

Inteligencia artificial y gemelos digitales en el mantenimiento predictivo industrial: cartografía de la literatura latinoamericana

Artificial intelligence and digital twins in industrial predictive maintenance: mapping the Latin American literature

^aDiego Gonzalo Fernández Sánchez ✉; ^bRonald Alberto Zúñiga Incalla;

^cKaren Paola Barrientos-Quintanilla; ^dMariano Damián Ecurra Vicésar

Resumen

Introducción: La inteligencia artificial (IA) y los gemelos digitales representan tecnologías clave dentro de la Industria 4.0, al transformar los sistemas tradicionales de mantenimiento hacia modelos predictivos basados en análisis de datos, optimización operativa y toma de decisiones automatizada. **Objetivo:** Analizar la estructura de la literatura científica sobre inteligencia artificial aplicada al mantenimiento predictivo industrial, identificando vacíos de conocimiento con implicaciones prácticas para la toma de decisiones de inversión industrial en América Latina durante el periodo 2022-2026.

Metodología: Se realizó una revisión de alcance siguiendo las directrices PRISMA-ScR. La búsqueda incluyó estudios provenientes de Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, SciELO, PubMed, Google Académico y repositorios institucionales. El corpus final estuvo conformado por 47 fuentes, distribuidas en 28 publicaciones académicas (59,6 %) y 19 documentos institucionales, corporativos o periodísticos (40,4 %). **Resultados:** Los hallazgos evidenciaron un campo de investigación fragmentado organizado en cuatro corrientes principales: desarrollo algorítmico, aplicación de gemelos digitales, revisión y adopción tecnológica, y análisis económico-normativo. Se identificó una limitada producción científica regional y ausencia de estudios que cuantifiquen de manera directa el retorno económico de la implementación de estas tecnologías en entornos industriales. **Conclusiones:** La literatura actual presenta avances significativos en el desempeño técnico del mantenimiento predictivo basado en IA, pero mantiene una brecha crítica entre la precisión tecnológica y la evaluación económica de su implementación. Se requieren investigaciones que integren indicadores predictivos con resultados financieros y operativos para orientar decisiones de inversión industrial en América Latina.

Palabras clave: América Latina; Aprendizaje automático; Gemelos digitales; Industria 4.0; Mantenimiento predictivo; Toma de decisiones.

Abstract

Background: Artificial intelligence (AI) and digital twins are key technologies within Industry 4.0, transforming traditional maintenance systems toward predictive models based on data analytics, operational optimization, and automated decision-making. **Objective:** To analyze the structure of the scientific literature on artificial intelligence applied to industrial predictive maintenance, identifying knowledge gaps with practical implications for industrial investment decision-making in Latin America during the 2022–2026 period. **Methodology:** A scoping review was conducted following the PRISMA-ScR guidelines. The search included studies from Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, SciELO, PubMed, Google Scholar, and institutional repositories. The final corpus comprised 47 sources, including 28 academic publications (59.6%) and 19 institutional, corporate, or journalistic documents (40.4%). **Results:** The findings revealed a fragmented research field organized around four main streams: algorithmic development, digital twin applications, technology review and adoption, and economic and regulatory analysis. Limited regional scientific output was identified, along with a lack of studies directly quantifying the economic return on implementing these technologies in industrial

^a Escuela de Educación Superior CERTUS. Lima, Perú
dfernandezs@certus.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0003-1820-5023>

^b Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú
rzunigai@unsa.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-3244-8040>

^c Universidad Católica de Santa María. Arequipa, Perú
kbarrientosq@unsa.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-6846-0164>

^d Centro de Estudios, Tecnología e Investigación. Ciudad del Este, Paraguay
damian.escurra@cetisa.com.py
<https://orcid.org/0009-0009-7618-7426>

Historia del artículo:
Artículo recibido 28 de mayo 2026 |
Aceptado 15 de junio 2026 |
Publicado 01 de julio 2026

Cómo citar:
Fernández Sánchez, D. G., Zúñiga Incalla, R. A., Barrientos-Quintanilla, K. P., & Ecurra Vicésar, M. D. (2026). Inteligencia artificial y gemelos digitales en el mantenimiento predictivo industrial: cartografía de la literatura latinoamericana. *Impulso, Revista de Administración*, 6(15), 1-16.
<http://doi.org/10.59659/impulso.v.6i15.367>

settings. **Conclusions:** The current literature shows significant advances in the technical performance of AI-based predictive maintenance while maintaining a critical gap between technological accuracy and the economic assessment of implementation. Further research is needed to integrate predictive indicators with financial and operational outcomes to support industrial investment decisions in Latin America.

Keywords: Latin America; Machine learning; Digital twins; Industry 4.0; Predictive maintenance; Decision making

Introducción

La gestión de activos físicos y de procesos productivos depende del grado de digitalización industrial. En el marco de la Industria 4.0, la integración de sensores, conectividad y analítica convierte los datos operativos en información útil para la decisión, con efectos sobre la productividad y la resiliencia. La literatura, no obstante, describe un avance desigual donde las competencias digitales y el liderazgo directivo determinan la digitalización alcanzable por cada organización (Gutiérrez et al., 2025). A esa disparidad se suma el rezago de las pymes frente a las grandes empresas en las fases iniciales de adopción, atribuido a factores tecnológicos, organizacionales y ambientales (Ghobakhloo et al., 2022). En otro plano, esas mismas tecnologías fortalecen la resiliencia manufacturera ante choques externos (Madrid et al., 2025). En ese contexto, el mantenimiento predictivo cobra protagonismo por su efecto en la disponibilidad de los activos.

En el terreno técnico, la promesa del mantenimiento predictivo descansa en la Inteligencia Artificial (IA) capaz de convertir señales de vibración y consumo en diagnósticos y pronósticos confiables. La revisión del aprendizaje profundo en el diagnóstico inteligente de maquinaria rotativa sistematiza las arquitecturas principales y delimita los retos de datos desbalanceados, ruido y generalización entre condiciones operativas (Zhu et al., 2023). En complemento, el aprendizaje por refuerzo añade la dimensión prescriptiva, pues propone acciones de mantenimiento y no solo predicciones de fallo (Siraskar et al., 2023). Con todo, la cartografía del aprendizaje supervisado en la Industria 4.0 constata la preferencia por datos reales de planta, si bien su escasa disponibilidad pública compromete la reproducibilidad (Guidotti et al., 2025).

De igual modo, el segundo pilar lo constituyen los gemelos digitales, que enlazan la operación física del activo con su representación virtual. La revisión comprensiva de la gemelación clasifica las tecnologías habilitantes según el flujo de datos entre activo y réplica, con el monitoreo de salud entre las aplicaciones más maduras (Thelen et al., 2022). Sobre esa base, el mantenimiento predictivo basado en gemelo digital se distingue del convencional por incorporar la simulación en línea del activo y aporta un marco de referencia para la manufactura inteligente (Zhong et al., 2023). El cuadro se completa con la búsqueda de equilibrio entre exactitud y costo computacional, resuelta mediante marcos de fidelidad adaptativa que ajustan la simulación en tiempo de ejecución (Waseem y Chang, 2026). Con ese trasfondo, la pregunta relevante trasciende lo técnico y se instala en el ámbito económico y organizativo.

