este diámetro se calcula en la Ec. (5) [13]:

$$D_r = 2\left(\frac{\left(\frac{2f}{1+\cos(\theta_r)}\right) sen(\theta_0)}{sen(\pi - \left(\theta_0 + \left(\frac{\pi}{2} - \theta_r\right)\right)}\right) \tag{5}$$

El análisis de estos parámetros geométricos es esencial para diseñar un concentrador eficiente. Los estudios previos han demostrado que la geometría del paraboloide juega un papel crucial en la eficiencia del sistema de concentración solar. Investigaciones recientes han confirmado que la geometría del concentrador solar influye de manera significativa en parámetros ópticos como la relación de concentración, la distribución de la irradiancia y las aberraciones ópticas presentes en el sistema. Al- Arab et al., (2024) [15] compararon las características ópticas de concentradores solares parabólicos y esféricos, encontrando que la configuración parabólica presenta relaciones de concentración considerablemente superiores, lo que la convierte en una alternativa adecuada para aplicaciones de alta concentración solar. Del mismo modo, la relación de concentración para el CDP se puede calcular en función de θ_r y θ_s, este último corresponde al ángulo de aceptación que se considera como $\theta_s = 0{,}2666\ ^\circ$ [14], este valor se encuentra asociado con la ventana angular solar proveniente del Sol. Por ello, considerando la Ec. (6), la relación de concentración se calcula como [13]:

$$C_{CDP} = \left(\frac{\tan(\theta_r)}{[tan(\theta_r + \theta_s) - \tan(\theta_r)]\ \cos(\theta_s)}\right)^2 \tag{6}$$

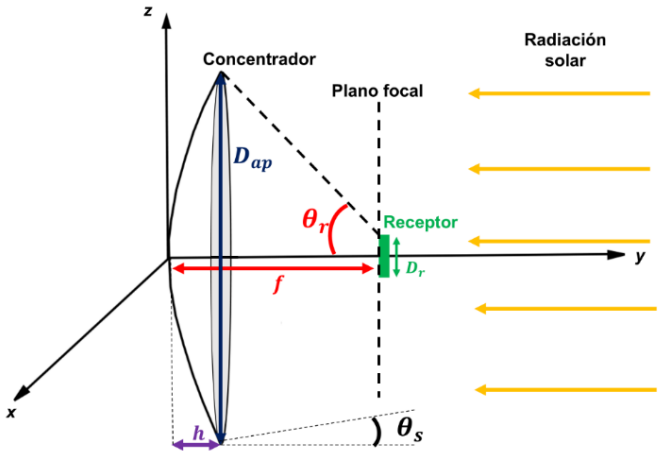


FIGURA 3. Parámetros geométricos del CDP

Parámetros Ópticos y Geométricos para el trazado de rayos

Para la simulación del trazado de rayos, se han seleccionado los siguientes parámetros ópticos y geométricos (Ver Tabla 1):

Tabla 1. Parámetros ópticos y geométricos del CDP.

Parámetro	Valor
Diámetro del Disco (D_a)	1.4 m
Ángulo de borde (θ_r)	18°
Altura del Paraboloide (h)	5.54 cm
Longitud Focal (f)	2.21 m
Reflectividad del Disco (ρ)	0.95
DNI (Irradiancia Directa Normal)	1000 W/m^2
Diámetro del Receptor (D_r)	0.021 m
Relación de concentración (C)	3970 soles

Estos parámetros se han seleccionado para representar un sistema de concentración solar típico y para estudiar el efecto de la variación de la longitud focal en la distribución del flujo de energía en el receptor.

Modelo Monte Carlo para el trazado de rayos

El modelo estadístico de Monte Carlo es ampliamente utilizado en simulaciones de trazado de rayos para estudiar la óptica y la concentración de energía en sistemas solares, como los concentradores

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

solares de disco parabólico [3]. Recientemente, Banitia et al., (2025) [16] emplearon la metodología de trazado de rayos Monte Carlo para analizar el comportamiento óptico y térmico de un concentrador solar parabólico, demostrando la capacidad de esta técnica para optimizar la distribución energética sobre el receptor y evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de operación. Tanto SolTrace como Tonatiuh utilizan este método para modelar la propagación de los rayos solares y analizar cómo interactúan con los componentes del sistema. Por esta razón en la Figura 4 se presenta el diagrama de flujo donde se describen las etapas que son empleadas en trazado de rayos empleando este modelo. Por tal motivo, con base en lo descrito en el diagrama de flujo de la Figura 4 a continuación se describen las etapas [17] [18] [19] [20].



FIGURA 4. Diagrama de flujo del modelo Monte Carlo

Con base en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4, a continuación, se describen las expresiones y ecuaciones empleadas en las etapas para llevar a cabo el trazado de rayos [21]. En la primera etapa, se generan los rayos que representan la luz solar incidente. Estos rayos son emitidos desde una fuente o una distribución que representa la luz solar. En aplicaciones solares, los rayos suelen ser paralelos y se distribuyen uniformemente sobre el área de apertura del concentrador. Para ello es necesario determinar la posición y la dirección inicial del rayo. Por lo tanto, la posición inicial del rayo se expresa con la Ec. (7):

$$r_0 = (x_0, y_0, z_0) \tag{7}$$

La posición inicial del rayo en el plano de apertura se puede determinar de manera aleatoria dentro del área de apertura A_{ap} utilizando una distribución uniforme. Por su parte, la dirección inicial del rayo se determinar mediante la Ec. (8):

$$d_0 = (cos\theta cos\phi, cos\theta sen\phi, sen\phi) \tag{8}$$

donde, θ es el ángulo de inclinación respecto al eje normal a la apertura, y ϕ es el ángulo azimutal. Estos ángulos pueden generarse utilizando una distribución angular, a menudo representada por una función de distribución de irradiancia.

En la etapa donde los rayos generados interactúan con las superficies es necesario resolver la ecuación paramétrica de la línea del rayo, expresada en la Ec. (9):

$$r(t) = r_0 + t \bullet d_0 \tag{9}$$

donde *r(t)* es la posición del rayo en función del parámetro *t*, r_0 es la posición inicial, y es la d_0 es la dirección del rayo. A partir de ello, si la superficie es descrita por una ecuación *f(r)=0*, se encuentra el parámetro *t* que satisface (ver Ec. (10) [22]:

$$f\left(r_0 + t \bullet d_0\right) = 0 \tag{10}$$

En la tercera etapa la reflexión y refracción del rayo se pueden modelar empleando las leyes de reflexión y refracción [22]. La ley de reflexión se denota por la Ec. (11):

$$d_{ref} = d - 2(d \bullet n) \tag{11}$$

Donde d_{ref} es la dirección del rayo reflejado, *d* es la dirección del rayo incidente y *n* es el vector normal a la superficie. Del mismo modo, la ley de Snell (refracción) [22] se expresa en la Ec. (12):

$$\frac{sen\ \theta_i}{sen\ \theta_r} = \frac{n_2}{n_1} \tag{12}$$

de aquí se tiene que θ_i es el ángulo de incidencia del rayo, θ_r es el ángulo de refracción y n_1 y n_2, son los índices de refracción de los dos medios. Con base en lo anterior, La dirección del rayo refractado d_{refr} se puede calcular usando la Ec. (13):

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

$$d_{refr} = \frac{n_1}{n_2} d + \left(\frac{n_1}{n_2} (d \bullet n) - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (1 - (d \bullet n)^2)} \right) \tag{13}$$

Es de suma importancia mencionar que el modelo Monte Carlo acumula la energía en el receptor con base en la cantidad de rayos que llegan a él. Por esta razón, la cuarta etapa del diagrama de flujo (Figura 4) correspondiente al cálculo de la energía concentrada en el receptor emplea la Ec. (14):

$$E_r = \sum_{i=1}^{N} w_i \tag{14}$$

donde w_i es la energía asociada a cada rayo que llega al receptor, y N es el número total de rayos que impactan el receptor. Además, se calcula el factor de concentración que se define como la relación entre la energía concentrada en el receptor y la energía total incidente en la apertura representada en la Ec. (15):

$$FC = \frac{E_r}{E_{inc}} \tag{15}$$

donde E_{inc} es la energía total incidente en el área de apertura, y E_r es la energía total que llega al receptor. Una vez calculados los parámetros anteriores, es importante determinar la probabilidad de que un rayo sea reflejado, absorbido o transmitido, basándose principalmente en las propiedades ópticas de los materiales. Por ello, se calcula la probabilidad de reflexión (P_{ref}) a partir de la Ec. (16):

$$P_{ref} = R(d, n) \tag{16}$$

en donde $R(d, n)$ es la reflectancia de la superficie del concentrador. Con ello, se calcula la también la probabilidad de absorción (P_{abs}) empleando la Ec. (17):

$$P_{abs} = 1 - R(d, n) - T(d, n) \tag{17}$$

en esta expresión $T(d, n)$ es la transmitancia del material. Estas ecuaciones y expresiones forman la base del modelo Monte Carlo en trazado de rayos, permitiendo simular con precisión la propagación de la luz y el comportamiento de los sistemas ópticos en aplicaciones solares [3].

Simulación del Trazado de Rayos con SolTrace, Tonatiuh y código de Matlab

De acuerdo con el objetivo de esta investigación se llevará a cabo la simulación del trazado de rayos del CDP con los parámetros geométricos descritos previamente con el software SolTrace, Tonatiuh y con el código programado en Matlab. La finalidad de simularlo con tres diferentes softwares es validar los

resultados del trazado de rayos como se describe a continuación. Cabe destacar, que los tres trazadores de rayos, emplean las mismas etapas durante el proceso, tal como se muestra en el diagrama de flujo descrito en la Figura 5.



FIGURA 5. Diagrama de flujo de las etapas del trazado de rayos con SolTrace, Tonatiuh y código de Matlab

Debido a que el presente trabajo corresponde a una etapa preliminar de análisis y diseño óptico del concentrador solar de disco parabólico, no se realizó una validación experimental directa mediante un prototipo físico. En su lugar, la validación de los resultados se llevó a cabo mediante una comparación cruzada entre tres herramientas independientes de trazado de rayos: SolTrace, Tonatiuh y un código desarrollado en MATLAB. La concordancia observada en la distribución espacial del flujo energético y en la determinación de la longitud focal óptima permitió verificar la consistencia de los resultados obtenidos. Como trabajo futuro se contempla la construcción del prototipo experimental para realizar la validación física de los resultados numéricos obtenidos.

Simulación con SolTrace

SolTrace es una herramienta de trazado de rayos desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL). Permite modelar sistemas ópticos complejos y evaluar su rendimiento mediante simulaciones detalladas. En este estudio, se utiliza SolTrace para simular la concentración de rayos solares en el receptor para diferentes longitudes focales del CDP. El uso de SolTrace es ampliamente reconocido en la comunidad científica debido a su capacidad para simular con precisión sistemas de concentración solar complejos (Figura 6). Estudios previos han demostrado que SolTrace es una herramienta eficaz para predecir y optimizar el rendimiento de concentradores solares parabólicos [23].

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

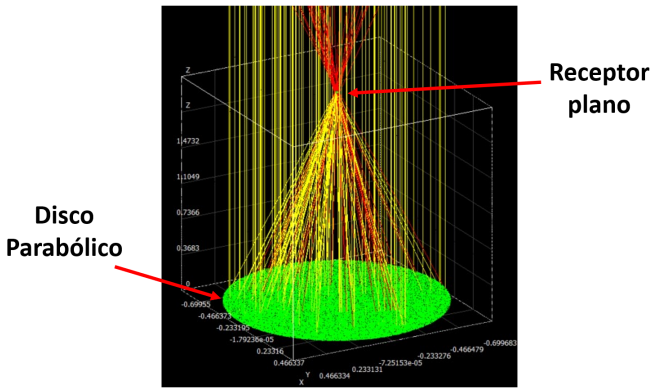


FIGURA 6. Trazado de rayos con SolTrace

Simulación con Tonatiuh

Tonatiuh es un software de código abierto especializado en la simulación de sistemas de concentración solar, desarrollado por la Agencia Española de Energía Renovable (CIEMAT). Se utiliza para modelar y analizar el comportamiento óptico de concentradores solares mediante técnicas de trazado de rayos Monte Carlo [24]. A continuación, se describe el proceso de simulación con Tonatiuh:

El uso de Tonatiuh es bien conocido en la comunidad científica debido a su capacidad para simular sistemas de concentración solar complejos con alta precisión. Estudios previos han demostrado que Tonatiuh es una herramienta eficaz para el diseño y optimización de concentradores solares parabólicos y otros sistemas de concentración óptica [25].

Simulación con MATLAB

Además de SolTrace y Tonatiuh, se desarrolló un programa de MATLAB para realizar el trazado de rayos y obtener la distribución del flujo de energía en el receptor. El desarrollo del código tuvo como objetivo proporcionar una herramienta independiente para verificar la consistencia de los resultados obtenidos mediante ambos softwares de trazado de rayos. Asimismo, MATLAB ofrece una mayor flexibilidad para modificar parámetros geométricos y ópticos, implementar condiciones particulares de simulación y desarrollar futuras estrategias de optimización del concentrador solar. De esta manera, el código desarrollado no pretende sustituir a SolTrace o Tonatiuh, sino complementar el análisis mediante una metodología independiente que permita comparar tendencias, identificar posibles discrepancias y aumentar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

RESULTADOS

De acuerdo con el objetivo de este estudio, se simuló el trazado de rayos de un CDP con tres

distintas longitudes focales; 2, 2.4 y 2.2 metros, esta última corresponde a la longitud focal calculada geométricamente, en donde se afirma que se tiene la energía concentrada con los valores máximos para este CDP.

Longitud focal de 2.20 m

Con base en la Figura 7, se muestra una alta concentración de flujo en el centro del receptor, alcanzando valores máximos de aproximadamente 6 MW/m^2 que disminuyen radialmente hacia los bordes. Esta distribución indica una alta eficiencia en la concentración de energía en el punto focal, esencial para maximizar la absorción en aplicaciones de energía solar. En la Figura 7a se presenta el mapa de energía generado por SolTrace, en él se observa un patrón similar de alta concentración central con valores máximos alrededor de 7 MW/m^2, pero con una distribución más uniforme en comparación con Tonatiuh (Figura 7b). La uniformidad observada en SolTrace puede ser indicativa de una mejor dispersión de los rayos solares, lo que puede resultar en un calentamiento más homogéneo del receptor. El gráfico generado por el código en Matlab, en la Figura 7c, se aprecia una distribución de flujo de calor más difusa con valores máximos en torno a 6 MW/m^2. Los valores en Matlab son significativamente menores, lo cual puede deberse a diferentes parámetros de simulación o a la metodología utilizada para el trazado de rayos. No obstante, el patrón general sigue mostrando una concentración mayor en el centro y una disminución hacia los bordes, coherente con los resultados obtenidos por Tonatiuh y SolTrace.

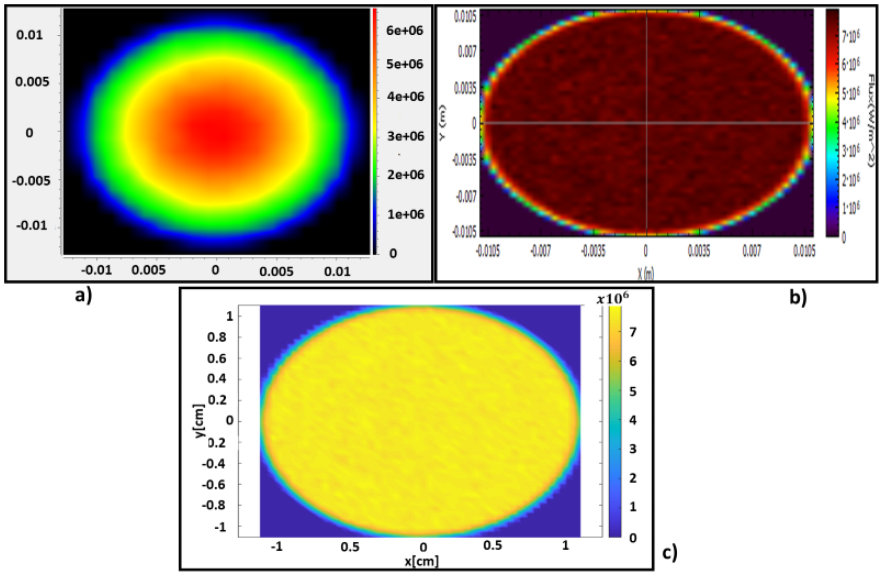


FIGURA 7. Flujo de energía en el receptor a una distancia de 2.20 m; a) SolTrace; b) Tonatiuh y c) Matlab

Asimismo, la Figura 8 muestra el perfil radial del flujo de energía en receptor, considerando el

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

comportamiento mostrado en la Figura 7. Se puede observar que la tendencia de la energía distribuida en el receptor es gaussiana. Por ello, se observa que el máximo valor de energía en el receptor se localiza en el centro, por otra parte, la energía disminuye hacia los alrededores del receptor plano.

