

Macaya-Vitali, P., Hernández-Lemul, J., Martínez-Soto, A., Polanco-Levicán, K., Castilla, M.J. (2024). Revisión sistemática de la integración de modelos BIM e IA en la fase de operación y mantenimiento de edificios: Un análisis exhaustivo de tendencias, desafíos y oportunidades. En Herrera, R.F., Salazar, L.A., (Editores), *Actas del IX Congreso Iberoamericano de Gestión y tecnología de la Construcción (IX ELAGEC2024)*.

REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA INTEGRACIÓN DE MODELOS BIM E IA EN LA FASE DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE EDIFICIOS: UN ANÁLISIS EXHAUSTIVO DE TENDENCIAS, DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES

Paolo Macaya-Vitali ¹- paolo.macaya@ufrontera.cl

Javiera Hernández-Lemul ²- j.hernandez21@ufromail.cl

Aner Martínez-Soto ¹- aner.martinez@ufrontera.cl

Karina Polanco-Levicán ³- karina.polanco@ufrontera.cl

María-José Castilla ⁴- mariajose.castilla@ufrontera.cl

¹*Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera.*

²*Estudiante de la Carrera Ingeniería en Construcción, Universidad de La Frontera.*

³*Programa de Doctorado en Ciencias Sociales, Universidad de La Frontera.*

⁴*Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Frontera.*

RESUMEN

La integración de IA y BIM en la fase de operación y mantenimiento de edificios tiene un gran potencial para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad. Sin embargo, pocos estudios recientes abordan los desafíos prácticos y brechas en esta integración. Este artículo realiza una revisión sistemática de la literatura basada en PRISMA, seleccionando 34 artículos para análisis. Los resultados destacan el uso de tecnologías emergentes como IA, BIM, IoT, blockchain y AR para optimizar la gestión de instalaciones y el mantenimiento predictivo. Aun así, persisten desafíos en la integración, como la falta de datos reales y la necesidad de más investigación sobre su aplicación en diversas fases operativas. Se recomienda que futuros estudios desarrollen casos prácticos y evalúen el impacto de estas tecnologías para establecer un marco que promueva innovaciones sostenibles en la industria de la construcción.

PALABRAS CLAVE

BIM; Inteligencia Artificial; Edificios Inteligentes; Eficiencia Energética; O&M

INTRODUCCIÓN

Dentro del ciclo de vida de los proyectos de construcción, la fase de operación y mantenimiento (O&M) emerge como una etapa crítica, representando el 57,47% del costo total del proyecto (Gallaher et al., 2004). En algunos casos, este porcentaje ha llegado a superar el 70% del costo total del ciclo de vida (Troncoso, 2016). Además, el impacto ambiental en la fase de O&M también es significativo. Radhi & Sharples (2013) afirman que el mayor impacto ambiental ocurre durante la fase de O&M, representando entre el 80% y el 90% del total (Radhi & Sharples, 2013), de los cuales casi el 60% se debe a la demanda de energía para calefacción y aire acondicionado (You et al., 2011). En este contexto, la adopción de enfoques y tecnologías innovadoras, como el Building Information Modeling (BIM) y la Inteligencia Artificial (IA), emerge como una solución prometedora para mejorar la eficiencia energética y reducir los costos asociados a la gestión del entorno construido durante la fase de O&M.

BIM se puede emplear en todas las fases de un proyecto de construcción (planificación, diseño, construcción, y O&M) (Liu, 2023). Según González-Marquez et al. (2014), el uso de BIM permite anticiparse a problemas y ofrecer soluciones en todas las etapas del proyecto, mejorando la planificación, reduciendo accidentes y aumentando la sostenibilidad (González-Marquez et al., 2014). Además, BIM mejora la gestión del proyecto, y las comunicaciones entre equipos, aumentando la precisión en el cálculo de cantidad de materiales (Gómez-Valdés et al., 2023). Esto promueve una colaboración más efectiva y garantiza un mayor control sobre los procesos (Badia Juan, 2017). Asimismo, BIM facilita la sistematización y estructuración de datos, contribuyendo a una gestión más eficiente y organizada del proyecto (Musella et al., 2021). Sin embargo, a pesar de sus múltiples beneficios, se requieren herramientas más específicas para el análisis de información cuando aumenta el repositorio de datos en BIM (Peng et al., 2017).

La creciente adopción de BIM en la gestión de edificios ya construidos, ha aumentado un 60% en el Reino Unido entre 2011 y 2020 (T. Wang & Chen, 2023), presentando una oportunidad para emplear modelos estadísticos respaldados por IA con el propósito de mejorar la toma de decisiones y optimizar la eficiencia de los procesos (Pedral Sampaio et al., 2022). En la fase de O&M, los equipos de Facility Management (FM) recopilan datos de diversas fuentes, donde la integración entre la IA y el BIM puede ayudar a estructurar la información, permitiendo una gran interoperabilidad y un mayor control sobre esta fase (Mendoza Jesica & Mosquera Aldayr, 2020). En este contexto, Eber (2020) propone que el uso de IA en construcción debe ser planteado como algoritmos para complementar las labores humanas (Eber, 2020). Sin embargo, la literatura actual presenta escasez de estudios detallados sobre los desafíos contemporáneos en esta área.

Es crucial abordar preguntas abiertas sobre la integración de BIM e IA en la fase de O&M de edificios, explorar los tipos de IA utilizados, analizar los avances, desafíos y limitaciones en su implementación para orientar las futuras investigaciones (Deng et al., 2021; Heidari et al., 2023). En este sentido, en la presente investigación se realizará una revisión sistemática con el objetivo de analizar los avances en la integración de BIM e IA en la gestión energética de edificios en su fase de O&M, con el fin de identificar nichos de investigación emergentes y proponer un marco conceptual que promueva la eficiencia

energética y la sostenibilidad en el sector residencial, permitiendo identificar las direcciones futuras de la investigación en esta área.

METODOLOGÍA

El proceso de búsqueda sistemática de literatura y la recuperación de registros se realizaron siguiendo las directrices de PRISMA expuesta en (Page et al., 2021) las recomendaciones para el proceso de búsqueda sistemática de (Bramer et al., 2018) este proceso incluye procedimientos para un muestreo adecuado, la descripción detallada de la muestra seleccionada y un análisis exhaustivo de sus contenidos (Figura 1).

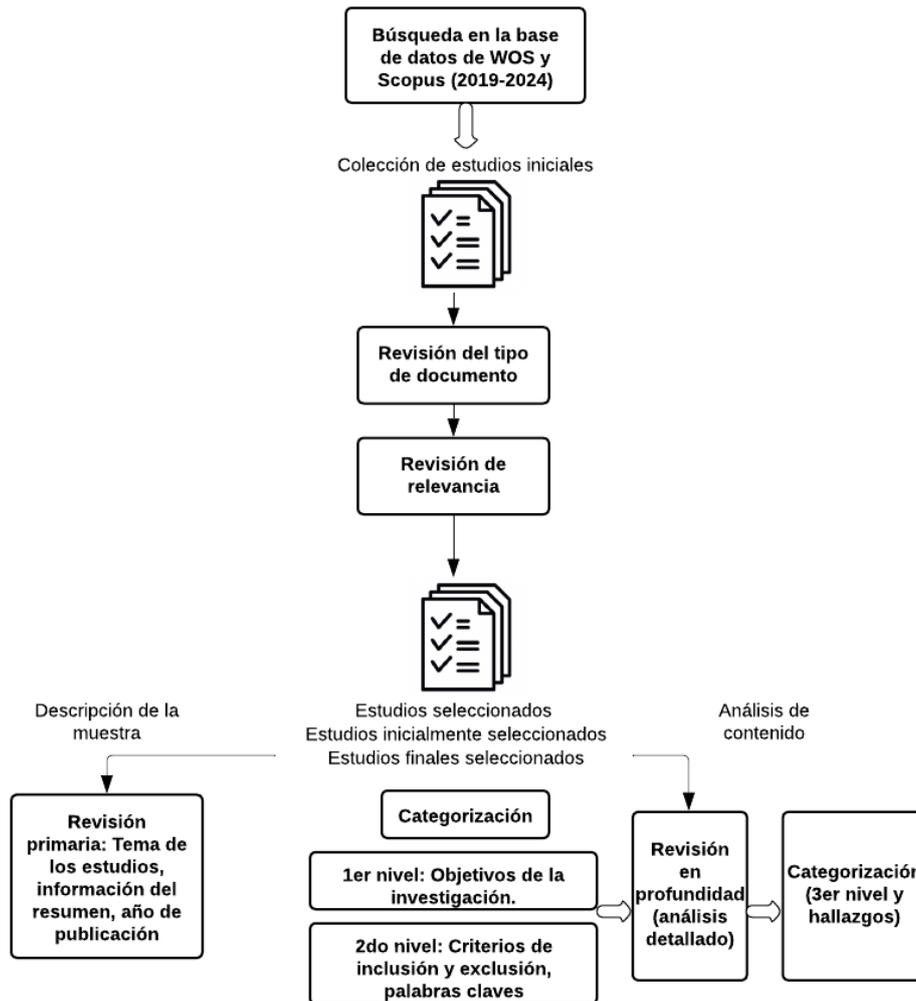


Figura 1. Esquema del proceso global de la búsqueda sistemática.

ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

Esta investigación considera el análisis de artículos de revistas científicas de las bases de datos de Web of Science (WoS) y Scopus. Las preguntas de investigación que originaron este estudio son:

1. ¿Qué tecnologías han sido utilizados en la literatura para integrar BIM e IA en la gestión energética durante la fase de O&M?

2. ¿Cuáles son las tendencias emergentes en la integración de datos entre modelos BIM e IA para la gestión energética de edificios?
3. ¿Qué áreas específicas de la investigación sobre la integración de BIM e IA requieren mayor desarrollo y exploración para mejorar la gestión energética en edificios?

La estrategia de búsqueda consideró una combinación de términos booleanos clasificados en cuatro Áreas Temáticas (AT). La primera AT aborda términos asociados a “BIM”. La segunda AT se enfoca en "IA". La tercera AT considera conceptos asociados a la “Fase”. La cuarta AT se enfoca en aspectos de los edificios. Para refinar el proceso de búsqueda, se utilizaron los operadores booleanos "AND" entre las AT y "OR" entre los conceptos incluidos en la misma AT de búsqueda. La Figura 2 representa las AT, palabras clave y operadores booleanos de la estrategia de búsqueda utilizada en esta investigación. El detalle de la combinación de palabras y operadores booleanos se muestra en la Figura 2.

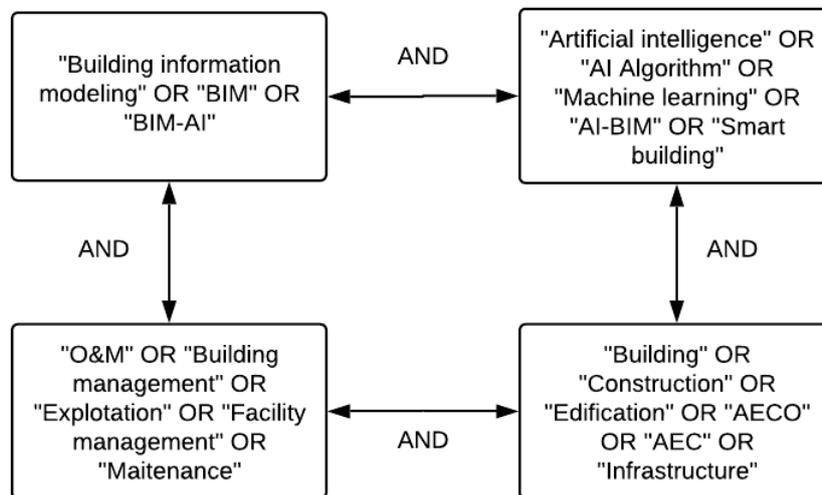


Figura 2. Esquema de distribución de palabras y símbolos booleanos.

ELEGIBILIDAD

Criterios de inclusión: Se incluyen artículos publicados entre 2019 y 2024, de cualquier país. Los artículos deben abordar casos de estudio que exploren la integración de BIM e IA específicamente en la gestión energética durante la fase de O&M de edificios.

Criterios de exclusión: Se excluyen los artículos que no estén disponibles en texto completo, artículos que deban ser comprados o que se hayan solicitado por correo a los autores y no llegaron a tiempo.

SELECCIÓN DE ESTUDIOS

La muestra inicial seleccionada de artículos científicos tanto de WoS y Scopus, fueron importados en la aplicación web y gratuita de “Rayyan”, tal como se plantea en la metodología usada por (Ouzzani et al., 2016), con el objetivo de eliminar los artículos duplicados de Scopus. Esto se realizó de manera manual y verificando el porcentaje de duplicación entre ambas bases. A los artículos resultantes, se les aplicó el primer filtro de búsqueda, el cual consideró evaluar la pertinencia de los estudios seleccionados en

función del título del artículo y el resumen. Posteriormente, los artículos seleccionados se revisaron y leyeron por completo en una lectura en profundidad, la cual se asignó en partes iguales entre los autores de la investigación, trabajando el análisis de manera independiente. En aquellos casos en que existieron dudas respecto a la inclusión de algún artículo por parte de los autores, se tomó la decisión final de forma conjunta. Finalmente, todos los artículos seleccionados fueron leídos y analizados tanto cuantitativamente como cualitativamente por cada autor. Los artículos que no entregaron datos específicos para analizar, fueron excluidos del análisis final por no aportar al proceso.

CATEGORIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se realiza un análisis bibliométrico para evaluar la relevancia, impacto e influencia cuantitativa de los artículos seleccionados a través de un análisis detallado de los años de publicación, distribución geográfica, las revistas más frecuentes, naturaleza de los artículos y palabras clave más mencionadas. Posteriormente, en un análisis cualitativo, se elabora una tabla que clasifica los tipos de inteligencia artificial integrados con BIM en la fase de O&M de edificios, identificando los avances alcanzados con cada tipo de IA. Esta tarea se lleva a cabo tras finalizar la lectura exhaustiva y la selección de los artículos definitivos, de los cuales se extrae la información relevante del tema, incluyendo un análisis de la revisión de literatura de cada artículo en relación con los casos de estudio revisados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la búsqueda sistemática, se utilizó "All field" en WoS y "Article title, Abstract, Keywords" en Scopus, combinando las palabras clave de cada área temática mediante el operador booleano OR, y utilizando AND para conectar las diferentes áreas temáticas (BIM, Inteligencia Artificial, Fase y Edificio), lo que generó los datos presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Estrategia de palabras clave y resultados de la búsqueda sistemática realizada 11 de junio de 2024.

Concepto	Palabras clave	Artículos de WoS	Artículos de Scopus
BIM	“Building information Modelling” OR “BIM” OR “BIM-AI”	22.867	30.439
Inteligencia Artificial	“Artificial Intelligence” OR “AI-Algorithm” OR “Machine Learning” OR “AI-BIM” OR “Smart building”	884.166	1.122.149
Fase	“O&M” OR “Building management” OR “Exploitation” OR “Facility management” OR “Maintenance” OR “Operation”	1.695.998	2.999.912
Edificio	“Building” OR “Construction” OR “Edification” OR “AECO” OR “AEC” OR “Infrastructure”	4.196.722	3.269.696
BIM e IA en la fase de O&M de edificios	Combinación de palabras de las cuatro dimensiones con el booleano AND	131	244

Se obtuvo un total de 375 artículos, los cuales se introdujeron a la aplicación web de Rayyan versión estándar, identificar y eliminar duplicados. Cabe señalar que, de igual manera la revisión de duplicidad de artículos fue realizada de forma manual entre los autores de la investigación.

SELECCIÓN PRELIMINAR DE ARTÍCULOS

Los resultados del proceso se pueden visualizar en la Figura 3, la cual se separa en 4 secciones: (1) Identificación de artículos, (2) filtro, (3) elegibilidad, y (4) artículos incluidos para la lectura en profundidad.

