

Metaheurísticas en ingeniería: una aproximación del estado del arte y sus implicaciones en gerencia de la construcción

Metaheuristics in engineering: an approach to the state of the art and its implications for construction management

Nolberto Sarmiento Mireles, Eduardo Vargas Cano

Palabras clave: metaheurísticas, investigación de operaciones, gerencia de la construcción, ScienceDirect

Key words: metaheuristics, operations research, construction management, ScienceDirect

RESUMEN

Este artículo analiza la evolución y el impacto de las metaheurísticas en la ingeniería, con énfasis en la gerencia de construcción y una influencia transversal en la Ingeniería Industrial. Empleando el protocolo PRISMA, se realizó una revisión sistemática de un corpus de 75 artículos recuperados de *ScienceDirect* —2020-2024—. Los resultados identifican una hegemonía investigativa liderada por China e Irán, naciones que concentran el 60% de la producción científica a través de autores destacados como Deng y Chen. Se documenta una transición definitiva hacia arquitecturas híbridas —30.7% de la muestra—, donde las técnicas predominantes incluyen la Inteligencia de Enjambre, los Algoritmos Genéticos y el Aprendizaje Profundo. Estos modelos optimizan procesos industriales críticos, incluyendo la logística de suministros y los sistemas de almacenamiento de energía. El análisis, reforzado por literatura de vanguardia de 2025, demuestra que la hibridación algorítmica fortalece la resiliencia operativa en entornos de recursos restringidos, como el de Venezuela. Se concluye que la convergencia tecnológica y la sostenibilidad multiobjetivo definen las tendencias de competitividad global para la gestión de infraestructuras en el próximo bienio.

ABSTRACT

This article analyzes the evolution and impact of metaheuristics in engineering, focusing on construction management and its transversal influence on Industrial Engineering. Employing the PRISMA protocol, a systematic review was conducted on a corpus of 75 articles retrieved from *ScienceDirect* —2020–2024—. The results identify a research hegemony led by China and Iran, nations that account for 60% of the scientific production through prominent authors such as Deng and Chen. A definitive transition toward hybrid architectures (30.7% of the sample) is documented, where predominant techniques include Swarm Intelligence, Genetic Algorithms, and Deep Learning. These models optimize critical industrial processes, including supply chain logistics and Battery Energy Storage Systems. The analysis, reinforced by state-of-the-art 2025 literature, demonstrates that algorithmic hybridization strengthens operational resilience in resource-constrained environments, such as Venezuela. It is concluded that technological convergence and multi-objective sustainability define the global competitiveness trends for infrastructure management in the coming biennium.

INTRODUCCIÓN

En el panorama actual de la ingeniería, la toma de decisiones ha trascendido el juicio empírico para apoyarse en modelos de optimización matemática de alta complejidad. Ante problemas de naturaleza compleja, donde los métodos exactos resultan computacionalmente prohibitivos para instancias de gran escala, las metaheurísticas se han consolidado como la estrategia predominante para hallar soluciones cuasi-óptimas en tiempos de ejecución prácticos (Garey y Johnson, 1979; Saka et al., 2016; Houssein et al., 2025). Estas herramientas, que abarcan desde algoritmos bio-inspirados hasta sistemas basados en el comportamiento social y físico, han permitido a la Investigación de Operaciones abordar la incertidumbre, la estocasticidad y la multiobjetividad en el diseño de sistemas de ingeniería cada vez más interconectados.

A pesar de su origen histórico en la manufactura y la logística industrial, la Gerencia de Construcción ha adoptado recientemente este paradigma para mitigar la baja productividad y los sobrecostos que caracterizan al sector a nivel global. Autores como Cheng et al. (2024) y Jakubczyk-Gałczyńska et al. (2024), demuestran que la integración de algoritmos de inteligencia de enjambre (*Swarm Intelligence*) y técnicas de aprendizaje por refuerzo es fundamental para resolver el Problema de Programación de Proyectos con Recursos Restringidos (RCPSP). Este desafío, crítico en la gestión

de infraestructura moderna, exige un equilibrio dinámico entre la disponibilidad limitada de mano de obra, maquinaria y los plazos contractuales agresivos.

La construcción, analizada hoy como un sistema de producción bajo condiciones de alta variabilidad, encuentra en las metaheurísticas la capacidad de optimizar el *trade-off* entre tiempo, costo, calidad y, más recientemente, la sostenibilidad ambiental. Este enfoque supera las limitaciones deterministas de las técnicas de redes tradicionales como CPM o PERT, las cuales fallan al capturar la complejidad de los entornos de obra actuales (ElSahly et al., 2023; Jakubczyk-Gałczyńska et al., 2024; Martí et al., 2025). Además, el surgimiento de las *matheuristics* y la optimización asistida por IA está permitiendo una gestión proactiva, donde el algoritmo no solo busca la eficiencia, sino que se adapta a las interrupciones en tiempo real (Ding et al., 2026; Sulaiman et al., 2025).