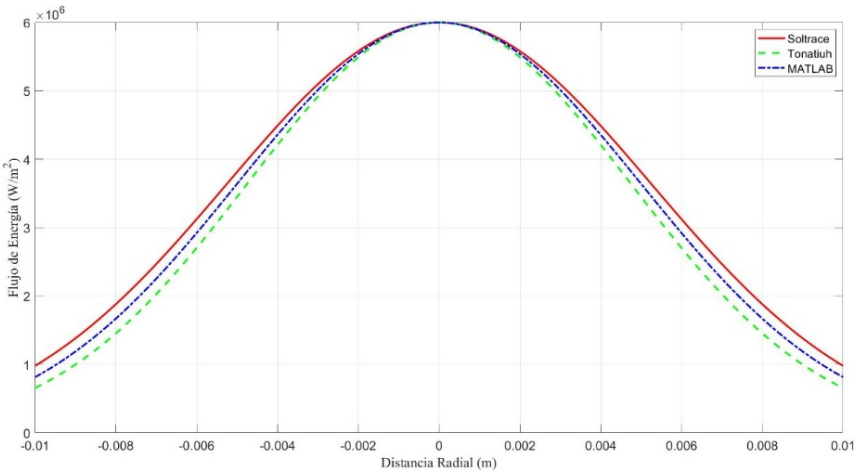


FIGURA 8. Perfil radial del flujo de energía en el receptor a una distancia focal de 2.2 m

Los resultados obtenidos para la distancia focal de 2.2 m muestran un comportamiento consistente con la teoría óptica de concentradores solares parabólicos. Debido a que esta distancia corresponde a la posición focal calculada geométricamente, los rayos reflejados convergen sobre una región reducida del receptor, generando los valores máximos de flujo energético observados. Este comportamiento coincide con lo reportado por Pavlovic et al., [6] y Bellos et al., [8], quienes identificaron que la localización precisa del receptor favorece un incremento significativo de la densidad energética concentrada.

Longitud focal de 2 m

La imagen que se muestra en la Figura 9 describe el análisis del flujo de calor en el receptor de un concentrador parabólico utilizando Tonatiuh, SolTrace y Matlab. En Tonatiuh (Figura 9b), el flujo de energía alcanza un máximo de 120 kW/m^2, concentrándose en el centro del receptor y disminuyendo hacia los bordes, indicando alta eficiencia en la concentración. SolTrace (Figura 9a) presenta una distribución similar, con valores máximos alrededor de 120 kW/m^2 y una mayor uniformidad, posiblemente debido a un trazado de rayos más preciso.

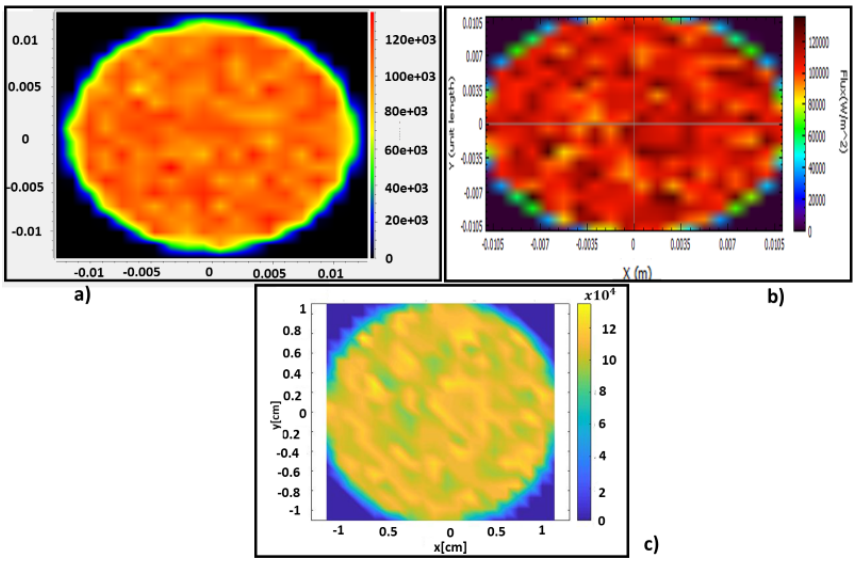


FIGURA 9. Flujo de energía en el receptor a una distancia de 2 m; a) SolTrace; b) Tonatiuh y c) Matlab

Del mismo modo, el comportamiento gaussiano se presenta en la distribución de energía en el receptor plano. La Figura 10 describe este comportamiento, afirmando lo que la literatura determina para el flujo de energía en el receptor.

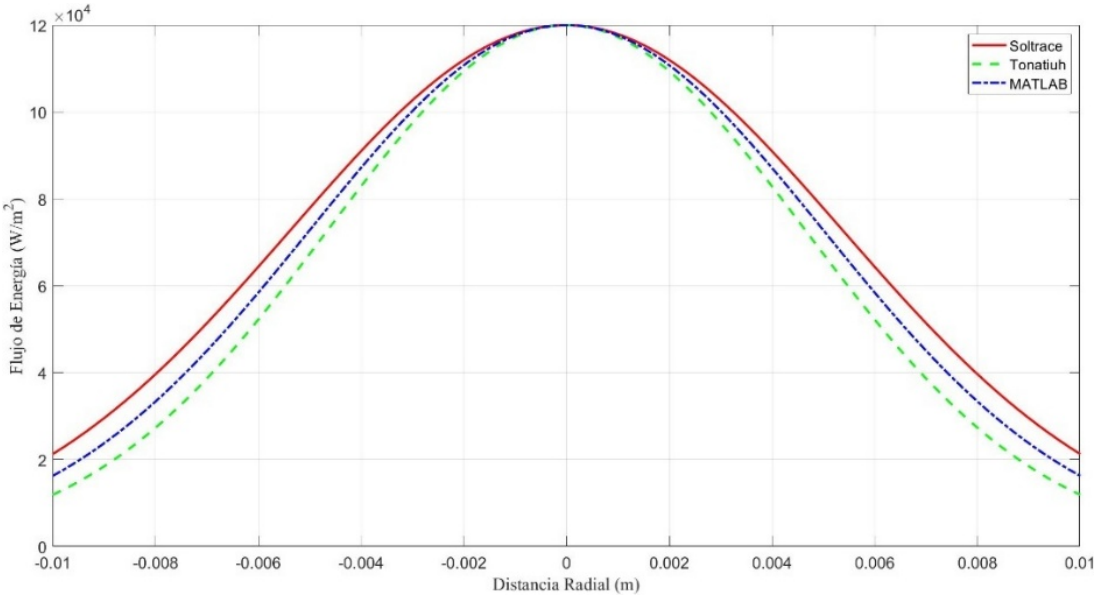


FIGURA 10. Perfil radial del flujo de energía en el receptor a una distancia focal de 2 m

Cuando el receptor se encuentra a una distancia menor que la longitud focal calculada

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

geométricamente, los rayos reflejados aún no alcanzan su máxima convergencia sobre la superficie receptora. Como consecuencia, la energía se distribuye sobre un área más amplia y el flujo energético disminuye considerablemente. Este efecto de desenfoque óptico ha sido reportado previamente en la literatura para sistemas de concentración solar de disco parabólico y representa una de las principales fuentes de reducción en la eficiencia óptica del sistema [6], [7].

Longitud focal de 2.4 m

En la Figura 11, las intensidades de flujo varían entre 0 y 150 kW/m^2, con concentraciones máximas (>100 kW/m^2) en rojo y mínimas (<50 kW/m^2) en azul, con coordenadas en metros (-0.015 a 0.015 m). Con Tonatiuh (Figura 11b), con coordenadas en centímetros (-1.0 a 1.0 cm), muestra intensidades de flujo entre 0 y 14 kW/m^2, destacando las áreas amarillas como las de mayor concentración. Empleando el código de Matlab (Figura 11c), con coordenadas en metros (-0.0105 a 0.0105 m), presenta intensidades de flujo entre 25 y 148 kW/m^2, con las áreas rojas indicando las mayores concentraciones de energía. Estos mapas visualizan la distribución del flujo energético en el receptor, información crucial para optimizar el diseño de concentradores solares parabólicos.

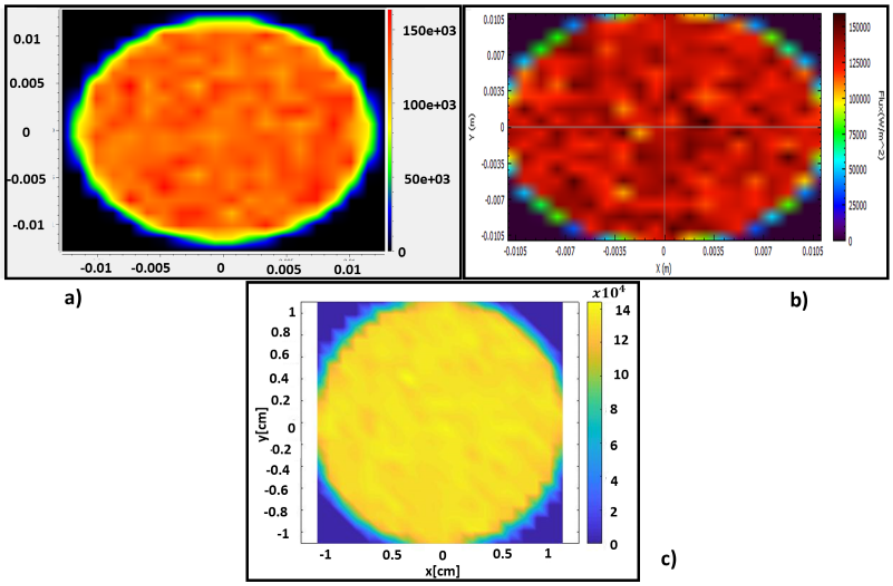


FIGURA 11. Flujo de energía en el receptor a una distancia de 2.4 m; a) SolTrace; b) Tonatiuh y c) Matlab

El perfil radial de la energía concentrada en el receptor cuando éste se encuentra en una longitud focal de 2.4 metros, se muestra en la Figura 12. Con ello, se aprecia que cuando el receptor se encuentra a una distancia mayor que la longitud focal la energía concentrada incrementa. Esto se puede comparar con la

energía que tiene el receptor cuando la distancia a la que se encuentra el receptor en el eje focal es menor que la distancia focal, aquí se muestra que la energía es menor.

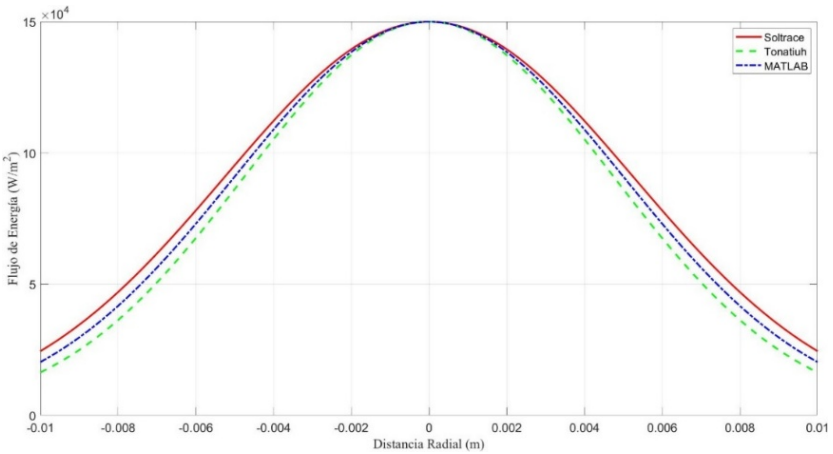


FIGURA 12. Perfil radial del flujo de energía en el receptor a una distancia focal de 2.4 m

Para una distancia de 2.4 m se observa que el receptor se encuentra más allá del punto focal geométrico, produciendo nuevamente una dispersión parcial del haz reflejado. Aunque los valores de flujo energético son superiores a los obtenidos para 2.0 m, el sistema no alcanza los niveles máximos observados en la configuración focal óptima. Este comportamiento confirma la elevada sensibilidad de los concentradores solares parabólicos a pequeñas variaciones en la posición del receptor.

Finalmente, la Figura 13 describe el comportamiento de la concentración de energía en el receptor simulada con SolTrace. En la gráfica se puede observar cómo la variación de la longitud focal tiene un efecto significativo en la energía concentrada por el CDP. Con base en estos resultados se puede determinar que la longitud focal de 2.2 m, calculada geométricamente es la óptima para localizar el receptor plano. Sin embargo, al analizar la distancia focal de 2 y 2.4 metros, esta última presenta valores mayores de energía concentrada. Esto se debe a que mayor número de rayos inciden sobre la superficie del receptor a una longitud focal de 2.4 m comparado con una distancia de 2 m. Del mismo modo, la Tabla 2 contiene los valores de energía concentrada por el CDP con el uso de SolTrace, en tres puntos (distancias radiales) diferentes del receptor considerando el plano xy, empleando los tres trazadores de rayos.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

Tabla 2. Energía concentrada por cada longitud focal en tres puntos del perfil radial del receptor.

Longitud focal	Distancia radial x =0 m	Distancia radial x =0.0025 m	Distancia radial x =0.01 m
2 m	120 kW/m^2	95 kW/m^2	50 kw/m^2
2.2 m	7 MW/m^2	6 MW/m^2	1 MW/m^2
2.4 m	150 kW/m^2	125 kW/m^2	75 kW/m^2

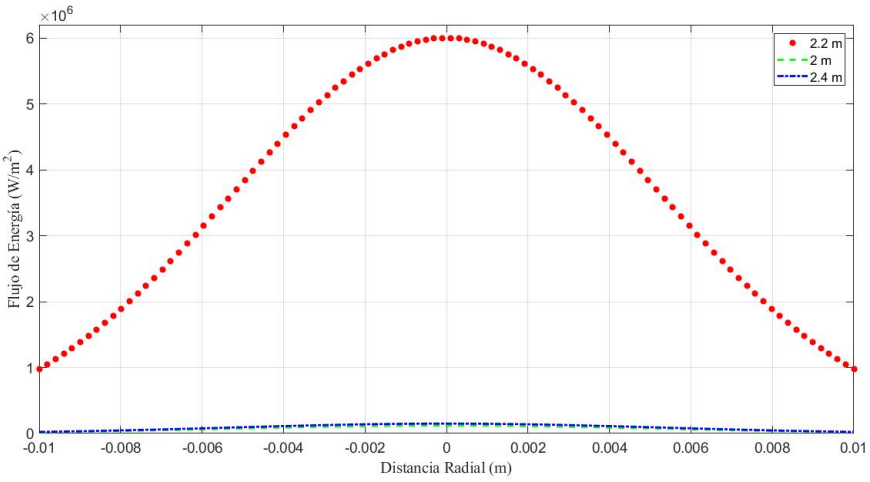


FIGURA 13. Perfil radial de energía en el receptor empleando SolTrace

La diferencia observada entre los valores máximos de flujo energético obtenidos para las distintas posiciones del receptor se atribuye principalmente al grado de convergencia de los rayos reflejados sobre la superficie receptora. Cuando el receptor se localiza exactamente en la distancia focal calculada geométricamente (2.2 m), la mayor parte de los rayos reflejados converge sobre una región reducida, produciendo una elevada densidad de flujo energético que alcanza valores del orden de MW/m^2. Por el contrario, cuando el receptor se desplaza por delante o por detrás de la posición focal (2.0 m y 2.4 m), el haz reflejado presenta un efecto de desenfoque, distribuyendo la energía sobre una superficie mayor y reduciendo considerablemente la densidad de energía concentrada. Este comportamiento es consistente con la teoría de concentración solar y con estudios previos reportados para concentradores de disco parabólico, donde pequeñas variaciones respecto a la posición focal generan diferencias significativas en la distribución del flujo energético sobre el receptor.

En términos generales, los resultados obtenidos mediante SolTrace, Tonatiuh y MATLAB muestran

tendencias similares respecto al efecto de la longitud focal sobre la distribución del flujo energético. Aunque existen diferencias en la magnitud absoluta reportada por cada herramienta de simulación, todas coinciden en identificar la distancia focal de 2.2 m como la configuración óptima para maximizar la concentración energética. Esta concordancia proporciona confianza en los resultados y confirma la validez de la metodología empleada.

Conclusiones y líneas abiertas

Con base en los resultados obtenidos se concluye que la correcta selección de la longitud focal es esencial para optimizar el rendimiento de los concentradores solares parabólicos. Al ajustar la longitud focal, se puede maximizar la concentración de energía en el receptor, lo que mejora significativamente la eficiencia del sistema. Los resultados obtenidos a través de las simulaciones realizadas con SolTrace, Tonatiuh y un programa desarrollado en MATLAB muestran que, aunque existen diferencias en la magnitud absoluta de la energía concentrada reportada por cada herramienta, todas muestran tendencias consistentes respecto a la localización de la distancia focal óptima y no afectan el uso de estos programas para analizar el desempeño del sistema.

Asimismo, el análisis reveló que los valores de energía concentrada en el receptor variaron en función de las diferentes longitudes focales utilizadas en las simulaciones. A medida que la distancia del receptor se incrementa respecto a la longitud focal, la energía concentrada tiende a distribuirse de manera más uniforme sobre el receptor, lo que puede reducir los picos de alta intensidad y minimizar las pérdidas por sobrecalentamiento. Sin embargo, ubicar el receptor a una distancia mayor a la longitud focal disminuirá considerablemente la concentración máxima alcanzable, comprometiendo la eficiencia total del sistema. Por otro lado, si el receptor se sitúa a una distancia menor respecto a la longitud focal (2 m), la energía concentrada disminuye de forma considerable incluso comparando con los valores obtenidos con la distancia focal de 2.4 m. A partir de ello, se concluye que la longitud focal calculada geométricamente es la óptima para garantizar la mayor concentración de energía en el sistema.