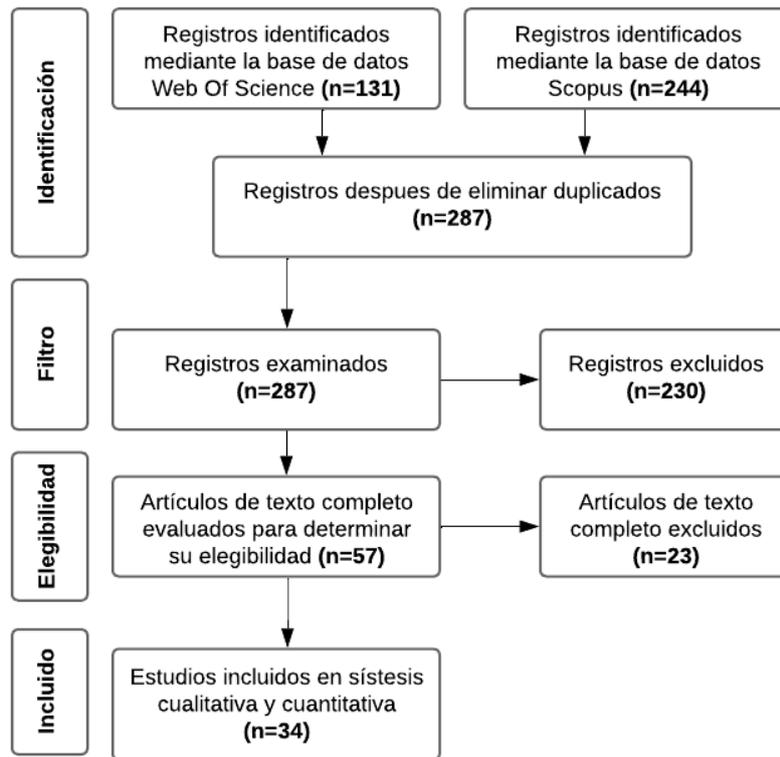


Figura 3. Esquema de selección de artículos (método PRISMA).

El proceso de selección de artículos inicia por la búsqueda en las bases de datos seleccionadas con las palabras claves de cada AT. Se aplicó un filtro para excluir artículos fuera de los años 2019-2024. Este proceso, identificó 131 artículos en WoS, y 244 artículos en Scopus, de los cuales 88 estaban duplicados, resultando 287 artículos únicos para analizar. Tras la lectura de títulos y resúmenes, se excluyeron 230 artículos que no eran relevante para la investigación, dejando 57 artículos para la lectura en profundidad. En esta etapa, 23 artículos fueron excluidos por falta de disponibilidad (artículo de pago y sin respuesta de los autores), dejando un total de 34 artículos para la síntesis cualitativa y cuantitativa.

LISTADO DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

La Tabla 2 presenta un desglose detallado de la selección de artículos científicos utilizados en esta investigación.

Tabla 2. Listado de artículos científicos seleccionado para la lectura en profundidad.

N°	Título del Artículo	Referencia	Base de datos
1	Evolution of BIM to DTs: A Paradigm Shift for the Post-Pandemic AECO Industry	(Megahed & Hassan, 2022)	WoS
2	Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions	(Pan & Zhang, 2023)	WoS
3	BIM-based automated design for HVAC system of office buildings-An experimental study	(H. Wang et al., 2022)	WoS
4	A systematic review of the BIM in construction: from smart building management to interoperability of BIM & AI	(Heidari et al., 2023)	WoS
5	The values and barriers of Building Information Modeling (BIM) implementation combination evaluation in smart building energy and efficiency	(Y. Chen et al., 2022)	WoS
6	Digital twin with Machine learning for predictive monitoring of CO2 equivalent from existing buildings	(Arsiwala et al., 2023)	WoS
7	Trends in Adopting BIM, IoT and DT for Facility Management: A Scientometric Analysis and Keyword Co-Occurrence Network Review	(Siccardi & Villa, 2023)	WoS
8	Digitalization for sustainable buildings: Technologies, applications, potential, and challenges	(Asif et al., 2024)	WoS
9	Design information-assisted graph neural network for modeling central air conditioning systems	(Li et al., 2024)	WoS
10	Adopting Building Information Modeling (BIM) for the Development of Smart Buildings: A Review of Enabling Applications and Challenges	(Yang et al., 2021)	WoS
11	Toward Smart-Building Digital Twins: BIM and IoT Data Integration	(Eneyew et al., 2022)	WoS
12	BIM-Based digital twin and XR devices to improve maintenance procedures in smart buildings: A literature review	(Coupry et al., 2021)	WoS
13	Building automation system - BIM integration using a linked data structure	(Quinn et al., 2020)	WoS
14	Applications of machine learning to BIM: A systematic literature review	(Zabin et al., 2022)	WoS
15	Use of bim-fm to transform large conventional public buildings into efficient and smart sustainable buildings	(Pavón et al., 2021)	WoS
16	Integrated applications of building information modeling and artificial	(Zhang et al., 2022)	WoS

	intelligence techniques in the AEC/FM industry		
17	Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms	(Cheng et al., 2020)	WoS
18	From Spherical Photos to Facility Management. Algorithmic Optimization Procedures for Buildings in BIM Approaches	(D'Agostino & Antuono, 2024)	Scopus
19	Toward cognitive digital twins using a BIM-GIS asset management system for a diffused university	(Meschini et al., 2022)	Scopus
20	A Systematic Approach to Optimizing Energy-Efficient Automated Systems with Learning Models for Thermal Comfort Control in Indoor Spaces	(Erişen, 2023)	Scopus
21	Learning Algorithms for Building Control Applied to the iHomeLab Lighting System	(Pestana & Paice, 2021)	Scopus
22	Defect digital twinning: A technical framework to integrate robotics, AI and BIM for facility management and renovation	(J. Chen et al., 2022)	Scopus
23	Artificial Intelligence Solutions Towards to BIM6D: Sustainability and Energy Efficiency	(Kardoka et al., 2022)	Scopus
24	Application of Vision-Based Artificial Intelligence in Creating a Contactless Interaction with Immersive Environments	(Ramaji et al., 2022)	Scopus
25	Evaluating the roadmap of 5g technology implementation for smart building and facilities management in singapore	(Chew et al., 2020)	Scopus
26	From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry	(Deng et al., 2021)	Scopus
27	BIM and post-occupancy evaluations for building management system: Weaknesses and opportunities	(Di Giuda et al., 2020)	Scopus
28	Moving from building information models to digital twins for operation and maintenance	(Lu, Xie, Parlikad, et al., 2020)	Scopus
29	From BIM towards digital twin: Strategy and future development for smart asset management	(Lu, Xie, Heaton, et al., 2020)	Scopus
30	BIM as the digital enabler for smart cities	(Dy Buncio, 2019)	Scopus
31	Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond A critical review	(Panteli et al., 2020)	Scopus
32	A review of building information modelling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends	(Tang et al., 2019)	Scopus

33	Application of Integrated Building Information Modeling, IoT and Blockchain Technologies in System Design of a Smart Building	(Lokshina et al., 2019)	Scopus
34	Assessing building performance in residential buildings using BIM and sensor data	(Rogage et al., 2020)	Scopus

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

Para una visualización clara del número de artículos por año, la Figura 4 presenta un gráfico de líneas, donde el eje vertical muestra la cantidad de artículos y el eje horizontal los años correspondientes.

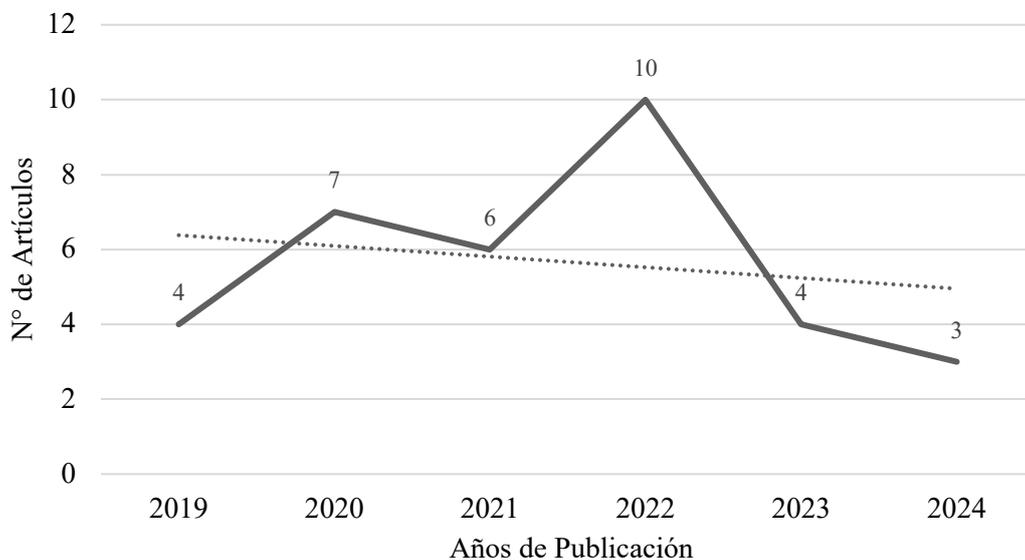


Figura 4. Gráfico de producción científica anual.