Frente a este panorama, América Latina presenta condiciones particulares para la adopción de esas tecnologías. La intención de adoptar la Industria 4.0 en Colombia, Ecuador, México, Panamá y Perú obedece a la utilidad y la facilidad de uso percibidas, junto con factores conductuales (Cordero et al., 2023). Esa disposición, sin embargo, tropieza con restricciones estructurales pues el análisis comparado de pymes de regiones no capitales de Argentina y Chile refleja déficits que limitan la profundidad de la adopción digital (Gatica et al., 2024). La evidencia brasileña identifica las condiciones que favorecen el uso de la IA como son el tamaño empresarial, los entornos digitalizados y la infraestructura previa (Katz y Jung, 2026). De ahí que invertir en mantenimiento predictivo exija criterios que combinen el desempeño técnico de los algoritmos con un resultado económico verificable, cuestión que la literatura regional no ha resuelto.

Pese a ese acervo, la producción sobre IA aplicada al mantenimiento predictivo sigue fragmentada en corrientes especializadas —algoritmos, gemelos digitales, optimización económica y adopción— con escasa comunicación. En América Latina, las decisiones de inversión se apoyan en magnitudes corporativas sin escrutinio, por causas como la especialización disciplinar y la diversidad de métricas. La situación ideal exigiría resultados comparables que enlacen desempeño predictivo y retorno económico. Este estudio aborda esa exigencia mediante una revisión de alcance, con esta pregunta general: ¿cómo se estructura esa literatura, qué naturaleza tienen sus resultados y qué vacíos tendrían mayor consecuencia práctica para la adopción? De ella se derivan cinco preguntas: ¿cómo se distribuye la producción por corrientes, diseño, geografía y sector?; ¿son comparables sus resultados?; ¿cuál es la contribución arbitrada regional?; ¿qué aplicaciones verificables existen?; ¿qué vacíos se priorizan por tratabilidad y valor esperado?

Un estudio en este sentido contribuiría a ordenar la evidencia dispersa y a dotar a gestores de activos, inversores y formuladores de política de criterios comparables para juzgar la implantación de esta tecnología. La revisión de alcance resulta pertinente porque admite literatura diversa, mapea su composición y delimita vacíos, cualidades ausentes en las síntesis estrechas. La contribución cobija a la academia regional, pues visibiliza la distancia entre la visibilidad de la adopción y la solidez de la evidencia. Con ese horizonte, la presente revisión de alcance tuvo como objetivo analizar la estructura de la literatura sobre IA aplicada al mantenimiento predictivo industrial, para la identificación de vacíos de conocimiento de mayor consecuencia práctica para la decisión de inversión industrial en América Latina durante el periodo 2022-2026.

Método

En virtud de lo expuesto, el estudio adopta el diseño de revisión de alcance (scoping review) con búsqueda sistematizada, orientado a cartografiar la extensión, la composición y la distribución de diversa literatura y a identificar vacíos de investigación. Este diseño conviene cuando el campo posee producciones dispersas y marcos en formación, pues sintetiza sin exigir similitud metodológica previa. La conducción siguió la guía de la Fundación Joanna Briggs (JBI) para protocolos de revisiones de alcance, que prescribe definir objetivos y criterios de elegibilidad a priori, planificar el cribado y la extracción, y documentar las decisiones con transparencia (Peters et al., 2022). El reporte adoptó además la lista de verificación PRISMA-ScR, que ordena la presentación de fuentes, la selección y la síntesis.

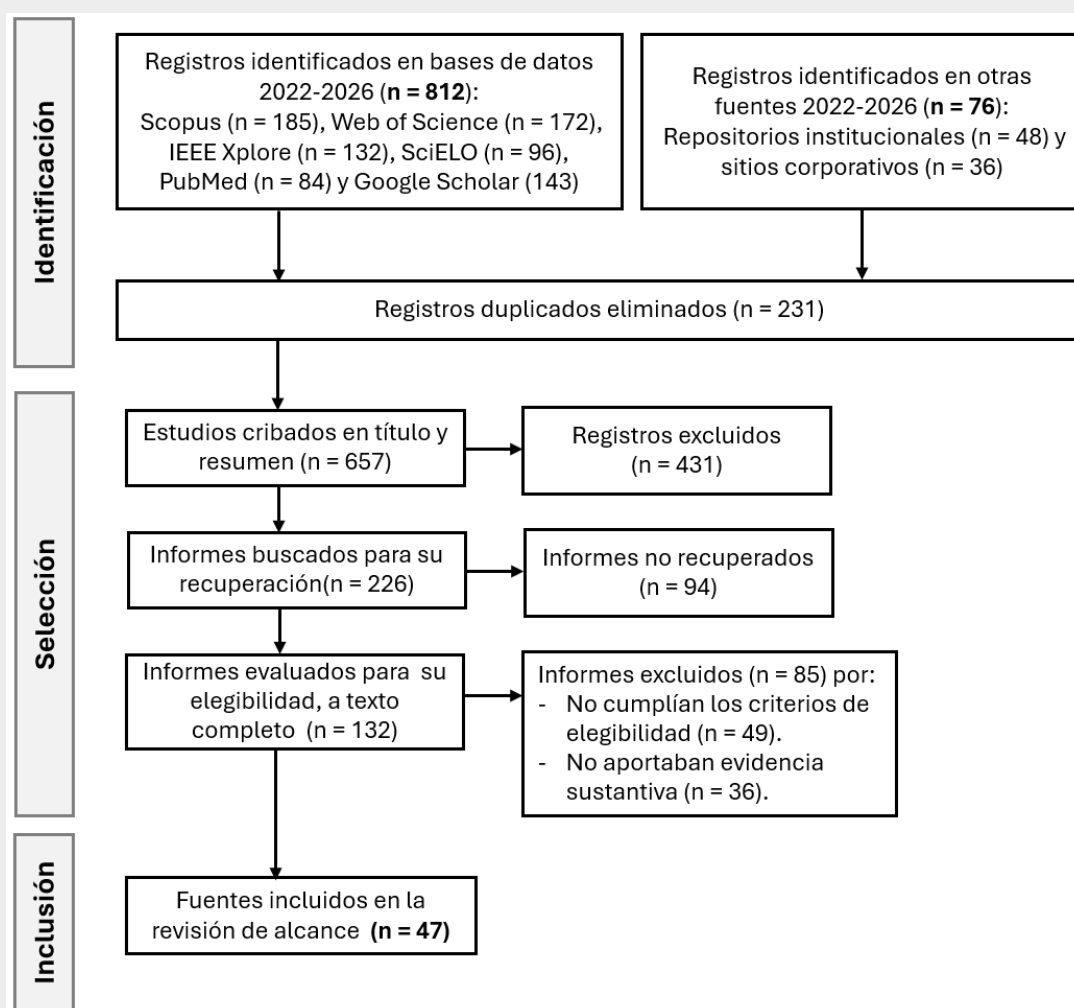
De acuerdo con ese protocolo, se realizó la búsqueda en Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, SciELO, PubMed y Google Académico, complementadas con repositorios institucionales para recuperar literatura gris regional. Las ecuaciones combinaron términos booleanos sobre IA, aprendizaje automático y profundo, mantenimiento predictivo, diagnóstico de fallos, vida útil remanente, gemelos digitales y contexto latinoamericano, con adaptaciones por base. La última consulta se fechó el 15 de junio de 2026 y la ventana de publicación abarcó 2022-2026. Además, se rastrearon las listas de referencias de los artículos seleccionados mediante bola de nieve, para capturar estudios pertinentes que escapaban a las ecuaciones. Cada registro recuperado ingresó a un gestor bibliográfico, donde la eliminación de duplicados dejó una base única para el cribado. Este procedimiento asegura que la delimitación del corpus responda a criterios explícitos y verificables.