El presente artículo ofrece una aproximación al estado del arte de estas técnicas, analizando su evolución técnica y sus implicaciones directas en la gerencia de la construcción. A través de una revisión de la literatura de *ScienceDirect*, se examina cómo la digitalización y el uso de algoritmos avanzados están redefiniendo la eficiencia en este sector. El objetivo es proporcionar una visión que permita a los gerentes de proyecto y académicos transitar hacia una gestión basada en la precisión algorítmica, la competitividad industrial y la resiliencia operativa.

Marco Teórico

La Investigación de Operaciones y la Complejidad en Ingeniería

La Investigación de Operaciones (IO) se define como la aplicación de métodos analíticos avanzados para facilitar la toma de decisiones óptimas en sistemas complejos. En la ingeniería moderna, muchos de estos problemas se clasifican como NP-duros (*Non-deterministic Polynomial-time hard*), lo que implica que el tiempo necesario para encontrar una solución óptima global crece exponencialmente con el tamaño del problema (Garey y Johnson, 1979). En la gestión de proyectos, esto se manifiesta en el Problema de Programación de Proyectos con Restricción de Recursos (RCPSP, por su siglas en inglés, *Resource-Constrained Project Scheduling Problem*), donde las interdependencias entre actividades y la limitación de recursos impiden el uso eficiente de métodos exactos tradicionales.

Fundamentos de las Metaheurísticas

Las metaheurísticas son estrategias de optimización de alto nivel que diseñan o seleccionan una heurística —algoritmo de búsqueda— para proporcionar una solución suficientemente buena a un problema de optimización, especialmente con información incompleta o capacidad computacional limitada (Houssein et al., 2025; Saka et al., 2016; Sulaiman et al., 2025). A diferencia de los algoritmos exactos, las metaheurísticas no garantizan el óptimo global, pero ofrecen soluciones cuasi-óptimas mediante un equilibrio entre la exploración —búsqueda en nuevas áreas

del espacio de soluciones— y la explotación —refinamiento de las mejores soluciones encontradas— (Ahmed Shaban et al., 2025).

Taxonomía y Algoritmos de Vanguardia

La literatura científica reciente clasifica las metaheurísticas principalmente por su fuente de inspiración. Los algoritmos de Inteligencia de Enjambre (Swarm Intelligence), como la Optimización por Cúmulo de Partículas (PSO) y los algoritmos basados en comportamientos biológicos complejos, han demostrado una robustez superior en la ingeniería civil al manejar funciones objetivo no lineales y discontinuas (Cheng et al., 2024; Houssein et al., 2025). Estos enfoques permiten una exploración exhaustiva del espacio de soluciones, superando las limitaciones de los métodos de gradiente tradicionales en entornos de diseño estructural y programación de obra.

Optimización Híbrida y Matheuristics

La frontera del conocimiento en la IO actual es la hibridación. Las matheuristics combinan las fortalezas de los modelos de programación matemática con la flexibilidad de las metaheurísticas. Según Martí et al. (2025), esta integración representa la evolución técnica necesaria para abordar problemas de gran escala. En el sector de la construcción, este enfoque facilita la gestión de la logística y la nivelación de recursos, integrando además técnicas de Machine Learning para la predicción de escenarios inciertos —clima, retrasos y variabilidad de costos—, tal como proponen Jakubczyk-Gańczyńska et

al. (2024) al combinar heurísticas con redes bayesianas.

Aplicación en la Gerencia de Construcción

En el ámbito de la gerencia de proyectos de infraestructura contemporánea, la optimización ha evolucionado desde el control de parámetros aislados hacia un enfoque integral de Sostenibilidad Multiobjetivo (MOO). Bajo este paradigma, las metaheurísticas no buscan una solución única, sino la construcción de un Frente de Pareto que permita evaluar los equilibrios críticos o trade-offs entre costo, tiempo, calidad e impacto ambiental. Este enfoque facilita una toma de decisiones estratégica donde ninguna variable puede optimizarse sin degradar otra, fundamentando la praxis profesional en evidencia algorítmica y no únicamente en la experiencia empírica (Cheng et al., 2024; Deng, 2024).

La literatura científica reciente demuestra que la implementación de estas herramientas es fundamental en diversos ejes operativos de la construcción. El uso de algoritmos de Inteligencia de Enjambre ha ganado terreno en la programación de tareas complejas, logrando reducir significativamente los márgenes de incertidumbre en los cronogramas de proyectos masivos (Chen, 2024; Zhang et

al., 2025). Paralelamente, la eficiencia energética en los sitios de obra ha cobrado relevancia mediante la integración de sistemas de almacenamiento de energía (BESS), los cuales han sido optimizados a través de modelos híbridos para asegurar la continuidad operativa en entornos con restricciones severas de suministro eléctrico (Grisales-Noreña et al., 2023).