En 2019, se registraron 4 publicaciones, señalando el inicio de un creciente interés en la integración de BIM e IA para la gestión energética en edificios. En 2020, el número de artículos aumentó a 7, probablemente reflejando un mayor enfoque en la eficiencia energética y la digitalización en la edificación. Sin embargo, en 2021, la producción disminuyó ligeramente a 6 artículos, lo que podría indicar una fase de consolidación o una reevaluación de los enfoques investigativos. El año 2022 fue el más productivo, con 10 publicaciones, lo que sugiere un avance significativo en la adopción de tecnologías emergentes y su aplicación práctica en la gestión energética. En contraste, 2023 muestra una disminución con solo 4 artículos, lo que podría estar vinculado a desafíos en la implementación efectiva de estas tecnologías. En 2024, hasta la fecha de la revisión, se han publicado 3 artículos, y se espera un repunte en la actividad científica a medida que avance el año.

Aunque la línea de tendencia (línea segmentada) parece mostrar una disminución entre 2019 y 2024, esta observación se basa en una revisión que solo abarca hasta la fecha de la búsqueda en 2024. Es probable que la tendencia al alza observada en años anteriores continúe una vez que se complete el año en curso.

Para ofrecer un análisis detallado sobre la producción de artículos por países, la Figura 5 presenta un gráfico de barras que compara el número de publicaciones entre naciones. El eje vertical representa el número de artículos y el eje horizontal muestra los países de origen.

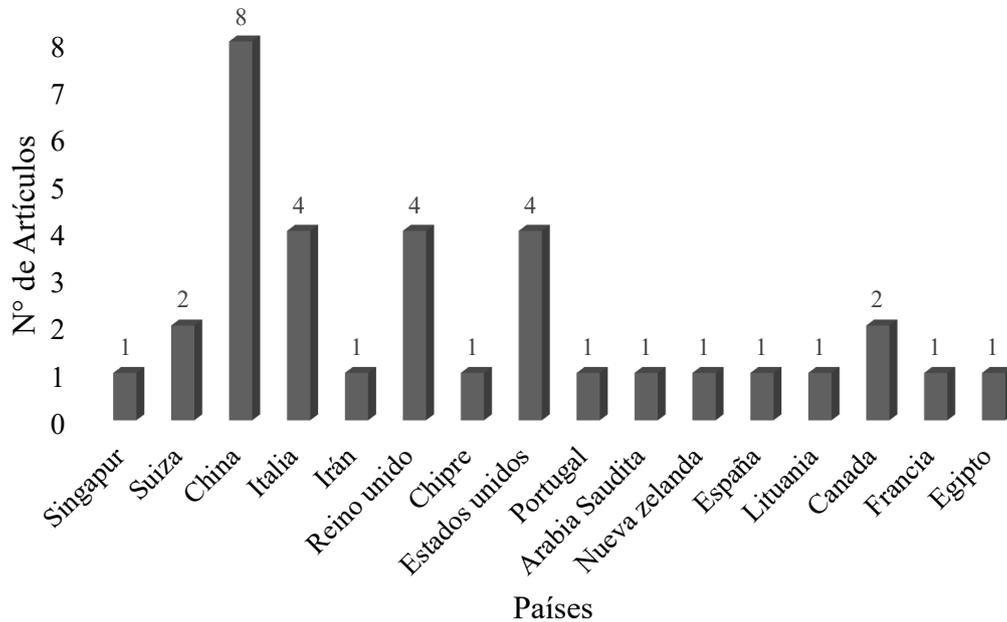


Figura 5. Gráfico de artículos publicados por países.

Se observa que la mayoría de los artículos seleccionados provienen de los países europeos y asiáticos. Entre los 16 países representados, China destaca como el más influyente con 8 artículos, posiblemente debido a su avanzado nivel de desarrollo tecnológico en comparación con otros países. Le siguen Italia, Reino Unido y Estados Unidos, con 4 artículos cada uno. Suiza y Canadá ocupan la tercera posición en términos de influencia, con 2 artículos cada uno, mientras que los otros 10 países tienen una publicación cada uno.

Los artículos seleccionados se encuentran distribuidos en 28 revistas distintas. De estos, el 12% fueron publicados en la revista “*Automation in Construction*”, que reúne un total de 4 artículos. Las siguientes revistas con mayor cantidad de publicaciones son “*Buildings*”, “*Journal of Cleaner Production*”, y “*Advanced Engineering Informatics*”, cada una con 2 artículos. El resto de los artículos se distribuyen de manera individual en diversas revistas, cada una con una sola publicación.

En cuanto a la naturaleza de los artículos, se observa una variedad en su enfoque. 7 son de carácter práctico, 10 son teóricos, y 17 combinan ambos enfoques. Esta combinación sugiere un equilibrio en la literatura revisada, proporcionando tanto estudios basados en la aplicación práctica de las tecnologías de inteligencia artificial en la gestión energética de edificios como enfoques teóricos que sustentan la fundamentación de estas prácticas. La presencia de artículos de carácter práctico y teórico subraya la relevancia y la diversidad en la investigación sobre la integración de BIM e IA, reflejando un sólido cuerpo de evidencia que valida la aplicación y el desarrollo de estas tecnologías en el contexto de la gestión energética de edificios.

La Figura 6 muestra que, en los 34 artículos revisados, las palabras clave más mencionadas son “BIM”, presente en el 79% de los casos. Le siguen “IA” y “Edificios inteligentes”, con un 32% cada una. “Gemelo digital” aparece en el 29% de los artículos, mientras que “O&M” e “IoT” se mencionan en un 26% de las publicaciones.