Este análisis subraya la importancia de utilizar un enfoque metodológico adecuado para la optimización de concentradores solares parabólicos, lo que tiene implicaciones prácticas tanto en el diseño de sistemas solares más eficientes como en la implementación de tecnologías de concentración solar en aplicaciones industriales. Además, este trabajo contribuye significativamente al campo de la energía solar, ofreciendo datos valiosos para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en el área de la energía renovable.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

David Rojas Valdez: Conceptualización, Metodología, Redacción - Preparación del borrador

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

original.

Miriam Sánchez Pozos: Conceptualización, Investigación, Redacción - Preparación del borrador original. **Iván G. Martínez Ciegus:** Supervisión. **María Dolores Durán García:** Supervisión. **Martha Fernanda Mohedano Castilolo:** Software, Validación.

Referencias

[1] B. Chavarría-Domínguez, S. E. De León-Aldaco, N. Velázquez-Limón, M. Ponce-Silva, J. A. Aguilar-Jiménez, and F. Chavarría-Domínguez, "A Review of the Modeling of Parabolic Trough Solar Collectors Coupled to Solar Receivers with Photovoltaic/Thermal Generation," Energies, vol. 17, no. 7, p. 1582, 2024, DOI: 10.3390/en17071582.

[2] E. González-Mora and M. Durán-García, "Energía solar concentrada para procesos industriales: un recurso estratégico hacia la sostenibilidad," CIENCIA ergo-sum, vol. 33, 2025, DOI: 10.30878/ces.v33n0a54.

[3] K. Faye, A. Thiam, M. Faye, K. J. Craig, E. H. I. Cissé, and V. Sambou, "Combining ray tracing and CFD to evaluate the outlet air temperature of an indirectly irradiated solar receiver equipped with a 3D-CPC for a solar tower power plant," SSRN Electronic Journal, 2022, DOI: 10.2139/ssrn.4237380.

[4] G. Klepp, "Solar Stirling for Renewable Energy Multigeneration Systems," Sustainability, vol. 17, no. 3, p. 1257, 2025, DOI: 10.3390/su17031257.

[5] D. Banitia, S. Ramachandran, S. S. Bhogilla, and P. K. Vijayan, "Optical analysis and design of a novel solar beam down concentrator for indoor cooking," Solar Compass, vol. 12, Art. no. 100083, 2024, DOI: 10.1016/j.solcom.2024.100083.

[6] L. F. Martins, J. E. P. Navalho, M. A. A. Mendes, and J. C. F. Pereira, "Optical and thermal performance analysis of ceramic foam solar receivers in parabolic dish solar collector assemblies: The role of collector geometrical and optical parameters and absorber and coating materials," Energy Conversion and Management, vol. 365, Art. no. 121694, 2026, DOI: 10.1016/j.enconman.2026.121694.

[7] M. H. Farhat, Y. Mazloum, S. Wakim, W. Bou Nader, M. ALEbrahim, and N. Ghareeb, "Energy optimization of parabolic dish solar concentrator coupled to organic Rankine cycle: Experimental and analytical investigation of cavity receiver design and covering effects," International Journal of Thermofluids, vol. 23, Art. no. 100730, 2024, DOI: 10.1016/j.ijft.2024.100730.

[8] M. Rahbari, P. Esfanjani, A. Mahmoudi, and M. S. Valipour, "Performance enhancement of a parabolic dish collector with a novel receiver assisted with a secondary reflector," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 283, Art. no. 113464, 2025, DOI: 10.1016/j.solmat.2025.113464.

[9] R. Mitchell, Y. Wang, M. Izygon, J. Pye, and G. Zhu, "Modeling receiver flux of commercial power tower concentrating solar power plants using ray tracing: a round-robin comparison of SolTrace, Solstice, and TieSOL," Solar Energy, vol. 300, Art. no. 113785, 2025, DOI: 10.1016/j.solener.2025.113785.

[10] L. Jadhav, P. Gadiya, J. Girnar, H. Bhusal, and P. Gadhe, "Numerical analysis using SolTrace software to determine the size and position of a central receiver for ganged heliostat system," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 1042, no. 1, Art. no. 012015, 2022, DOI: 10.1088/1755-1315/1042/1/012015.

[11] P. Richter and F. Hövelmann, "Computationally fast analytical ray-tracer for central receiver systems," in AIP Conference Proceedings, vol. 2445, Art. no. 030019, 2022, DOI: 10.1063/5.0085714.

[12] L. Li, Y. Zhang, H. Li, R. Liu, and P. Guo, "An optimized approach for solar concentrating parabolic dish based on particle swarm optimization-genetic algorithm," Heliyon, vol. 10, no. 4, Art. no. e26165, 2024, DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26165.

[13] K. H. Kumar, D. S. Reddy, and M. Karmakar, "Optical modeling of a cylindrical-hemispherical receiver for parabolic dish concentrator," Environmental Science and Pollution Research, vol. 30, no. 22, pp. 63121–63134, May 2023, DOI: 10.1007/s11356-023-26432-4.

[14] E. H. El-Gamal, M. Emran, O. Elsamni, M. Rashad, and O. Mokhiamar, "Parabolic Dish Collector as a New Approach for Biochar Production: An Evaluation Study," Applied Sciences, vol. 12, no. 24, Art. no. 12677, 2022, DOI: 10.3390/app122412677.

[15] H. S. Al-Arab, "Analyzes and compares the optical characteristics for two types of solar dish concentrators," Journal of Optics, 2024, DOI: 10.1007/s12596-024-02278-y.

[16] D. Banitia, S. Ramachandran, S. S. Bhogilla, and P. K. Vijayan, "Mathematical modeling and optical-thermal analysis of a novel solar beam down parabolic dish concentrator," Solar Compass, vol. 15, Art. no. 100137, 2025, DOI: 10.1016/j.solcom.2025.100137.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.28584 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 66- 88

[17] N. Zhang, N. Huang, and C. Gong, "Improved Monte Carlo ray-tracing algorithm based on importance sampling," Journal of Physics: Conference Series, vol. 2700, no. 1, Art. no. 012005, 2024, DOI: 10.1088/1742-6596/2700/1/012005.

[18] G. Canneto, I. Balog, P. Di Ascenzi, and G. Caputo, "Analysis of Experimental Data from a Concentrating Parabolic Solar Plant and Comparison with Simulation Model Results," Energies, vol. 18, no. 12, Art. no. 3161, 2025, DOI: 10.3390/en18123161.

[19] S. Y. Khan, M. Uzair, and U. Allauddin, "Coupled optical-thermal performance enhancement of solar parabolic dish system using a hemiellipsoidal tubular receiver," Renewable Energy, vol. 256, Part F, Art. no. 124434, 2026, DOI: 10.1016/j.renene.2025.124434.

[20] N. ur Rehman and M. Uzair, "Hybrid ray-tracing model for solar energy assessment and its open-source implementation as a service," Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 49, no. 2, pp. 289–300, 2025, DOI: 10.1139/tcsme-2024-0044.

[21] M. Reeze, M. A. Veerman, and C. C. van Heerwaarden, "Machine learning-based denoising of surface solar irradiance simulated with Monte Carlo ray tracing," Journal of Geophysical Research: Machine Learning and Computation, vol. 2, Art. no. e2024JH000515, 2025, DOI: 10.1029/2024JH000515.

[22] R. Winston, J. C. Miñano, and P. Benítez, Nonimaging Optics. Burlington, MA, USA: Elsevier Academic Press, 2005.

[23] F. M. Boora, J. Ebrahimpourboura, and M. Sheikholeslami, "Machine learning technique for optimization of solar unit equipped with a novel design tube filled with nanofluid," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 166, Part A, Art. no. 113544, 2026, DOI: 10.1016/j.engappai.2025.113544.

[24] Y. Zheng, L. Li, S. Dai, D. Liu, H. Zheng, S. Yang, Y. Guo, M. Rafique, B. Wang, C.-H. Wang, and Y. Shuai, "Monte-Carlo ray tracing simulation of view factors for diffuse solar radiation determination in cylindrical photobioreactor arrays for microalgae cultivation," Bioresource Technology, vol. 436, Art. no. 132813, 2025, DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132813.

[25] J. Yan, Y.-X. Liu, and Y.-D. Peng, "Study on the optical performance of novel dish solar concentrator formed by rotating array of plane mirrors with the same size," Renewable Energy, vol. 195, pp. 416–430, 2022, DOI: 10.1016/j.renene.2022.06.005.

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Enfoque experimental óptico para la emulación del comportamiento direccional del beamforming de radiofrecuencia para el estudio de la captación inalámbrica de energía

An optical experimental approach for emulating the directional behavior of radio-frequency beamforming for wireless energy harvesting studies

E. Gutiérrez[1], C. Castorena[2] *, J. A. De Rus[2], S. Roger[2], C. Botella-Mascarell[2]
(*carlos.castorena@uv.es)

Recibido: 16 de septiembre de 2026 Aceptado: 13 de octubre de 2026

Resumen

La generación de haces de radiofrecuencia mediante beamforming permite dirigir la potencia transmitida hacia determinadas regiones del espacio, lo que resulta de interés en aplicaciones de captación inalámbrica de energía y gestión de la energía disponible en dispositivos. En estos sistemas, conocer cómo varía la potencia recibida según la posición y orientación del receptor es relevante para estudiar las condiciones de disponibilidad energética y las decisiones asociadas a su administración. Aunque este comportamiento puede analizarse mediante modelos matemáticos y simulaciones numéricas, su estudio experimental mediante sistemas de radiofrecuencia requiere hardware específico para generar, controlar y medir los haces, lo que puede resultar costoso cuando se necesitan múltiples condiciones de operación. En este trabajo se propone un enfoque experimental óptico para emular la potencia de radiofrecuencia que estaría disponible en diferentes posiciones y orientaciones respecto a un haz generado mediante beamforming. El sistema utiliza una fuente luminosa para generar un haz dirigido y un receptor óptico para registrar su distribución angular. La propuesta no busca reproducir la transferencia de energía ni la física electromagnética del haz de radiofrecuencia, sino proporcionar una representación experimental de su potencia recibida equivalente. Para ello, las lecturas del receptor óptico se relacionan mediante una función empírica con la potencia proporcionada por un modelo matemático de radiofrecuencia. Los resultados muestran que el sistema óptico permite

[1]Tecnológico Nacional de México, Campus Toluca, Toluca, Estado de México, México.
[2]Universitat de València, Departamento de Informática, València, España.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29503 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 89- 105

representar experimentalmente determinadas características direccionales del modelo de referencia de radiofrecuencia, particularmente la dirección del máximo y la magnitud de la potencia recibida, bajo las condiciones evaluadas.

Palabras clave: haces de radiofrecuencia, distribución angular, captación inalámbrica de energía

Abstract

The generation of radio-frequency beams through beamforming enables transmitted power to be directed toward specific regions of space, which is of interest in wireless energy harvesting and in managing the energy available to devices. In these systems, understanding how the received power varies with the position and orientation of the receiver is relevant for studying energy availability conditions and the decisions associated with energy management. Although this behavior can be analyzed using mathematical models and numerical simulations, its experimental study using radio-frequency systems requires specific hardware to generate, control, and measure the beams, which can become costly when multiple operating conditions need to be investigated. This work proposes an optical experimental approach to emulate the radio-frequency power that would be available at different positions and orientations with respect to a beam generated through beamforming. The system uses a light source to generate a directed beam and an optical receiver to record its angular distribution. The proposed approach does not seek to reproduce energy transfer or the electromagnetic physics of the radio-frequency beam, but rather to provide an experimental representation of its equivalent received power. To this end, the optical receiver readings are related through an empirical function to the power provided by a mathematical radio-frequency model. The approach is evaluated by comparing the amplitude, angular position, and angular width of the optical and radio-frequency distributions. The results show that the optical system can experimentally represent selected directional characteristics of the RF reference model, particularly the peak direction and received-power magnitude, under the evaluated conditions.

Keywords: *radio-frequency beams, angular distribution, wireless energy harvesting*

Introduction

Beamforming is a fundamental technique in radio-frequency (RF) systems for controlling the spatial distribution of transmitted energy. By appropriately controlling the signals radiated by multiple antenna elements, transmitted power can be concentrated toward selected spatial or angular regions [1]. This capability is used in communications, localization [2, 3], sensing [4], wireless power transfer [5], and RF energy harvesting [6, 7].

In RF energy harvesting, the power available at a receiving device depends not only on the transmitted

power and propagation conditions, but also on the spatial distribution of the transmitted energy [8]. Beam direction, spatial alignment, and beam width can therefore affect the energy collected by a receiver [9], particularly when multiple receivers or changing device positions are considered. Characterizing the spatial behavior of directional beams is thus relevant for understanding the power available to energy-harvesting devices under different physical conditions.

Beamforming behavior can be studied using mathematical models and numerical simulations [10, 11], which allow different antenna configurations, transmission powers, distances, and beam directions to be evaluated without a physical implementation. However, experimental conditions may introduce positioning errors, angular misalignment, measurement noise, channel uncertainty, and hardware nonidealities that are not fully represented by idealized models. Direct experimental characterization with RF hardware can capture these effects, but requires systems for generating, controlling, and measuring directional transmission [12, 13]. Such implementations may involve antenna arrays, RF sources, phase or amplitude control, power amplifiers, receivers or rectennas, and measurement instrumentation, making extensive measurement campaigns demanding.

To provide a lower-complexity experimental alternative, this work proposes an optical approach for studying selected observable characteristics of an RF beam generated through beamforming. A directional light source and an optical receiver are used to measure an angular response that experimentally represents beam direction, angular position, and angular width. The optical measurements are related to a mathematical RF model through an empirical correspondence function, allowing the measured optical response to be expressed as an equivalent RF received-power value. Because the measurements are obtained from a physical setup, experimental effects such as positioning errors, angular misalignment, measurement noise, and other nonidealities can also be incorporated into the evaluation.

Optical technologies have previously been investigated for directional wireless energy transmission, beam steering, and beam shaping. Optical wireless power transfer systems with dynamic beam steering have been demonstrated [14], as have approaches for controlling optical beam shape for wireless power transmission [15]. Optical technologies have also been incorporated into RF wireless power transfer systems for target detection and positioning, enabling RF transmission to adapt to receiver location [16].

The role of the optical system proposed here is fundamentally different. The optical beam is neither used as an energy carrier, nor to generate or control the RF signal, nor to locate the receiver. Instead, it serves as an experimental analogue of selected observable characteristics of a directional RF beam. Its measured angular distribution is empirically related to RF received power using a mathematical RF model as reference, without assuming electromagnetic or physical equivalence between the two systems. The main contribution is therefore the experimental demonstration and evaluation of this optical analogue as a lower-

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29503 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 89- 105

complexity means of studying selected directional characteristics of RF beamforming, particularly the power available at receiving locations in wireless energy harvesting and energy management applications. The proposed platform also provides an accessible tool for scientific and technological education, enabling the experimental exploration of directional beam characteristics and spatial power availability without requiring specialized RF hardware.

RF Beamforming Model

The purpose of the RF model is to describe how the power available at a receiving location varies as the direction of the transmitted beam is changed. In this work, the analysis considers a two-dimensional configuration based on a uniform linear array (ULA), in which the beam can be steered within a single plane. The transmitter (TX) is represented by a ULA with N_{tx} antenna elements, while the receiver (RX) is represented by a single receiving antenna located at a distance d from the TX and at an angular position ϕ with respect to the TX. The direction toward which the transmitted beam is steered is denoted by θ. Thus, ϕ describes the position of the receiver, whereas θ describes the direction of the transmitted beam. The considered geometry and the corresponding angular received-power response are illustrated in Figure 1.