Respecto a la elegibilidad, los criterios de inclusión comprendieron artículos arbitrados de 2022 a 2026, en español, inglés o portugués, sobre IA, aprendizaje automático o profundo aplicados al mantenimiento predictivo industrial, gemelos digitales de activos, adopción regional de estas tecnologías y evaluaciones económicas documentadas. El protocolo admitió, además, fuentes institucionales, corporativas y periodísticas con datos verificables, clasificadas por separado según su nivel de arbitraje. Los criterios de exclusión abarcaron publicaciones anteriores a 2022, estudios en otros idiomas, editoriales, cartas, resúmenes sin texto completo, trabajos sin aplicación empírica y documentos con IA sin descripción metodológica. En vista de lo anterior, ninguna fuente ingresó al

corpus por afinidad temática sin superar la evaluación completa de su texto. El cribado registró la distinción entre fuentes arbitradas y no arbitradas, pues condiciona la jerarquía de evidencia que estructura los resultados.

Derivado de esto, el flujo de selección registró 812 registros identificados en las bases consultadas y 76 de otras fuentes, de los cuales 231 resultaron duplicados y quedaron fuera. El cribado de títulos y resúmenes descartó 431 registros, luego 94 no pudieron recuperarse y tras la evaluación de textos completos se excluyeron 85 fuentes por no cumplir los criterios de elegibilidad o por no aportar evidencia sustantiva. Al culminar ese proceso, el corpus final comprendió 47 fuentes. Dos revisores efectuaron el cribado de forma independiente y resolvieron las discrepancias mediante discusión, con registro de acuerdos en actas internas. La Figura 1 detalla el proceso de identificación y selección de las fuentes de la revisión.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 del proceso de identificación, cribado e inclusión de fuentes.



Con el corpus delimitado, la extracción de datos se organizó mediante un formulario estandarizado con campos de autores, año, contexto geográfico, sector, objetivo, metodología, tecnologías, resultados cuantitativos, limitaciones e identificador persistente. Dos revisores completaron el formulario por cada fuente y un tercero verificó la coherencia entre las fichas y los textos originales. Conforme a las recomendaciones para la extracción, el análisis y la presentación de resultados en revisiones de alcance, la síntesis adoptó forma narrativa con apoyo de tablas resumen (Pollock et al., 2023). La organización temática distinguió cuatro corrientes: algorítmica, gemelos digitales, revisión y adopción, y económico-normativa. Junto con lo anterior, cada fuente recibió un rótulo de referente regional cuando el estudio, la muestra o la filiación correspondía a América Latina. Este sistema de

clasificación permite agrupar resultados dispares sin forzar comparaciones métricas entre diseños incompatibles.

En otra dimensión de análisis, la valoración de calidad aplicó una lista de verificación adaptada con cinco dimensiones: claridad de objetivos, descripción metodológica, adecuación de la muestra o el caso, validez y fiabilidad de datos e instrumentos, y reporte de limitaciones. Cada dimensión se calificó en tres niveles y el agregado determinó la solidez probatoria de la fuente. El protocolo definió tres jerarquías de evidencia la producción arbitrada con resultados cuantitativos verificables, la documentación institucional con trazabilidad formal y el material corporativo o periodístico sin auditoría metodológica. En cuanto al tratamiento de la literatura gris, su inclusión obedece a que concentra las magnitudes económicas regionales, aunque la jerarquía asignada acota su peso interpretativo. Las obras metodológicas empleadas para conducir y reportar la revisión no forman parte del corpus ni de los recuentos presentados.

Ante este panorama, conviene precisar las decisiones de transparencia del estudio. No se registró la revisión en PROSPERO ni en otro repositorio de protocolos, opción habitual en revisiones de alcance, aunque el protocolo interno quedó documentado con fecha anterior a la búsqueda. Las fichas de cribado y de extracción permanecen disponibles para solicitud, con lo que cualquier lector puede auditar los recuentos expuestos. En lo que respecta a sesgos, la ventana 2022-2026 evita la obsolescencia de tecnologías de rápida evolución, aunque restringe la cobertura de antecedentes previos. La búsqueda limitada a tres idiomas puede omitir producciones en otras lenguas, y la presencia predominante de resultados positivos en el campo introduce riesgo de sesgo de publicación, que el análisis admite y discute. Con ese marco, las ecuaciones, los recuentos y la trazabilidad de fuentes aseguran la reproducibilidad del procedimiento completo.

Resultados

Derivado de la ruta metodológica descrita, el análisis del corpus arroja una literatura especializada y fragmentada. De las 47 fuentes, 28 corresponden a producción académica (59.6 %) y 19 a documentación institucional, corporativa o periodística (40.4 %). La Tabla 1 presenta la composición por tipo de fuente y nivel de arbitraje. Dentro de las académicas, 24 son artículos arbitrados, 2 son preprints, 1 es tesis de posgrado y 1 carece de arbitraje o indexación verificable. Las corrientes temáticas se reparten entre 12 fuentes para la corriente algorítmica, 11 para gemelos digitales, 5 para revisión y adopción, y ninguna arbitrada para la corriente económico-normativa. Esta composición confirma que el campo concentra su esfuerzo en el desarrollo técnico y en la documentación de casos, con un vacío evidente en la evaluación económica arbitrada que la exposición siguiente desglosa.

Tabla 1. Composición del corpus analítico por tipo de fuente y nivel de arbitraje (n = 47)

Categoría	Tipo de fuente	n	%
Académica (n = 28; 59.6 %)	Artículos arbitrados en revista	24	51,1
	Preprints sin arbitraje	2	4,3
	Tesis de posgrado	1	2,1
	Artículo académico sin arbitraje o indexación verificable	1	2,1
	Documentación corporativa y de proveedores	6	12,8
Institucional y gris (n = 19; 40.4 %)	Prensa especializada y general	6	12,8
	Organismos públicos y entidades binacionales	5	10,6
	Organismos multilaterales	1	2,1
	Actas de conferencia sin arbitraje verificable	1	2,1
Total		47	100,0

Nota: Elaboración propia a partir del recuento directo del corpus. Los porcentajes se calculan sobre 47 fuentes. Las obras metodológicas citadas en el apartado de método no forman parte del corpus ni de los recuentos.

En términos de distribución temporal, 43 de las 47 fuentes (91,5 %) aparecieron entre 2023 y 2026, lo que confirma la juventud del campo y la velocidad de su crecimiento. El año 2025 registró el mayor número de aportaciones, seguido de 2024, mientras el volumen de 2022 resulta marginal dentro de la ventana estudiada. En cuanto a la geografía de la producción arbitrada, los equipos con filiación europea, asiática y norteamericana dominan el corpus, con aportes regionales acotados a un conjunto reducido de artículos. La producción institucional regional, por su parte, proviene de organismos públicos, entidades binacionales, proveedores tecnológicos y prensa especializada del sector energético, minero y manufacturero. Este contraste entre la procedencia académica y la procedencia institucional del material regional anticipa la lectura de solidez probatoria que cierra el apartado.

En la corriente algorítmica, la literatura describe aplicaciones de aprendizaje automático y profundo para predicción de fallos, diagnóstico y estimación de vida útil remanente (RUL). La revisión sistemática sobre diagnóstico y pronóstico mecánico en casos industriales reales sostiene que los modelos rinden alto en laboratorio, aunque la transferencia a planta tropieza con la disponibilidad y calidad de los datos (Fernandes et al., 2022). En la misma dirección, la revisión de estado del arte sobre diagnóstico de máquinas rotativas agrupa las técnicas de IA vigentes y muestra la madurez creciente del campo (Singh et al., 2023). La revisión regional sobre estrategias de IA y big data para mantenimiento predictivo identifica el predominio del aprendizaje profundo y la centralidad de los datos de sensores (Paitan et al., 2025). Estas síntesis delimitan el bloque algorítmico del corpus y anticipan sus desafíos de despliegue.