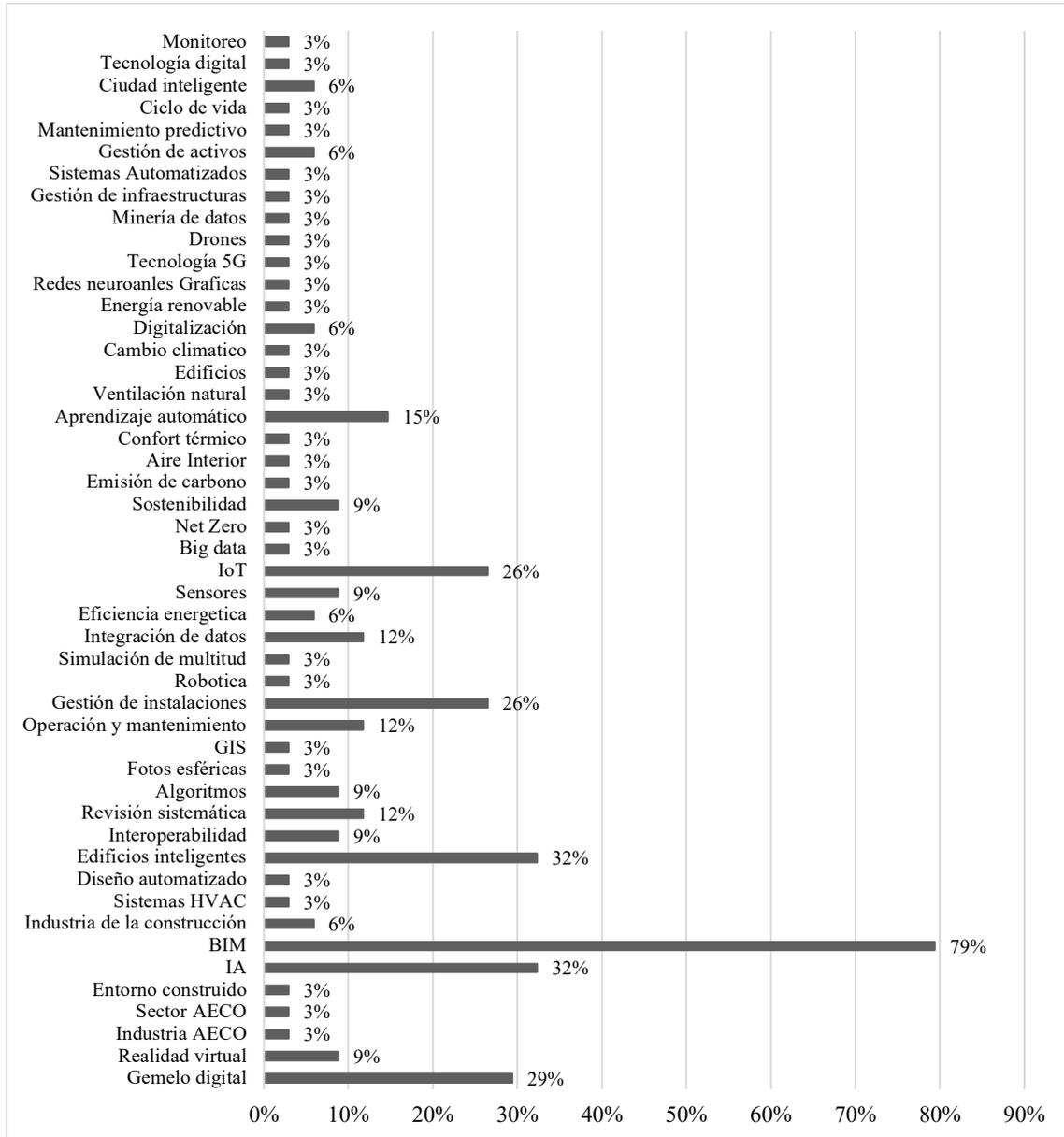


Figura 6. Palabras claves más mencionadas.

ANÁLISIS CUALITATIVO

En la Tabla 3, se presenta una clasificación de los principales tipos de IA integradas con BIM, junto con la referencia de artículos científicos específicos. Este análisis permite observar la distribución del interés investigativo en diferentes áreas de la IA, y proporciona una visión general de las tendencias actuales en la literatura científica.

Tabla 3. Tipos de IA encontradas en los artículos seleccionados.

Nombre	Referencias
Aprendizaje Automático	(Arsiwala et al., 2023; Asif et al., 2024; Y. Chen et al., 2022; Cheng et al., 2020; Deng et al., 2021; Di Giuda et al., 2020; Heidari et al., 2023; Kardoka et al., 2022; Li et al., 2024; H. Wang et al., 2022; Zabin et al., 2022; Zhang et al., 2022)
Redes neuronales	(Di Giuda et al., 2020; Erişen, 2023; Kardoka et al., 2022; Li et al., 2024; Zhang et al., 2022)
Aprendizaje Profundo	(Erişen, 2023)

Según la búsqueda de información sobre los tipos de inteligencias artificiales, la Tabla 3 muestra como la cantidad de artículos va disminuyendo a medida que la clasificación se vuelve más específica, recordando que el Aprendizaje Profundo es un tipo de Red Neuronal y las Redes Neuronales son un caso particular de Aprendizaje Automático.

En la Tabla 4 se muestran las tecnologías emergentes integradas con BIM. La tecnología “*IoT*” destaca por su amplia representación, evidenciando su papel crucial en la conectividad y la recopilación de datos en tiempo real dentro de los sistemas BIM. Los “*Sensores*” y los “*Gemelos Digitales*” también muestran una presencia significativa, reflejando su importancia en la facilitación del intercambio de datos y en la mejora del monitoreo de sistemas constructivos. Los “*Algoritmos*”, por su parte, resaltan la tendencia hacia el uso de técnicas avanzadas para optimizar el análisis y la gestión de datos en BIM, subrayando el creciente interés en la inteligencia predictiva y el aprendizaje automático. En contraste, tecnologías como “*Blockchain*” y “*Robótica*”, aunque menos representadas, sugieren áreas con potencial para futuras investigaciones. Estos campos emergentes podrían ofrecer nuevas oportunidades para innovar y mejorar la integración y eficiencia en la gestión de edificios.

Tabla 4. Tecnologías Emergentes integradas con BIM.

Nombre	Referencias
Gemelo Digital	(Arsiwala et al., 2023; J. Chen et al., 2022; Chew et al., 2020; Coupry et al., 2021; Deng et al., 2021; Dy Buncio, 2019; Eneyew et al., 2022; Heidari et al., 2023; Lu, Xie, Heaton, et al., 2020; Lu, Xie, Parlikad, et al., 2020; Megahed & Hassan, 2022; Meschini et al., 2022; Pan & Zhang, 2023; Pestana & Paice, 2021; Siccardi & Villa, 2023)
Internet de las Cosas	(Arsiwala et al., 2023; Asif et al., 2024; Cheng et al., 2020; Chew et al., 2020; Deng et al., 2021; Di Giuda et al., 2020; Dy Buncio, 2019; Eneyew et al., 2022; Erişen, 2023; Heidari et al., 2023; Lokshina et al., 2019; Lu, Xie, Parlikad, et al., 2020; Megahed & Hassan, 2022; Pan & Zhang, 2023; Panteli et al., 2020; Pavón et al., 2021; Pestana & Paice, 2021; Quinn et al., 2020; Siccardi & Villa, 2023; Tang et al., 2019; Yang et al., 2021)

Tecnologías de realidad virtual	(Couptry et al., 2021; Dy Buncio, 2019; Pan & Zhang, 2023; Ramaji et al., 2022; Yang et al., 2021)
Tecnología Blockchain	(Asif et al., 2024; Heidari et al., 2023; Lokshina et al., 2019; Pan & Zhang, 2023; Siccardi & Villa, 2023)
Algoritmos	(J. Chen et al., 2022; Y. Chen et al., 2022; Cheng et al., 2020; Chew et al., 2020; D'Agostino & Antuono, 2024; Erişen, 2023; Li et al., 2024; Lu, Xie, Parlikad, et al., 2020; Pan & Zhang, 2023; Pestana & Paice, 2021; Quinn et al., 2020; H. Wang et al., 2022; Zhang et al., 2022)
Grandes Datos	(Arsiwala et al., 2023; Erişen, 2023; Pavón et al., 2021)
Sensores	(J. Chen et al., 2022; Cheng et al., 2020; Chew et al., 2020; Di Giuda et al., 2020; Dy Buncio, 2019; Eneyew et al., 2022; Erişen, 2023; Heidari et al., 2023; Lu, Xie, Heaton, et al., 2020; Lu, Xie, Parlikad, et al., 2020; Megahed & Hassan, 2022; Pavón et al., 2021; Quinn et al., 2020; Rogage et al., 2020; Tang et al., 2019)
Escaneo láser	(Megahed & Hassan, 2022; Zabin et al., 2022)
Robótica	(J. Chen et al., 2022; Chew et al., 2020; Heidari et al., 2023; Zhang et al., 2022)
Redes inalámbricas	(Chew et al., 2020; Lu, Xie, Heaton, et al., 2020)

La Figura 7, muestra un gráfico circular con la distribución porcentual de artículos científicos dedicados a diferentes avances y mejoras en el campo de la integración de la IA y BIM en la fase de O&M de edificios.

