

MODELADO MATEMÁTICO Y OPTIMIZACIÓN EN SISTEMAS COMPLEJOS: UNA REVISIÓN DE MÉTODOS Y TENDENCIAS EMERGENTES

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION IN COMPLEX SYSTEMS: A REVIEW OF METHODS AND EMERGING TRENDS

Lizandro Agustin Cedeño Barcia^{1*}

¹ Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0464-2174>. Correo: lizandro.cedemo@utm.edu.ec

Ella es Evelyn Maria Polit Cedeño²

² Investigadora Independiente. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5507-0562>. Correo: politevelyn@gmail.com

Irene Dalia Murillo Malagón³

³ Universidad Espíritu Santo - Ministerio de Educación, Deporte y Cultura. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5567-6715>. Correo: irene.murillo@educacion.gob.ec

Jean Pierre Giraldo Aponte⁴

⁴ Ministerio de Educación, Deporte y Cultura. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5821-2360>. Correo: jean.giraldo@educacion.gob.ec

* Autor para correspondencia: lizandro.cedemo@utm.edu.ec

Resumen

Los sistemas complejos (caracterizados por relaciones no lineales, múltiples escalas de interacción y comportamientos emergentes) constituyen uno de los principales desafíos de la ingeniería, la física aplicada y las ciencias computacionales contemporáneas; comprender y controlar su dinámica exige instrumentos matemáticos capaces de representar la incertidumbre, la interdependencia estructural y la evolución temporal de sus componentes. Esta revisión narrativa tiene como objetivo sintetizar los métodos de modelado matemático y las técnicas de optimización aplicadas a sistemas complejos, así como identificar las tendencias emergentes que están redefiniendo el campo. La búsqueda de literatura se realizó en bases de datos científicas



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Sociedad Ecuatoriana de Investigación Científica. E-mail: revistaalcon@gmail.com

indexadas, combinando términos en español e inglés relacionados con modelado matemático, optimización, metaheurísticas, gemelos digitales y teoría de redes complejas, priorizando publicaciones de los últimos cinco años; el proceso permitió examinar un conjunto amplio de estudios y seleccionar veintidós referencias pertinentes. Los resultados evidencian una consolidación de los algoritmos metaheurísticos bioinspirados como herramienta dominante para problemas de optimización no convexos, un avance sostenido de los modelos híbridos que combinan simulación física con aprendizaje automático (particularmente en gemelos digitales) y una creciente aplicación de la teoría de redes complejas para representar la interdependencia estructural de sistemas de ingeniería. Se concluye que la convergencia entre inteligencia artificial, optimización multiobjetivo y modelado basado en redes constituye la trayectoria más prometedora para abordar la complejidad creciente de los sistemas contemporáneos, aunque persisten desafíos relacionados con la interpretabilidad, el costo computacional y la validación empírica de los modelos propuestos.

Palabras clave: modelado matemático; optimización; sistemas complejos; metaheurísticas; gemelos digitales

Abstract

Complex systems — characterized by nonlinear relationships, multiple interacting scales, and emergent behavior — represent one of the central challenges facing contemporary engineering, applied physics, and computational science; understanding and controlling their dynamics requires mathematical tools capable of representing uncertainty, structural interdependence, and the temporal evolution of their components. This narrative review aims to synthesize mathematical modeling methods and optimization techniques applied to complex systems, as well as to identify the emerging trends that are redefining the field. The literature search was carried out in indexed scientific databases, combining Spanish and English terms related to mathematical modeling, optimization, metaheuristics, digital twins, and complex network theory, prioritizing publications from the last five years; this process allowed for the examination of a broad set of studies and the selection of twenty-two relevant references. The results show a consolidation of bio-inspired metaheuristic algorithms as the dominant tool for non-convex optimization problems, sustained progress in hybrid models that combine physical simulation with machine learning — particularly in digital twins — and a growing application of complex network theory to represent the structural interdependence of engineering systems. It is concluded that the convergence of artificial intelligence, multi-objective optimization, and network-based modeling constitutes the most promising trajectory for addressing the growing complexity of contemporary systems, although challenges remain regarding interpretability, computational cost, and the empirical validation of proposed models.

Keywords: mathematical modeling; optimization; complex systems; metaheuristics; digital twins

Fecha de recibido: 22/05/2025

Fecha de aceptado: 03/08/2026

Fecha de publicado: 05/08/2026



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Sociedad Ecuatoriana de Investigación Científica. E-mail: revistaalcon@gmail.com

Introducción

La noción de sistema complejo ha pasado, en poco más de tres décadas, de ser un concepto marginal de la física estadística a convertirse en un marco de referencia transversal para la ingeniería, la economía, la biología y las ciencias de la computación. Un sistema complejo se define habitualmente por la presencia de un número elevado de componentes interconectados cuyas interacciones locales dan lugar a comportamientos globales que no pueden deducirse trivialmente de las propiedades individuales de sus partes; esta propiedad, conocida como emergencia, hace que la comprensión de la dinámica del sistema requiera necesariamente instrumentos matemáticos capaces de capturar la no linealidad, la retroalimentación y la interdependencia estructural (Zhao, 2024). El modelado matemático constituye, en este sentido, la vía principal para traducir la complejidad observada en estructuras formales susceptibles de análisis, simulación y, sobre todo, optimización.

La relevancia de esta línea de investigación se ha visto reforzada por la convergencia de tres fenómenos recientes. En primer lugar, la disponibilidad creciente de datos generados por sensores, plataformas de monitoreo y procesos industriales ha impulsado el desarrollo de modelos híbridos que combinan ecuaciones físicas con técnicas de aprendizaje automático, capaces de aprender patrones que los modelos puramente analíticos no logran representar (Veeranan et al., 2024). En segundo lugar, la potencia computacional disponible ha permitido la maduración de los algoritmos metaheurísticos bioinspirados, que ofrecen soluciones aproximadas de alta calidad para problemas de optimización no convexos, multimodales y con múltiples restricciones, característicos de los sistemas de ingeniería reales (Talatahari et al., 2021). En tercer lugar, la difusión del paradigma del gemelo digital ha situado a la optimización matemática en el centro de la operación y el mantenimiento predictivo de sistemas físicos complejos, desde infraestructuras energéticas hasta procesos de manufactura (Kunzer et al., 2022).