Dentro de ese bloque, la estimación de RUL concentra una fracción considerable de la producción arbitrada. Una red bidireccional de memoria prolongada con atención múltiple (Bi-LSTM) supera a los enfoques comparados en la predicción de vida útil de rodamientos (Shen et al., 2022). La arquitectura híbrida que fusiona convoluciones unidimensionales, memoria prolongada y auto-atención pronostica la vida útil de motores turbofán con precisión estable (Li et al., 2023). La regresión profunda desbalanceada con aprendizaje sensible a costes corrige la distribución desigual de estados de degradación y mejora la estimación en rodamientos (Ding et al., 2022). Estos trabajos comparten conjuntos de datos públicos y métricas de error estandarizadas, rasgo que facilita su comparación técnica. Su dependencia de bancos de prueba acotados restringe, sin embargo, la lectura directa para decisiones de inversión.

Sumado a lo anterior, la detección de anomalías conforma el segundo bloque temático de la corriente. El método basado en vectores de vibración y en clasificación de mínima covarianza detectó anomalías con notable antelación respecto a los enfoques de amplitud, con validación sobre una turbina de vapor y una bomba de alimentación reales (Hu et al., 2022). En el registro no supervisado, un autoencoder convolucional temporal con módulo de memoria restringe la reconstrucción a patrones normales y evita la generalización excesiva de los autoencoders clásicos (Li et al., 2023). Ambos trabajos ilustran el tránsito del monitoreo clásico hacia esquemas de aprendizaje con umbrales automatizados. En consecuencia, la corriente cubre el ciclo de detección, diagnóstico y pronóstico, aunque expresa sus resultados en métricas de exactitud y error que no dialogan con las demás corrientes.

En cuanto a los resultados, la corriente algorítmica los expresa en unidades técnicas estandarizadas. La revisión de mantenimiento predictivo con aprendizaje automático registra la exactitud como métrica dominante y constata que el 85.2 % de los estudios empleó datos del mundo real (Benmansour et al., 2026). La revisión de técnicas de IA para mantenimiento predictivo detecta la inclinación hacia el aprendizaje profundo y la persistencia de problemas de calidad de datos, interpretabilidad, escalabilidad y ciberseguridad (Lefrouni y Taibi, 2025). En la aplicación, el algoritmo de detección y diagnóstico inteligente de fallos en equipos eléctricos alcanzó una exactitud media de 98.5 % sobre cinco tipos de fallo (Li y Li, 2026). En consecuencia, la corriente genera métricas de clasificación, diagnóstico y pronóstico, unidades que no combinan con las de los gemelos digitales ni de la adopción.

Junto con lo anterior, los gemelos digitales forman la segunda corriente por volumen de producción arbitrada. La revisión sistemática sobre mantenimiento predictivo con gemelos digitales sintetiza elementos arquitectónicos y direcciones futuras (van Dinter et al., 2022). La evaluación del uso de gemelos digitales en sistemas de producción constata beneficios de planificación y control, con adopción concentrada en gran escala (Bustamante et al., 2024). La revisión de gemelos digitales para la supervisión y el mantenimiento de infraestructuras viales examinó 21 estudios sin identificar trabajos latinoamericanos en su muestra (García et al., 2025). Las tres revisiones coinciden en que el valor del gemelo depende del acoplamiento entre datos de planta, modelo virtual y análisis mediante IA. En conjunto, la corriente reporta arquitecturas, taxonomías y validaciones de concepto, con escasos resultados económicos medidos.

La implementación de gemelos digitales concentra aportes sobre despliegue y arquitecturas. La estrategia de implementación de la entidad física en gemelos de manufactura propone un esquema de requisitos orientado por diseño axiomático (Wei et al., 2022). La arquitectura de gemelo digital de sistema de control numérico computarizado (CNC) impulsada por inteligencia de borde supera limitaciones de cómputo y de red mediante procesamiento distribuido (Yu et al., 2023). En el sector eléctrico, el gemelo digital de multiplicadora de aerogenerador acopla cargas del sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), modelos dinámicos calibrados con señales de monitoreo y modelos de daño por fatiga (Zhou et al., 2024). Estos casos muestran madurez arquitectónica creciente y validación en activos específicos. Aun así, ninguno reporta el costo del despliegue ni su retorno.

En vista de lo anterior, la corriente digital extiende su alcance hacia la generación y los procesos continuos. La revisión de gemelos digitales para aerogeneradores tipifica enfoques que combinan datos históricos, sensores, aprendizaje automático y modelado físico para predecir fallos y estimar vida útil (Leon et al., 2025). La revisión sistemática sobre gemelos digitales fotovoltaicos mapea 61 estudios, describe tendencias y formula orientaciones de implementación (Elnosh et al., 2026). En manufactura, su aplicación digital al mantenimiento en producción esbelta con mejora continua documenta su aporte a la eficiencia de procesos (Iheanacho et al., 2025). Estos trabajos afianzan la presencia del gemelo digital en sectores de capital intensivo. Con todo, la evidencia proviene de contextos extra regionales, de validaciones técnicas y de activos específicos, sin enlace con decisiones de inversión.

En lo que concierne a la revisión y adopción, la revisión sistemática de mantenimiento predictivo y tecnologías de gemelos digitales reúne desafíos, oportunidades y buenas prácticas transversales al campo (Abd Wahab et al., 2024). En el plano organizacional, el estudio en grandes manufactureras colombianas constata una distancia notoria entre la preparación declarada de las empresas y la implementación real reportada pues la adopción se concentra en tecnologías fundamentales, en tanto la IA, los sistemas ciberfísicos y los gemelos digitales muestran implantación limitada pese a percepciones favorables (Quiroga et al., 2026). Ese desalineamiento entre percepción y práctica conecta las expectativas tecnológicas con las condiciones reales de las organizaciones que deciden. La corriente aporta, de este modo, el puente conceptual entre las capacidades técnicas descritas por las demás corrientes y el contexto institucional donde las inversiones se deciden.

A este panorama se une la evidencia regional arbitrada en casos de planta. El estudio ecuatoriano que combina sensores, SCADA, internet de las cosas (IoT) y redes neuronales reportó precisiones de 96.4 % y 93.8 %, una reducción de 8.5 a 2.1 fallos mensuales, una caída de inactividad de 42 a 10 horas y un descenso energético de 12 % (Mendoza et al., 2025). En Perú, los gemelos digitales y aprendizaje predictivo en manufacturas de Huancayo documentaron una reducción del 45 % del tiempo de respuesta, un aumento del 60 % en el tiempo entre fallos, una mejora de usabilidad del 83 %, pérdidas potenciales de hasta 42 000 dólares mensuales y una tasa de fallos de conectividad móvil de cuarta generación (4G) del 35 % (Armada et al., 2026). Ambos casos constituyen evidencia puntual no generalizable.

