Revista esprint Investigación

https://rei.esprint.tech
Vol. 5 N° 2, julio-diciembre 2026 (176-192)

ISSN: 2960-8317

Artículo de revisión

Gemelos digitales aplicados a la supervisión y control automático de procesos industriales: una revisión sistemática

Digital twins applied to the supervision and automatic control of industrial processes: a systematic review

Johana Beatriz Samaniego Palacios*
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba-Ecuador
johana.samaniego@espoch.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-3432-2089

Juan Diego Erazo Rodríguez
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba-Ecuador
juan.erazo@espoch.edu.ec
https://orcid.org/0000-0003-0152-5645

Byron Daniel Erazo Rodríguez
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba-Ecuador
erazodaniel97@gmail.com
https://orcid.org/0009-0001-3339-9017

Wilian Andres Nuñez Yanez
Cooperativa de Ahorro y Crédito Educadores de Chimborazo
Riobamba-Ecuador
andy_050113@hotmail.com
https://orcid.org/0009-0002-8089-7200

***Correspondencia:**
johana.samaniego@espoch.edu.ec

Cómo citar este artículo:
Samaniego, J., Erazo, J., Erazo, B., & Nuñez, W. (2026). Gemelos digitales aplicados a la supervisión y control automático de procesos industriales: una revisión sistemática. *Esprint Investigación, 5*(2), 176-192. https://doi.org/10.61347/ei.v5i2.356

Recibido: *15 de junio de 2026*
Aceptado: *18 de julio de 2026*
Publicado: *24 de julio de 2026*

Copyright: Derechos de autor 2026 Johana Beatriz Samaniego Palacios, Juan Diego Erazo Rodríguez, Byron Daniel Erazo Rodríguez, Wilian Andres Nuñez Yanez.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen: Los gemelos digitales (GD) se han consolidado como una de las tecnologías habilitadoras más relevantes de la Industria 4.0 para fortalecer la supervisión, el monitoreo y el control automático de procesos industriales. El presente artículo tuvo como objetivo analizar la evidencia científica disponible sobre la aplicación de gemelos digitales en la supervisión y el control automático de procesos industriales mediante una revisión sistemática basada en la metodología PRISMA 2020. Se realizó una búsqueda bibliográfica en Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI y SpringerLink, identificándose inicialmente 120 registros; tras el proceso de cribado y evaluación de elegibilidad, se seleccionaron 25 estudios de acceso abierto publicados en revistas científicas indexadas. Los resultados evidenciaron que los gemelos digitales se aplican principalmente en la supervisión remota mediante sistemas SCADA, la integración con sistemas de control automático, el diagnóstico de fallas y mantenimiento predictivo, la ciberseguridad industrial y la formación de operadores mediante realidad aumentada y realidad virtual. Asimismo, se identificaron aplicaciones en sectores como manufactura discreta, energía hidroeléctrica y fotovoltaica, petróleo y gas, tratamiento de agua y robótica industrial, confirmando su carácter transversal dentro de los ecosistemas industriales inteligentes. Se concluye que los gemelos digitales constituyen una herramienta estratégica para mejorar la eficiencia operacional, la capacidad predictiva y la toma de decisiones industriales; sin embargo, su adopción enfrenta desafíos relacionados con la interoperabilidad, la estandarización de arquitecturas, la ciberseguridad y los costos de implementación.

Palabras clave: Control automático, gemelo digital, Industria 4.0, PRISMA, revisión sistemática, supervisión de procesos.

Abstract: *Digital twins (DTs) have become one of the most relevant enabling technologies of Industry 4.0 for strengthening the supervision, monitoring, and automatic control of industrial processes. This article aimed to analyze the available scientific evidence on the application of digital twins in the supervision and automatic control of industrial processes through a systematic review based on the PRISMA 2020 methodology. A bibliographic search was conducted in Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI, and SpringerLink, initially identifying 120 records; after the screening and eligibility assessment process, 25 open-access studies published in indexed scientific journals were selected. The results showed that digital twins are mainly applied in remote supervision through SCADA systems, integration with automatic control systems, fault diagnosis and predictive maintenance, industrial cybersecurity, and operator training through augmented and virtual reality. Likewise, applications were identified in sectors such as discrete manufacturing, hydroelectric and photovoltaic energy, oil and gas, water treatment, and industrial robotics, confirming their transversal nature within smart industrial ecosystems. It is concluded that digital twins constitute a strategic tool for improving operational efficiency, predictive capabilities, and industrial decision-making; however, their adoption faces challenges related to interoperability, architecture standardization, cybersecurity, and implementation costs.*