The TX operates at a carrier frequency f_c, which determines the free-space wavelength $\lambda = c/f_c$, where c denotes the speed of light in free space. The ULA is configured with an inter-element spacing of $\lambda/2$, a conventional configuration for phased-array beamforming that avoids grating lobes over the visible angular region under the ideal array model [17]. To describe how the array responds to different spatial directions, it is necessary to represent the phase relationship between the signals observed at the individual

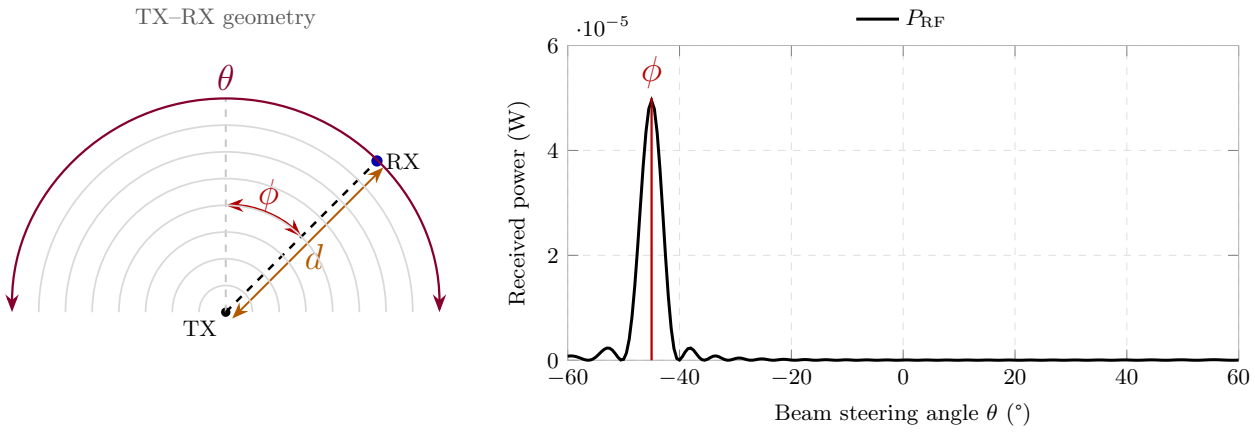


FIGURA 1. TX–RX geometry and corresponding angular received-power response for the two-dimensional ULA configuration considered in this work. The RX is located at a TX–RX distance d and angular position ϕ with respect to the TX, while θ denotes the beam steering direction. For a fixed receiver position, sweeping θ produces the angular RF received-power response P_{RF}.

antenna elements for a given direction. This directional dependence is represented by the steering vector. For a generic angular direction ψ, the normalized steering vector of the ULA is defined in Eq. (1) as follows:

$$\mathbf{a}(\psi) = \frac{1}{\sqrt{N_{tx}}} \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\pi \sin(\psi)} & \cdots & e^{-j\pi(N_t-1)\sin(\psi)} \end{bmatrix}^T. \tag{1}$$

The angle ψ represents a generic spatial direction, while $\mathbf{a}(\psi)$ describes the phase progression across the array elements associated with that direction. The normalization ensures that $\|\mathbf{a}(\psi)\|^2 = 1$, separating the directional response from the overall transmitted-power scale. The steering vector provides a representation of the spatial response of the array for a given direction. In the considered configuration, two directions are of particular interest: the angular position of the RX, ϕ, and the beam steering direction, θ. Their spatial relationship can be quantified through the inner product between the corresponding steering vectors, presented in Eq. (2).

$$\mathbf{a}^H(\phi)\mathbf{a}(\theta). \tag{2}$$

Where $(\cdot)^H$ denotes the Hermitian transpose, i.e., the complex conjugate transpose. Thus, $\mathbf{a}^H(\phi)\mathbf{a}(\theta)$ provides a scalar measure of the spatial alignment between the RX direction ϕ and the beam steering direction θ. The magnitude of this inner product is maximized when the steering direction coincides with the RX angular position, i.e., when $\theta = \phi$. As θ is varied for a fixed ϕ, the magnitude of this term describes how strongly the transmitted beam is spatially aligned with the RX direction and therefore determines the angular variation of the received-power response. The propagation between the TX and RX is modeled as a single line-of-sight (LOS) free-space path. Its complex propagation coefficient is given by Eq. (3).

$$g(d) = \frac{\lambda}{4\pi d} e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}}. \tag{3}$$

Where d is the TX–RX distance. The magnitude of $g(d)$ describes the attenuation associated with free-space propagation, while its phase represents the propagation delay. This formulation follows the free-space propagation relationship underlying the Friis transmission model and its extensions to multiport and beamformed antenna systems [18]. Combining the spatial alignment of the array with the free-space propagation coefficient, the received RF power for a transmitted power P_{tx} is modeled in Eq. (4) as:

$$P_{\mathrm{RF}}(\theta, \phi, d) = P_{tx} N_{tx} \left| g(d)\mathbf{a}^H(\phi)\mathbf{a}(\theta) \right|^2. \tag{4}$$

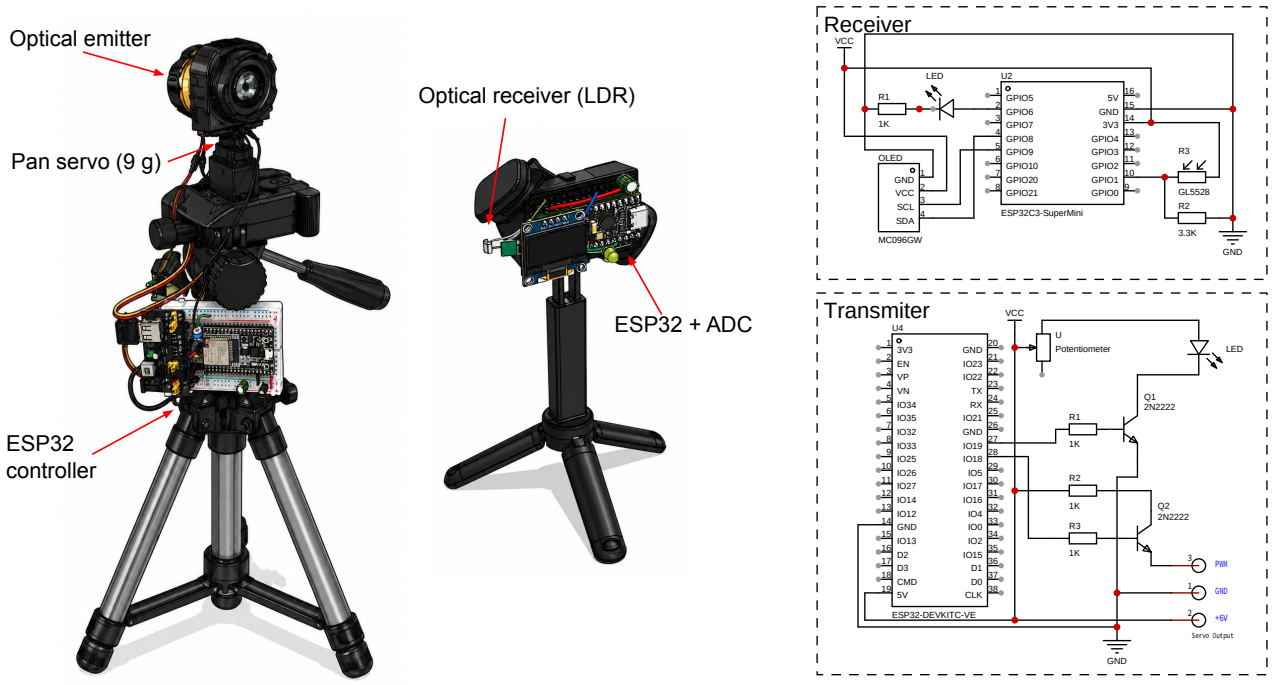
https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29503 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 89- 105

Here, P_{tx} denotes the transmitted power associated with each antenna element, while the factor N_{tx} accounts for the total transmitted power of the array under the adopted normalization. The expression contains two main contributions to the received-power response. The term $|g(d)|^2$ determines the distance-dependent magnitude through free-space propagation, whereas the term $|\mathbf{a}^H(\phi)\mathbf{a}(\theta)|^2$ determines the angular behavior through the spatial alignment between the RX direction and the beam steering direction. Therefore, for a fixed TX–RX distance, varying θ changes the angular response without modifying the propagation loss. Conversely, changing d modifies the received-power magnitude through the free-space propagation term. The RF reference considered in this work is an ideal ULA model under free-space LOS propagation, rather than measurements from a physical RF antenna array.

EXPERIMENTAL OPTICAL SYSTEM AND RF–OPTICAL CORRESPONDENCE

Experimental Optical Platform

The proposed experimental platform consists of an optical transmitter and an optical receiver designed to provide an experimental representation of selected observable characteristics of the angular behavior of a directional RF beam. The complete platform is shown in Figure 2, where the physical implementation is



(a) Physical implementation. (b) Electrical circuit.

FIGURA 2. Experimental optical platform used to characterize the proposed RF–optical correspondence. (a) Physical implementation of the optical transmitter and receiver. (b) Electrical circuit of the experimental platform.

presented in Figure 2(a) and the corresponding electrical circuits are shown in Figure 2(b). The platform is implemented using two ESP32-based control units: one associated with the optical transmitter and the angular positioning mechanism, and the other associated with the optical receiver and data acquisition.

The optical transmitter consists of a low-cost commercial flashlight containing three LEDs, nominally operating at $4{,}5$ V, mounted on a 9 g pan servo. The servo allows the direction of the emitted beam to be varied by changing its angular position. The flashlight incorporates a movable focusing lens that allows the beam divergence to be adjusted approximately between 5° and 15° by changing the distance between the lens and the LEDs. The optical emitter is driven through a transistor stage, and a potentiometer is included in the transmitter circuit to adjust its operating condition. The servo was controlled using angular increments of 1°, corresponding to the angular sampling step used in the experimental measurements. This increment represents the commanded angular step rather than an independently measured mechanical positioning resolution. The electrical implementation of these elements is shown in the transmitter circuit of Figure 2(b). By changing the servo position, the direction of the optical beam can be varied over a predefined angular range (θ), while the adjustable lens allows its angular width to be controlled. These two degrees of control provide an experimental means of varying the beam direction and angular width corresponding to the steering-angle and beam-width characteristics considered in the RF model.

The optical receiver consists of an LDR connected to an ESP32-C3 for analog signal acquisition. During the experiments, the receiver is placed at a prescribed TX–RX distance d and angular position ϕ with respect to the transmitter, following the geometry defined in the RF model. The LDR is incorporated into a voltage-divider circuit with a $3{,}3$ kΩ resistor, and the resulting voltage is measured through an analog input of the ESP32-C3. The receiver circuit also includes an LED used as a local indicator and an OLED display connected through an I^2C interface for monitoring the measurement system. The physical implementation of the receiver and its corresponding electrical circuit are shown in Figure 2(a) and Figure 2(b), respectively. During an angular measurement, the receiver remains at the prescribed position (d, ϕ) while the transmitter changes the orientation of the optical emitter over the selected angular range. The receiver records the response of the LDR as an ADC value at each angular position. Consequently, the receiver provides a measurement of the optical response for a given TX–RX distance and receiver angular position rather than a direct measurement of RF power.

RF–Optical Correspondence

The optical receiver provides a measured ADC value for each experimental configuration defined by the beam steering angle θ, receiver angular position ϕ, and TX–RX distance d. This measured value is denoted as $ADC_{\theta,\phi,d}$. The purpose of the RF–optical correspondence is to establish an empirical relationship between the optical measurements and the RF received power $P_{\mathrm{RF}}(\theta, \phi, d)$ obtained from the mathematical model in Eq. (4), considering the same experimental configuration (θ, ϕ, d). The corresponding quantity

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29503 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 89- 105

obtained from the optical measurements is later denoted as P_{OP} and represents an equivalent RF-power value expressed on the scale of the RF reference model.

The calibration measurements are acquired at three TX–RX distances, $d = 1{,}0$, $1{,}5$, and $2{,}0$ m. For the calibration configurations, the receiver is positioned at $\phi = 0°$, while the optical emitter is swept over $\theta = -20°$ to $\theta = 20°$ in $1°$ increments. The choice of $\phi = 0°$ is made to establish the RF–optical correspondence under a reference alignment condition. In the RF model, changing the relative angular alignment between the RX position ϕ and the beam steering direction θ can modify not only the amplitude of the received-power response but also its angular width and shape. The optical system considered in this work does not provide an equivalent mechanism for reproducing this dependence: the angular width of the optical beam is determined by the emitter lens and remains approximately constant as the beam is steered. Consequently, the correspondence is established for the reference condition $\phi = 0°$, where the optical system can be adjusted to reproduce the angular width of the corresponding $N_{tx} = 32$ antenna RF response. The RF frequency is likewise fixed because the spatial response of the array and the propagation characteristics depend on the carrier frequency. In this work, the RF reference model is therefore limited to $f_c = 2{,}4$ GHz, and the optical beam is adjusted to represent the directional response associated with this configuration. The transmitter and receiver are positioned in the same horizontal plane using a laser level to reduce geometric misalignment during the measurements.

The measured ADC response is affected by measurement noise and experimental variations. To reduce the influence of individual deviations when estimating the quantities required for calibration, the measured values $ADC_{\theta,\phi,d}$ obtained during each angular sweep are fitted to a Gaussian distribution with an offset, following Eq. (5).

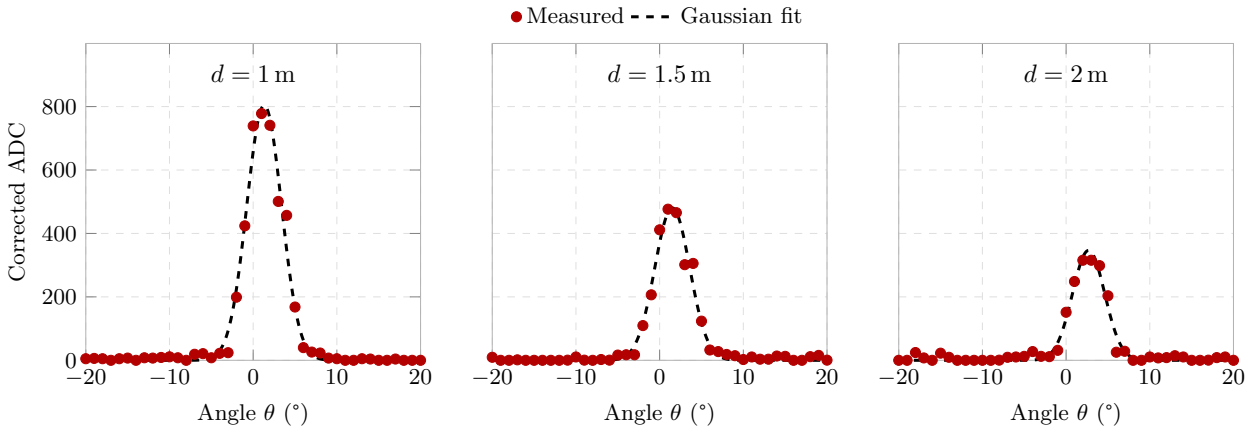


FIGURA 3. Measured corrected ADC response and Gaussian fit for the three TX–RX distances considered.

$$ADC^{\text{fit}}_{\phi,d}(\theta) = B_{\phi,d} + A_{\phi,d} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta - \mu_{\phi,d}}{\sigma_{\phi,d}}\right)^2\right]. \tag{5}$$

Where $B_{\phi,d}$ represents the estimated measurement floor, $A_{\phi,d}$ is the amplitude of the directional response above this floor, $\mu_{\phi,d}$ is the angular position of the maximum response, and $\sigma_{\phi,d}$ represents its angular spread. Figure 3 shows the measured responses and their corresponding Gaussian fits for the three TX–RX distances considered during calibration. The fitted distributions provide a representative description of the measured angular response while reducing the influence of individual deviations in the ADC measurements.

The calibration is based on the maximum amplitude $A_{\phi,d}$ obtained from each fitted angular distribution. For each experimental condition, the corresponding transmitted power P_{tx} and TX–RX distance d are associated with the measured amplitude $A_{\phi,d}$, while the RF received power is calculated from the mathematical model in Eq. (4).

The empirical RF–optical correspondence is obtained by fitting the RF reference power to the optical response amplitude according to $P_{\text{OP}}(0, \phi, d) = \alpha P_{tx} \left[A_{\phi,d}\right]^{\beta} \approx P_{\text{RF}}(0, \phi, d)$, where α and β are empirical parameters obtained from the calibration. The transmitted power $P_t x$ is maintained as a multiplicative factor because the RF received-power model in Eq. (4) is linear with respect to $P_t x$ under the adopted formulation. Consequently, the nonlinear dependence between the optical response amplitude and the RF-power scale is represented by β.

The calibration campaign uses 20 transmitted-power levels, from $0{,}25$ to $5{,}0$ W in increments of $0{,}25$ W, for each of the three TX–RX distances, resulting in 60 calibration conditions. For each condition, the maximum amplitude $A_{\phi,d}$ obtained from the corresponding Gaussian fit is paired with the RF received power calculated using the same transmitted power and TX–RX distance.

Since the RF reference power depends on the TX–RX distance, the uncertainty associated with the distance measurement is incorporated into the calibration procedure. For each Monte Carlo realization, the nominal distance associated with each experimental configuration is perturbed according to its corresponding measurement uncertainty, and the RF received power is recalculated using the perturbed distance. The resulting RF reference values are then paired with the corresponding optical amplitudes and used to repeat the calibration.

The empirical parameters are obtained by solving the nonlinear least-squares problem presented in Eq. (6).

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29503 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 89- 105

$$(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \arg\min_{\alpha,\beta} \sum_{i=1}^{60} \left[P_{\mathrm{RF},i} - \alpha P_{tx,i} \left(A_{\phi_i,d_i} \right)^{\beta} \right]^2 . \tag{6}$$

Where i denotes the calibration condition. For each Monte Carlo realization, the perturbed distances are used to recalculate the 60 RF reference powers, after which the nonlinear regression is solved to obtain a corresponding pair $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$. Repeating this procedure produces distributions of the calibration parameters that quantify the sensitivity of the empirical correspondence to the uncertainty in the TX–RX distance. This Monte Carlo analysis focuses on transmitter–receiver distance uncertainty and does not represent a complete uncertainty budget for the experimental platform. Additional sources of variability include servo positioning, optical alignment, LDR response, ambient illumination, ADC quantization, and emitter stability.

Results and Discussion

RF–Optical Correspondence Calibration

The effect of the TX–RX distance uncertainty on the empirical correspondence parameters is shown in Figure 4. The Monte Carlo analysis produces well-defined distributions for both $\hat{\alpha}$ and $\hat{\beta}$, although their spreads are different. The distribution of $\hat{\alpha}$ exhibits a larger relative dispersion and a positive skew, whereas the distribution of $\hat{\beta}$ is more concentrated around its central value. This difference is expected because $\hat{\alpha}$ primarily determines the overall power scale of the correspondence, making it more sensitive to variations in the RF reference power caused by the TX–RX distance. In contrast, $\hat{\beta}$ characterizes the nonlinear dependence between the ADC response and the RF-power scale and is less directly affected by a common scaling variation in the reference power.