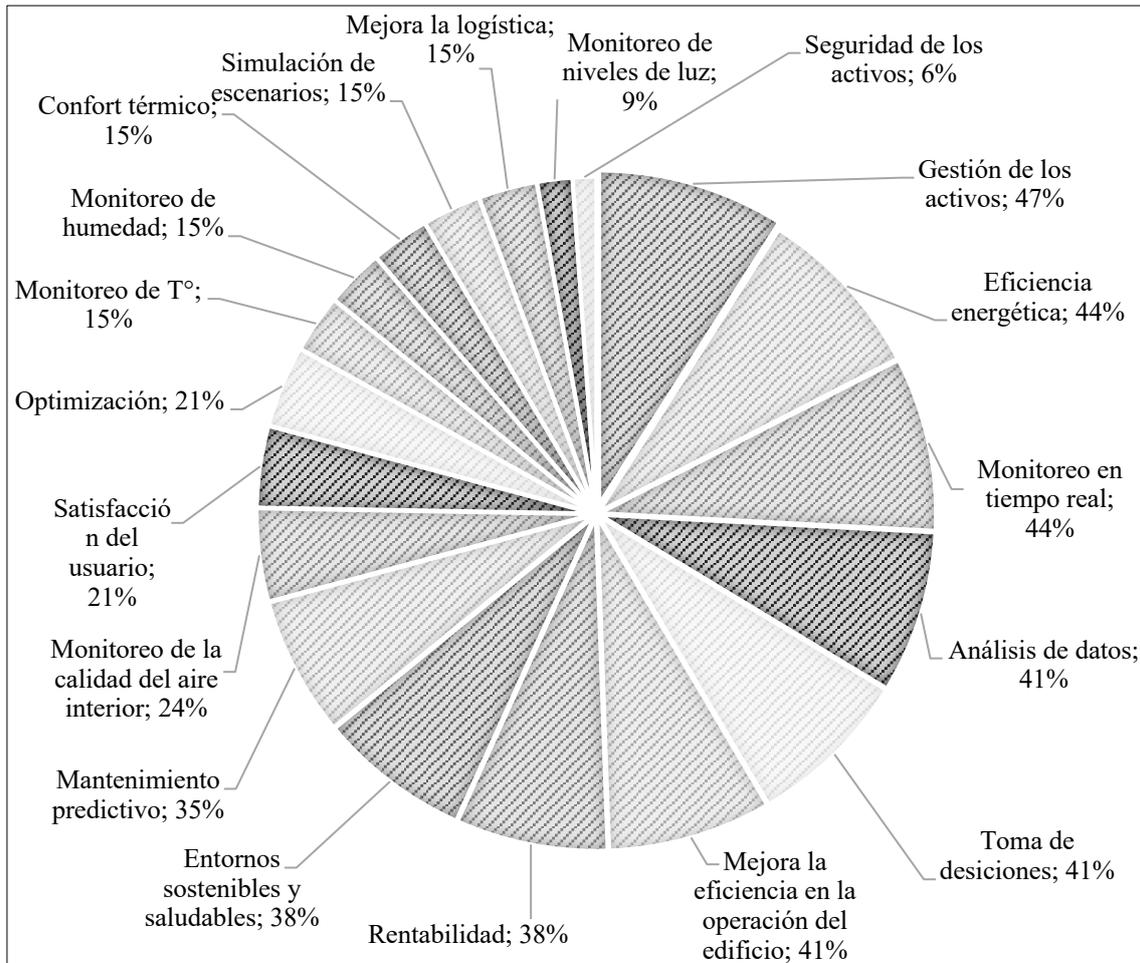


Figura 7. Avances de la integración de BIM e IA en la fase de O&M de edificios.

Se observa que la mayor parte de las investigaciones de los artículos analizados se centran en la gestión de los activos, cuyo valor es un 47% del total. El monitoreo en tiempo real y las prácticas en eficiencia energética para tener un mayor control en las operaciones de las instalaciones de los edificios, son el siguiente sector más grande, cuyo valor corresponde a un 44% del total. Por su parte, con un 41% de la totalidad, se encuentran los avances en toma de decisiones, mejoras en la eficiencia en la operación de edificios y análisis de datos. La rentabilidad y los entornos sostenibles y saludables representan el 38% de artículos que muestran los avances en estas categorías. El mantenimiento predictivo representa el 35%. El 24% en monitoreo en la calidad del aire interior que conlleva a un 21% en satisfacción del usuario, y optimización. Este análisis demuestra que mientras algunas áreas de la IA reciben mayor atención, otras como las que tienen los porcentajes más bajos están comenzando a recibir un reconocimiento creciente.

La aplicación de tecnologías emergentes ofrece beneficios significativos: gestión más eficiente, reducción de costos, mejor toma de decisiones, mayor productividad y sostenibilidad (Siccardi & Villa, 2023). A continuación, se presentan algunos casos de estudios de la integración de IA y BIM:

1. MACHINE LEARNING (ML)

Es la capacidad de las computadoras para aprender sin la necesidad de ser programas explícitamente, sino mediante el análisis y procesamiento de datos (H. Wang et al., 2022). Las técnicas comunes incluyen Redes Neuronales Artificiales (ANN), Aprendizaje Profundo (DL), y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM).

En un edificio en Hong Kong, la interoperabilidad entre BIM y ML se logró utilizando plataformas como Python con bibliotecas como Pandas y TensorFlow para aplicar modelos ML a los datos extraídos de Autodesk Revit, ArchiCAD y Tekla Structures permitiendo la exportación en formatos IFC o JSON. La integración mejora la gestión energética, optimiza sistemas HVAC y mejora la sostenibilidad. El uso de ML facilita el análisis de grandes datos y mejora la toma de decisiones en la gestión de edificios (Li et al., 2024).

Kardoka et al., (2022), implementó un estudio con 11 modelos de ML, implementados con Python; la mejor predicción en el consumo térmico del edificio es de un 38,65% con árbol Extra, mejorando la eficiencia energética y sostenibilidad en tiempo real (Kardoka et al., 2022).

2. DEEP LEARNING (DL)

El Deep Learning se basa en redes neuronales profundas para resolver problemas complejos, como el confort térmico y el bienestar interior. Aunque la investigación en DL aplicado a FM es limitada, existe potencial para mejorar la gestión de edificios.

En un estudio de Erişen (2023) utilizaron algoritmos de optimización de energía y modelos de DL para mejorar el confort térmico y el rendimiento energético en interiores. Datos de sensores IoT son procesados en el software BIM como Autodesk Revit Architecture para simular y modelar el rendimiento de los edificios logrando soluciones energéticas eficientes y entornos interiores sostenibles (Erişen, 2023).

3. DIGITAL TWIN (DT)

Un DT se define como una instancia virtual de un sistema físico que se actualiza continuamente con datos de rendimiento, mantenimiento y estado de salud de un edificio (Madni et al., 2019).

En una investigación se usó la ontología RealEstateCore con DT para monitorear y predecir emisiones de CO₂ en edificios. La IA analiza datos de BIM y sensores IoT para optimizar la gestión energética y mejorar la sostenibilidad (Arsiwala et al., 2023).

Pan et al. (2023) crearon un marco de DT que integra BIM, e IoT en la nube para automatizar y optimizar la construcción. Los datos de IoT se asignan al esquema IFC para permitir la interoperabilidad, luego los datos se analizan con minería difusa y análisis de series temporales para obtener información detallada de los datos IoT recopilados desde el BIM en la nube (Pan & Zhang, 2023).

También la integración de BIM con DT se logra mediante el uso de software como ESRI ArcGIS Pro® y Autodesk Revit®, que facilitan la interoperabilidad entre BIM y GIS. El uso de gemelos digitales cognitivos (CDTs) junto con GeoBIM permite que los edificios respondan de manera autónoma a cambios ambientales, mejorando la sostenibilidad y la

experiencia del usuario, mejorando la gestión de activos, costo y toma de decisiones en la fase de O&M (Meschini et al., 2022).

4. INTERNET OF THINGS (IOT)

El IoT interconecta dispositivos de detección y actuación que proporcionan la capacidad de compartir datos a través de plataformas (Gubbi et al., 2013).

Pestana & Paice (2021) usan sensores iHomeLab conectados a una red KNX a través de una Raspberry-Pi y AWS IoT para recibir mensajes MQTT. Estos datos se representan en un modelo BIM importado a Amazon Sumerian, que crea aplicaciones 3D, AR y VR (Pestana & Paice, 2021).

En otro estudio, la integración entre BIM e IoT se realiza a través de APIs (Interfaces de Programación de Aplicaciones) y plataformas como Revit y Dynamo, que permiten la visualización de datos en tiempo real y la monitorización del rendimiento de activos (Arsiwala et al., 2023; Erişen, 2023).

5. REALIDAD AUMENTADA (AR) Y VIRTUAL (VR)

Las tecnologías AR y VR conectan el mundo físico con el cibernético, mejorando la visualización y la interacción con los modelos BIM durante la O&M de edificios (Yang et al., 2021).

En el estudio de Dy Buncio (2019), la integración de BIM se realiza a través de plataformas como Revit, Unreal Engine, BIM 360, Enscape, Fuzor y tecnología VR y AR con Navisworks y Unity. Esto permite una mejor visualización en modelos 3D en tiempo real, facilita la detección de conflictos, mejora la colaboración entre equipos y experiencia del cliente (Dy Buncio, 2019).

El estudio de Chew et al. (2020), prueba la red 5G que se utiliza para proporcionar requisitos de baja latencia y alto ancho de banda establecidos por BIM para ser compatible con la nube de renderizado y AR/VR con BIM (Chew et al., 2020).

6. BLOCKCHAIN (BT)

La Blockchain es un sistema de base de datos descentralizado, que sirve como un libro de registro digital, mejorando la gestión y almacenamiento de datos (Lokshina et al., 2019; Pan & Zhang, 2021).