Keywords*: Automatic control, digital twin, Industry 4.0, PRISMA, process supervision, systematic review.*

1. Introducción

La cuarta revolución industrial ha transformado profundamente la forma en que las organizaciones productivas conciben la supervisión y el control de sus procesos, incorporando tecnologías digitales capaces de replicar, en tiempo real, el comportamiento de los sistemas físicos que intervienen en la producción. En este contexto, el gemelo digital se ha consolidado como una de las tecnologías habilitadoras más relevantes de la Industria 4.0, debido a que permite establecer un flujo de comunicación bidireccional entre un activo físico y su representación virtual, donde los cambios del sistema real se reflejan en el modelo digital y permiten generar respuestas orientadas a la optimización del proceso (Sierla et al., 2020).

De esta manera, el gemelo digital supera la concepción de un modelo estático de simulación para convertirse en una herramienta dinámica de monitoreo, diagnóstico y toma de decisiones. Su capacidad para integrar datos históricos y en tiempo real permite anticipar fallas, optimizar el rendimiento operativo y reducir los tiempos de inactividad de los sistemas productivos (Bofill et al., 2023).

La digitalización de los procesos industriales ha impulsado una expansión significativa de las aplicaciones de los gemelos digitales en actividades relacionadas con la supervisión y el control automático. En este sentido, se han desarrollado plataformas que integran gemelos digitales con sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), permitiendo la monitorización remota de variables de proceso mediante protocolos industriales como OPC UA y Modbus (Bastos Boschoski & de Sousa Santos, 2026; Rodríguez-Alonso et al., 2024).

Asimismo, diversos estudios han explorado la integración de gemelos digitales en esquemas de control clásico, como los reguladores proporcional-integral-derivativo (PID), con el objetivo de mejorar la estabilidad y capacidad predictiva de los sistemas industriales ante condiciones operativas dinámicas y no lineales (Dapkute et al., 2024). Estas aplicaciones evidencian la transición del gemelo digital desde una herramienta de representación virtual hacia un componente activo dentro de los sistemas ciberfísicos industriales.

De igual forma, la literatura reciente evidencia un creciente interés por el uso de gemelos digitales como soporte para el diagnóstico de fallas y el mantenimiento predictivo, especialmente mediante la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático e inteligencia artificial generativa. Estas técnicas permiten identificar patrones de degradación y anticipar posibles fallos en componentes críticos antes de que ocurran interrupciones no planificadas del proceso (Mikołajewska et al., 2025; Zhang et al., 2025).

En este contexto, el mantenimiento predictivo basado en gemelos digitales constituye una de las líneas de investigación con mayor proyección dentro de la ingeniería industrial y la gestión de activos. Esta tendencia ha sido confirmada por Abd Wahab et al. (2024), quienes identificaron un crecimiento sostenido de publicaciones relacionadas con la integración de tecnologías de mantenimiento predictivo y gemelos digitales durante el periodo 2018–2023.

No obstante, pese a los avances alcanzados, la implementación de gemelos digitales orientados específicamente a la supervisión y el control automático de procesos industriales aún presenta desafíos asociados con la interoperabilidad entre plataformas de simulación y sistemas de control reales, la estandarización de arquitecturas tecnológicas y la ciberseguridad de los canales de comunicación entre el gemelo digital y su contraparte física (Sayghe, 2025; Birk et al., 2022).

Por ello, resulta necesario consolidar la evidencia científica disponible para identificar las tendencias actuales, las tecnologías habilitadoras, los principales ámbitos de aplicación y los vacíos de

investigación relacionados con el uso de gemelos digitales en sistemas industriales de supervisión y control automático.

En correspondencia con lo anterior, el presente artículo tiene como objetivo analizar, mediante una revisión sistemática de la literatura basada en la metodología PRISMA 2020 (Page et al., 2021), las aplicaciones de los gemelos digitales en la supervisión y el control automático de procesos industriales reportadas en estudios científicos de acceso abierto.

Asimismo, busca caracterizar los enfoques metodológicos empleados, las tecnologías habilitadoras asociadas y los sectores industriales en los cuales estas soluciones han sido implementadas, con el propósito de establecer una visión integral del estado actual del conocimiento en esta área.