Estos tres fenómenos —la abundancia de datos, la madurez computacional de las metaheurísticas y la consolidación del paradigma del gemelo digital— no operan de manera aislada, sino que se refuerzan mutuamente: los algoritmos de optimización requieren de la capacidad predictiva de los modelos híbridos para operar sobre representaciones fieles del sistema real, mientras que los gemelos digitales requieren, a su vez, de procedimientos de optimización eficientes para calibrar sus parámetros y para orientar las decisiones operativas que de ellos se derivan.

A pesar de estos avances, el conocimiento disponible presenta todavía vacíos relevantes. Buena parte de la literatura sobre metaheurísticas se concentra en la propuesta y validación de nuevos algoritmos inspirados en fenómenos naturales, sin ofrecer una visión integradora de sus fundamentos comunes ni de los criterios que permiten seleccionar el método más adecuado para un problema determinado (Benaissa et al., 2024; Almufti et al., 2023). De manera similar, los estudios sobre gemelos digitales y modelos sustitutos tienden a enfocarse en aplicaciones sectoriales específicas —estructuras dinámicas, sistemas térmicos, baterías de vehículos eléctricos— sin establecer puentes explícitos con el cuerpo teórico de la optimización matemática clásica (Chakraborty et al., 2021). Por su parte, la teoría de redes complejas, pese a su capacidad demostrada para representar la interdependencia estructural de sistemas de infraestructura crítica, continúa siendo tratada como un campo relativamente autónomo respecto de la optimización numérica y del modelado matemático tradicional (Anderson & Dragičević, 2020; Myhre et al., 2020). Esta fragmentación disciplinar dificulta la



construcción de una visión unificada de los métodos disponibles y de las tendencias que orientarán su desarrollo en el corto y mediano plazo.

Frente a este panorama, la presente revisión narrativa tiene como objetivo sintetizar, de manera integradora, los principales métodos de modelado matemático y las técnicas de optimización aplicadas a sistemas complejos, con especial atención a los algoritmos metaheurísticos, los modelos híbridos basados en inteligencia artificial y la teoría de redes complejas, así como identificar las tendencias emergentes que están redefiniendo estas líneas de trabajo. A diferencia de las revisiones sistemáticas centradas en un único algoritmo o dominio de aplicación, este trabajo adopta una perspectiva transversal que busca poner en diálogo tradiciones metodológicas que, si bien comparten el objetivo común de representar y optimizar sistemas con múltiples componentes interdependientes, rara vez son analizadas de manera conjunta.

El artículo se organiza de la siguiente manera. La sección de materiales y métodos describe el procedimiento de búsqueda y selección de la literatura utilizada como base empírica de la revisión. La sección de resultados presenta una síntesis organizada en cuatro ejes temáticos: los métodos metaheurísticos bioinspirados, la optimización multiobjetivo y los algoritmos evolutivos avanzados, los modelos híbridos y los gemelos digitales basados en inteligencia artificial, y la teoría de redes complejas aplicada al modelado estructural de sistemas de ingeniería. La sección de discusión integra estos hallazgos, identifica convergencias y divergencias entre las distintas tradiciones metodológicas y señala los vacíos de conocimiento más relevantes. Al finalizar, se plantean las conclusiones, las cuales resumen los principales aportes de la revisión y proponen líneas de investigación futura.

Materiales y métodos

Este trabajo se desarrolló como una revisión narrativa de la literatura, un enfoque que se consideró más adecuado que una revisión sistemática o un metaanálisis dado el carácter transversal y multidisciplinar del objeto de estudio, que abarca desde la teoría de la optimización matemática hasta la inteligencia artificial aplicada y la ciencia de redes. A diferencia de las revisiones sistemáticas, que exigen la delimitación estricta de una pregunta de investigación única y de criterios de elegibilidad cuantificables, la revisión narrativa permitió integrar de manera argumentativa cuerpos de conocimiento que, aunque metodológicamente distintos, convergen en el problema común de modelar y optimizar sistemas con múltiples componentes interdependientes.

La búsqueda de literatura se realizó en bases de datos científicas indexadas de acceso académico, complementadas con motores de búsqueda especializados en ciencia y tecnología. Se emplearon términos de búsqueda tanto en español como en inglés, dado que este último idioma concentra la mayor proporción de publicaciones especializadas en optimización matemática e inteligencia artificial. Entre los términos utilizados se incluyeron combinaciones de “modelado matemático”, “optimización”, “sistemas complejos”, “metaheurísticas”, “gemelos digitales”, “redes complejas” y sus equivalentes en inglés (“mathematical modeling”, “optimization”, “complex systems”, “metaheuristics”, “digital twins”, “complex networks”), articulados mediante operadores booleanos para cubrir de manera independiente cada uno de los ejes temáticos y sus posibles intersecciones.



Se establecieron como criterios de inclusión: publicaciones en revistas académicas revisadas por pares o en actas de congresos científicos indexados; disponibilidad de resumen y texto verificable; pertinencia temática directa con el modelado matemático o la optimización de sistemas complejos; y prioridad para trabajos publicados durante los últimos cinco años, ampliando el rango a un máximo de seis años cuando la relevancia conceptual de un estudio lo justificaba. Se excluyeron los documentos sin verificación bibliográfica disponible, los que carecían de una descripción metodológica mínima y aquellos cuyo objeto de estudio, pese a mencionar términos relacionados con la complejidad o la optimización, correspondía a aplicaciones clínicas o biomédicas ajenas al enfoque de ingeniería y ciencias computacionales adoptado en este trabajo.