La combinación de BIM y Blockchain puede mejorar la seguridad y la gestión de datos relacionados con la operación de edificios. Blockchain proporciona un entorno seguro para almacenar y gestionar datos, control de acceso, monitoreo en tiempo real, mejora la toma de decisiones y la eficiencia operativa (Lokshina et al., 2019; Siccardi & Villa, 2023).

7. ALGORITMOS DE IA

Se utilizan algoritmos avanzados de IA para el análisis de datos en BIM, incluyendo técnicas como Visión por Computadora (CV) y Procesamiento del Lenguaje Natural (NLP).

Una plataforma FM integrada con BIM alojada en la nube permite el análisis de datos con algoritmos de modelado predictivo, esto proporciona una vista integrada de los datos de los sensores para optimizar la gestión de activos y la eficiencia operativa (Quinn et al., 2020). También, se emplea la tecnología BIM para crear modelos 3D detallados a partir de fotos esféricas y luego se aplican algoritmos de optimización para mejorar la gestión de instalaciones (D'Agostino & Antuono, 2024).

Cheng et al. (2020) proponen un nuevo algoritmo de registro para alinear nubes de puntos con un modelo BIM, lo que permite proyectar los defectos detectados de imágenes 2D a sus posiciones reales en 3D en el mundo físico (Cheng et al., 2020).

8. BIG DATA

El Big Data se describe a través de un marco común de 3V, volumen (magnitud de los datos, terabytes o petabytes), variedad (heterogeneidad estructural de un conjunto de datos) y velocidad en que se generan, actualizan y analizan los datos (Gandomi & Haider, 2015).

La integración de BIM con Big Data permite una mejor gestión de datos a gran escala, mejorando la toma de decisiones, eficiencia operativa, predicción e integración que incluye plataformas de gestión de datos, herramientas de análisis de datos y software de visualización que pueden trabajar con modelos BIM (Pavón et al., 2021).

Erisen (2023) reporta que su sistema generó Big Data con predicciones etiquetadas de actividades, logrando un 99,97% de precisión en predicciones y reconocimiento en tiempo real (Erişen, 2023).

9. ESCANEEO LÁSER

El Escaneo Láser captura datos precisos del entorno construido, creando modelos BIM a partir de nubes de puntos 3D (Zabin et al., 2022).

El escaneo láser se integra con BIM capturando datos precisos del edificio, tanto interiores como exteriores, y luego convirtiéndolos en un modelo 3D de alta resolución. Los beneficios incluyen la mejora de los procesos de gestión, la capacidad de realizar mantenimiento predictivo, la mejora del confort de los ocupantes y la eficiencia en el consumo de recursos (Megahed & Hassan, 2022).

10. ROBÓTICA

La Robótica de IA es una técnica práctica en los dominios de BIM, percibiendo el mundo externo por medio del perceptrón, maximizando el éxito de sistemas de control (Zhang et al., 2022).

La robótica se integra con BIM utilizando plataformas que combinan Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV), UGV y mini drones. Utilizando una capa de hardware (robots), una capa de algoritmos (IA para detectar y reconstruir geometría 3D de defectos) y una capa de representación (BIM para registrar nubes de puntos y visualizar defectos en 3D). Los beneficios incluyen: inspección más rápida y precisa, capacidad de mapear defectos a ubicaciones específicas en el DT y la posibilidad de almacenar y analizar datos históricos de inspección (J. Chen et al., 2022).

11. REDES INALÁMBRICAS 5G

Las redes inalámbricas utilizan ondas de radio para conectar los dispositivos, sin necesidad de utilizar cables, estas se clasifican en dos grandes segmentos de corto alcance como redes de área local (LAN) y de largo alcance como redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN) (Salazar, 2016).

La red 5G permite la computación en la nube para procesar datos BIM, permitiendo un análisis eficiente de los requisitos del código de construcción y las necesidades de mantenimiento utilizando dispositivos portátiles (Chew et al., 2020).

12. SENSORES

Un sensor es un dispositivo técnico que monitorea el entorno circundante y genera señales en forma de analógico a una frecuencia constante para la recopilación de datos (Asif et al., 2024).

Quinn et al., (2020), procesan los datos recogidos por sensores en Arduino Mega 2560, para luego llevar a cabo un análisis por lotes de los datos, que son integrados en un modelo FM-BIM, permitiendo visualizar y analizar la información capturada en el contexto de modelo de gestión del edificio (Quinn et al., 2020).

CONCLUSIONES

Las tecnologías emergentes, están transformando significativamente la gestión de edificios. Cada una de estas tecnologías aporta beneficios específicos, desde la optimización del rendimiento energético hasta la mejora de la sostenibilidad y la eficiencia operativa. ML y DL demuestran ser fundamentales para el análisis de datos y la optimización de sistemas, permitiendo mejoras en la eficiencia energética y el confort de los edificios. El DT facilita la simulación y el monitoreo en tiempo real, mientras que el IoT y el escaneo láser contribuyen a una integración más precisa y eficaz de los datos. La AR y VR mejoran la visualización y la interacción con modelos BIM, promoviendo una mejor toma de decisiones y colaboración. El Blockchain ofrece soluciones innovadoras para la seguridad y gestión de datos, mientras que los algoritmos de IA permiten un análisis avanzado de datos. Big Data proporciona una plataforma para la gestión y análisis de grandes volúmenes de datos, y la robótica y las redes inalámbricas 5G optimizan la eficiencia en la inspección y el procesamiento de datos.

A pesar de los avances significativos, algunas áreas, como la integración de Blockchain y Robótica con BIM, aún presentan oportunidades de desarrollo y requieren una mayor exploración. Las tendencias emergentes indican un continuo interés y desarrollo en estas tecnologías, sugiriendo que el campo de la gestión energética en edificios seguirá evolucionando con nuevas innovaciones y aplicaciones.

REFERENCIAS

Arsiwala, A., Elghaish, F., & Zoher, M. (2023). Digital twin with Machine learning for predictive monitoring of CO2 equivalent from existing buildings. *Energy and Buildings*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112851>

- Asif, M., Naeem, G., & Khalid, M. (2024). Digitalization for sustainable buildings: Technologies, applications, potential, and challenges. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 450). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141814>
- Badia Juan. (2017). *Guía-inicial-para-implementar-BIM-en-las-organizaciones-versión-impresión*. 1–38. <https://www.bimforum.cl/wp-content/uploads/2017/07/Gu%C3%ADa-inicial-para-implementar-BIM-en-las-organizaciones-versi%C3%B3n-impresión.pdf>
- Bramer, W. M., de Jonge, G. B., Rethlefsen, M. L., Mast, F., & Kleijnen, J. (2018). A systematic approach to searching: An efficient and complete method to develop literature searches. *Journal of the Medical Library Association*, 106(4), 531–541. <https://doi.org/10.5195/jmla.2018.283>
- Chen, J., Lu, W., Ghansah, F. A., & Peng, Z. (2022). Defect digital twinning: A technical framework to integrate robotics, AI and BIM for facility management and renovation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1101(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/2/022041>
- Chen, Y., Cai, X., Li, J., Zhang, W., & Liu, Z. (2022). The values and barriers of Building Information Modeling (BIM) implementation combination evaluation in smart building energy and efficiency. *Energy Reports*, 8, 96–111. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.075>
- Cheng, J. C. P., Chen, W., Chen, K., & Wang, Q. (2020). Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms. *Automation in Construction*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103087>
- Chew, M. Y. L., Teo, E. A. L., Shah, K. W., Kumar, V., & Hussein, G. F. (2020). Evaluating the roadmap of 5g technology implementation for smart building and facilities management in singapore. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su122410259>
- Coupry, C., Noblecourt, S., Richard, P., Baudry, D., & Bigaud, D. (2021). BIM-Based digital twin and XR devices to improve maintenance procedures in smart buildings: A literature review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 15). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app11156810>
- D'Agostino, P., & Antuono, G. (2024). From Spherical Photos to Facility Management. Algorithmic Optimization Procedures for Buildings in BIM Approaches. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 204–213. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51623-8_20
- Deng, M., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2021). From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 58–83. <https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2021.005>
- Di Giuda, G. M., Pellegrini, L., Schievano, M., Locatelli, M., & Paleari, F. (2020). BIM and post-occupancy evaluations for building management system: Weaknesses and opportunities. In *Research for Development* (pp. 319–327). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33570-0_29
- Dy Buncio, D. (2019). *Title: BIM as the Digital Enabler For Smart Cities*.