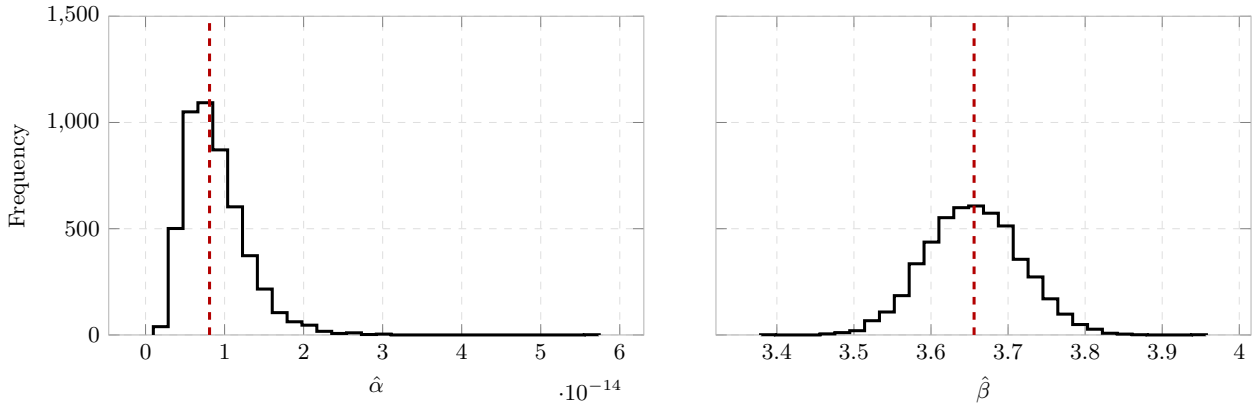


FIGURA 4. Monte Carlo distributions of the empirical RF–optical correspondence parameters. The dashed red lines indicate the median values of (a) $\hat{\alpha}$ and (b) $\hat{\beta}$.

The median values obtained from the Monte Carlo distributions are $\hat{\alpha} = 8{,}0978 \times 10^{-15}$ and $\hat{\beta} = 3{,}6559$. These values are used as the nominal parameters of the RF–optical correspondence for the subsequent analysis. The use of the median is appropriate for the present uncertainty analysis because the resulting parameter distributions, particularly that of $\hat{\alpha}$, are not perfectly symmetric. Therefore, the median provides a representative central value without requiring the distribution to be symmetric around its center.

Using these parameters, the maximum equivalent RF power obtained from the optical measurements is compared with the maximum RF received power calculated from the reference model. Figure 5 presents the resulting relationship for the 60 calibration conditions. The 20 RF transmit-power levels were introduced numerically, while the optical emitter intensity remained fixed. Thus, these levels do not represent independent optical measurements. The experimental component of the calibration lies in the variation of the transmitter–receiver distance, which produces measurable changes in the received optical response even at a fixed emitter intensity. The measurements cover the three TX–RX distances and the complete range of transmitted powers considered in the calibration. The points remain closely grouped

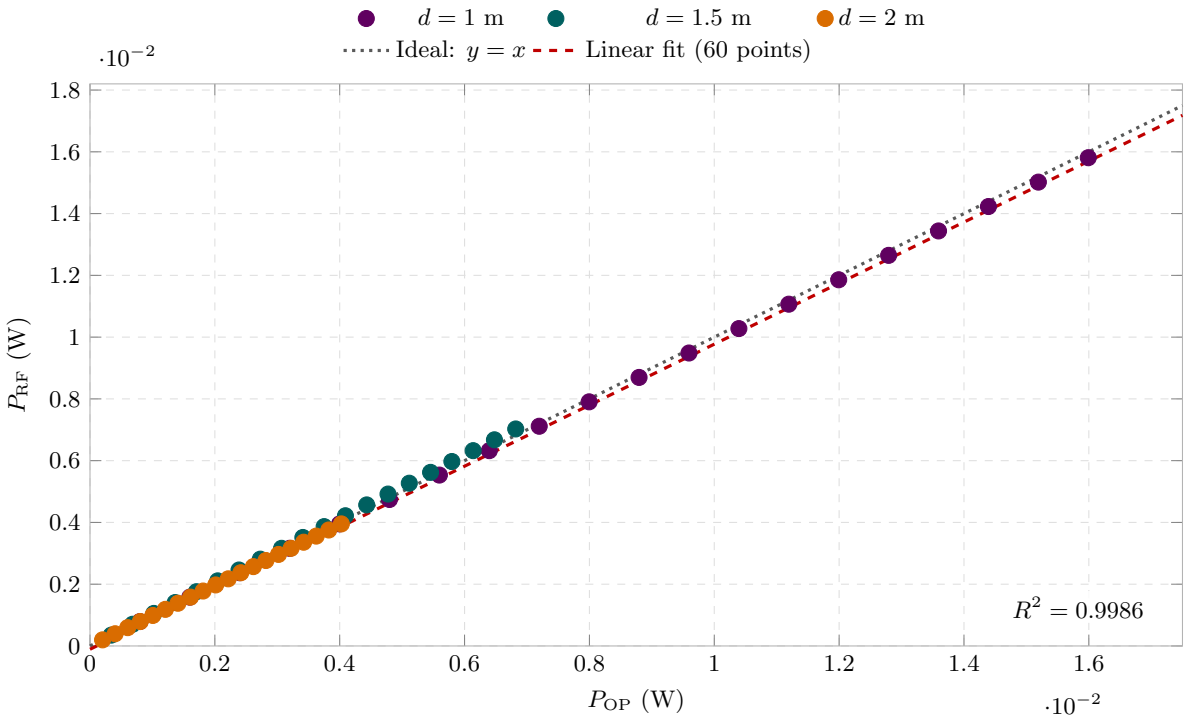


FIGURA 5. Comparison between the maximum equivalent RF received power, P_{OP}, obtained from the optical measurements and the maximum RF received power, P_{RF}, obtained from the reference model. The 60 calibration points correspond to three TX–RX distances and 20 transmitted-power levels at each distance. Point colors indicate the TX–RX distance. The dotted line represents the ideal unit-slope relationship, while the dashed red line represents the linear regression obtained from all 60 points.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29503 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 89- 105

around the identity relationship, indicating that the optical measurements can be mapped to the RF power scale over the evaluated operating range.

A linear regression of the maximum values gives a slope of $0{,}9878$, an intercept of $-1{,}0661 \times 10^{-4}$ W, and a coefficient of determination of $R^2 = 0{,}9986$. The slope is close to unity, indicating that the variation of the equivalent RF power obtained from the optical measurements follows the variation of the RF reference power with a small deviation in scale. The intercept is small compared with the maximum power values considered in the calibration, while the coefficient of determination indicates that the linear relationship accounts for almost all of the observed variation in the 60 calibration points.

The agreement between P_{OP} and P_{RF} reflects the consistency of the calibrated power mapping across the evaluated distances and numerically introduced RF transmit-power levels. The result therefore indicates that the empirical function is able to establish a consistent power-scale correspondence across the evaluated conditions. In particular, the near-unity regression slope shows that the calibrated optical response preserves the dependence of the maximum equivalent received power on the transmitted-power and distance conditions represented by the RF model.

The regression result, however, should be interpreted as a validation of the amplitude correspondence rather than as evidence of electromagnetic equivalence between the optical and RF systems. The optical receiver does not measure RF power directly; instead, the optical ADC response is transformed through the empirically calibrated function. The high value of R^2 therefore indicates the consistency of this empirical mapping with the RF reference model over the calibration conditions, rather than equivalence between the underlying physical mechanisms.

The calibration establishes the amplitude correspondence required to express the optical measurements on the RF-power scale. It does not, by itself, demonstrate that the optical system reproduces the complete directional behavior of the RF beam. This aspect requires comparison of the angular distributions, including their peak position and angular width, which is considered in the following subsection.

Experimental Validation of the Optical Approach

The results in Table 1 show that the angular position of the optical response remains close to the position predicted by the RF model for the six evaluated conditions. Except for E2, where the difference is $2{,}321°$, the absolute peak-position error remains below $1°$, with errors below $0{,}01°$ for E5 and E6. This indicates that the proposed optical representation preserves the angular location of the directional response over the evaluated range of receiver positions. The largest angular deviation was observed for configuration E2 ($2{,}321°$). This discrepancy may result from a combination of servo positioning uncertainty, mechanical alignment, and the optical beam characteristics. Since these contributions were not independently characterized, the deviation cannot be attributed to a single source.

Tabla 1. Experimental validation results for the six measurement conditions. The optical and RF peak positions are denoted by μ_{OP} and μ_{RF}, respectively. The position error is defined as $\mu_{\mathrm{OP}} - \mu_{\mathrm{RF}}$. The amplitude error and angular widths are obtained from the corresponding optical and RF power distributions.

Test	d (m)	ϕ (deg)	P_{tx} (W)	μ_{OP} (deg)	μ_{RF} (deg)	$\Delta\mu$ (deg)	E_A (%)	$\mathrm{FWHM}_{\mathrm{OP}}$ (deg)	$\mathrm{FWHM}_{\mathrm{RF}}$ (deg)
E1	1.0	-50	1	$-50{,}667$	$-49{,}997$	$-0{,}680$	$4{,}416$	$2{,}178$	$4{,}922$
E2	1.2	-35	1	$-32{,}667$	$-34{,}992$	$2{,}321$	$-5{,}016$	$2{,}178$	$3{,}841$
E3	1.4	-10	1	$-9{,}000$	$-9{,}983$	$0{,}983$	$-9{,}539$	$2{,}396$	$3{,}161$
E4	1.6	10	1	$10{,}667$	$9{,}983$	$0{,}684$	$-4{,}544$	$2{,}396$	$3{,}161$
E5	1.8	35	1	$35{,}000$	$34{,}992$	$0{,}008$	$4{,}137$	$2{,}396$	$3{,}841$
E6	2.0	50	1	$50{,}000$	$49{,}997$	$0{,}003$	$3{,}333$	$2{,}178$	$4{,}922$

The amplitude comparison presents a larger variability than the peak-position comparison. For E1–E6, the amplitude error (E_a) remains within approximately $10\,\%$. This difference should not be interpreted exclusively as an error introduced by the RF–optical correspondence. The optical measurements are affected by the experimental conditions under which each dataset is acquired, including the background optical level, measurement noise, positioning uncertainty, and other nonidealities of the experimental setup. Consequently, the amplitude discrepancy represents the combined effect of the correspondence approximation and the physical and measurement conditions present during the experiment.

This behavior is consistent with the purpose of the proposed experimental approach. Rather than attempting to reproduce an ideal RF beamforming response under controlled numerical conditions, the optical system provides a physical measurement of the directional response under the conditions present during the experiment. Variations in the measured amplitude can therefore contain information associated with environmental and experimental factors that are not explicitly represented in the ideal RF model. In this sense, the observed differences are not necessarily undesirable, since they provide an experimentally accessible representation of deviations in the power available at the receiving location.

The angular widths are characterized using the full width at half maximum (FWHM), defined as the angular separation between the two points at which the response reaches half of its maximum value. The measured optical FWHM ranges from $2{,}178^\circ$ to $2{,}396^\circ$, whereas the RF model produces values between $3{,}161^\circ$ and $4{,}922^\circ$. This difference indicates that, although the optical approach preserves the angular position of the main response, the angular spread is not reproduced with the same magnitude in all evaluated conditions. Therefore, the optical representation should be understood as an experimental analogue of selected directional characteristics rather than as a complete reproduction of the RF beam pattern.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29503 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 89- 105

Figure 6 provides a direct visualization of the agreement between the optical and RF responses. In all six cases, the main optical response is located close to the maximum of the corresponding RF distribution, despite the different receiver positions and distances. The optical curves also reproduce the localized nature of the directional response, although their angular widths differ from those predicted by the RF model. The differences in amplitude are more pronounced than the differences in angular position, particularly for conditions in which the RF reference power becomes small. These results further support the interpretation of the optical system as an experimental representation of selected observable beam characteristics rather than a physically equivalent RF system.

The experimental validation was conducted using six receiver configurations with different angular positions and transmitter–receiver distances, distinct from the reference calibration direction. The RF comparison was restricted to an ideal 32-element ULA operating at 2.4 GHz under LOS propagation. Therefore, the reported results demonstrate the feasibility of representing selected directional characteristics within the evaluated configurations, rather than establishing general applicability to arbitrary RF beamforming systems.

To facilitate the use and reproducibility of the proposed approach, a web-based application was developed for RF–optical calibration and experimental evaluation. The application allows users to upload optical measurements, estimate the empirical parameters α and β, compare new measurements with the RF reference model, and export the resulting power distributions for further analysis. The application is publicly available at https://www.uv.es/carcasla/proyectos/rf_optical_web/in

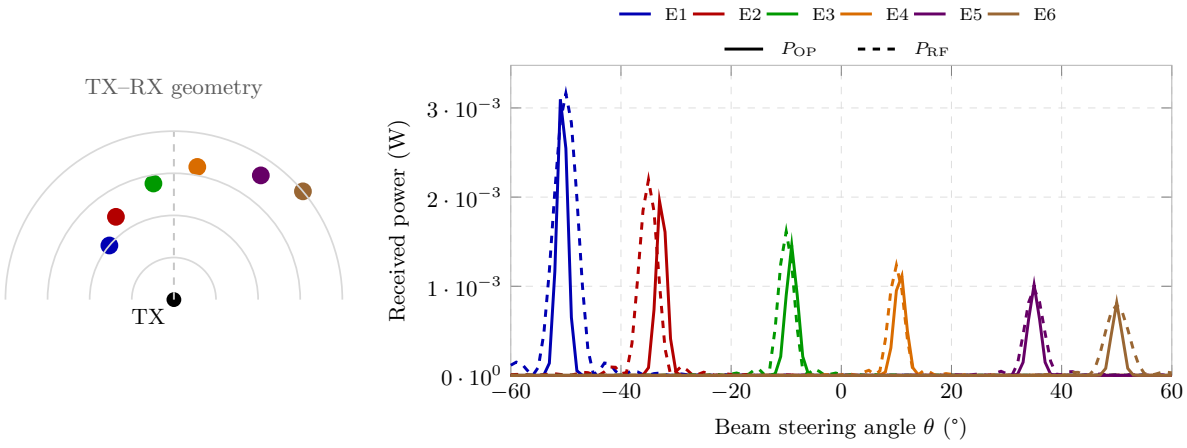


FIGURA 6. Comparison of the equivalent optical and RF received-power responses. Each color identifies one experimental condition, whereas the solid and dashed line styles represent the equivalent optical response P_{OP} and the RF beamforming response P_{RF}, respectively. The six conditions cover TX–RX distances from 1,0 to 2,0 m and receiver angular positions from $-50°$ to $50°$.

dex.html.

CONCLUSION

This work presented an optical experimental approach for emulating selected observable characteristics of the directional behavior of an RF beam generated through beamforming, with particular interest in wireless energy harvesting and energy management applications. Rather than reproducing the electromagnetic behavior or energy-transfer mechanisms of the RF system, the proposed approach uses a directional optical beam and an optical receiver to represent the equivalent power available under different spatial and angular conditions. The empirical RF–optical correspondence yielded $\hat{\alpha} = 8{,}0978 \times 10^{-15}$ and $\hat{\beta} = 3{,}6559$, with a regression slope of $0{,}9878$ and $R^2 = 0{,}9986$, indicating a strong correspondence between the equivalent optical and RF power.

Experimental validation across six receiver positions showed that the optical system approximates both the angular position and the magnitude of the main response predicted by the RF reference model, while the most significant systematic discrepancies occur in the beamwidth, particularly in the FWHM. These differences also reflect experimental factors such as background illumination, measurement noise, positioning uncertainty, and angular misalignment. Overall, the results support the proposed optical system as a low-complexity experimental alternative for studying selected directional characteristics of RF beamforming and spatial power availability, particularly for wireless energy harvesting and energy management, within the characteristics that can be represented and validated through the established empirical correspondence. Since no experimental RF array measurements were performed, the reported correspondence is limited to the ideal RF reference model. Effects such as phase errors, antenna coupling, impedance mismatch, and hardware tolerances remain outside the scope of this study.

AUTHOR AND CONTRIBUTOR CONTRIBUTION STATEMENT

Eduardo Gutiérrez: Software, Methodology, Investigation, Validation, Experimentation, Writing – Original Draft. **Carlos Castorena**: Conceptualization, Methodology, Supervision, Project Administration, Writing – Original Draft. **Juan A. de Rus**: Technical support and assistance with the experimental work. **Sandra Roger**: Methodology, Writing – Review and Editing. **Carmen Botella**: Methodology, Supervision, Writing – Review and Editing.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Grants PID2023-148671OB-I00 and PLEC2024-011160, funded by MICIU/AEI/10.13039/501100011033 and by ERDF/EU. This research was also partially funded by the Generalitat Valenciana through the Prometeo project CIPROM/2026/037. The authors also gratefully acknowledge the Programa Interinstitucional para el Fortalecimiento de la Investigación y el Posgrado del

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29503 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 89- 105

Pacífico for its support through the Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico.