2. Metodología

El presente trabajo se desarrolló mediante una revisión sistemática de la literatura, siguiendo los lineamientos establecidos en la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021), reconocida como una guía internacional para garantizar la transparencia y reproducibilidad en este tipo de estudios. En este sentido, se aplicaron de manera secuencial los elementos establecidos en la lista de verificación PRISMA 2020, desde la identificación de registros hasta la síntesis cualitativa de los estudios incluidos.

Se incluyeron artículos científicos originales y de revisión que abordaron explícitamente la aplicación de gemelos digitales en actividades de supervisión, monitoreo o control automático de procesos industriales, publicados entre 2018 y 2026. Como criterios adicionales de inclusión, se consideró que los estudios debían encontrarse disponibles en acceso abierto, disponer de un identificador de objeto digital (DOI) verificable y estar publicados en revistas científicas indexadas en bases bibliográficas reconocidas.

Se excluyeron estudios centrados exclusivamente en gemelos digitales orientados al producto o diseño sin relación con la supervisión o control de procesos. Además, se descartaron documentos con acceso restringido, actas de congresos sin publicación asociada en revista científica y artículos cuya información editorial o indexación no pudo ser comprobada mediante fuentes oficiales.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect y SpringerLink, así como en el portal editorial MDPI y el motor de búsqueda académico Google Scholar como fuente complementaria de verificación cruzada. La última actualización de la estrategia de búsqueda se efectuó el 23 de julio de 2026.

La estrategia de búsqueda estuvo conformada por la combinación de los términos "digital twin" AND ("industrial process" OR "process control" OR "process supervision" OR SCADA OR "predictive maintenance" OR "fault diagnosis"). Los operadores booleanos fueron adaptados según las características sintácticas de cada base de datos consultada para optimizar la recuperación de información relevante.

La selección de los estudios se realizó mediante dos fases consecutivas. En la primera fase, se efectuó un cribado inicial mediante la revisión de títulos y resúmenes, con el objetivo de eliminar registros que no presentaban relación directa con la temática investigada. En la segunda fase, se evaluaron los textos completos de los estudios potencialmente elegibles para confirmar el cumplimiento de los criterios establecidos.

Durante la evaluación a texto completo, se verificó la disponibilidad del DOI, el acceso abierto de la publicación y la correspondencia del contenido con el objetivo de la revisión. Este proceso contó con

el apoyo de herramientas digitales asistidas por inteligencia artificial como mecanismo complementario de comprobación bibliográfica; sin embargo, la selección definitiva de los estudios fue realizada bajo criterio de los investigadores.

De los estudios incluidos se extrajeron las siguientes variables bibliográficas y metodológicas: autoría, año de publicación, revista científica, cuartil asignado en Scimago Journal Rank, sector industrial de aplicación, tecnología de gemelo digital implementada y principales hallazgos relacionados con la supervisión o el control automático de procesos.

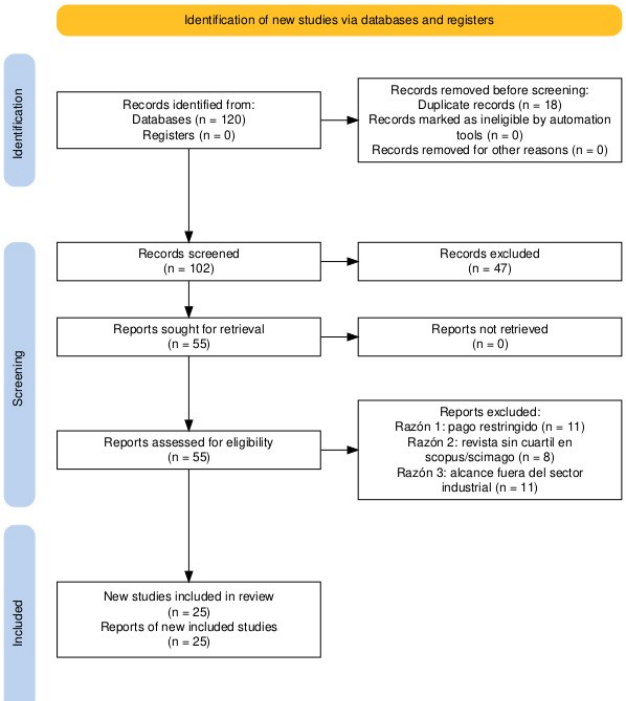
Debido a la heterogeneidad identificada entre los estudios incluidos, considerando las diferencias existentes en sus diseños metodológicos, tecnologías empleadas y sectores industriales analizados, se realizó una síntesis narrativa de tipo temático. Los resultados fueron organizados en categorías relacionadas con la supervisión mediante sistemas SCADA, integración con sistemas de control industrial, diagnóstico de fallas y mantenimiento predictivo, ciberseguridad industrial, formación de operadores mediante realidad aumentada y realidad virtual, y aplicaciones específicas por sector productivo.