El proceso de búsqueda se organizó en múltiples rondas independientes, cada una orientada a uno de los ejes temáticos identificados —metaheurísticas bioinspiradas, optimización multiobjetivo, modelos híbridos e inteligencia artificial, y teoría de redes complejas—, lo que permitió examinar varios centenares de resultados potenciales. De este conjunto inicial se preseleccionaron los estudios cuyo resumen evidenciaba una correspondencia clara con los objetivos de la revisión, y posteriormente se depuró la lista mediante la lectura del texto disponible, priorizando aquellos trabajos con mayor especificidad metodológica, diversidad de enfoques y complementariedad temática. Como resultado de este proceso se seleccionaron veintidós referencias que constituyen el sustento empírico de la síntesis presentada en las secciones siguientes.

El análisis de los estudios seleccionados se realizó mediante lectura crítica y comparativa, identificando en cada caso el tipo de sistema complejo abordado, el enfoque de modelado o de optimización propuesto, los resultados reportados y las limitaciones señaladas por los propios autores. Esta información se organizó posteriormente en los cuatro ejes temáticos que estructuran la sección de resultados, procurando en cada caso integrar los hallazgos individuales en una narrativa que permitiera identificar convergencias metodológicas, divergencias de enfoque y vacíos de conocimiento pendientes de resolver.

Resultados y discusión

Herramientas computacionales para la implementación y validación de modelos y algoritmos

Los estudios revisados recurren a un conjunto relativamente estable de herramientas computacionales para la implementación y validación de los modelos y algoritmos propuestos. En el ámbito de las metaheurísticas, la mayoría de los trabajos emplea entornos de programación científica —principalmente MATLAB y Python, este último con bibliotecas especializadas en computación numérica y optimización— para implementar los algoritmos y evaluarlos sobre baterías de funciones de referencia, como los conjuntos de prueba de las competencias CEC (Talatahari et al., 2021; Trojovský et al., 2022).

En el terreno de los gemelos digitales y los modelos híbridos, las herramientas más utilizadas corresponden a bibliotecas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo, junto con software de simulación por elementos finitos para la generación de datos sintéticos de entrenamiento (Chakraborty et al., 2021). Finalmente, el análisis de redes complejas se apoya de manera recurrente en paquetes especializados de teoría de grafos, empleados para calcular métricas de centralidad, robustez estructural y resiliencia frente a fallos aleatorios o ataques dirigidos (Anderson & Dragičević, 2020; Li et al., 2023).

Metaheurísticas bioinspiradas: fundamentos comunes y diversificación algorítmica



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Sociedad Ecuatoriana de Investigación Científica. E-mail: revistaalcon@gmail.com

La primera línea de convergencia identificada en la literatura revisada corresponde a la consolidación de los algoritmos metaheurísticos bioinspirados como la herramienta dominante para resolver problemas de optimización no convexos, multimodales y con restricciones complejas, característicos de los sistemas de ingeniería reales. Estos algoritmos se distinguen de los métodos de optimización clásicos —basados en gradientes o en programación lineal y no lineal— por su capacidad de explorar espacios de búsqueda de alta dimensionalidad sin requerir información analítica sobre la función objetivo, lo que los convierte en herramientas particularmente adecuadas para problemas en los que dicha función es discontinua, ruidosa o computacionalmente costosa de evaluar (Benaissa et al., 2024).

Benaissa et al. (2024) ofrecen una síntesis particularmente útil de los fundamentos comunes de estos algoritmos, señalando que su eficacia depende del equilibrio entre dos mecanismos complementarios: la exploración, entendida como la capacidad de recorrer ampliamente el espacio de soluciones para evitar la convergencia prematura hacia óptimos locales, y la explotación, entendida como la capacidad de refinar progresivamente las soluciones prometedoras hasta alcanzar un óptimo satisfactorio. Este equilibrio, lejos de ser una propiedad garantizada por diseño, constituye el principal desafío conceptual del campo y explica en gran medida la proliferación de nuevas propuestas algorítmicas inspiradas en fenómenos naturales, físicos y sociales.

En esta línea, Almufti et al. (2023) clasifican las metaheurísticas en función de su fuente de inspiración —evolutiva, basada en enjambres, basada en fenómenos físicos o basada en comportamientos sociales—, categorización que resulta útil para organizar la enorme diversidad de algoritmos publicados en los últimos años. Entre los ejemplos más recientes de esta diversificación se encuentran el optimizador de valle de energía, inspirado en principios de estabilidad y decaimiento de partículas subatómicas, cuyo desempeño competitivo frente a algoritmos de referencia fue evaluado sobre veinte funciones matemáticas de prueba y sobre problemas de optimización del mundo real correspondientes a las competencias CEC (Azizi et al., 2023); el algoritmo de generación de materiales, que traduce principios de la química de formación de compuestos en un procedimiento de búsqueda capaz de resolver quince problemas clásicos de diseño en ingeniería con resultados superiores a los de metaheurísticas previamente establecidas (Talatahari et al., 2021); y el algoritmo de búsqueda de optimización basado en el radio terrestre de Al-Biruni, que incorpora un mecanismo geométrico de exploración del entorno de soluciones locales validado tanto en problemas matemáticos como en un problema de diseño de ingeniería (El-kenawy et al., 2023).

Un segundo grupo de propuestas recientes recurre a la imitación de comportamientos animales complejos como fuente de inspiración. El algoritmo de optimización del tigre siberiano, por ejemplo, modela matemáticamente las estrategias de caza y confrontación de esta especie, y su desempeño fue comparado favorablemente con el de doce metaheurísticas de referencia en un conjunto amplio de funciones de prueba y problemas de diseño en ingeniería (Trojovský et al., 2022).

De manera análoga, el optimizador basado en el comportamiento ecológico colectivo de un pez de agua dulce integra cuatro estrategias biológicamente motivadas —desplazamiento rápido guiado por aptitud, agregación orientada a la convergencia, dispersión ante estancamiento y escape ante perturbaciones— que le permiten equilibrar exploración y explotación en problemas clásicos de diseño estructural y mecánico, como el diseño de recipientes a presión, reductores de velocidad y trenes de engranajes (Liu et al., 2025). Estos desarrollos ilustran una tendencia consistente: la incorporación de mecanismos cada vez más específicos y



biológicamente detallados en la formulación de las reglas de búsqueda, en un intento por superar las limitaciones señaladas por el teorema de no free lunch, según el cual ningún algoritmo puede garantizarse óptimo para la totalidad de los problemas de optimización posibles (Liu et al., 2025).