Referencias

[1] V. Venkateswaran and A.-J. van der Veen, "Analog beamforming in mimo communications with phase shift networks and online channel estimation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 8, pp. 4131–4143, 2010. DOI: 10.1109/TSP.2010.2048321

[2] G. K. J. Fischer, T. Schaechtle, A. Gabbrielli, J. Bordoy, I. Häring, F. Höflinger, and S. J. Rupitsch, "A systematic survey and comparative analysis of angular-based indoor localization and positioning technologies," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 28, pp. 3830–3869, 2026. DOI: 10.1109/COMST.2025.3567765

[3] M. Kaczyński, Z. Piotrowski, and D. Pietrow, "A survey of machine learning techniques for signal source localization and emitter tracking," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 198 390–198 409, 2025. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3629818

[4] W. Ma, L. Zhu, Y. Tan, B. Zheng, Y. Zhang, Y. Zhang, K. Ying, Z. Gao, H. Sun, X. Shao, Z. Xiao, D. Niyato, and R. Zhang, "A survey on reconfigurable and movable antennas for wireless communications and sensing," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 28, pp. 4842–4882, 2026. DOI: 10.1109/COMST.2026.3663021

[5] S. Claessens, K. Hammoud, P. Dhull, D. Schreurs, and S. Pollin, "Energy and pilot efficient beamforming for los wireless power transfer," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 10, pp. 1293–1307, 2026. DOI: 10.1109/TGCN.2025.3623642

[6] F. Silva, P. Pinho, and N. B. Carvalho, "Multibeam beamforming technology in microwave power transfer and harvesting," *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 5, no. 4, pp. 918–938, 2025. DOI: 10.1109/JMW.2025.3575342

[7] O. Martínez Rosabal, O. L. Alcaraz López, V. Dala Pegorara Souto, R. Demo Souza, S. Montejo-Sánchez, R. Schober, and H. Alves, "Wireless energy transfer beamforming optimization for intelligent transmitting surface," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 25, pp. 6332–6346, 2026. DOI: 10.1109/TWC.2025.3624479

[8] S. N. Arinze, E. R. Obi, S. H. Ebenuwa, and A. O. Nwajana, "Rf energy-harvesting techniques: Applications, recent developments, challenges, and future opportunities," *Telecom*, vol. 6, no. 3, 2025. DOI: 10.3390/telecom6030045

[9] M. Rybakowski, K. Bechta, C. Grangeat, and P. Kabacik, "Impact of beamforming algorithms on the actual rf emf exposure from massive mimo base stations," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 141 956–141 964, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3341623

[10] J. Hoydis, S. Cammerer, F. Ait Aoudia, M. Nimier-David, L. Maggi, G. Marcus, A. Vem, and A. Keller, "Sionna," 2022, https://nvlabs.github.io/sionna/.

[11] S.-P. Chen and H. Schmiedel, *RF Antenna Beam Forming*. Springer, 2023.

[12] M. Ahn, I. Park, I. Sohn, O.-S. Shin, and H. Ku, "Implementation of digital beamforming system for microwave power transfer with real-time beam scanning," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 27 280–27 289, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3253205

[13] N. R. Dusari, Shipra, and M. Rawat, "Digital beamforming with digital predistortion using xilinx rf soc zcu216," in *2022 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM)*, 2022, pp. 1–5. DOI: 10.1109/SPCOM55316.2022.9840819

[14] N.-L. Nguyen, K.-H. Nguyen, J. Nadeem, and J. Ha, "Dynamic beam steering for wireless optical power transfer in iot applications," *Optics Letters*, vol. 49, no. 8, pp. 2025–2028, 2024. DOI: 10.1364/OL.518243

[15] T. Moriyama *et al.*, "Beam shape control system with cylindrical lens optics for optical wireless power transmission," *Energies*, vol. 18, no. 9, p. 2310, 2025. DOI: 10.3390/en18092310

[16] W. Li, Q. Yu, J. H. Qiu *et al.*, "Intelligent wireless power transfer via a 2-bit compact reconfigurable transmissive-metasurface-based router," *Nature Communications*, vol. 15, p. 2807, 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-46984-4

[17] D. Lloria, S. Roger, C. Botella-Mascarell, and M. Cobos, "Deep-learning-based aoa and aod estimation in analog millimeter wave mimo systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 75, no. 6, pp. 10 200–10 210, 2026. DOI: 10.1109/TVT.2025.3637908

[18] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, May 1946. DOI: 10.1109/JRPROC.1946.234568

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Tratamiento biotecnológico de lactosuero con *Kluyveromyces marxianus*: reducción de la carga orgánica y valorización de subproductos

Biotechnological treatment of cheese whey with *Kluyveromyces marxianus*: organic load reduction and by-product valorization

L. Conde-Báez[1] *, C. A. Gómez-Aldapa[2], J. Castro-Rosas[2], C. F. Pineda-Muñoz[1]
(*lcondebaez@gmail.com)

Recibido: 16 de septiembre de 2026 Aceptado: 13 de octubre de 2026

Resumen

El lactosuero dulce es un subproducto de la industria quesera, que constituye un vertido de elevada carga orgánica (DQO: 50,000-55,000 mg O_2/L; DBO: 30-50 g/L) excediendo ampliamente los límites de descarga establecidos por la normativa ambiental mexicana. En el Valle de Tulancingo, Hidalgo, se estima que se generan alrededor de 80,000 L diarios de este efluente que se vierte sin tratamiento sobre suelos y cuerpos de agua, provocando eutrofización y disminución del oxígeno disuelto en los ecosistemas acuáticos receptores. Este trabajo evalúa la fermentación de lactosuero crudo con la levadura *Kluyveromyces marxianus* como estrategia de tratamiento biotecnológico optimizada mediante Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) con un Diseño Compuesto Central. Bajo condiciones óptimas (4.50 g/L de L-fenilalanina, 0.76 g/L de $(NH_4)_2SO_4$, 28 °C, pH 4.8), se alcanzó una remoción de DQO de hasta un 76 % en 96 horas y una remoción de lactosa del 99.4 %, transformando un efluente no apto para descarga, en un residuo ambientalmente manejable. El proceso genera simultáneamente 2-feniletanol (1.1 g/L), bioetanol (hasta 25.13 g/L) y acetato de isoamilo (0.923 g/L), subproductos de valor comercial que contribuyen a financiar el costo del tratamiento sin comprometer su función ambiental primaria. Los resultados demuestran que la fermentación con *K. marxianus* constituye una alternativa de tratamiento de bajo costo y alto co-beneficio para efluentes lácteos de elevada carga orgánica, con potencial de escalamiento en otras regiones queseras del país.

[1]Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Guerrero, Chilpancingo, Guerrero, México.
[2]Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, demanda química de oxígeno, valorización de residuos

ABSTRACT

Sweet cheese whey is a by-product of the dairy industry characterized by a high organic load (COD: 50,000-55,000 mg O_2/L; BOD: 30-50 g/L), far exceeding the discharge limits set by Mexican environmental regulations. In the Tulancingo Valley, Hidalgo, an estimated 80,000 L per day of this effluent are discharged untreated onto soils and water bodies, causing eutrophication and a reduction in dissolved oxygen in receiving aquatic ecosystems. This study evaluates the fermentation of raw sweet whey with the yeast *Kluyveromyces marxianus* as a biotechnological treatment strategy, optimized through Response Surface Methodology (RSM) using a Central Composite Design. Under optimal conditions (4.50 g/L L-phenylalanine, 0.76 g/L $(NH_4)_2SO_4$, 28 °C, pH 4.8), a COD removal of up to 76 % was achieved within 96 hours, along with a 99.4 % lactose removal, converting a discharge unsuitable for release into an environmentally manageable residue. The process simultaneously yields 2- phenylethanol (1.1 g/L), bioethanol (up to 25.13 g/L) and isoamyl acetate (0.923 g/L), commercially valuable by-products that help offset the cost of treatment without compromising its primary environmental function. The results show that *K. marxianus* fermentation is a low-cost, high co-benefit treatment alternative for high-organic-load dairy effluents, with scale-up potential in other cheese-producing regions of Mexico.

Keywords: wastewater treatment, chemical oxygen demand, waste valorization

INTRODUCCIÓN

La industria quesera genera como subproducto el lactosuero dulce, un efluente de elevada carga orgánica cuya disposición inadecuada constituye uno de los principales pasivos ambientales del sector lácteo en México. Se estima que, en el Valle de Tulancingo, Hidalgo, una de las principales cuencas queseras del país, se producen anualmente 164.25 millones de litros de lactosuero, de los cuales aproximadamente 80,000 litros diarios se vierten sin tratamiento previo sobre suelos agrícolas y cuerpos de agua [1]. Este vertido presenta valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de entre 50,000 y 55,000 mg O_2/L y de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de entre 30 y 50 g/L, cifras que exceden ampliamente los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas de aguas residuales en cuerpos receptores nacionales [2]. Estos valores son consistentes con los reportados internacionalmente para lactosuero de quesería, incluyendo caracterizaciones recientes en el este de África que confirman perfiles composicionales comparables en términos de lactosa y carga orgánica [3]. Las consecuencias documentadas de esta

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29710 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 106- 121

descarga no regulada incluyen consumo acelerado de oxígeno disuelto, eutrofización, formación de espumas y grasas flotantes, salinización de suelos y generación de olores desagradables, con impactos negativos sobre la biodiversidad acuática y la calidad de vida de las comunidades aledañas [4]. La diversidad de tratamientos convencionales desarrollados para los efluentes lácteos (lodos activados, lagunas de oxidación, tratamiento anaerobio, procesos electroquímicos, nanofiltración y el uso de nanomateriales avanzados) suelen generar elevados costos de operación sin generar ningún retorno económico, lo que impide su adopción por parte de productores queseros de pequeña y mediana escala. Cabe señalar que procesos convencionales como la digestión anaerobia pueden operar a menor costo relativo al no requerir la adición de oxígeno, incluso en lactosuero del mismo Valle de Tulancingo [5, 6]; sin embargo, no genera productos de valor comercial que retornen parte de la inversión operativa, a diferencia de las alternativas fermentativas dirigidas a la coproducción. Entre las alternativas de creciente interés se encuentra el tratamiento biotecnológico mediante fermentación microbiana, en el cual la remoción de carga orgánica ocurre como consecuencia directa del metabolismo microbiano, generando simultáneamente productos de valor comercial que pueden financiar parcial o totalmente el costo del tratamiento. La cepa de *Kluyveromyces marxianus* ITD00262 empleada en este trabajo expresa la enzima β-galactosidasa (LAC4) que le permite metabolizar directamente la lactosa del lactosuero sin pre-tratamientos costosos [7]. Trabajos previos del grupo de investigación han demostrado que esta levadura, al fermentar lactosuero dulce crudo bajo condiciones optimizadas, reduce significativamente la carga orgánica del efluente mientras genera 2-feniletanol, bioetanol y acetato de isoamilo como productos de valor añadido [8–10]. Otros microorganismos (microalgas, levaduras y bacterias) han sido igualmente explorados como plataformas de tratamiento biotecnológico del lactosuero mediante la acumulación de lípidos microbianos con potencial para biodiésel, lo que confirma el interés creciente por estrategias fermentativas que combinan remoción de carga orgánica con valorización de subproductos [11]. El objetivo del presente trabajo es evaluar el desempeño de la fermentación con *K. marxianus* como estrategia de tratamiento biotecnológico del lactosuero dulce del Valle de Tulancingo, cuantificando la remoción de carga orgánica (DQO) bajo condiciones optimizadas mediante Metodología de Superficie de Respuesta, y analizando la valorización de subproductos como mecanismo de sostenibilidad económica del tratamiento. El alcance del trabajo se limita a la etapa de fermentación y a la evaluación conceptual de la etapa de separación de subproductos, quedando la validación a escala piloto como línea de investigación futura.

Materiales y métodos

Preparación y caracterización del lactosuero

El lactosuero dulce empleado en los experimentos fue suministrado por empresas lácteas del Valle

de Tulancingo, Hidalgo. Se caracterizó fisicoquímicamente determinando la DQO, contenido de lactosa, proteínas, minerales, grasa y pH, conforme a métodos estándar reportados previamente [8, 12]: la DQO se determinó por digestión de reflujo cerrado con dicromato de potasio y sulfato de plata, con lectura colorimétrica a 620 nm tras 2 h de digestión a 150 °C; la lactosa residual se cuantificó por el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS). El lactosuero dulce crudo empleado presentó una DQO de 51,833 $\pm$3,790.96 mgO_2/L, una concentración de lactosa de 52.90 $\pm$ 3.87 g/L, pH 5.9 $\pm$ 0.02, 0.80 $\pm$ 0.10 % de proteína, 0.59 $\pm$ 0.03 % de minerales y 0.3 $\pm$ 0.05 % de grasa.

La eficiencia de remoción del sistema para cada parámetro se calculó con la Ec. (1):

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \tag{1}$$

Donde E es la eficiencia de remoción de sistema (%), S es la carga contaminante de salida (mg DQO, DBO_5 o SST/L) y S_o es la carga contaminante de entrada (mg DQO, DBO_5 o SST/L) [13].

Se empleó la levadura *Kluyveromyces marxianus* ITD00262 en fermentaciones batch utilizando lactosuero dulce crudo (sin diluir) como único medio de cultivo, sin pre-tratamiento ni suplementos adicionales de costo elevado más allá del precursor L-fenilalanina y, en algunas formulaciones, sulfato de amonio como fuente nitrogenada suplementaria [8, 9].

Preparación del inóculo

Para la preparación del inóculo, la cepa se reactivó en medio LPY sólido (2 % lactosa, 2 % peptona de caseína, 1 % extracto de levadura, 1 % agar) incubado a 28 °C durante 24 h. Posteriormente, una asada de la colonia se transfirió a un matraz Erlenmeyer de 250 mL con 100 mL de caldo LPY a pH 4.8, incubado en agitación orbital durante 12 h. Las fermentaciones se realizaron bajo condiciones de microaerofilia (limitación de oxígeno), sin aireación forzada ni control de oxígeno disuelto, consistente con matraces y microbiorreactores cerrados en agitación orbital. Las condiciones empleadas en este estudio son consistentes con el metabolismo respiro-fermentativo de *K. marxianus*, que permite la coproducción simultánea de biomasa, etanol y 2-feniletanol observada. La densidad del inóculo se determinó por conteo directo en cámara de Neubauer, ajustando la concentración final a 1×10^6 células/mL en cada biorreactor. Todos los experimentos se realizaron por triplicado (desviación estándar). El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA factorial con prueba post hoc Tukey (software Statistica®, nivel de confianza del 95 %), considerando diferencias significativas cuando $p < 0.05$.

Modelado cinético del crecimiento microbiano

El crecimiento celular se monitoreó mediante conteo directo en cámara de Neubauer cada 24 h durante

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29710 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 106- 121

96 h. Los datos experimentales de biomasa (Log_{10} UFC/mL) se ajustaron de forma independiente a los modelos no lineales de Gompertz, Logístico y Richards [14, 15], mediante regresión no lineal con el algoritmo de Marquardt (OriginPro v8.1, Northampton, MA, EUA; intervalo de confianza del 95 %), obteniendo los parámetros de cada modelo a partir de los cuales se calcularon la velocidad específica máxima de crecimiento (μ_{max}), la fase de latencia (λ) y la asíntota superior (A). El tiempo de generación (t_g) se calculó de acuerdo con Garre et al. [15]: $tg = Log_{10}(2) / \mu_{max}$. Para la velocidad específica de crecimiento obtenida con el modelo Monod (μm, h^{-1}; Tabla 4), el tiempo de generación se calculó como $tg = \ln(2)/\mu m$.

Parámetros cinéticos de fermentación (modelo Monod)

Los parámetros cinéticos de la fermentación —velocidad específica de crecimiento (μ), rendimiento de biomasa sobre sustrato ($Y_{x/s}$), rendimiento de producto sobre sustrato ($Y_{p/s}$), velocidad de formación de producto (r_p), velocidad de crecimiento celular (r_g) y velocidad de consumo de sustrato ($-r_s$) — se determinaron considerando un reactor intermitente (batch) isotérmico de volumen constante, mediante balance molar diferencial. Dado que se ha reportado un efecto inhibitorio del 2-feniletanol sobre la velocidad de crecimiento [16], se empleó la Ec. (2) de Monod modificada para inhibición por producto:

$$r_g = \frac{K_{obs}\,\mu_m\,C_s\,C_x}{K_s + C_s} \tag{2}$$

Donde $K_{obs}=(1-C_p/C_p^*)^{n}$, siendo C_p^* la concentración de producto a la cual cesa el metabolismo. Mientras que K_s es la constante de saturación. El rendimiento $Y_{p/s}$ se calculó como la masa de producto formado por unidad de masa de sustrato consumido.

Diseño experimental y optimización

La optimización de las condiciones de fermentación para maximizar la remoción de DQO y la producción de 2-feniletanol se realizó mediante Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) con un Diseño Compuesto Central (DCC) rotable [17], evaluando como variables independientes la concentración de L-fenilalanina (precursor) y de sulfato de amonio. El diseño contempló 12 tratamientos, incluyendo cuatro puntos centrales y puntos axiales a una distancia $\alpha = \pm 1.41$. La producción de 2-feniletanol se monitoreó cada 24 horas durante 96 horas mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (FID; columna capilar DB-WAX de 60m x 0.25 mm x 0.25 μm, gas acarreador nitrógeno a 1 mL/ min, volumen de inyección de 2 μL, temperaturas de inyector y detector de 220 °C y 250 °C, respectivamente), con identificación y cuantificación por comparación con estándares de referencia [8]. La remoción de DQO y de lactosa residual se determinó a las 96 horas de fermentación. La lactosa residual y el etanol se cuantificaron mediante cromatografía de líquidos de alta resolución

(HPLC) en un equipo Agilent® 1100, provisto de un inyector automático y un detector de índice de refracción, equipado con una columna SEPAX Carbomix H-NP10:8 % (7.8 x 300 mm), con un flujo de 0.4 mL/min. Los compuestos se identificaron y cuantificaron por comparación con estándares de referencia. La inyección de las muestras se realizó por duplicado.