En general, 27 de las 47 fuentes (57.4 %) poseen referente latinoamericano, pero 18 de ellas corresponden a literatura institucional, corporativa o periodística. Solo 5 de los 24 artículos arbitrados (20.8 %) presentan autoría con filiación regional, concentrada en un número reducido de países. La producción arbitrada regional se sitúa en casos de planta o revisiones con contexto productivo concreto; el resto de la producción arbitrada proviene de equipos de otras regiones que abordan problemas de alcance general. Esta distribución expone una asimetría entre la visibilidad de la adopción tecnológica, sostenida por documentación institucional abundante, y la solidez arbitrada de la evidencia disponible sobre esos mismos despliegues. La Tabla 2 ordena los vacíos de conocimiento que derivan de esa lectura, clasificados por tratabilidad metodológica y valor esperado para la decisión de inversión industrial.

Tabla 2. Vacíos de conocimiento priorizados por tratabilidad y valor esperado.

Prioridad	Vacío de conocimiento	Tratabilidad
1	Acoplamiento entre desempeño predictivo y resultado económico	Alta
2	Umbral mínimo de rentabilidad de la inversión en mantenimiento predictivo	Alta
3	Costo diferencial de los errores de predicción	Media
4	Anclaje económico de los instrumentos de madurez digital	Media
5	Estimaciones regionales verificables del retorno económico	Alta
6	Desalineamiento sectorial de la evidencia disponible	Media
7	Umrales de escala tecnológica para pymes	Media

Nota: Priorización propia según tratabilidad metodológica y valor esperado para la decisión de inversión industrial regional.

Frente a la ausencia de corriente económico-normativa arbitrada, el análisis de la evidencia institucional gana relevancia. Ninguno de los 24 artículos arbitrados aporta una estimación del retorno de planta con respaldo metodológico documentado. Las magnitudes económicas del corpus provienen de documentación corporativa, sectorial e institucional como ahorros anuales estimados por proveedores, pérdidas evitadas consignadas en notas sectoriales y modernizaciones descritas por organismos binacionales. Esos valores carecen de auditoría independiente, de líneas base comparables y de horizontes de cálculo explícitos y verificables. La jerarquía de evidencia los sitúa en el nivel descriptivo, apto para ilustrar la magnitud del fenómeno, no para sustentar una inversión. Por ello, el corpus ofrece desempeño técnico, arquitecturas de referencia y diagnósticos de madurez organizacional, pero no una función que enlace esas dimensiones con el retorno esperado de una implantación.

Con el corpus descrito, el análisis deriva un modelo conceptual de cuatro fases para la adopción gradual de IA en mantenimiento predictivo, ajustado al contexto latinoamericano. La fase de digitalización y conectividad comprende sistemas SCADA, sensores IoT, redes de comunicación y acoplamiento de gestores de mantenimiento, con la modernización de salas de control como referente regional. La fase de análisis y diagnóstico abarca el estudio de condiciones operativas, identificación de patrones, detección de anomalías y visualización en tiempo real. La fase de modelado predictivo incorpora arquitecturas de aprendizaje para predicción de fallos, estimación de vida útil y detección de anomalías. La fase de gemelo digital y mantenimiento prescriptivo combina los modelos predictivos para simular escenarios, optimizar intervenciones y generar recomendaciones de acción. La capacitación y la cultura de datos atraviesan las cuatro fases como condición transversal de adopción.

Con ese sustento, la agenda de investigación derivada del corpus comprende tres fases encadenadas: formal, instrumental y empírica regional. La fase formal exige definir la función de acoplamiento entre desempeño predictivo y resultado económico, con especificación de líneas base y horizontes de medición explícitos. La fase instrumental demanda instrumentos de madurez con anclaje económico y umbrales de rentabilidad aplicables a distintos tamaños y tipos de planta. La fase empírica regional pide estimaciones verificables del retorno económico en generación hidroeléctrica, minería e hidrocarburos, sectores donde el corpus concentra abundante documentación institucional con menor respaldo arbitrado. La progresión de fases respeta la dependencia lógica entre conceptos,

herramientas y medición empírica. Este orden evita que las mediciones regionales anticipen marcos conceptuales aún sin especificar, error que comprometería la comparabilidad futura y la utilidad práctica de la agenda propuesta.

Como complemento, los resultados requieren lecturas acotadas por sus condiciones. La diversidad de diseños, métricas y contextos limita la comparabilidad directa de los resultados entre corrientes. La inclusión predominante de estudios con resultados positivos puede sobreestimar la efectividad de las tecnologías; los registros con desempeño subóptimo aparecen con menor frecuencia en el corpus. La ventana 2022-2026 reduce la obsolescencia, aunque el ritmo de evolución de la IA puede envejecer algunos resultados con rapidez. La búsqueda en tres idiomas no cubre la totalidad de la producción regional, y las fuentes corporativas, por su naturaleza, carecen del escrutinio propio del arbitraje académico. Estos límites no invalidan la cartografía; delimitan su alcance descriptivo y justifican la agenda priorizada que la discusión contrasta con la literatura internacional. La agenda asume estos límites como condiciones de diseño y no como obstáculos definitivos.

Discusión

En diálogo con los resultados expuestos, la estructura fragmentada de la literatura coincide con diagnósticos recientes del campo. La revisión sobre predicción de vida útil remanente de [Ferreira y Gonçalves \(2022\)](#), advierte que los enfoques basados en datos conviven con los basados en modelos sin un marco común de comparación y que la distancia entre bancos de prueba y planta persiste. En la misma dirección, la revisión de desafíos del mantenimiento predictivo realizada por [Nunes et al. \(2023\)](#) identifica datos ruidosos, exigencias de escalabilidad y soluciones acotadas a un equipo concreto como obstáculos que impiden sistemas generalizables. Este estudio añade la ausencia total de corriente económico-normativa arbitrada, rasgo que esas síntesis describen de manera tangencial. La coincidencia es parcial pues el corpus regional acentúa la separación entre unidades de resultado y refuerza la necesidad de una función común de decisión.

En cuanto a la naturaleza de los resultados algorítmicos, el corpus muestra métricas elevadas junto con retos de despliegue, patrón que la literatura internacional corrobora. La evaluación de herramientas de IA explicable en el mantenimiento predictivo de discos duros llevado a cabo por [Ferraro et al. \(2023\)](#), documenta que las explicaciones útiles para técnicos de planta exigen fidelidad y estabilidad rara vez garantizadas. Como complemento, [Kim et al. \(2024\)](#) realizaron la evaluación de robustez adversarial de sistemas de diagnóstico demuestra que perturbaciones apenas perceptibles degradan el rendimiento y expone una vulnerabilidad de ciberseguridad rara vez tratada en los estudios de métricas. El presente estudio coincide con ambos resultados pues la exactitud promedio del corpus se acompaña de riesgos operativos sin cuantificar. La discrepancia aparece en el énfasis, pues la literatura internacional despliega esos debates en detalle técnico y el corpus regional apenas los registra.

Sobre la corriente de gemelos digitales, la madurez arquitectónica observada convive con una validación limitada, lectura que las síntesis especializadas apoyan. [Loaiza y Cloutier \(2022\)](#) analizaron la implantación de un sistema de manufactura con gemelo digital mediante pensamiento sistémico mapea retos organizativos que exceden lo técnico y anticipa problemas de adopción. Asimismo, [Zahedi-yami et al. \(2026\)](#) apreciaron que el marco ágil de verificación y validación de gemelos digitales extiende la comprobación a datos, modelos y servicios a lo largo del ciclo de vida, en respuesta a la complejidad de los sistemas híbridos. El estudio coincide con esa línea dado que los gemelos del corpus validan conceptos y arquitecturas, pero ninguno documenta costos de implantación ni retorno. Frente a esa problemática, la lectura regional gana precisión al distinguir la fidelidad técnica del valor económico, distinción que los marcos de verificación disponibles aún no incorporan.