Cabe destacar que un número creciente de algoritmos bioinspirados se ha extendido hacia formulaciones basadas en modelos epidemiológicos, como el algoritmo de búsqueda de optimización Ebola, cuya formulación combina un modelo compartimental —basado en subpoblaciones susceptibles, expuestas, infectadas, hospitalizadas, recuperadas, vacunadas, en cuarentena y fallecidas— con un procedimiento metaheurístico de búsqueda, evaluado sobre setenta y siete funciones de referencia clásicas y restringidas, y aplicado con éxito a la selección de hiperparámetros de redes neuronales convolucionales para la clasificación de imágenes médicas (Oyelade et al., 2022).

Este ejemplo resulta particularmente ilustrativo de una segunda tendencia relevante: la utilización de modelos matemáticos de sistemas dinámicos —en este caso, un sistema de ecuaciones diferenciales de propagación epidémica— no solo como objeto de estudio en sí mismo, sino como fuente de inspiración estructural para el diseño de nuevos procedimientos de optimización, lo que evidencia una relación de retroalimentación cada vez más estrecha entre el modelado matemático de fenómenos complejos y el desarrollo de herramientas de optimización.

En conjunto, la evidencia revisada en este eje temático confirma la consolidación de las metaheurísticas bioinspiradas como una familia metodológica robusta y en expansión, capaz de abordar problemas de optimización que resultan intratables para los métodos clásicos basados en gradientes. Sin embargo, esta misma diversificación plantea un desafío relevante para la comunidad científica, relacionado con la ausencia de criterios consensuados que permitan comparar de manera rigurosa el desempeño relativo de decenas de algoritmos con fundamentos conceptuales heterogéneos, cuestión que se retoma en la sección de discusión de este trabajo.

Optimización multiobjetivo y algoritmos evolutivos avanzados

Un segundo eje temático relevante en la literatura revisada corresponde a la extensión de los algoritmos metaheurísticos hacia problemas de optimización multiobjetivo, en los que resulta necesario optimizar de manera simultánea varios indicadores de desempeño que, con frecuencia, se encuentran en tensión entre sí. A diferencia de los problemas monoobjetivo, en los que existe un único óptimo global bien definido, los problemas multiobjetivo se caracterizan por la existencia de un conjunto de soluciones no dominadas —conocido como frente de Pareto— entre las cuales ninguna resulta estrictamente superior a las demás en la totalidad de los criterios considerados, lo que exige procedimientos algorítmicos capaces de aproximar y preservar la diversidad de dicho frente.

Azizi et al. (2022) proponen una versión multiobjetivo del algoritmo de búsqueda orbital atómica, incorporando mecanismos de archivo externo para preservar las soluciones no dominadas encontradas a lo largo del proceso de búsqueda, y validan su desempeño sobre los conjuntos de referencia ZDT y DTLZ, ampliamente utilizados en la comunidad de optimización evolutiva, además de problemas reales de diseño en ingeniería. De manera similar, Khodadadi et al. (2021) desarrollan la versión multiobjetivo del algoritmo de estructura cristalina, inspirado en los principios geométricos de formación de las redes cristalinas, e integran en su procedimiento tres componentes característicos de la optimización multiobjetivo basada en enjambres



—el archivo externo de soluciones no dominadas, un mecanismo de selección de líderes y un operador de mutación adaptativa—, validando el algoritmo resultante sobre los problemas de referencia de las competencias CEC específicas para optimización multiobjetivo y sobre problemas clásicos de diseño estructural, como el diseño de vigas de celosía y de sistemas de frenado.

Ambos desarrollos ponen de manifiesto un patrón metodológico recurrente en la literatura reciente: la extensión sistemática de algoritmos monoobjetivo previamente validados hacia versiones multiobjetivo mediante la incorporación de mecanismos de archivo y de selección de soluciones no dominadas, en lugar del diseño de procedimientos multiobjetivo completamente novedosos. Esta estrategia presenta ventajas evidentes en términos de eficiencia en el desarrollo metodológico, dado que permite capitalizar los mecanismos de exploración y explotación ya validados en la versión monoobjetivo del algoritmo; sin embargo, plantea también interrogantes sobre la medida en que dichos mecanismos, diseñados originalmente para optimizar un único criterio, resultan realmente adecuados para preservar la diversidad y la distribución uniforme del frente de Pareto en problemas con tres o más objetivos simultáneos, una limitación reconocida de manera explícita en ambos estudios.

Cabe señalar, además, que la validación empírica de estos algoritmos multiobjetivo se apoya de manera recurrente en problemas clásicos de diseño en ingeniería mecánica y estructural —vigas, recipientes a presión, sistemas de frenado, reductores de velocidad—, lo que evidencia tanto la madurez de estos problemas como bancos de prueba estandarizados, como una relativa concentración disciplinar de las aplicaciones reportadas. En este sentido, la optimización de sistemas de bombeo con múltiples depósitos de almacenamiento, un problema clásico de la ingeniería hidráulica que exige equilibrar simultáneamente el consumo energético y la disponibilidad de agua ante demandas variables, ilustra la posibilidad de extender estos enfoques hacia dominios de aplicación menos representados en la literatura sobre metaheurísticas bioinspiradas, mediante formulaciones matemáticas que combinan restricciones operativas, modelos de comportamiento hidráulico y criterios de optimización energética (Sanchís & Peñarrocha, 2020).

En conjunto, la evidencia revisada en este eje temático sugiere que la optimización multiobjetivo constituye una dirección de desarrollo natural para la enorme diversidad de metaheurísticas bioinspiradas identificadas en el eje temático anterior, pero también revela la necesidad de una mayor diversificación de los dominios de aplicación empleados para validar estos desarrollos, así como de criterios más robustos para evaluar la calidad de los frentes de Pareto obtenidos, cuestión que se retoma con mayor profundidad en la sección de discusión.