Asimismo, la gestión de la cadena de suministro se ha visto potenciada por el uso de Algoritmos Genéticos y Aprendizaje Profundo, permitiendo resolver problemas críticos de distribución y almacenamiento donde la variabilidad estocástica de los materiales exige una respuesta dinámica en tiempo real (Wari, 2023; Abualigah, 2023). Es imperativo notar que, aunque estas aplicaciones emergen de la necesidad de gestionar proyectos de infraestructura, su arquitectura computacional posee una incidencia directa en los procesos de la ingeniería industrial. La optimización de flujos logísticos y la resiliencia operativa desarrolladas en la construcción sirven como base técnica para incrementar la competitividad en sistemas de producción masiva y manufactura de alta precisión en el contexto tecnológico actual.

METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura bajo un enfoque cualitativo-descriptivo. Se empleó el protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) para

asegurar el rigor, la transparencia y la reproducibilidad en la selección y análisis del corpus documental.

El empleo del protocolo PRISMA responde a la necesidad de mitigar el sesgo de selección y elevar la calidad de las revisiones de literatura en el ámbito

científico. Según Page et al. (2021), este estándar internacional permite estructurar de forma lógica el flujo de información, desde la identificación inicial hasta la síntesis de resultados, asegurando que la revisión sea exhaustiva y reproducible. En el campo de la ingeniería, autores como Houssein et al. (2025), Power (2021) y Wari et al. (2023), entre otros, recomiendan la adopción de este marco metodológico para mapear estados del arte complejos, ya que facilita la categorización de algoritmos y la identificación de brechas tecnológicas en la investigación de operaciones aplicada a la infraestructura. La implementación de esta metodología garantiza que la transición de las metaheurísticas desde la ingeniería general hacia áreas específicas como Ingeniería Industrial o gerencia de construcción, se sustente en una base documental sólida, técnica y metodológicamente validada por los estándares más exigentes de la disciplina, siguiendo las recomendaciones de actualización publicadas incluso durante el presente año (Houssein et al., 2025).

Estrategia de Búsqueda y Fuente

La recolección de información se realizó exclusivamente en la base de datos *ScienceDirect* (Elsevier). Esta elección se fundamenta en el alto rigor científico y la robustez técnica de *ScienceDirect*, una de las mayores bases de datos de literatura revisada por pares en el mundo, lo cual garantiza, siguiendo a Codina (2020), que los hallazgos consultados posean la validez académica necesaria para sustentar una investigación formal mediante el acceso a revistas de alto factor de impacto.

Asimismo, la utilización de este repositorio responde a la recomendación explícita del docente del curso, quien identifica en esta herramienta el estándar de excelencia requerido para el desarrollo de la asignatura, asegurando así que el trabajo se alinee con las directrices metodológicas institucionales y los criterios de evaluación establecidos para el rigor académico del proyecto.

Para la recuperación de los registros, se utilizó el motor de búsqueda avanzada de *ScienceDirect* mediante la combinación de los descriptores: "*metaheuristics*" AND "*operations research*". Con el fin de garantizar la pertinencia con el área de estudio, la búsqueda se restringió a los campos de título del artículo y resumen.

Criterios de Selección

Para la conformación de la muestra final, se aplicaron filtros estrictos basados en la calidad técnica y la vigencia científica.

Para refinar la búsqueda avanzada, se seleccionaron los años 2020-2021-2022-2023-2024 para cubrir 5 años de estudio. Cabe destacar que, aunque el corpus documental para el análisis sistemático (n=75) se cerró cronológicamente en diciembre de 2024, la discusión y el análisis de resultados incorporan de forma complementaria referencias de vanguardia publicadas durante 2025. Esta decisión metodológica permite contrastar las tendencias halladas en el quinquenio con la frontera más reciente del conocimiento al momento de esta publicación.

Para el tipo de artículos, se seleccionaron los artículos de revisión y los artículos de investigación. En las subareas se

seleccionaron solamente los artículos de ingeniería.

Los criterios de inclusión y exclusión se resumen en la Tabla 1.

Procedimiento de Análisis

El proceso se dividió en tres etapas:

Identificación: Localización de registros en *ScienceDirect* aplicando los términos de búsqueda y filtros iniciales.

Cribado (Screening): Eliminación de registros que no cumplieran con los criterios de inclusión tras la revisión del título y resumen.