Ante el resultado regional, la distancia entre visibilidad y solidez arbitrada dialoga con la literatura de adopción latinoamericana. [Cordeiro et al. \(2024\)](#) al estudiar las barreras en empresas brasileñas, concluyeron que la infraestructura tecnológica, la restricción financiera y la falta de comprensión de

los beneficios afectan la adopción. De igual manera, [Muñoz et al. \(2024\)](#) realizaron el diagnóstico de pymes colombianas y constataron la adopción baja con obstáculos de infraestructura y costos. [Bernal et al. \(2025\)](#) por su parte, al analizar las pymes manufactureras de Boyacá, añaden la visión limitada del potencial propio y la actitud pasiva de los gerentes. Este estudio coincide con esas barreras y las extiende al mantenimiento predictivo donde los casos arbitrados se concentran en pocos países y dependen de condiciones locales de conectividad. La discrepancia reside en el foco pues esa literatura examina la adopción general, no la evidencia de retorno.

En relación con la ausencia de retorno arbitrado, la literatura internacional demuestra que la medición resulta viable. En este sentido, considera [Meng et al. \(2022\)](#) que el método que combina dinámica de sistemas y juegos evolutivos cuantifica costos, beneficios incrementales y retorno de inversión con análisis de sensibilidad. [Meddaoui et al. \(2023\)](#) realizaron un estudio de caso en excelencia de manufactura y documentan beneficios de la estrategia predictiva sobre paradas no planificadas, costos y calidad. [Alvarado et al. \(2023\)](#) por su lado, consideran que el marco estocástico de costo-beneficio para planes de mantenimiento en una gran instalación industrial equilibra los costos contra las interrupciones del suministro. Con estos referentes, el vacío del corpus no se explica por imposibilidad técnica, sino por la separación entre la producción algorítmica y la evaluación económica. Este estudio discrepa de cualquier lectura que interprete la ausencia de cifras regionales como falta de madurez metodológica internacional.

No menos importante, el resultado sobre barreras de talento y capacidades encuentra respaldo empírico directo. [Alam et al. \(2026\)](#) mediante el análisis de demandas de competencias mediante procesamiento de lenguaje natural identifican perfiles híbridos donde la experticia en mantenimiento domina junto a las habilidades digitales. [Yli y Helo \(2026\)](#) aseguran que la encuesta a pymes finlandesas vincula la adopción con el aprendizaje organizacional y distingue necesidades internas de coordinación externa. [Baio y Carrer \(2022\)](#) sostiene que la encuesta a pymes metalúrgicas de São Paulo registra adopción baja y la asocia con competencias en tecnologías de la información y consultoría. El corpus regional muestra el mismo patrón en sus casos, donde la cultura de datos y la capacitación figuran como nodos centrales. La coincidencia es amplia y la diferencia radica en que este estudio conecta ese déficit con la imposibilidad de sostener decisiones de inversión.

En otro orden de ideas, los instrumentos de madurez y las hojas de ruta ofrecen el andamiaje que la agenda demanda. Según [Felippes et al. \(2022\)](#), el modelo de preparación 3D-CUBE organiza dimensiones tecnológicas, organizacionales y de proceso con escalas orientadas a decisiones de inversión digital. [Sonntag et al. \(2025\)](#) por su parte, sostienen que el modelo de madurez para el despliegue de IA en empresas manufactureras aporta indicadores que calculan la preparación para su uso. Para [Giacotto et al. \(2025\)](#), la revisión de mantenimiento prescriptivo sitúa la frontera del campo en la unión entre predicción, optimización y decisión de intervención. El estudio coincide con la pertinencia de esos instrumentos y añade una condición ausente que es el anclaje económico de las escalas de madurez, sin el cual el nivel alcanzado no aporta valor esperado. Con ese añadido, servirían a la agenda propuesta.

Respecto al eje sectorial, la escasa evidencia arbitrada sobre activos de generación concuerda con revisiones especializadas. La revisión de monitoreo de condición para centrales hidroeléctricas realizado por [García et al. \(2026\)](#), clasifica tecnologías por componente y señala retos prácticos para evitar paradas no deseadas. La revisión sobre fallos de ductos de petróleo y gas de [Al-Sabaeei et al. \(2023\)](#), resume algoritmos, fuentes de datos y desafíos de confiabilidad. La revisión de monitoreo de condición en turbinas Francis llavado a cabo por [Karna et al. \(2025\)](#), describe sensores, señales y métodos para el mantenimiento predictivo hidroeléctrico. Estas síntesis confirman que la literatura técnica sobre los sectores prioritarios de la agenda existe, con centro fuera de la región. Así se responde a la pregunta general: la literatura se estructura en corrientes incomparables, produce métricas técnicas sin acople económico y prioriza ese acoplamiento como vacío de mayor consecuencia práctica.

Conclusiones

Con el recorrido precedente, la revisión de alcance sintetiza el estado del conocimiento sobre IA aplicada al mantenimiento predictivo industrial durante 2022-2026 y responde al objetivo de analizar su estructura para identificar los vacíos de mayor consecuencia práctica para la decisión de inversión en América Latina. El campo se organiza en corrientes especializadas con escaso tránsito entre sí: la algorítmica produce métricas de clasificación, diagnóstico y pronóstico; los gemelos digitales aportan arquitecturas y validaciones de concepto; la corriente de revisión y adopción documenta casos regionales; la económico-normativa carece de estudios arbitrados. Lo que se sabe hasta ahora cubre el desempeño técnico y la arquitectura de referencia. Lo que falta por saber es el enlace entre ese desempeño y el resultado económico medido en planta, vacío que ningún artículo arbitrado cubre y que encabeza la priorización del estudio.

En términos de implicaciones, la cartografía aporta a gestores de activos y a formuladores de política industrial un criterio para distinguir la solidez arbitrada de la visibilidad institucional, con lo que desalienta decisiones de inversión fundadas solo en magnitudes corporativas sin auditoría. Para la comunidad académica, el modelo conceptual de cuatro fases y la agenda de tres fases entregan rutas de investigación verificables: especificar la función de acoplamiento, anclar con criterios económicos los instrumentos de madurez y estimar retornos regionales en generación hidroeléctrica, minería e hidrocarburos. El estudio recomienda a los equipos regionales priorizar diseños con líneas base y horizontes de medición explícitos, y a las organizaciones documentar sus implantaciones con transparencia metodológica. La investigación futura debería ampliar la ventana temporal, incorporar idiomas adicionales y contrastar estos resultados con corpus sectoriales, pasos que afianzarían la comparabilidad del conocimiento acumulado.

Acerca de

Contribución de los autores: Los autores contribuyeron en la conceptualización del estudio, al desarrollo metodológico, al análisis e interpretación de los datos, a la redacción del manuscrito y a la revisión crítica de su contenido intelectual. Asimismo, aprobó la versión final para su publicación.

Financiamiento: Los autores declaran que no recibió financiamiento para esta investigación.

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Certificación ética: Por tratarse de una revisión de alcance basada en el análisis de literatura científica y documentos institucionales, corporativos y periodísticos disponibles en fuentes documentales, el estudio no involucró participantes humanos, intervención directa ni recopilación de datos personales o sensibles. En consecuencia, no fue necesaria la obtención de consentimiento informado ni la aprobación de un comité de ética.