Modelos híbridos, inteligencia artificial y gemelos digitales

Un tercer eje temático identificado en la literatura revisada corresponde al desarrollo de modelos híbridos que combinan el modelado matemático basado en principios físicos con técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático, orientados fundamentalmente a la construcción de gemelos digitales de sistemas complejos. Zhao (2024) sitúa este desarrollo en un marco conceptual más amplio, al señalar que la incorporación de inteligencia artificial en el modelado matemático de sistemas complejos permite superar algunas de las limitaciones históricas de los enfoques puramente analíticos, particularmente en lo referido a la representación de patrones no lineales presentes en grandes volúmenes de datos y a la implementación de mecanismos de control adaptativo capaces de ajustar el comportamiento del sistema en tiempo real.



Esta perspectiva es respaldada por Talib (2023), quien identifica el modelado de orden reducido, el modelado multiescala y la cuantificación de incertidumbre como tendencias emergentes centrales dentro del modelado matemático aplicado a la ingeniería computacional, subrayando además el papel creciente de la computación de alto rendimiento, la aceleración mediante unidades de procesamiento gráfico y los métodos sin malla como catalizadores de simulaciones más eficientes y precisas. De manera complementaria, Veeranan et al. (2024) documentan la aplicación de modelos matemáticos —particularmente controladores de lógica difusa y algoritmos de planificación de rutas de cobertura— al diseño y la optimización de sistemas de tecnologías de la información, enfatizando la necesidad de mantener y actualizar estos modelos a lo largo del ciclo de vida completo del sistema, dado que su complejidad tiende a aumentar con el tiempo y puede comprometer tanto su capacidad predictiva como su viabilidad computacional.

El concepto de gemelo digital condensa de manera particularmente clara esta convergencia entre modelado físico y aprendizaje automático. Chakraborty et al. (2021) proponen la incorporación de modelos sustitutos basados en procesos gaussianos dentro del marco de los gemelos digitales de sistemas dinámicos, argumentando que este tipo de modelo estadístico resulta especialmente adecuado para tratar datos ruidosos y escasos, una condición habitual en los entornos de monitoreo industrial real. Su evaluación, realizada sobre un sistema dinámico amortiguado con variaciones de rigidez y de masa, demuestra que los modelos sustitutos permiten actualizar de manera continua la representación digital del sistema físico a partir de datos de sensores, sin necesidad de resolver de manera explícita y recurrente las ecuaciones diferenciales que gobiernan su comportamiento.

Kunzer et al. (2022) amplían esta perspectiva al revisar el panorama general de los gemelos digitales en el contexto del mantenimiento predictivo, proponiendo una definición mínima viable del concepto a partir de siete elementos esenciales y destacando que la combinación híbrida de modelado basado en física con aprendizaje automático permite compensar las limitaciones que cada enfoque presenta cuando se utiliza de manera aislada: mientras los modelos puramente basados en física ofrecen generalización pero requieren un conocimiento detallado del sistema, los modelos puramente basados en datos ofrecen flexibilidad pero pueden aprender correlaciones espurias en ausencia de restricciones físicas adecuadas.

Esta lógica de hibridación se observa también, aunque desde una perspectiva complementaria, en el trabajo de Posypkin et al. (2022), quienes sitúan el control, la optimización y el modelado matemático de sistemas complejos dentro de un mismo programa de investigación transversal, que abarca desde la simulación numérica en ciencias físicas y sociales hasta los problemas de control en robótica y el diseño optimizado de sistemas complejos, pasando por los modelos estocásticos en física e ingeniería y los modelos matemáticos aplicados a la ciencia de materiales. Esta integración conceptual resulta consistente con la evidencia empírica revisada en los ejes temáticos anteriores, en la medida en que sugiere que la optimización matemática, el modelado basado en datos y el modelado basado en principios físicos no constituyen aproximaciones alternativas y mutuamente excluyentes, sino componentes complementarios de un mismo esfuerzo por representar y controlar sistemas cuya complejidad desborda las capacidades de cualquiera de estos enfoques considerados de manera aislada.

La evidencia revisada en este eje temático documenta aplicaciones sectoriales diversas —sistemas dinámicos estructurales, sistemas térmicos transitorios, procesos de manufactura, gestión energética de baterías—, lo que confirma la naturaleza transversal del paradigma de los gemelos digitales, pero también revela una



fragmentación metodológica considerable, dado que cada dominio de aplicación tiende a desarrollar sus propias variantes de modelos sustitutos y sus propios criterios de validación, sin que exista todavía un marco metodológico unificado que permita transferir sistemáticamente los avances logrados en un sector hacia otros dominios de aplicación con características estructurales similares.

Teoría de redes complejas y modelado estructural de la interdependencia

El cuarto eje temático identificado en la literatura revisada corresponde a la aplicación de la teoría de redes complejas al modelado de la interdependencia estructural en sistemas de ingeniería, un enfoque que representa los componentes del sistema como nodos y sus interacciones como aristas, permitiendo capturar propiedades topológicas —como la distribución de grados, el coeficiente de agrupamiento o la existencia de nodos altamente conectados— que resultan difíciles de representar mediante los modelos matemáticos tradicionales basados en ecuaciones diferenciales o en formulaciones de optimización clásica.

Anderson y Dragićević (2020) ofrecen una revisión particularmente completa de este campo desde la perspectiva de la ciencia de la información geográfica, argumentando que, pese a compartir un interés común por la complejidad estructural, la ciencia de redes y el modelado de sistemas complejos basado en agentes han permanecido como campos insuficientemente integrados, y proponiendo la incorporación de sistemas de autómatas geográficos como vía para avanzar hacia una representación más dinámica de las redes espaciales, capaz de capturar no solo la estructura estática de dichas redes sino también su evolución en respuesta a procesos dinámicos subyacentes. Esta observación resulta especialmente relevante para el presente trabajo, en la medida en que sugiere que buena parte de la literatura sobre redes complejas se ha concentrado tradicionalmente en la caracterización de estructuras estáticas, dejando relativamente inexplorada su integración con los métodos de optimización dinámica revisados en los ejes temáticos anteriores.