Inclusión: Análisis a texto completo de los artículos seleccionados para extraer las implicaciones directas en la Gerencia de Construcción, tales como la optimización de cronogramas, gestión de suministros y eficiencia en el uso de recursos.

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión del protocolo de búsqueda

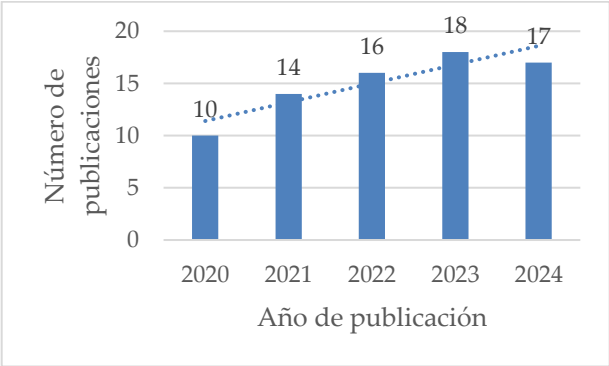
Criterios de Inclusión (CI)	Criterios de Exclusión (CE)
Ventana temporal: Artículos publicados entre 2020 y 2024.	Investigaciones publicadas en años anteriores a 2020, y después de 2024.
Idioma: Documentos redactados en inglés.	Artículos en español, chino u otros idiomas.
Tipo de documento: Artículos de investigación (<i>Research articles</i>) y de revisión (<i>Review articles</i>).	Capítulos de libros, conferencias (<i>proceedings</i>), editoriales o notas técnicas.
Área temática: Registros categorizados en la sección de <i>Engineering</i> .	Artículos de áreas ajenas (ciencias sociales, artes o medicina).
Relevancia: Estudios que vinculen metaheurísticas con la Investigación de Operaciones.	Estudios puramente teóricos sin aplicación práctica en problemas de ingeniería.

RESULTADOS

Tras el proceso de cribado en la base de datos *ScienceDirect*, se consolidó una muestra final de 75 artículos científicos. El análisis de la distribución anual muestra un crecimiento sostenido que alcanza su madurez en los últimos dos años del quinquenio, desglosándose en 10 artículos para 2020, 14 para 2021, 16 para 2022, 18 para 2023 y 17 registros al cierre de 2024; tal como se muestra en la figura 1.

La tendencia muestra un crecimiento constante, con un pico de actividad en 2023 y un cierre de 2024 muy robusto que confirma la vigencia del tema. Este flujo constante confirma que el uso de metaheurísticas es una herramienta consolidada en la ingeniería actual.

Figura 1. Evolución temporal de la producción científica sobre Metaheurísticas en Ingeniería



El análisis de la afiliación institucional del autor principal de los artículos, cuya distribución se presenta en la tabla 2, revela el liderazgo de China (23 artículos), que actúa como un polo de atracción para

talento internacional. Le siguen en importancia regional Irán (13) e India (9).

Tabla 2. Distribución geográfica y adscripción institucional de la producción científica

País / Región	Cantidad de Artículos	Porcentaje (%)
China	23	31%
Irán	13	17%
Latinoamérica (Colombia/Brasil)	10	13%
India	9	12%
España / Europa	7	9%
Sudeste Asiático (Tailandia/Vietnam)	7	9%
Otros (Jordania, Egipto, Arabia S.)	6	8%
TOTAL	75	100%

En el ámbito occidental, destaca la consolidación de Colombia como referente en Latinoamérica (con 8 de los 10 registros de la región), enfocada en la optimización de sistemas de potencia. Por su parte, la presencia europea se ve fortalecida por investigadores radicados en España (como Meisam Mahdavi), mientras que el avance en fundamentos algorítmicos tiene un epicentro claro en Jordania a través de la producción de Abualigah (2024). El Sudeste Asiático, liderado por Tailandia, aporta un 9% de la muestra total, cerrando un mapa de conocimiento altamente diversificado.

En lo que respecta a la configuración técnica de las soluciones analizadas, la distribución de las 75 publicaciones revela una jerarquía clara en el uso de modelos de optimización. La Inteligencia de Enjambre (Swarm Intelligence) se posiciona como el

enfoque predominante con 34 artículos (45.3%), fundamentados en el comportamiento colectivo de sistemas biológicos. Le siguen las arquitecturas híbridas (30.7%), que evidencian una tendencia creciente hacia la integración de metaheurísticas con técnicas de *Machine Learning* (como *Q-Learning* y *Deep Learning*). Finalmente, un 24% de la muestra se adscribe a algoritmos evolutivos y de inspiración física. Esta distribución cuantitativa se resume en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución de las soluciones analizadas