Adicionalmente, en una serie experimental independiente del DCC, se evaluaron seis formulaciones (F1-F6; pH 4.8, 30 °C, 180 rpm) variando las concentraciones de sulfato de amonio y L-fenilalanina para cuantificar la producción simultánea de bioetanol (Tabla 1), siguiendo la metodología reportada en [9]. La producción de acetato de isoamilo se determinó en fermentaciones batch de 96 horas a 28 °C y pH 4.8, monitoreando lactosa residual, biomasa, acetato de isoamilo y bioetanol cada 24 horas. El acetato de isoamilo se cuantificó por GC-FID (columna DB-WAX de 60m x 0.25 mm x 0.25 μm, gas acarreador nitrógeno a 1 mL/ min; rampa de temperatura de horno de 150 a 200 °C a 5 °C/min), identificando y cuantificando los compuestos por comparación con estándares de referencia [10, 18]. La identidad estructural del 2-feniletanol y la composición anomérica de la lactosa se confirmaron por espectroscopía de RMN de ^{1}H. Las muestras de lactosuero fermentado se centrifugaron a 6000 rpm por 6 min y se mantuvieron a 60 °C por 30 min para evaporar el exceso de humedad. Para la confirmación del 2-feniletanol, las muestras se disolvieron en 1 mL de cloroformo deuterado ($CDCl_3$); para el análisis de la composición anomérica de la lactosa, las muestras se disolvieron en óxido de deuterio (D_2O). Los espectros se obtuvieron en un espectrómetro de resonancia magnética nuclear Varian NMR de 400 MHz.

Tabla 1. Formulaciones evaluadas para la producción simultánea de bioetanol, variando las concentraciones de L-fenilalanina y sulfato de amonio.

Formulación	L-fenilalanina (g/L)	$(NH_4)_2SO_4$ (g/L)	Condiciones
F1	0	0	pH 4.8, 180 rpm, 30 °C
F2	0.50	0	pH 4.8, 180 rpm, 30 °C
F3	1.00	0	pH 4.8, 180 rpm, 30 °C
F4	1.00	0.45	pH 4.8, 180 rpm, 30 °C
F5	1.00	0.90	pH 4.8, 180 rpm, 30 °C
F6	1.00	1.35	pH 4.8, 180 rpm, 30 °C

Fuente: [9].

Diseño conceptual de la etapa de separación

Se retomó el diseño de proceso de separación desarrollado mediante simulación en Aspen Plus v.10 (modelo termodinámico UNIQUAC) reportado en [19], que contempla una columna de extracción líquido-líquido con acetato de etilo como solvente, seguida de dos columnas de destilación para la recuperación del producto y del solvente. Este diseño se retoma como referencia conceptual para dimensionar la etapa de recuperación de subproductos, sin que su validación experimental a escala piloto

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29710 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 106- 121

forme parte del alcance del presente trabajo.

Resultados y discusión

Bajo las condiciones óptimas identificadas por el modelo de superficie de respuesta (4.50 g/L de L-fenilalanina, 0.76 g/L de $(NH_4)_2SO_4$, 28 °C, 245 rpm, pH 4.8), la fermentación con *K. marxianus* alcanzó una remoción de DQO de 76 % a las 96 horas y una remoción de lactosa de 99.4 % [8]. La composición anomérica de la lactosa presente en el lactosuero dulce se determinó por RMN de ^{1}H (400 MHz, D_2O) (Figura 1). La integración de las señales anoméricas características (un doblete en 5.06 ppm (J=3.5 Hz) para la α -lactosa y dobletes en 4.3 – 4.5 ppm (J=7.9 Hz) para la β -lactosa) indicó una proporción de 82.35 % de β -lactosa y 17.64 % de α -lactosa [18]. Esta predominancia de la forma β podría explicar, al menos parcialmente, la eficiencia del consumo de lactosa observada durante la fermentación con *K. marxianus*, dado que la β-D-galactosidasa (LAC4) de esta levadura hidroliza preferentemente el anómero β, mientras que el consumo del anómero α depende de su mutarrotación espontánea a la forma β del medio de cultivo.

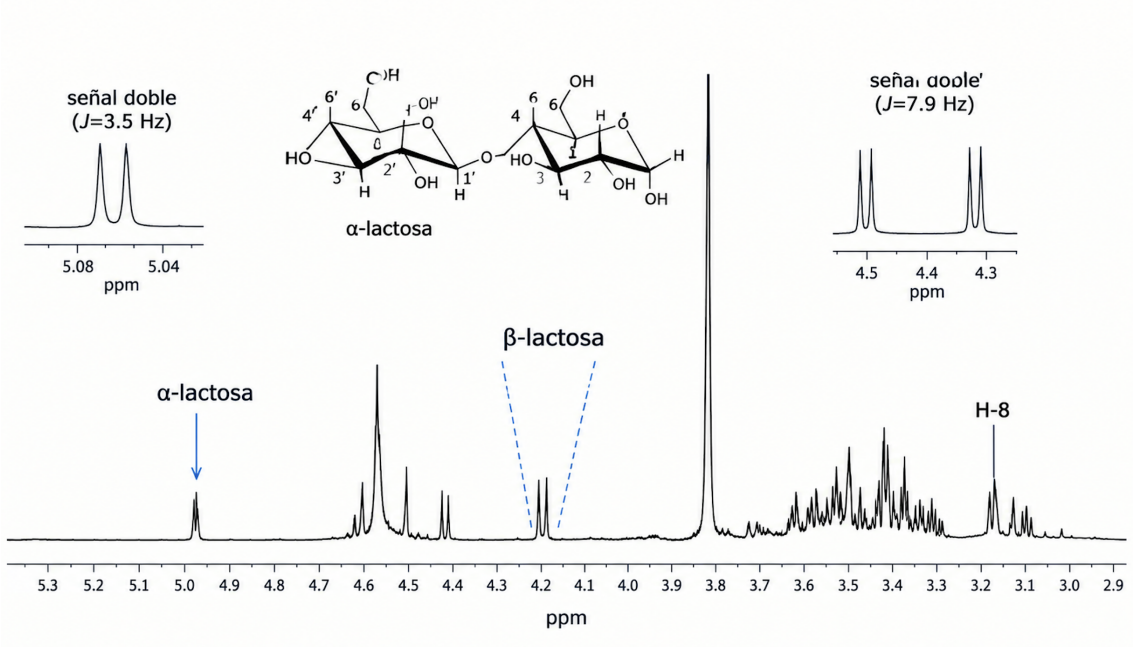


FIGURA 1. Espectro de RMN de ^{1}H a 400 MHz en D_2O de la lactosa del lactosuero dulce.

Los resultados mostraron que el efluente fermentado presenta una carga contaminante cuatro veces menor que el lactosuero sin tratamiento (Tabla 2), lo que reduce sustancialmente el costo y la complejidad de cualquier tratamiento posterior requerido antes de su descarga, y permite acercar el efluente tratado a los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 [2]. En el proceso fermentativo aquí

evaluado, en cambio, la remoción y la generación de productos comercializables ocurren de forma simultánea [8, 9]. Los modelos polinomiales de segundo orden mostraron un buen ajuste (R^2 = 0.78 y 0.88), y el análisis de varianza confirmó que la concentración de L-fenilalanina influye de manera estadísticamente significativa ($p < 0.05$) sobre la producción del subproducto principal.

Tabla 2. Condiciones óptimas de fermentación y remoción de carga orgánica obtenidas mediante MSR-DCC.

Parámetro	Valor
L-fenilalanina (precursor)	4.50 ± 0.12 g/L
$(NH_4)_2SO_4$ (sal nitrogenada)	0.76 ± 0.09 g/L
Temperatura / pH de fermentación	28 °C / pH 4.8
Remoción de DQO	76 % a 96 h
Remoción de lactosa	99.4 % a 96 h
Producción máxima de 2-feniletanol	1.1 ± 0.07 g/L (48–72 h)

Tabla 3. Remoción de la DQO a las 96 h en el control sin suplementos (F1) y en las formulaciones con 1.00 g/L de L-fenilalanina y distintas concentraciones de $(NH_4)_2SO_4$ (F4–F6).

Formulación	$(NH_4)_2SO_4$ (g/L)	L-fenilalanina (g/L)	DQO inicial (mgO_2/L)	DQO final 96 h (mgO_2/L)	Eficiencia de remoción (%)
F1	0	0	51,833 ± 3790.96	16,472 ± 277.31	68.22
F4	0.45	1.00	41,344 ± 994.32	5,083 ± 1184.06	87.72
F5	0.90	1.00	50,583 ± 3033.21	1,222 ± 45.36	97.58
F6	1.35	1.00	37,027 ± 622.58	10,750 ± 1784.34	70.97

El grupo evaluó seis formulaciones en total. En tres de ellas (F4-F6) se varió únicamente la concentración de sulfato de amonio (0.45, 0.90 y 1.35 g/L), manteniendo fija la concentración de L-fenilalanina en 1.00 g/L, y se compararon con el control sin suplementos (F1) [9] (Tabla 3). La relación entre la dosis de sulfato de amonio y la eficiencia de remoción de la DQO no fue monotónica: con 0.90 g/L (F5) se obtuvo la máxima remoción (97.58 %), mientras que la dosis más alta evaluada (1.35 g/L, F6) redujo la eficiencia a 70.97 % un valor incluso menor que el obtenido con 0.45 g/L (87.72 %, F4). Este comportamiento sugiere un efecto de inhibición a concentraciones elevadas de sulfato de amonio sobre la actividad metabólica de *K. marxianus*, consistente con lo reportado en [9, 20] para la producción de bioetanol bajo condiciones similares.

Entre las formulaciones orientadas a maximizar la producción de bioetanol como coproducto, F3 (1.00 g/L de L-fenilalanina, sin sulfato de amonio, 48 h) alcanzó una remoción de DQO de 76.5 % superando incluso a la formulación de mayor rendimiento en bioetanol (F6: 70.97 % de remoción a 96 h;

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29710 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 106- 121

Tabla 3) [9]. Estos resultados muestran que existe un margen de optimización específico para maximizar simultáneamente la remoción de la carga orgánica y la producción de subproductos, considerando el tiempo de fermentación y la formulación nutricional empleada, lo que resulta relevante para el diseño de un proceso de tratamiento orientado a la remoción de contaminación. Bajo las condiciones evaluadas, la misma plataforma simultáneamente produjo 2-feniletanol (hasta 1.1 g/L a 48-72 h), bioetanol (hasta 25.13 g/L) y acetato de isoamilo (0.923 g/L a 96 h) [8–10]. Estos rendimientos son consistentes con lo reportado para *K. marxianus* en sustratos de lactosuero: el título de 2-feniletanol se ubica dentro del rango medio reportado en la literatura para esta levadura, que va de valores cercanos a 1 g/L hasta 2.55 g/L bajo condiciones de co-cultivo optimizadas [21], mientras que el bioetanol obtenido (25.13 g/L) es comparable con el reportado recientemente para levaduras del género *Kluyveromyces* en lactosuero dulce (24.85 g/L) [22]. Destaca particularmente la producción de acetato de isoamilo (923 mg/L), muy superior a los 160 mg/L reportados por el grupo utilizando la misma cepa ITD00262 en otros tipos de lactosuero [18], lo que sugiere que la composición específica del lactosuero dulce crudo del Valle de Tulancingo favorece la síntesis del éster.

La identidad del 2-feniletanol producido se confirmó mediante espectroscopía de RMN de ^{1}H (400 MHz, $CDCl_3$) (Figura 2). El espectro mostró señales características del anillo aromático monosustituido entre 7.15 y 7.36 ppm, consistentes con los cinco hidrógenos aromáticos de la molécula. Los hidrógenos alifáticos se observaron como dos señales triples (J= 6.4 Hz) en 2.88 ppm, correspondientes a los hidrógenos del metileno unido al anillo aromático (CH_2-Ar, H-7), y en 3.87 ppm, correspondientes a los hidrógenos del metileno unido al grupo hidroxilo (CH_2-OH, H-8). El patrón de acoplamiento triple-triple entre ambos metilenos confirma la estructura de cadena hidroxietílica característica del 2-feniletanol.

Estos compuestos poseen aplicaciones industriales consolidadas permitiendo reforzar la viabilidad económica del proceso. El 2-feniletanol es ampliamente utilizado como aditivo alimentario, en productos cosméticos y de limpieza del hogar, así como perfumería, debido a su característico aroma a rosas [16, 23]. El acetato de isoamilo, de aroma a plátano, se emplea principalmente en las industrias alimentaria y farmacéutica como saborizante; su producción por vía fermentativa responde a la creciente preferencia del mercado por aromas etiquetados como “naturales” frente a la síntesis petroquímica convencional [10, 18]. El bioetanol producido, además de su potencial como biocombustible, es apto para su uso en las industrias alimentaria, de bebidas, farmacéutica y cosmética [9, 20]. El 2-feniletanol, con valor de mercado superior a USD 1,000/kg [16, 23], junto con el bioetanol y el acetato de isoamilo como coproductos adicionales, constituye un mecanismo de recuperación de costos que puede hacer económicamente más atractiva la adopción del tratamiento por parte de productores queseros, para quienes los tratamientos convencionales representan únicamente un costo neto; una evaluación económica preliminar del proceso integrado estima un costo de producción de USD 144.46/kg de 2-

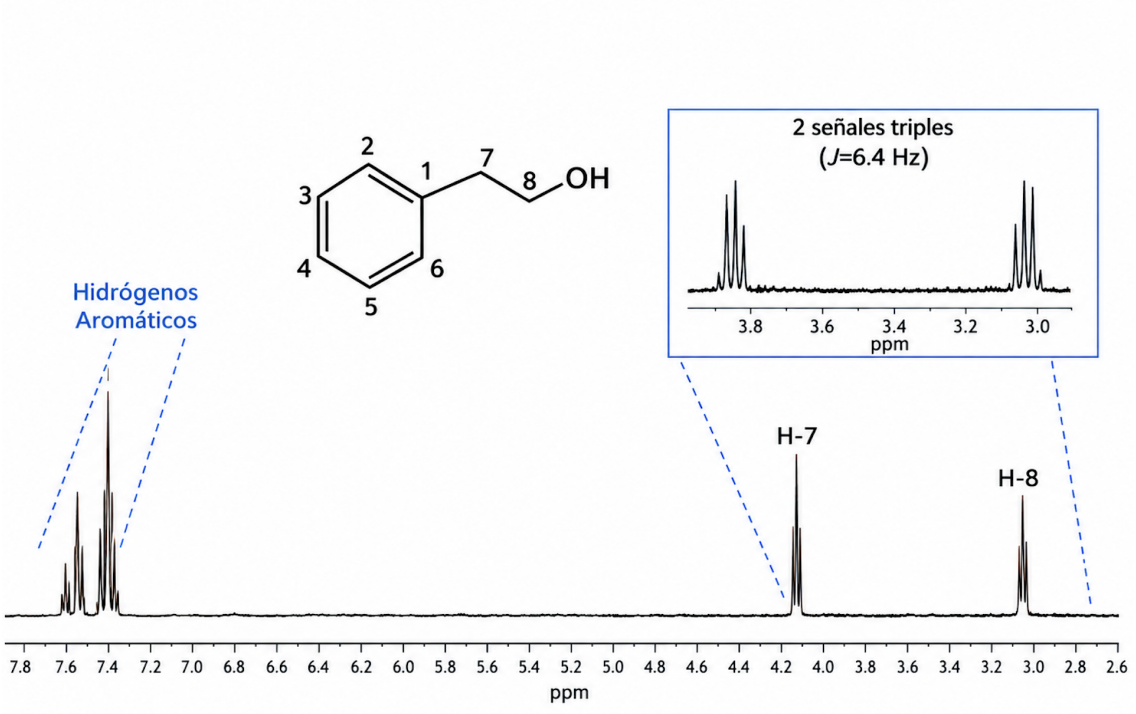


FIGURA 2. Espectro de RMN de ^{1}H a 400 MHz en $CDCl_3$ del compuesto 2-feniletanol en cinéticas de lactosuero dulce en la formulación F5 (0.90 g/L de $(NH_4)_2SO_4$ y 1.00 g/L de L-fenilalanina) a 30 °C/180 rpm.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29710 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 106- 121

feniletanol frente a un precio de mercado de USD 1,000/kg [1, 19]. Como limitación, los coeficientes R^2 de los modelos (0.78-0.88) dejan margen de mejora incorporando variables adicionales (pH, aireación) en futuras etapas de optimización, y la validación del proceso a escala piloto.

Adicional a la remoción de la DQO, se determinaron los parámetros cinéticos de la fermentación para las formulaciones F2-F6 (Tabla 1), monitoreando 2-feniletanol, lactosa residual, etanol y biomasa cada 24 h durante 96 h (Tabla 4). Bajo el esquema de separación descrito en la metodología [19] (Figura 3), el 2-feniletanol se recupera como producto de fondo de la primera columna de destilación con una pureza de 96.9 % en peso y una recuperación de 99.99 %, mientras que la segunda columna recupera el solvente con 95 % de recuperación y 88.1 % de pureza, de modo que el acetato de etilo fresco requerido representa solo 1.16 % del solvente total tras la recirculación. El costo operativo estimado para esta etapa de separación fue de USD 22.70 por kilogramo de 2-feniletanol [19], que sumado al costo de producción por fermentación reportado previamente por el grupo (USD 121.76 kg^{-1}), arroja un costo total estimado de USD 144.46 kg^{-1} considerablemente menor al precio de mercado del 2-feniletanol natural (USD 1000 Kg^{-1}), lo que sugiere un potencial económico favorable para la valorización de este subproducto de la fermentación de lactosuero, en línea con desarrollos recientes que reducen los costos y el consumo energético de la recuperación del 2-feniletanol mediante esquemas de destilación intensificada [24].