En el ámbito de la infraestructura crítica, Myhre et al. (2020) aplican la teoría de redes complejas al modelado de las interdependencias entre un sistema eléctrico de distribución y su correspondiente infraestructura de tecnologías de la información y comunicación, empleando métricas de centralidad de intermediación y un método de ataque dirigido a los nodos para identificar los componentes más críticos del sistema combinado. Sus resultados evidencian que la teoría de redes complejas constituye una herramienta particularmente adecuada para anticipar los efectos en cascada que pueden derivarse de fallos localizados en sistemas ciberfísicos altamente interdependientes, un tipo de vulnerabilidad estructural que los modelos de optimización tradicionales, centrados habitualmente en componentes individuales, tienden a subestimar.

En una línea de aplicación distinta, aunque metodológicamente análoga, Li et al. (2023) emplean la teoría de redes complejas para evaluar y optimizar la resistencia a la destrucción de un sistema de mando y control, demostrando mediante simulación que dicho sistema exhibe propiedades de mundo pequeño y de escala libre, y que resulta particularmente sensible a ataques deliberados dirigidos contra sus nodos de mayor conectividad; a partir de este diagnóstico, los autores proponen una estrategia de adición de conexiones de bajo grado —ampliando el contacto horizontal entre entidades del mismo nivel jerárquico y el contacto cruzado entre distintos niveles— como mecanismo para reforzar de manera eficiente la resiliencia estructural del sistema.

Estos hallazgos, considerados en conjunto, permiten identificar una función particular que la teoría de redes complejas cumple dentro del panorama más amplio del modelado y la optimización de sistemas complejos: mientras las metaheurísticas bioinspiradas y los modelos híbridos revisados en los ejes temáticos anteriores



se orientan fundamentalmente a la búsqueda de soluciones óptimas o casi óptimas para problemas de diseño, operación o predicción, el análisis de redes complejas aporta una perspectiva complementaria centrada en el diagnóstico estructural de la vulnerabilidad y la resiliencia del sistema, un insumo que resulta indispensable para formular de manera adecuada las restricciones y los criterios de optimización que posteriormente pueden abordarse mediante los métodos revisados en los ejes temáticos precedentes. Esta complementariedad, sin embargo, rara vez se aprovecha de manera explícita en la literatura revisada, lo que constituye uno de los vacíos de conocimiento más relevantes identificados en esta revisión.

Discusión

La síntesis de los cuatro ejes temáticos abordados en la sección anterior permite identificar convergencias metodológicas relevantes entre tradiciones de investigación que, en gran medida, se han desarrollado de manera relativamente independiente. En primer lugar, tanto los algoritmos metaheurísticos bioinspirados como los modelos híbridos basados en inteligencia artificial y la teoría de redes complejas comparten un supuesto epistemológico común: la imposibilidad de representar de manera completa y exacta el comportamiento de un sistema complejo mediante formulaciones puramente analíticas, lo que exige recurrir a procedimientos aproximados, ya sea mediante búsquedas heurísticas guiadas por reglas inspiradas en fenómenos naturales, mediante modelos estadísticos entrenados a partir de datos observados, o mediante representaciones topológicas simplificadas de la estructura del sistema. Esta convergencia conceptual sugiere que, más allá de sus diferencias metodológicas superficiales, las distintas familias de métodos revisadas en este trabajo responden a un mismo desafío epistemológico fundamental, relacionado con los límites de la tratabilidad analítica de los sistemas complejos.

En segundo lugar, se observa una tendencia consistente hacia la hibridación de enfoques previamente considerados independientes. Los algoritmos metaheurísticos inspirados en modelos epidemiológicos de sistemas dinámicos (Oyelade et al., 2022) ilustran cómo el modelado matemático de fenómenos complejos puede convertirse en fuente de inspiración estructural para el diseño de procedimientos de optimización; los gemelos digitales que combinan simulación basada en física con modelos sustitutos estadísticos (Chakraborty et al., 2021; Kunzer et al., 2022) ilustran cómo la inteligencia artificial puede integrarse con el modelado analítico tradicional sin sustituirlo por completo; y las extensiones multiobjetivo de algoritmos monoobjetivo previamente validados (Azizi et al., 2022; Khodadadi et al., 2021) ilustran cómo los avances metodológicos tienden a construirse de manera incremental, capitalizando desarrollos previos en lugar de proponer alternativas completamente novedosas. Esta lógica de hibridación incremental, más que la aparición de paradigmas radicalmente disruptivos, parece constituir el patrón dominante de innovación metodológica en el campo durante el período analizado.

La revisión también evidencia divergencias y asimetrías relevantes entre los distintos ejes temáticos. La literatura sobre metaheurísticas bioinspiradas se caracteriza por una proliferación acelerada de nuevos algoritmos, frecuentemente inspirados en fenómenos naturales cada vez más específicos, sin que exista todavía un consenso metodológico claro sobre los criterios que deberían orientar la comparación rigurosa de su desempeño relativo; esta situación ha sido señalada de manera crítica por parte de la propia comunidad especializada, que advierte sobre el riesgo de que la analogía biológica se convierta en un fin en sí mismo, en detrimento del rigor conceptual y de la utilidad práctica de los algoritmos propuestos (Benaissa et al., 2024). En contraste, la literatura sobre gemelos digitales y modelos híbridos tiende a concentrarse en aplicaciones



sectoriales específicas —estructuras dinámicas, sistemas térmicos, manufactura, gestión de baterías—, lo que favorece un desarrollo metodológico más profundo pero, simultáneamente, dificulta la identificación de principios generales aplicables a través de distintos dominios de ingeniería. La teoría de redes complejas, por su parte, ha alcanzado un nivel relativamente maduro de desarrollo conceptual, particularmente en lo referido a la caracterización de la vulnerabilidad estructural de sistemas de infraestructura crítica, pero permanece relativamente desconectada de los métodos de optimización numérica revisados en los otros ejes temáticos, una fragmentación disciplinar señalada explícitamente por Anderson y Dragičević (2020).