- Eber, W. (2020). Potentials of artificial intelligence in construction management. *Organization, Technology and Management in Construction*, 12(1), 2053–2063. <https://doi.org/10.2478/otmcj-2020-0002>
- Eneyew, D. D., Capretz, M. A. M., & Bitsuamlak, G. T. (2022). Toward Smart-Building Digital Twins: BIM and IoT Data Integration. *IEEE Access*, 10, 130487–130506. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3229370>
- Erişen, S. (2023). A Systematic Approach to Optimizing Energy-Efficient Automated Systems with Learning Models for Thermal Comfort Control in Indoor Spaces. *Buildings*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071824>
- Gallaher, M. P., O’connor, A. C., Dettbarn, J. L., & Gilday, L. T. (2004). *Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry*.
- Gandomi, A., & Haider, M. (2015). Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*, 35(2), 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007>
- Gómez-Valdés, M., Acevedo-Acevedo, S., Alvarado-Acuña, L., & Iturra-Molina, R. (2023). Impacto de la metodología BIM en la gestión de proyectos de construcción. *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i7.6860>
- González-Marquez, R. J., Choclán-Gámez, F., & Soler, M. (2014). *INTRODUCCION A LA METODOLOGÍA BIM*. <https://www.researchgate.net/publication/284159764>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Heidari, A., Peyvastehgar, Y., & Amanzadegan, M. (2023). A systematic review of the BIM in construction: from smart building management to interoperability of BIM & AI. In *Architectural Science Review* (Vol. 67, Issue 3, pp. 237–254). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/00038628.2023.2243247>
- Heidari, A., Peyvastehgar, Y., & Amanzadegan, M. (2024). A systematic review of the BIM in construction: from smart building management to interoperability of BIM & AI. In *Architectural Science Review* (Vol. 67, Issue 3, pp. 237–254). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/00038628.2023.2243247>
- Kardoka, J., Paulauskaite-Taraseviciene, A., & Pupeikis, D. (2022). Artificial Intelligence Solutions Towards to BIM6D: Sustainability and Energy Efficiency. *Communications in Computer and Information Science*, 1665 CCIS, 117–135. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16302-9_9
- Li, A., Zhang, J., Xiao, F., Fan, C., Yu, Y., & Chen, Z. (2024). Design information-assisted graph neural network for modeling central air conditioning systems. *Advanced Engineering Informatics*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102379>
- Liu, X. (2023). Application of BIM in project management in China. *Theoretical and Natural Science*, 26(1), 1–5. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/26/20241001>
- Lokshina, I. V., Greguš, M., & Thomas, W. L. (2019). Application of integrated building information modeling, iot and. *Procedia Computer Science*, 160, 497–502. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.058>

- Lu, Q., Xie, X., Heaton, J., Parlikad, A. K., & Schooling, J. (2020). From BIM towards digital twin: Strategy and future development for smart asset management. In *Studies in Computational Intelligence* (Vol. 853, pp. 392–404). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1_30
- Lu, Q., Xie, X., Parlikad, A. K., Schooling, J. M., & Konstantinou, E. (2020). Moving from building information models to digital twins for operation and maintenance. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Smart Infrastructure and Construction*, 174(2), 46–56. <https://doi.org/10.1680/jsmic.19.00011>
- Madni, A. M., Madni, C. C., & Lucero, S. D. (2019). Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- Megahed, N. A., & Hassan, A. M. (2022). Evolution of BIM to DTs: A Paradigm Shift for the Post-Pandemic AECO Industry. *Urban Science*, 6(4), 67. <https://doi.org/10.3390/urbansci6040067>
- Mendoza, J., Quispe, M., & Muñoz, S. (2022). *Revision sobre el rol de la IA en construccion*. 1–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11727>
- Mendoza Jesica, & Mosquera Aldayr. (2020). *BIM Y FACILITY MANAGEMENT*.
- Meschini, S., Pellegrini, L., Locatelli, M., Accardo, D., Tagliabue, L. C., Di Giuda, G. M., & Avena, M. (2022). Toward cognitive digital twins using a BIM-GIS asset management system for a diffused university. *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.959475>
- Musella, C., Serra, M., Menna, C., & Asprone, D. (2021). Building information modeling and artificial intelligence: Advanced technologies for the digitalisation of seismic damage in existing buildings. *Structural Concrete*, 22(5), 2761–2774. <https://doi.org/10.1002/suco.202000029>
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., Mcdonald, S., ... Mckenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. In *The BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Automated process discovery from event logs in BIM construction projects. *Automation in Construction*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103713>
- Pan, Y., & Zhang, L. (2023). Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions. In *Archives of Computational Methods in Engineering* (Vol. 30, Issue 2, pp. 1081–1110). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09830-8>
- Panteli, C., Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2020). Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond A

- critical review. *Journal of Cleaner Production*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121766>
- Pavón, R. M., Alberti, M. G., Álvarez, A. A. A., & Del Rosario Chiyón Carrasco, I. (2021). Use of bim-fm to transform large conventional public buildings into efficient and smart sustainable buildings. *Energies*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/en14113127>
- Pedral Sampaio, R., Aguiar Costa, A., & Flores-Colen, I. (2022). A Systematic Review of Artificial Intelligence Applied to Facility Management in the Building Information Modeling Context and Future Research Directions. In *Buildings* (Vol. 12, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/buildings12111939>
- Peng, Y., Lin, J. R., Zhang, J. P., & Hu, Z. Z. (2017). A hybrid data mining approach on BIM-based building operation and maintenance. *Building and Environment*, 126, 483–495. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.030>
- Pestana, E., & Paice, A. (2021). *Learning Algorithms for Building Control Applied to the iHomeLab Lighting System*.
- Quinn, C., Shabestari, A. Z., Misic, T., Gilani, S., Litoiu, M., & McArthur, J. J. (2020). Building automation system - BIM integration using a linked data structure. *Automation in Construction*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103257>
- Radhi, H., & Sharples, S. (2013). Global warming implications of facade parameters: A life cycle assessment of residential buildings in Bahrain. *Environmental Impact Assessment Review*, 38, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.009>
- Ramaji, I., Anderson, A., Cates, S., Tetreault, J., Fleming, A., Pugsley, K., & Mendela, K. (2022). Application of Vision-Based Artificial Intelligence in Creating a Contactless Interaction with Immersive Environments. *Computing in Civil Engineering 2021 - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2021*, 1351–1358. <https://doi.org/10.1061/9780784483893.165>
- Rogage, K., Clear, A., Alwan, Z., Lawrence, T., & Kelly, G. (2020). Assessing building performance in residential buildings using BIM and sensor data. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 38(1), 176–191. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-01-2019-0012>
- Salazar, J. (2016). *REDES INALÁMBRICAS*. <http://www.techpedia.eu>
- Siccardi, S., & Villa, V. (2023). Trends in Adopting BIM, IoT and DT for Facility Management: A Scientometric Analysis and Keyword Co-Occurrence Network Review. *Buildings*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/buildings13010015>
- Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., & Gao, X. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. In *Automation in Construction* (Vol. 101, pp. 127–139). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>
- Troncoso, J. C. (2016). *CLIMATIZACIÓN EN EDIFICIOS – Certificación de Edificio Sustentable*. <https://www.certificacionsustentable.cl/climatizacion-en-edificios/>

- Wang, H., Xu, P., Sha, H., Gu, J., Xiao, T., Yang, Y., & Zhang, D. (2022). BIM-based automated design for HVAC system of office buildings—An experimental study. *Building Simulation*, 15(7), 1177–1192. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0883-7>
- Wang, T., & Chen, H. M. (2023). Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle. In *Automation in Construction* (Vol. 150). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104832>
- Yang, A., Han, M., Zeng, Q., & Sun, Y. (2021). Adopting Building Information Modeling (BIM) for the Development of Smart Buildings: A Review of Enabling Applications and Challenges. In *Advances in Civil Engineering* (Vol. 2021). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2021/8811476>
- You, F., Hu, D., Zhang, H., Guo, Z., Zhao, Y., Wang, B., & Yuan, Y. (2011). Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China-A case study of residential buildings. *Ecological Complexity*, 8(2), 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.02.003>
- Zabin, A., González, V. A., Zou, Y., & Amor, R. (2022). Applications of machine learning to BIM: A systematic literature review. *Advanced Engineering Informatics*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101474>
- Zhang, F., Chan, A. P. C., Darko, A., Chen, Z., & Li, D. (2022). Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry. In *Automation in Construction* (Vol. 139). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104289>