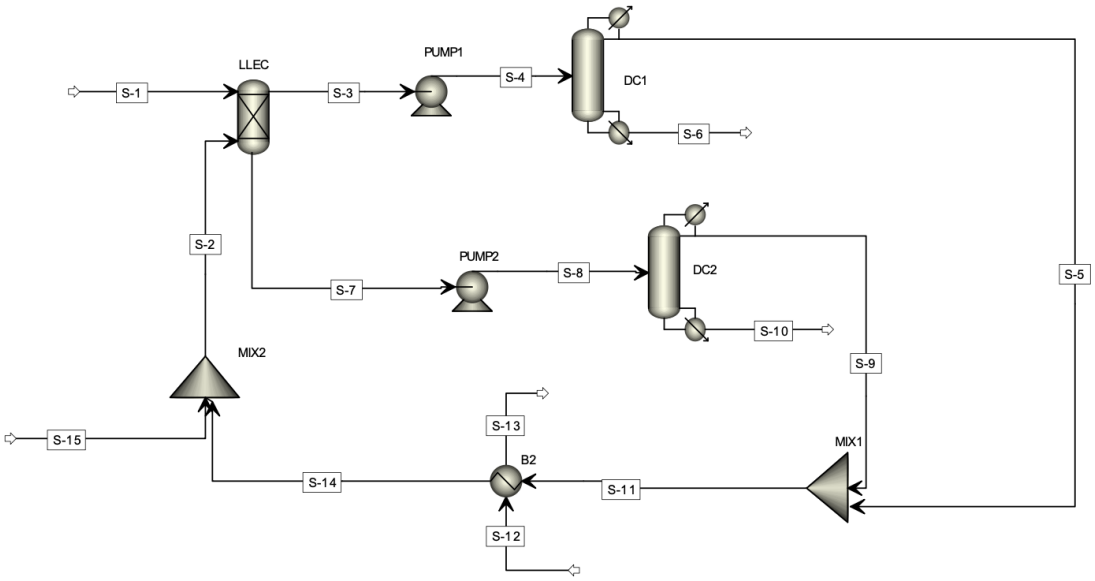


FIGURA 3. Diagrama de flujo de proceso de separación de 2-feniletanol propuesto. Reproducido de Puga-Córdova et al. [19].

El mayor rendimiento de biomasa ($Y_{x/s}$) y la mayor tasa de formación de producto (r_p) se observaron en F5 (0.90 g/L de $(NH_4)_2SO_4$), consistente con la máxima remoción de la DQO (97.58 %) reportada

para esta misma formulación. En F6 (1.35 g/L de $(NH_4)_2SO_4$) se observó una disminución en r_p y μm, lo que refuerza la hipótesis de inhibición metabólica por exceso de amonio ya discutida. Con el fin de caracterizar matemáticamente la cinética de crecimiento de *K. marxianus* en lactosuero dulce, los datos experimentales de biomasa (Log_{10} UFC/mL) se ajustaron a los modelos no lineales de Gompertz, Richards y Logístico (Figura 4).

Tabla 4. Parámetros cinéticos de la fermentación de lactosuero dulce en las formulaciones F2–F6 (Tabla 1) a pH 4.8, 30 °C y 180 rpm.

Parámetro	F4 (0.45 g/L $(NH_4)_2SO_4$)	F5 (0.90 g/L $(NH_4)_2SO_4$)	F6 (1.35 g/L $(NH_4)_2SO_4$)	F2 (0.5 g/L L-fenilalanina)	F3 (1.00 g/L L-fenilalanina)
2-FE (mg/L)	780	995	718	320	437
Etanol (g/L)	24	14	25.13	19	24
r_p (g L^{-1} h^{-1})	0.72	1.14	0.32	0.24	0.34
$-r_s$ (g L^{-1} h^{-1})	1.07	1.26	1.35	1.34	1.27
μ_m (h^{-1})	0.098	0.27	0.11	0.19	0.21
t_g (h)	7.07	2.57	6.30	3.65	3.30
$Y_{x/s}$ (g/g)	0.30	0.22	0.42	0.28	0.44
Lactosa residual (g/L)	0.30	0.45	0.70	0.81	1.72

El modelo de Richards presentó el mejor ajuste (R^2=0.98), seguido del modelo Logístico (R^2=0.96) y Gompertz (R^2=0.95). De acuerdo con el modelo de Richards, la velocidad específica máxima de crecimiento (μ_{max}) fue de 0.18 h^{-1}, con una fase de latencia (λ) de 0.29 h y un tiempo de generación (tg) de 1.67 h, consistentes con una adaptación rápida de la levadura al sustrato y una fase exponencial de crecimiento bien definida entre las 24 y 48 h de fermentación, en concordancia con la máxima velocidad de remoción de la DQO observada en este mismo intervalo.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS ABIERTAS

Bajo condiciones optimizadas mediante Metodología de Superficie de Respuesta, la fermentación de lactosuero dulce crudo con *Kluyveromyces marxianus* removió hasta 76 % de la DQO y 99.4 % de lactosa en 96 horas. Esto convierte un efluente que excede ampliamente los límites normativos mexicanos y de alta carga orgánica, en un residuo ambientalmente manejable, posicionando al proceso como una alternativa de tratamiento biotecnológico viable. La generación simultánea de 2-feniletanol, bioetanol y acetato de isoamilo como subproductos de valor comercial, ofrece un mecanismo de recuperación de costos que puede facilitar la adopción de este tratamiento por parte de productores lácteos de pequeña y mediana escala, para quienes los tratamientos convencionales representan únicamente un costo. Quedan pendientes al menos tres líneas de trabajo futuro. Primero, la validación del proceso de fermentación y

https://doi.org/10.36677/rici.v4i3.29710 ISSN: 2992-7447 Noviembre 2026 - Febrero 2027 págs. 106- 121

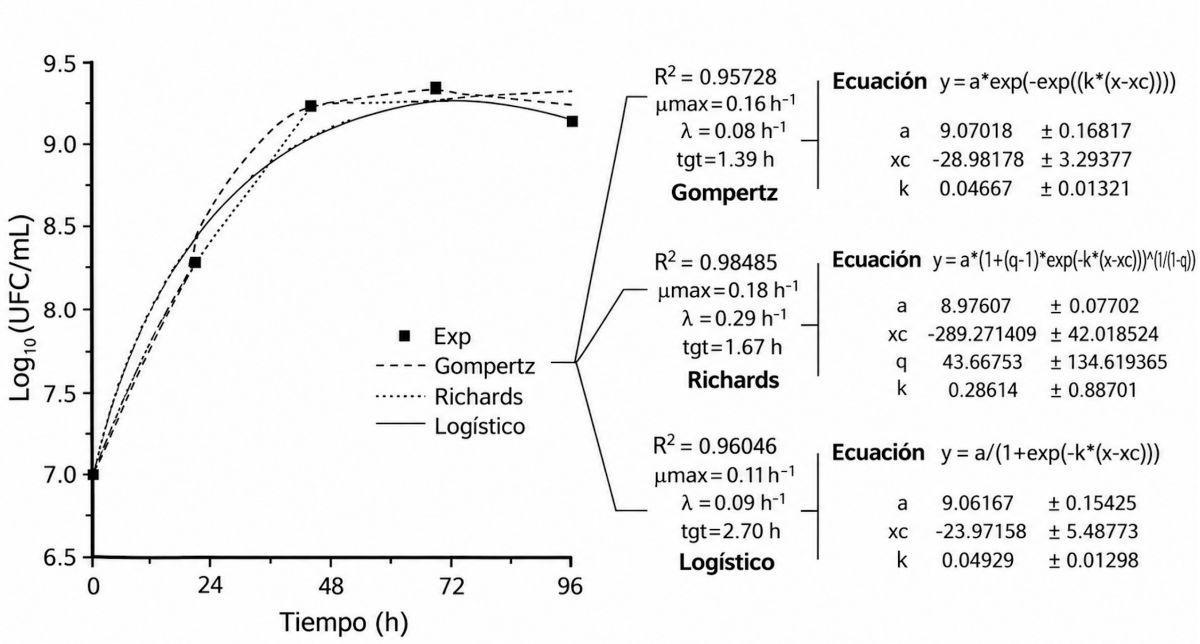


FIGURA 4. Ajuste de los modelos Gompertz, Richards y Logístico al crecimiento de *K. marxianus* en lactosuero dulce a pH 4.8, 30 °C, 180 rpm.

separación a escala piloto. Segundo, la incorporación de variables adicionales (pH, aireación) al diseño experimental, con el fin de mejorar la capacidad predictiva de los modelos. Y tercero, la búsqueda de fuentes alternativas o de menor costo para la L-fenilalanina, precursor que concentra la mayor parte del costo operativo del proceso.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

L. Conde-Báez: Conceptualización, Metodología, Investigación, Redacción. C.A. Gómez Aldapa: Análisis formal, Curación de datos, Redacción – revisión y edición. J. Castro Rosas: Recursos, Supervisión, Validación. C.F. Pineda-Muñoz: Conceptualización, Metodología, Investigación, Redacción.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de intereses financieros ni relaciones personales conocidos que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

REFERENCIAS

[1] F. T. A. Jorge et al., "Biotechnological production of 2-phenylethanol from agroindustrial byproducts: Experimental evaluation, techno-economic analysis, and life cycle assessment," *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 19, no. 4, pp. 1190-1203, 2025, DOI: 10.1002/bbb.2815.

[2] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, "NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación," *Diario Oficial de la Federación*, México, 2022.

[3] S. L. M. A. Omollo, J. M. Nduko, S. Bolwig, P. R. Jensen, and B. O. Bebe, "Quality characteristics of cheese whey from Kenyan dairy processors and their suitability for downstream valorisation," *J. Food Compos. Anal.*, vol. 157, Art. no. 109369, 2026, DOI: 10.1016/j.jfca.2026.109369.

[4] M. P. Giulianetti de Almeida, G. Mockaitis, and D. G. Weissbrodt, "Got whey? Sustainability endpoints for the dairy industry through resource biorecovery," *Fermentation*, vol. 9, no. 10, Art. no. 897, 2023, DOI: 10.3390/fermentation9100897.

[5] W. J. Guerrero-Rodríguez, P. Castilla-Hernández, K. N. Cárdenas-Medina, C. A. Gómez-Aldapa, and J. Castro-Rosas, "Degradación anaerobia de dos tipos de lactosuero en reactores UASB," *Tecnol. Quím.*, vol. 32, no. 1, pp. 99–106, 2012. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852012000100012

[6] A. R. Azkarahman, D. Cysneiros, A. Chatzifragkou, and K. A. G. Karatzas, "From waste to resource: A review on advancing whey permeate valorization through anaerobic digestion," *J. Environ. Manage.*, vol. 395, Art. no. 127695, 2025, DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127695.

[7] M. Bilal, L. Ji, Y. Xu, S. Xu, Y. Lin, H. M. N. Iqbal, and H. Cheng, "Bioprospecting Kluyveromyces marxianus as a robust host for industrial biotechnology," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 10, Art. no. 851768, 2022, DOI: 10.3389/fbioe.2022.851768.

[8] M. Alonso-Vargas, A. Téllez-Jurado, C. A. Gómez-Aldapa, M. del R. Ramírez-Vargas, L. Conde-Báez, J. Castro-Rosas, and A. Cadena-Ramírez, "Optimization of 2-phenylethanol production from sweet whey fermentation using Kluyveromyces marxianus," *Fermentation*, vol. 8, no. 2, Art. no. 39, 2022, DOI: 10.3390/fermentation8020039.

[9] L. Conde-Báez, C. F. Pineda-Muñoz, C. Conde-Mejía, E. Mas-Hernández, and A. López-Molina, "Conversion of sweet whey to bioethanol: A bioremediation alternative for dairy industry," *Biomass*, vol. 4, no. 2, pp. 507–517, 2024, DOI: 10.3390/biomass4020026.

[10] C. A. Gómez-Aldapa, J. Castro-Rosas, A. López-Molina, C. Conde-Mejía, C. F. Pineda-Muñoz, A. Jiménez-González, S. A. Medina-Moreno, M. P. Falcón-León, and L. Conde-Báez, "Best conditions for the production of natural isopentyl acetate (banana aroma) from cheese industry waste: An experimental precursor approach," *Processes*, vol. 9, no. 11, Art. no. 1880, 2021, DOI: 10.3390/pr9111880.

[11] A. Cantarini, S. Papanikolaou, A. Chatzifragkou, V. Milanović, A. Osimani, L. Aquilanti, and C. Garofalo, "Biodiesel production using wild-type oleaginous microorganisms grown on whey: A state-of-the-art review," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 48, Art. no. e02011, 2026, DOI: 10.1016/j.susmat.2026.e02011.

[12] O. Mohiuddin, A. P. Harvey, S. Tabraiz, M. T. Ameen, and S. Velasquez-Orta, "Kinetic modelling of yeast growth and pollutant removal in secondary effluent," *J. Water Process Eng.*, vol. 50, Art. no. 103244, 2022, DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103244.

[13] C. Conde-Mejía and L. Conde-Báez, "Biorefinery, an integrated concept: Analysis of bioethanol and aromas production from whey," in *Biofuels and Biorefining, Volume 1: Current Technologies for Biomass Conversion*, F. I. Gómez-Castro and C. Gutiérrez-Antonio, Eds. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2022, pp. 447–467, DOI: 10.1016/B978-0-12-824116-5.00007-6.

[14] J. Wang and X. Guo, "The Gompertz model and its applications in microbial growth and bioproduction kinetics: Past, present and future," *Biotechnol. Adv.*, vol. 72, Art. no. 108335, 2024, DOI: 10.1016/j.biotechadv.2024.108335.

[15] A. Garre, J. Koomen, H. M. W. den Besten, and M. H. Zwietering, "Modeling population growth in R with the biogrowth package," *J. Stat. Softw.*, vol. 107, no. 1, pp. 1–51, 2023, DOI: 10.18637/jss.v107.i01.

[16] A. R. S. Bernardino, C. A. V. Torres, J. G. Crespo, and M. A. M. Reis, "Biotechnological 2-phenylethanol production: Recent developments," *Molecules*, vol. 29, no. 23, Art. no. 5761, 2024, DOI: 10.3390/molecules29235761.

[17] K. Khorsheed, F. Asadi, R. Asadi, E. Aydoğmuş, B. Erzen, M. Karataş, Ş. Deniz, and R. Orhan, "Process optimization with response surface methodology: A comprehensive approach by experimental design types," *Int. J. Adv. Nat. Sci. Eng. Res.*, vol. 9, no. 12, pp. 546–558, 2025. as-proceeding.com

[18] M. A. Hernández-Cruz, A. Cadena-Ramírez, J. Castro-Rosas, J. B. Páez-Lerma, M. R. Ramírez-Vargas, E. Rangel-Vargas, C. Romo-Gómez, A. B. Lara-Gómez, L. Conde-Báez, and C. A.

Gómez-Aldapa, "Comparative analysis of three types of whey as substrate for fermentation by Kluyveromyces marxianus and its influence on isoamyl acetate synthesis," *Waste Biomass Valorization*, vol. 15, pp. 3413–3424, 2024, DOI: 10.1007/s12649-023-02380-5.

[19] L. E. Puga-Córdova, Z. A. Pérez-Sánchez, A. López-Molina, L. Conde-Báez, A. Jiménez-Gutiérrez, and C. Conde-Mejía, "Design of a separation process for natural 2-phenylethanol with economic and safety considerations," *Processes*, vol. 8, no. 12, Art. no. 1570, 2020, DOI: 10.3390/pr8121570.

[20] J. Zou and X. Chang, "Past, present, and future perspectives on whey as a promising feedstock for bioethanol production by yeast," *J. Fungi*, vol. 8, no. 4, Art. no. 395, 2022, DOI: 10.3390/jof8040395.

[21] M. Valdez Castillo, V. L. Pachapur, S. K. Brar, S. Arriaga, J.-F. Blais, and A. Avalos Ramirez, "Effect of the concentration of L-phenylalanine and lactose on 2-phenylethanol production by whey fermentation using the yeasts Kluyveromyces marxianus and Debaryomyces hansenii under co-culture mode," *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 18, Art. no. 100994, 2022, DOI: 10.1016/j.biteb.2022.100994.

[22] A. M. Ohstrom, A. E. Buck, X. Du, and J. Wee, "Evaluation of Kluyveromyces spp. for conversion of lactose in different types of whey from dairy processing waste into ethanol," *Front. Microbiol.*, vol. 14, Art. no. 1208284, 2023, DOI: 10.3389/fmicb.2023.1208284.

[23] S. Mitri, M. Koubaa, R. G. Maroun, T. Rossignol, and J.-M. Nicaud, "Bioproduction of 2-phenylethanol through yeast fermentation on synthetic media and on agro-industrial waste and by-products: A review," *Foods*, vol. 11, no. 1, Art. no. 109, 2022, DOI: 10.3390/foods11010109.

[24] T. Janković, A. J. J. Straathof, and A. A. Kiss, "Advanced downstream process design for recovery of 2-phenylethanol and 2-phenylethyl acetate after biotransformation," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 100, no. 10, pp. 2019–2028, 2025, DOI: 10.1002/jctb.70027.