Estas divergencias permiten identificar los vacíos de conocimiento más relevantes que emergen de la presente revisión. El primero se refiere a la ausencia de marcos comparativos estandarizados para evaluar el desempeño relativo de la creciente diversidad de algoritmos metaheurísticos disponibles, más allá de las baterías de funciones de prueba y de los problemas clásicos de diseño en ingeniería habitualmente empleados, cuya representatividad respecto de la complejidad real de los sistemas de ingeniería contemporáneos resulta cuestionable. El segundo se refiere a la limitada integración entre los modelos de optimización orientados a la búsqueda de soluciones y los modelos de redes complejas orientados al diagnóstico estructural, pese a que ambos enfoques podrían complementarse de manera natural en el diseño de sistemas simultáneamente eficientes y resilientes. El tercero se refiere a la escasa atención prestada a la interpretabilidad de los modelos híbridos basados en inteligencia artificial, cuya capacidad predictiva suele documentarse con detalle, mientras que la comprensión de los mecanismos internos que explican dicha capacidad predictiva recibe un tratamiento considerablemente más limitado en la literatura revisada.

Adicionalmente, la revisión sugiere que el ritmo de publicación observado en los distintos ejes temáticos no es homogéneo: mientras la producción sobre metaheurísticas bioinspiradas exhibe un crecimiento particularmente acelerado, impulsado por la relativa facilidad de proponer y validar nuevas variantes algorítmicas sobre baterías de funciones estandarizadas, la producción sobre gemelos digitales y sobre teoría de redes complejas aplicada a la ingeniería crece de manera más gradual, posiblemente debido a los mayores requisitos de datos empíricos, de infraestructura computacional y de validación experimental que estos enfoques exigen. Esta asimetría en el ritmo de desarrollo podría explicar, al menos parcialmente, la fragmentación disciplinar identificada a lo largo de esta revisión.

La convergencia observada entre los distintos ejes temáticos apunta hacia una trayectoria de desarrollo futuro caracterizada por la integración progresiva de la inteligencia artificial, la optimización multiobjetivo y el modelado basado en redes, en marcos metodológicos capaces de representar simultáneamente la dinámica temporal, la estructura topológica y los criterios múltiples de desempeño que caracterizan a los sistemas complejos contemporáneos. Esta trayectoria, sin embargo, no está exenta de tensiones: el aumento de la complejidad metodológica que supone dicha integración plantea desafíos considerables en términos de costo computacional, de disponibilidad de datos de calidad suficiente para entrenar los componentes basados en aprendizaje automático, y de validación empírica rigurosa de los modelos resultantes en condiciones operativas reales, más allá de los entornos de simulación y de los problemas de referencia habitualmente empleados en la literatura académica.



Conclusiones

Esta revisión narrativa se propuso sintetizar los principales métodos de modelado matemático y las técnicas de optimización aplicadas a sistemas complejos, así como identificar las tendencias emergentes que están redefiniendo este campo de conocimiento. El análisis de la literatura seleccionada permite concluir que los algoritmos metaheurísticos bioinspirados se han consolidado como la herramienta dominante para abordar problemas de optimización no convexos y multimodales, en un proceso caracterizado por una diversificación acelerada de fuentes de inspiración biológica, física y social, cuya principal fortaleza reside en la capacidad de explorar espacios de búsqueda de alta dimensionalidad sin requerir información analítica explícita sobre la función objetivo. Asimismo, se identificó un avance sostenido de los modelos híbridos que combinan simulación basada en principios físicos con técnicas de aprendizaje automático, particularmente en el marco conceptual de los gemelos digitales, cuya utilidad resulta especialmente relevante para el monitoreo, el control adaptativo y el mantenimiento predictivo de sistemas físicos complejos. Además, se documentó una aplicación creciente, aunque todavía insuficientemente integrada con los métodos anteriores, de la teoría de redes complejas para modelar la interdependencia estructural y la vulnerabilidad de sistemas de infraestructura crítica.

En relación con el objetivo planteado, la evidencia revisada permite afirmar que la trayectoria más prometedora para abordar la complejidad creciente de los sistemas contemporáneos no reside en el perfeccionamiento aislado de alguna de estas tres familias metodológicas, sino en su convergencia progresiva hacia marcos integrados capaces de combinar la capacidad exploratoria de las metaheurísticas, la capacidad predictiva de los modelos híbridos basados en datos y la capacidad diagnóstica de la teoría de redes complejas. Esta conclusión tiene implicaciones tanto teóricas como prácticas: desde una perspectiva teórica, sugiere la necesidad de desarrollar marcos conceptuales unificadores que permitan articular explícitamente estas tres tradiciones metodológicas, actualmente tratadas como campos relativamente autónomos; desde una perspectiva práctica, sugiere que los equipos de ingeniería y de investigación aplicada podrían beneficiarse de estrategias de modelado y optimización que integren de manera deliberada herramientas provenientes de más de una de estas tradiciones, en lugar de restringirse al repertorio metodológico habitual de su dominio disciplinar específico.

Esta revisión presenta limitaciones que conviene reconocer explícitamente. En primer lugar, al tratarse de una revisión narrativa y no de una revisión sistemática, la selección de la literatura, aunque guiada por criterios explícitos de pertinencia temática y calidad metodológica, conserva un componente de discrecionalidad interpretativa que podría haber priorizado determinadas líneas de trabajo en detrimento de otras igualmente relevantes. En segundo lugar, el número de referencias analizadas, si bien suficiente para identificar patrones generales y tendencias emergentes, resulta limitado en relación con la magnitud total de la producción científica disponible en un campo de investigación tan extenso y de crecimiento tan acelerado como el del modelado y la optimización de sistemas complejos. En tercer lugar, la revisión se concentró preferentemente en aplicaciones de ingeniería y ciencias computacionales, por lo que sus conclusiones no deberían extrapolarse sin matices a otros dominios de aplicación de los sistemas complejos, como la biología de sistemas o las ciencias sociales computacionales, que presentan tradiciones metodológicas propias no cubiertas en profundidad por este trabajo.