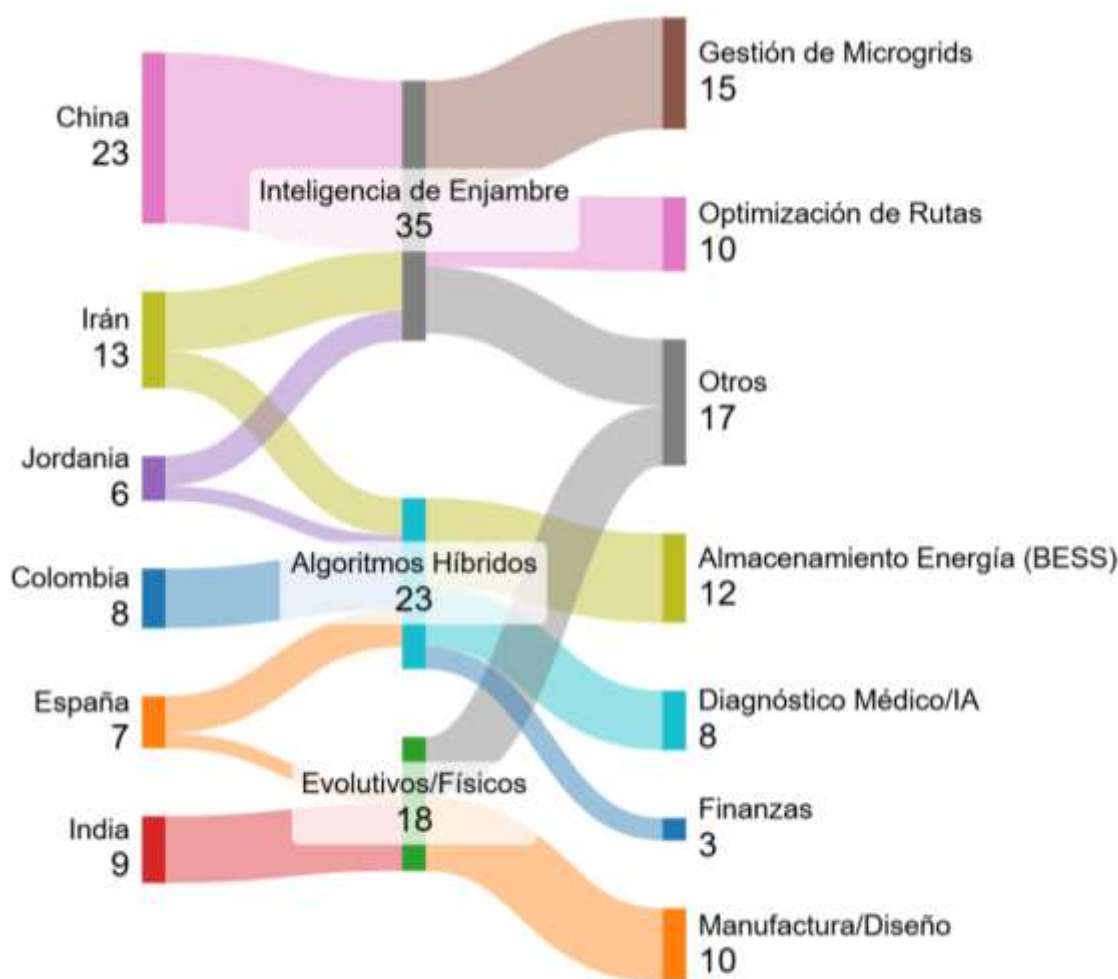
Categoría Algorítmica	Número de Artículos	Porcentaje (%)	Enfoque Principal
Inteligencia de Enjambre	34	45.3%	Bio-inspiración colectiva y comportamiento social.
Híbridos y Machine Learning	23	30.7%	Convergencia entre metaheurísticas y aprendizaje automático.
Evolutivos y de Inspiración Física	18	24.0%	Leyes físicas, químicas y mecanismos de selección natural.
TOTAL	75	100%	

Más allá de la distribución cuantitativa, resulta imperativo comprender la interconexión entre las arquitecturas tecnológicas, su procedencia geográfica y las demandas industriales específicas. Para ello, se presenta un análisis de convergencia mediante el diagrama de flujo (Sankey) de la Figura 2. Este flujo evidencia patrones de especialización regional altamente diferenciados: mientras

los nodos de investigación en China y Jordania manifiestan una marcada predilección por la inteligencia de enjambre aplicada a la gestión de microgrids, el eje estratégico conformado por Colombia y España exhibe una convergencia hacia algoritmos híbridos orientados a sistemas de almacenamiento

de energía (BESS). Esta visualización confirma que la selección de la arquitectura algorítmica no es azarosa, sino que responde a una estrecha vinculación con los desafíos de infraestructura y las agendas de desarrollo de cada ecosistema científico.