De los 120 registros identificados inicialmente en las bases de datos consultadas, se eliminaron 18 duplicados antes del proceso de cribado, obteniéndose 102 registros para la evaluación inicial por título y resumen. Posteriormente, 47 registros fueron excluidos debido a que no cumplían con el alcance temático definido, dejando 55 informes para evaluación a texto completo.

Tras la revisión completa de los documentos seleccionados, se excluyeron 30 estudios adicionales principalmente por presentar acceso restringido o no cumplir con los criterios relacionados con la verificación bibliográfica e indexación. Finalmente, 25 estudios fueron incluidos en la síntesis cualitativa de la revisión sistemática. La figura 1 presenta el diagrama de flujo PRISMA 2020 correspondiente al proceso de identificación, selección e inclusión de estudios.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA 2020 del proceso de identificación, cribado y selección de estudios



Nota. Elaboración propia a partir de la plantilla del diagrama de flujo PRISMA, siguiendo la estructura recomendada por Page et al. (2021).

3. Resultados

Características generales de los estudios incluidos

Los 25 estudios incluidos en la presente revisión fueron publicados entre 2020 y 2026, con una mayor concentración durante el periodo 2024–2025. Este comportamiento refleja el crecimiento reciente del interés científico por la aplicación de los gemelos digitales en la supervisión y el control automático de procesos industriales.

La mayoría de los estudios analizados fueron publicados en revistas de la editorial MDPI, principalmente en Sensors, Applied Sciences, Machines y Sustainability. El resto correspondió a publicaciones de editoriales como Springer, Frontiers y PeerJ, entre otras fuentes científicas indexadas. La tabla 1 presenta la síntesis de las principales características de los estudios incluidos, considerando el autor, año de publicación, revista científica y enfoque principal de investigación.

Tabla 1

Estudios incluidos entre 2020 y 2026

N.°	Autor(es) y año	Revista	Enfoque principal
1	Sayghe (2025)	Sensors	Ciberseguridad y detección de intrusiones en SCADA
2	Caiza & Sanz (2023)	Applied Sciences	Control y monitoreo con realidad aumentada
3	Ortiz et al. (2025)	Sensors	Formación de operadores y supervisión de proceso
4	Vyskočil et al. (2023)	Sustainability	MES distribuido con planificación por IA
5	Almusaed et al. (2024)	Machines	Optimización de manufactura flexible
6	Mikołajewska et al. (2025)	Applied Sciences	IA generativa para diagnóstico de fallas
7	Zhang et al. (2025)	Sensors	Diagnóstico de fallas en engranajes
8	Dapkute et al. (2024)	Machines	Integración de GD con control PID
9	Sierla et al. (2020)	Applied Sciences	Generación semiautomática de GD brownfield
10	Hassan et al. (2024)	J. Intelligent Manufacturing	Experiencia de implementación en mantenimiento
11	Birk et al. (2022)	Frontiers in Control Engineering	Revisión de generación automática de GD
12	Abd Wahab et al. (2024)	PeerJ Computer Science	Revisión sistemática de mantenimiento predictivo

13	Boschoski & Santos (2026)	Methane	Integración GD-SCADA en procesos químicos
14	Rodríguez-Alonso et al. (2024)	Sensors	GD por microservicios en tratamiento de agua
15	Mitacc Meza et al. (2024)	Sensors	Revisión de herramientas de GD en petróleo y gas
16	Yun et al. (2024)	Sustainability	Modelos predictivos en industria del gas
17	Bofill et al. (2023)	Sensors	Revisión de monitoreo de fallas con GD
18	Filipescu et al. (2024)	Sensors	IoT, nube y GD para celda robótica
19	Cai et al. (2025)	Sensors	Monitoreo inteligente en cableado robotizado
20	Chang et al. (2025)	Sensors	Control por fusión de realidad virtual
21	Ersan & Irmak (2024)	Sensors	GD de planta hidroeléctrica real
22	Hueros-Barrios et al. (2025)	Sensors	Diagnóstico de fallas en convertidores fotovoltaicos
23	Bohačík & Fujdiak (2024)	Smart Cities	Integración de GD en sistemas electroenergéticos
24	Alfaro-Viquez et al. (2025)	Electronics	Revisión de GD basados en IA en manufactura
25	Fudyma et al. (2025)	Processes	Balance de masa virtual en procesos continuos

Nota. Elaboración propia a partir de los estudios incluidos mediante el proceso de selección PRISMA 2020.