Referencias

- Abd Wahab**, N. H., Hasikin, K., Wee, K., Xia, K., Bei, L., Huang, K. y Wu, X. (2024). Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices. *PeerJ Computer Science*, 10, e1943. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1943>
- Alam**, N. B., Rahman, C. M. A., Harik, R., Wuest, T. y Ryu, J. (2026). Workforce competency requirements in Industry 4.0: a natural language processing analysis of job market demands. *Journal of Manufacturing Technology Management*. <https://doi.org/10.1108/jmtm-08-2025-0767>

- Al-Sabaei**, A. M., Alhussian, H., Abdulkadir, S. J. y Jagadeesh, A. (2023). Prediction of oil and gas pipeline failures through machine learning approaches: A systematic review. *Energy Reports*, 10, 1313–1338. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.009>
- Alvarado**, D., Moreno, R., Orchard, M. E. y Kirschen, D. S. (2023). Cost-benefit analysis of maintenance plans: case study of the power system of a large industrial facility. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38(3), 2046–2057. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2022.3185376>
- Armada**, J. M., Oseda, D., Ramos, D. y Franklin, G. Y. (2026). Gemelos digitales y mantenimiento predictivo en industrias manufactureras de Huancayo. *Revista Venezolana de Gerencia*, 31(114), e3111421. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.31.114.21>
- Baio**, A. A. y Carrer, M. J. (2022). Adoption of Industry 4.0 technologies: an analysis of small and medium-sized companies in the state of São Paulo, Brazil. *Gestão & Produção*, 29, e122. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e122>
- Benmansour**, O., Medarhri, I. y Hosni, M. (2026). Predictive maintenance in Industrial Systems Using Machine Learning: A Review. *Statistics, Optimization & Information Computing*, 15(4), 2743–2758. <https://doi.org/10.19139/soic-2310-5070-3058>
- Bernal**, I. V., Jiménez, H. L. y Alvarez, W. O. (2025). Factores que influyen en la adopción de tecnologías 4.0 en pymes manufactureras de Duitama, Boyacá. *Cuadernos de Administración*, 38. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cao38.fiatpm>
- Bustamante-Limones**, A., Rodriguez-Borges, C. y Pérez-Rodriguez, J. A. (2024). Evaluación del uso de gemelos digitales en los sistemas de producción. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 12(3), 195–204. <https://doi.org/10.15649/2346030X.4382>
- Cordeiro**, R. F., Reis, L. P. y Fernandes, J. M. (2024). A study on the barriers that impact the adoption of Industry 4.0 in the context of Brazilian companies. *The TQM Journal*, 36(1), 361–384. <https://doi.org/10.1108/tqm-07-2022-0239>
- Cordero**, D., Altamirano, K. L., Parra, J. O. y Espinoza, W. S. (2023). Intention to Adopt Industry 4.0 by Organizations in Colombia, Ecuador, Mexico, Panama, and Peru. *IEEE Access*, 11, 8362–8386. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3238384>
- Ding**, Y., Jia, M., Zhuang, J. y Ding, P. (2022). Deep imbalanced regression using cost-sensitive learning and deep feature transfer for bearing remaining useful life estimation. *Applied Soft Computing*, 127, 109271. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109271>
- Elnosh**, A., Calais, M. y Parlevliet, D. (2026). A systematic literature review of digital twin research for photovoltaic systems: Trends, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116326. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116326>
- Felippes**, B., da Silva, I., Barbalho, S., Adam, T., Heine, I. y Schmitt, R. (2022). 3D-CUBE readiness model for industry 4.0: technological, organizational, and process maturity enablers. *Production & Manufacturing Research*, 10(1), 875–937. <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2135628>
- Fernandes**, M., Corchado, J. M. y Marreiros, G. (2022). Machine learning techniques applied to mechanical fault diagnosis and fault prognosis in the context of real industrial manufacturing use-cases: a systematic literature review. *Applied Intelligence*, 52(12), 14246–14280. <https://doi.org/10.1007/s10489-022-03344-3>
- Ferraro**, A., Galli, A., Moscato, V. y Sperli, G. (2023). Evaluating eXplainable artificial intelligence tools for hard disk drive predictive maintenance. *Artificial Intelligence Review*, 56(7), 7279–7314. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10354-7>

- Ferreira, C. y Gonçalves, G.** (2022). Remaining Useful Life prediction and challenges: A literature review on the use of Machine Learning Methods. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 550–562. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.05.010>
- García, E., Navarro, L. C., Torres, D. A., Pinedo, A. y Torres, L. V.** (2025). Gemelos digitales para la supervisión y el mantenimiento de infraestructuras viales: Revisión sistemática. *Impulso, Revista de Administración*, 5(11), 161–181. <https://doi.org/10.59659/impulso.v.5i11.136>
- García, F. P., Gonzalo, A. P. y Papaelias, M.** (2026). A comprehensive review of condition monitoring systems for hydropower stations: Technologies, applications, and future trends. *Electric Power Systems Research*, 251, 112339. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2025.112339>
- Gatica, F., Ramos, M., Andrés, R., Revale, H. y Fernández, V.** (2024). Digital Technologies 4.0 in Small and Medium-Sized Manufacturing Industries: Cases of the Central Region of Argentina and the Biobio Region of Chile. *Sage Open*, 14(2), 21582440241249285. <https://doi.org/10.1177/21582440241249285>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Vilkas, M., Grybauskas, A. y Amran, A.** (2022). Drivers and barriers of Industry 4.0 technology adoption among manufacturing SMEs: a systematic review and transformation roadmap. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(6), 1029–1058. <https://doi.org/10.1108/jmtm-12-2021-0505>
- Giacotto, A., Marques, H. C. y Martinetti, A.** (2025). Prescriptive maintenance: a comprehensive review of current research and future directions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 31(1), 129–173. <https://doi.org/10.1108/jqme-07-2023-0064>
- Guidotti, D., Pandolfo, L. y Pulina, L.** (2025). A Systematic Literature Review of Supervised Machine Learning Techniques for Predictive Maintenance in Industry 4.0. *IEEE Access*, 13, 102479–102504. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3578686>
- Gutiérrez, E. B., Sarmiento, J. E., Ramírez, J. y Rincón, Y. A.** (2025). Determining factors for the digitization of micro, small, and medium-sized enterprises (MSMEs) in Ibero-America. *Journal of Innovation & Knowledge*, 10(1), 100631. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100631>
- Hu, D., Zhang, C., Yang, T. y Chen, G.** (2022). An Intelligent Anomaly Detection Method for Rotating Machinery Based on Vibration Vectors. *IEEE Sensors Journal*, 22(14), 14294–14305. <https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3179740>
- Iheanacho, C. C., Ozurumba, E., Amajoh, N. y Igwe, E.** (2025). Enhancing predictive maintenance in lean manufacturing for continuous process improvement using digital twin technology. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 26(3), 1533–1545. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.26.3.2307>
- Karna, A., Chitrakar, S., Neopane, H. P. y Dahlhaug, O. G.** (2025). A review of condition monitoring in Francis turbines for predictive maintenance. *Journal of Vibration and Control*, 32(7-8), 1318–1338. <https://doi.org/10.1177/10775463251315816>
- Katz, R. y Jung, J.** (2026). What drives artificial intelligence adoption and use among firms? Empirical evidence from Brazilian companies. *Digital Policy, Regulation and Governance*, 28(5), 506–525. <https://doi.org/10.1108/dprg-05-2025-0135>
- Kim, H., Lee, S., Lee, J., Lee, W. y Son, Y.** (2024). Evaluating practical adversarial robustness of fault diagnosis systems via spectrogram-aware ensemble method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 130, 107980. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.107980>
- Lefrouni, K. y Taibi, S.** (2025). Artificial Intelligence Techniques for Industrial Predictive Maintenance: A Systematic Review of Recent Advances. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 58(4), 653–668. <https://doi.org/10.18280/jesa.580401>