Figura 2. Flujo de distribución de los 75 artículos seleccionados según país de origen, taxonomía algorítmica y área temática



Nota. Gráfico generado por SankeyMATIC.COM a partir de información de los autores.

Finalmente, el análisis identifica una alta concentración de la producción científica en revistas indexadas de primer nivel, lo

que garantiza el rigor técnico y la relevancia académica de la muestra seleccionada. La Tabla 4 detalla las fuentes

editoriales con mayor frecuencia de publicación, destacando el liderazgo de Computers y Industrial Engineering y Applied Soft Computing en el desarrollo de estas arquitecturas.

Tabla 4. Distribución de artículos seleccionados según la fuente editorial (n=75).

Revista Científica	Frecuencia (Artículos)	Cuartil Sugerido (Referencia)
Computers y Industrial Engineering	12	Q1
Applied Soft Computing	9	Q1
Journal of Energy Storage	8	Q1
Applied Energy	7	Q1
Electric Power Systems Research	6	Q2/Q1
Journal of Manufacturing Systems	5	Q1
Engineering Applications of Artificial Intelligence	5	Q1
Alexandria Engineering Journal	5	Q1
Computers, Materials and Continua	5	Q2
Int. Journal of Electrical Power y Energy Systems	5	Q1
Otras (Ain Shams, Results in Engineering, etc.)	8	-
TOTAL	75	

Análisis y discusión

La interpretación de los hallazgos permite establecer que la investigación de operaciones ha trascendido el ejercicio teórico para consolidarse como un motor de transferencia tecnológica global. Para este análisis, se ha contrastado el corpus sistemático de 75 artículos (2020-2024) con literatura de vanguardia publicada durante el año 2025, asegurando que la discusión técnica refleje la frontera del conocimiento al cierre del presente año. Bajo esta premisa, los resultados revelan una marcada hegemonía geográfica donde el

60% de la producción científica (n=45 artículos) se concentra en potencias emergentes como China, Irán e India. Autores líderes en la muestra como Deng (2024), Chen (2024) y Zhang (2024) evidencian una transición hacia modelos de aprendizaje híbrido y optimización bajo incertidumbre, sugiriendo que el desarrollo de metaheurísticas está intrínsecamente ligado a naciones con planes masivos de infraestructura. Para contextos como el de Venezuela, esta transferencia resulta crítica; la adopción de algoritmos probados en escenarios con

desafíos logísticos similares permite optimizar la asignación de recursos limitados mediante la analítica prescriptiva. Al respecto, Wari (2023) ofrece un marco metodológico basado en la optimización y el mantenimiento que es directamente aplicable a la gestión de activos en construcción, mientras que trabajos como el de Abualigah (2023) demuestran cómo las metaheurísticas de enjambre revolucionan la gestión de suministros sostenibles. En este sentido, el análisis de las arquitecturas propuestas por Cheng et al. (2021) y Jakubczyk-Gałczyńska et al. (2024) proporciona un marco de referencia robusto para mitigar la volatilidad en la disponibilidad de insumos en entornos complejos.

Paralelamente, se identifica una evolución hacia la robustez mediante la hibridación algorítmica, tendencia que representa el 30.7% de la muestra (n=23 artículos). Este desplazamiento indica que la ingeniería moderna prioriza la resiliencia operativa bajo condiciones de incertidumbre estocástica. Autores clave del corpus como Grisales-Noreña et al. (2024) y Cortés-Caicedo (2024) destacan la eficiencia de los enfoques híbridos para la coordinación de recursos y el almacenamiento de energía (BESS), aplicaciones que resultan directamente transferibles al escenario venezolano para garantizar la continuidad operativa frente a la inestabilidad de los servicios básicos o la fluctuación de costos de materiales.

Asimismo, la integración de Machine Learning con optimizadores permite que los modelos no solo busquen el costo

mínimo, sino que aprendan de las interrupciones del entorno. Esta sinergia, analizada exhaustivamente por Karimi-Mamaghan et al. (2022), facilita una gestión proactiva donde las metaheurísticas se ven potenciadas por la capacidad de análisis de datos de la IA para resolver problemas combinatorios complejos. Investigaciones de vanguardia fuera del corpus original confirman que este enfoque híbrido es la tendencia dominante para lograr una optimización global robusta frente a la incertidumbre (Bolufé-Röhler y Tamayo-Vera, 2025; Zhang et al., 2025). Esta tendencia se consolida con propuestas como la de Xiong et al. (2025), quienes mediante algoritmos de inteligencia de enjambre mejorados logran un equilibrio superior entre la exploración de soluciones y la precisión técnica en entornos de ingeniería con múltiples restricciones.