De cara a futuras líneas de investigación, resulta particularmente prometedor el desarrollo de marcos metodológicos que integren de manera explícita la optimización multiobjetivo, los modelos híbridos basados en inteligencia artificial y el análisis de redes complejas, con especial atención a la evaluación empírica de dichos marcos en condiciones operativas reales, más allá de los entornos de simulación controlada. Asimismo, se identifica la necesidad de avanzar hacia criterios comparativos estandarizados para evaluar el desempeño relativo de la creciente diversidad de algoritmos metaheurísticos disponibles, así como de profundizar en la interpretabilidad de los modelos híbridos basados en datos, un aspecto que resultará cada vez más relevante a medida que estos modelos se incorporen a la toma de decisiones en sistemas de infraestructura crítica y otros contextos de alto impacto social y económico.

Referencias

- Almufti, S. M., Shaban, A. A., & Ali, Z. A. (2023). Overview of metaheuristic algorithms. *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*, 2(2), 10–32. <https://doi.org/10.58429/pgjsrt.v2n2a144>
- Anderson, T., & Dragičević, S. (2020). Complex spatial networks: Theory and geospatial applications. *Geography Compass*, 14(9). <https://doi.org/10.1111/gec3.12502>
- Azizi, M., Aickelin, U., & Khorshidi, H. A. (2023). Energy valley optimizer: A novel metaheuristic algorithm for global and engineering optimization. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27344-y>
- Azizi, M., Talatahari, S., & Khodadadi, N. (2022). Multiobjective atomic orbital search (MOAOS) for global and engineering design optimization. *IEEE Access*, 10, 72572–72587. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3186696>
- Benaissa, B., Kobayashi, M., & Al Ali, M. (2024). Metaheuristic optimization algorithms: An overview. *HCMCOUJS Journal of Science – Advances in Computational Structures*, 14(1), 33–61. <https://doi.org/10.46223/hmccoujs.acs.en.14.1.47.2024>
- Chakraborty, S., Adhikari, S., & Ganguli, R. (2021). The role of surrogate models in the development of digital twins of dynamic systems. *Applied Mathematical Modelling*, 90, 662–681. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.09.037>
- El-kenawy, E. S. M., Abdelhamid, A. A., & Ibrahim, A. (2023). Al-Biruni earth radius (BER) metaheuristic search optimization algorithm. *Computer Systems Science and Engineering*, 45(2), 1917–1934. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.032497>
- Fernández de Córdoba, P. (2023). Aplicaciones del modelado matemático en problemas energéticos: un recorrido desde la investigación a la creación de empresas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(138), 93–103. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.36\(138\).2012.2436](https://doi.org/10.18257/raccefyn.36(138).2012.2436)
- Khodadadi, N., Azizi, M., & Talatahari, S. (2021). Multi-objective crystal structure algorithm (MOCryStAl): Introduction and performance evaluation. *IEEE Access*, 9, 117795–117812. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3106487>



- Kunzer, B., Bergés, M., & Dubrawski, A. (2022). The digital twin landscape at the crossroads of predictive maintenance, machine learning and physics based modeling. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2206.10462>
- Li, T., Wang, G., & Guo, X. (2023). Evaluation and optimization of a command and control system based on complex networks theory. Electronics, 12(5), 1180. <https://doi.org/10.3390/electronics12051180>
- Liu, J., Wang, R., & Deng, Y. (2025). Sharpbelly fish optimization algorithm: A bio-inspired metaheuristic for complex engineering. Biomimetics, 10(7), 445. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10070445>
- Moyano-Arias, R. J., Salazar-Álvarez, E. G., & Toalombo-Vargas, V. M. (2024). Matemáticas aplicadas a la programación: una revisión sobre la solución de algoritmos complejos. MQRInvestigar, 8(4), 3667–3692. <https://doi.org/10.56048/mqr20225.8.4.2024.3667-3692>
- Myhre, S. F., Fosso, O. B., & Heegaard, P. E. (2020). Modeling interdependencies with complex network theory in a combined electrical power and ICT system. In 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/pmaps47429.2020.9183667>
- Oyelade, O. N., Ezugwu, A. E., & Mohamed, T. I. A. (2022). Ebola optimization search algorithm: A new nature-inspired metaheuristic optimization algorithm. IEEE Access, 10, 16150–16177. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3147821>
- Posypkin, M., Gorshenin, A., & Titarev, V. A. (2022). Preface to the special issue on “Control, optimization, and mathematical modeling of complex systems”. Mathematics, 10(13), 2182. <https://doi.org/10.3390/math10132182>
- Sanchís, R., & Peñarrocha, I. (2020). Modelado y optimización de la operación de un sistema de bombeo de múltiples depósitos. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497749.0596>
- Talatahari, S., Azizi, M., & Gandomi, A. H. (2021). Material generation algorithm: A novel metaheuristic algorithm for optimization of engineering problems. Processes, 9(5), 859. <https://doi.org/10.3390/pr9050859>
- Talib, S. A. (2023). Computational engineering advancements: General review of mathematical modeling in computer engineering applications. Al-Rafidain Journal of Engineering Sciences, 2(1), 51–71. <https://doi.org/10.61268/h1dg2e95>
- Trojovský, P., Dehghani, M., & Hanus, P. (2022). Siberian tiger optimization: A new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems. IEEE Access, 10, 132396–132431. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3229964>
- Veeranan, K., Vaidhyanathan, P., & Thamaraiselvi. (2024). Impact of mathematical models in IT system design and optimization. International Journal of Information Technology Research and Applications, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.59461/ijitra.v3i1.83>





Zhao, T. (2024). Artificial intelligence in mathematical modeling of complex systems. ICST Transactions on e-Education and e-Learning, 10. <https://doi.org/10.4108/eetel.5256>



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Sociedad Ecuatoriana de Investigación Científica. E-mail: revistaalcon@gmail.com