- Leon, J. X., Tibaduiza, D. A., Parés, N. y Pozo, F. (2025). Digital twin technology in wind turbine components: A review. *Intelligent Systems with Applications*, 26, 200535. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200535>
- Li, D. y Li, C. (2026). Intelligent fault detection and diagnosis algorithm of electrical equipment based on artificial intelligence model. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 28(1). <https://doi.org/10.17531/ein/210409>
- Li, J., Jia, Y., Niu, M., Zhu, W. y Meng, F. (2023). Remaining Useful Life Prediction of Turbofan Engines Using CNN-LSTM-SAM Approach. *IEEE Sensors Journal*, 23(9), 10241–10251. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3261874>
- Li, W., Shang, Z., Zhang, J., Gao, M. y Qian, S. (2023). A novel unsupervised anomaly detection method for rotating machinery based on memory augmented temporal convolutional autoencoder. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, 106312. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106312>
- Loaiza, J. H. y Cloutier, R. J. (2022). Analyzing the Implementation of a Digital Twin Manufacturing System: Using a Systems Thinking Approach. *Systems*, 10(2), 22. <https://doi.org/10.3390/systems10020022>
- Madrid, A., Maldonado, G. y Rodríguez, R. (2025). Unlocking resilience: the impact of Industry 4.0 technologies on manufacturing firms' response to the COVID-19 pandemic. *Management Decision*, 63(1), 126–154. <https://doi.org/10.1108/md-02-2024-0262>
- Meddaoui, A., Hain, M. y Hachmoud, A. (2023). The benefits of predictive maintenance in manufacturing excellence: a case study to establish reliable methods for predicting failures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(7-8), 3685–3690. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12086-6>
- Mendoza, J. J., Jácome, M. A., Villarruel, P. A. y Eras, D. C. (2025). Mantenimiento predictivo con inteligencia artificial en equipos electromecánicos para minimizar riesgos ambientales. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 7(5), 482–493. <https://doi.org/10.59169/pentacencias.v7i5.1683>
- Meng, H., Liu, X., Xing, J. y Zio, E. (2022). A method for economic evaluation of predictive maintenance technologies by integrating system dynamics and evolutionary game modelling. *Reliability Engineering & System Safety*, 222, 108424. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108424>
- Muñoz, D. S., Valencia, K. T., Caviativa, Y. P. y Castillo, J. S. (2024). Estado actual de la adopción de la industria 4.0 en pymes colombianas: desafíos y oportunidades. *Revista Politécnica*, 20(39), 99–118. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v20n39a7>
- Nunes, P., Santos, J. y Rocha, E. (2023). Challenges in predictive maintenance – A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 40, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.004>
- Paitan, N., Velveder, B., Sanchez, Y. y Ramos, S. (2025). Artificial Intelligence and Big Data Strategies for Predictive Maintenance in Industry 4.0: A Systematic Review from 2019 to 2024. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 73(6), 173-182. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V73I6P115>
- Peters, M. D., Godfrey, C., McInerney, P., Khalil, H., Larsen, P., Marnie, C., Pollock, D., Tricco, A. C. y Munn, Z. (2022). Best practice guidance and reporting items for the development of scoping review protocols. *JB I Evidence Synthesis*, 20(4), 953–968. <https://doi.org/10.11124/JBIES-21-00242>
- Pollock, D., Peters, M. D., Khalil, H., McInerney, P., Alexander, L., Tricco, A. C., Evans, C., de Moraes, É. B., Godfrey, C. M., Pieper, D., Saran, A., Stern, C. y Munn, Z. (2023). Recommendations for

- the extraction, analysis, and presentation of results in scoping reviews. *JBIE Evidence Synthesis*, 21(3), 520–532. <https://doi.org/10.11124/JBIES-22-00123>
- Quiroga**, D. J., Hernández, B. E., Mendoza, L., Valencia, H. y Alpala, L. O. (2026). Industry 4.0 Adoption in Large Manufacturing Companies: The Readiness–Adoption Gap in an Emerging Economy. *Systems*, 14(7), 799. <https://doi.org/10.3390/systems14070799>
- Shen**, Y., Tang, B., Li, B., Tan, Q. y Wu, Y. (2022). Remaining useful life prediction of rolling bearing based on multi-head attention embedded Bi-LSTM network. *Measurement*, 202, 111803. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111803>
- Singh**, V., Gangsar, P., Porwal, R. y Atulkar, A. (2023). Artificial intelligence application in fault diagnostics of rotating industrial machines: a state-of-the-art review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(3), 931–960. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01861-5>
- Siraskar**, R., Kumar, S., Patil, S., Bongale, A. y Kotecha, K. (2023). Reinforcement learning for predictive maintenance: a systematic technical review. *Artificial Intelligence Review*, 56(11), 12885–12947. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10468-6>
- Sonntag**, M., Mehmman, S., Mehmman, J. y Teuteberg, F. (2025). Development and Evaluation of a Maturity Model for AI Deployment Capability of Manufacturing Companies. *Information Systems Management*, 42(1), 37–67. <https://doi.org/10.1080/10580530.2024.2319041>
- Thelen**, A., Zhang, X., Fink, O., Lu, Y., Ghosh, S., Youn, B. D., Todd, M. D., Mahadevan, S., Hu, C. y Hu, Z. (2022). A comprehensive review of digital twin — part 1: modeling and twinning enabling technologies. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(12), 354. <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03425-4>
- van Dinter**, R., Tekinerdogan, B. y Catal, C. (2022). Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 151, 107008. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>
- Waseem**, M. y Chang, Q. (2026). Adaptive-fidelity digital twin framework for complex smart manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, 88, 967–985. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2026.07.016>
- Wei**, Y., Hu, T., Wang, Y., Wei, S. y Luo, W. (2022). Implementation strategy of physical entity for manufacturing system digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102259. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102259>
- Yli**, P. y Helo, P. (2026). Industry 4.0 technologies adoption and obstacles in manufacturing SMEs – challenges for strategy and organisational learning. *Journal of Workplace Learning*, 38(9), 69–86. <https://doi.org/10.1108/jwl-05-2025-0150>
- Yu**, H., Yu, D., Wang, C., Hu, Y. y Li, Y. (2023). Edge intelligence-driven digital twin of CNC system: Architecture and deployment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 79, 102418. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102418>
- ZahediYami**, M., Delos, V., Gorecki, S. y Traoré, M. K. (2026). Agile framework for Digital Twin verification and validation: Addressing complexity challenges in cross-disciplinary hybrid systems. *SIMULATION*. <https://doi.org/10.1177/00375497261464072>
- Zhong**, D., Xia, Z., Zhu, Y. y Duan, J. (2023). Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*, 9(4), e14534. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534>
- Zhou**, Y., Zhou, J., Cui, Q., Wen, J. y Fei, X. (2024). Digital twin-driven online intelligent assessment of wind turbine gearbox. *Wind Energy*, 27(8), 797–815. <https://doi.org/10.1002/we.2912>

Zhu, Z., Lei, Y., Qi, G., Chai, Y., Mazur, N., An, Y. y Huang, X. (2023). A review of the application of deep learning in intelligent fault diagnosis of rotating machinery. *Measurement*, 206, 112346. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112346>