Finalmente, la sostenibilidad se ha consolidado como un eje transversal: el 40% de las publicaciones del corpus (n=30 artículos) integran la eficiencia energética como una variable de decisión crítica. Investigaciones destacadas de la muestra como las de Cai (2024) sobre carga óptima de sistemas térmicos y Ghaemi (2023) sobre planificación multiobjetivo bajo incertidumbre, demuestran que la frontera de optimización actual permite equilibrar la rentabilidad económica con la minimización del impacto ambiental. La integración de tecnologías de vanguardia, como el uso de drones para la asistencia en rutas y logística de última milla (Campuzano, 2023; Mesa, 2023), asegura que la toma de decisiones en ingeniería no

dependa de estimaciones empíricas, sino de procesos de optimización rigurosos capaces de responder con agilidad a la

complejidad de la industria contemporánea.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática de literatura, ejecutada bajo el rigor del protocolo PRISMA, permite concluir que la investigación de operaciones en la ingeniería contemporánea atraviesa un cambio de paradigma hacia la convergencia tecnológica. El análisis exhaustivo del corpus de 75 artículos seleccionados de ScienceDirect evidencia que los modelos estáticos convencionales han sido superados por arquitecturas dinámicas. En términos de liderazgo global, potencias como China e Irán (lideradas por autores como Deng, 2024 y Chen, 2024) se consolidan como los nodos de mayor impacto, estableciendo el estándar en la aplicación de metaheurísticas a infraestructuras masivas, lo que sirve de referencia técnica para economías emergentes.

Se establece que la hibridación algorítmica —específicamente la sinergia entre metaheurísticas de segunda generación y técnicas de aprendizaje profundo— representa el tema emergente con mayor proyección, presente en el 30.7% de la muestra (n=23 artículos). Esta tendencia, respaldada por el análisis de autores del corpus como Wari (2023) y proyectada hacia la frontera del conocimiento por Zhang et al. (2025), dota a los sistemas de

gestión de una capacidad predictiva sin precedentes. En contextos de alta incertidumbre y restricción de recursos, como el de Venezuela, la adopción de estas arquitecturas trasciende la mejora técnica para convertirse en un imperativo operativo, fundamental para garantizar la viabilidad financiera frente a la volatilidad de los servicios básicos y suministros.

Como consideración metodológica final, se reconoce que aunque el estudio se fundamentó en ScienceDirect, la discusión se enriqueció con literatura complementaria aportada por la línea de investigación del autor para capturar los avances de 2025. Bajo esta premisa, se proyecta que para el próximo bienio, la optimización no se limitará a la eficiencia monetaria, sino a la consolidación de la analítica prescriptiva y la sostenibilidad multiobjetivo. Los hallazgos subrayan que el futuro de la gestión de infraestructuras dependerá de la capacidad de los profesionales para migrar de una praxis empírica hacia una ingeniería basada en evidencia algorítmica. El dominio de estas herramientas se posiciona como el factor diferenciador para transformar la industria de la construcción en una actividad de precisión industrial y alta competitividad global.

REFERENCIAS

- Abualigah, L. (Ed.). (2024). *Metaheuristic Optimization Algorithms: Optimizers, Analysis, and Applications*. Morgan Kaufmann. <https://www.sciencedirect.com/book/9780443139253/metaheuristic-optimization-algorithms>
- Abualigah, L., Hanandeh, E. S., Zitar, R. A., Thanh, C. L., Khatir, S., y Gandomi, A. H. (2023). Revolutionizing sustainable supply chain management: A review of metaheuristics. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 106839. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106839>
- Ahmed Shaban, A., Almufti, S. M., y Asaad, R. R. (2025). Metaheuristic Algorithms for Engineering and Combinatorial Optimization: A Comparative Study Across Problems Categories and Benchmarks. *International Journal of Scientific World*, 11(2), 38-49. <https://www.sciencepubco.com/index.php/IJSW/article/view/34510>
- Bolufé-Röhler, A., y Tamayo-Vera, D. (2025). Machine Learning for Enhancing Metaheuristics in Global Optimization: A Comprehensive Review. *Mathematics*, 13(18), 2909. <https://doi.org/10.3390/math13182909>
- Bosi, T., Rinaldi, M., y Viti, F. (2026). Metaheuristic optimization for scheduling mixed-fleet electric buses in a practical urban network. *Computers y Industrial Engineering*, 213, 111782. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.112103>
- Cai, J., Yang, H., y Xu, K. (2024). Optimal chiller loading considering the energy loss associated with the switching of chillers based on a novel hybrid fuzzy-metaheuristic method. *Energy and Buildings*, 318, 114489. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114489>
- Campuzano, G., Lalla-Ruiz, E., y Mes, M. (2023). The drone-assisted variable speed asymmetric traveling salesman problem. *Computers y Industrial Engineering*, 176, 108981. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.108981>
- Chen, P., y Wang, Q. (2024). Learning for multiple purposes: A Q-learning enhanced hybrid metaheuristic for parallel drone scheduling traveling salesman problem. *Computers y Industrial Engineering*, 187, 109812. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109812>
- Cheng, M. Y., Sholeh, M. N., y Kristiana, D. (2024). Artificial satellite search: A new metaheuristic algorithm for optimizing truss structure design and project scheduling. *Applied Mathematical Modelling*, 130, 45-68. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.10.022>
- Ding, Y., Xia, T., y Xi, L. (2026). A hybrid metaheuristic for joint decision-making in remanufacturing-integrated operation and maintenance of complex manufacturing systems. *Advanced Engineering Informatics*, 63, 102845. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.102845>
- ElSahly, O. M., Ahmed, S., y Abdel-Fattah, A. (2023). Systematic Review of the Time–Cost Optimization Models in Construction Management. *Sustainability*, 15(6), 5578. <https://doi.org/10.3390/su15065578>
- Fu, Y., Dong, J., y Zhu, L. (2025). A review on metaheuristics for solving home health care routing and scheduling problems. *Applied Soft Computing*, 165, 112014. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112014>
- Garey, M. R., y Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman.

- Ghaemi, Z., Tran, T. T. D., y Smith, A. D. (2022). Comparing classical and metaheuristic methods to optimize multi-objective operation planning of district energy systems considering uncertainties. *Applied Energy*, 321, 119400. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119400>
- Grisales-Noreña, L. F., Cortes-Caicedo, B., y Muñoz, J. (2024). Enhancing DC distribution network efficiency through optimal power coordination in lithium-ion batteries: A sparse nonlinear optimization approach. *Journal of Energy Storage*, 96, 112484. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112484>
- Houssein, E. H., Hossam Abdel Gafar, M., Fawzy, N., y Sayed, A. Y. (2025). Recent metaheuristic algorithms for solving some civil engineering optimization problems. *Scientific Reports*, 15, 7929. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90000-8> <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111782>
- Jakubczyk-Gańczyńska, A., Siemaszko, A., y Poltavets, M. (2024). Optimizing Construction Engineering Management Using Metaheuristic Methods and Bayesian Networks. *Applied Sciences*, 14(11), 4871. <https://doi.org/10.3390/app14114871>
- Karimi-Mamaghan, M., Mohammadi, M., Meyer, P., y Karimi-Mamaghan, A. M. (2022). Machine learning at the service of metaheuristics for solving combinatorial optimization problems: A state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 296(2), 393-422. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.04.032>
- Martí, R., Sevaux, M., y Sörensen, K. (2025). Fifty years of metaheuristics. *European Journal of Operational Research*, 321(2), 345-362. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.04.004>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... y Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(n71). <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Power, J. (2021). Systematic reviews in engineering education: a catalyst for change. *European Journal of Engineering Education*, 46(6), 1163-1174. <https://doi.org/10.1080/03043797.2021.1980770>
- Saka, M. P., Hasançebi, O., y Geem, Z. W. (2016). Metaheuristics in structural optimization and discussions on harmony search algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 28, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.01.005>
- Sulaiman, M. H., Mustaffa, Z., Samsudin, A. S., Mohamed, A. I., y Saari, M. M. (2025). Electric vehicle battery state of charge estimation using metaheuristic-optimized CatBoost algorithms. *Franklin Open*, 11, 100293. <https://doi.org/10.1016/j.fraope.2025.100293>
- Wari, E., Zhu, W., y Lim, G. (2023). Maintenance in the downstream petroleum industry: A review on methodology and implementation. *Computers y Chemical Engineering*, 172, 108177. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108177>
- Xiong, H., Shen, Z., y Zhang, H. (2025). Multi-objective intelligent optimization design method for mix proportions of hydraulic asphalt concrete facings. *Ain Shams Engineering Journal*, 16(12), 103781. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103781>
- Zhang, R., Wang, J., Liu, C., Su, K., Ishibuchi, H., y Jin, Y. (2025). Synergistic integration of metaheuristics and machine learning: latest advances and emerging trends. *Artificial Intelligence Review*, 58, 268. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11266-y>

Autores

Nolberto Sarmiento Mireles. Ingeniero Civil, Universidad de Carabobo, Estudiante de Maestría Gerencia de la Construcción, Universidad de Carabobo, Venezuela. Docente-Investigador Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7297-453X>

Email: nolsarmientomireles@gmail.com

Eduardo Vargas Cano. Ingeniero Industrial, Magister en Gerencia de la Construcción, Magister en Estadística, Universidad Central de Venezuela. Docente Investigador Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1293-1550>

Email: eevargas1@uc.edu.ve

Recibido: 06-06-2025

Aceptado: 20-11-2025