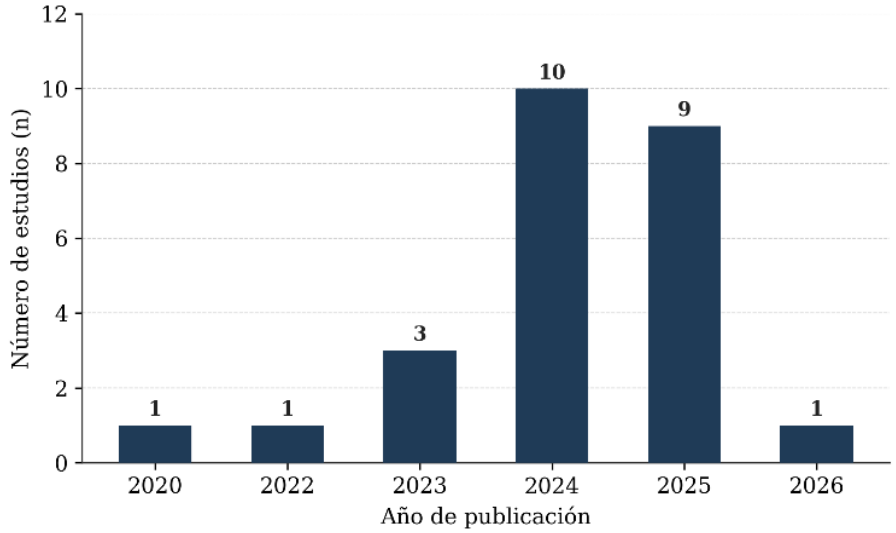
Con el propósito de complementar la caracterización descriptiva de los estudios incluidos, las figuras 2 a 5 muestran la distribución de las publicaciones según año de publicación, revista científica, cuartil Scimago y categoría temática predominante.

La distribución temporal evidencia que la producción científica sobre gemelos digitales aplicados a procesos industriales se concentró principalmente durante el bienio 2024–2025, periodo en el que se ubicaron 19 de los 25 estudios incluidos (76 %). Este resultado confirma la expansión reciente de esta línea de investigación dentro del contexto de la Industria 4.0.

En relación con las fuentes de publicación, la figura 3 muestra que Sensors concentró la mayor proporción de estudios incluidos, con 11 publicaciones (44 %), seguida por Applied Sciences con tres artículos. Las restantes revistas aportaron entre uno y dos estudios cada una, evidenciando una distribución relativamente diversificada de la producción científica, aunque con predominio de revistas especializadas en sensores y sistemas inteligentes.

Figura 2

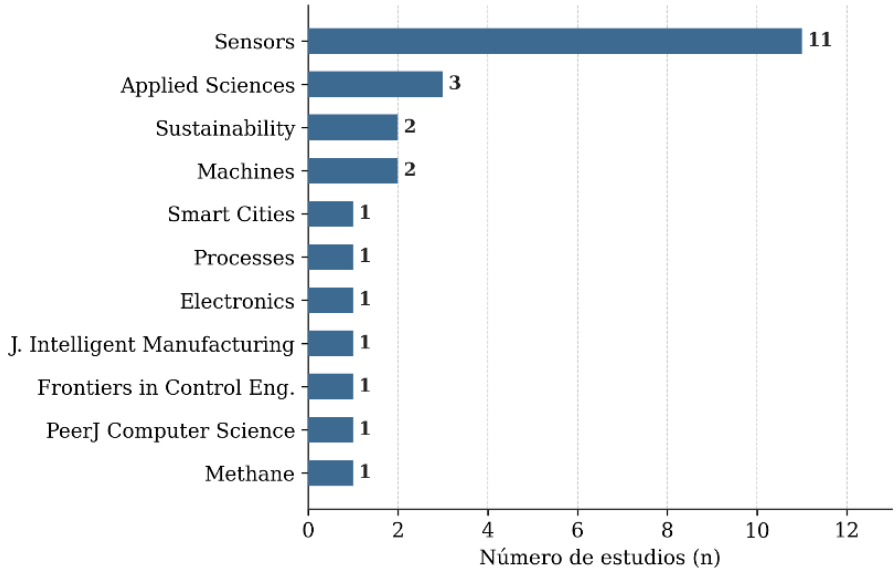
Distribución de los estudios incluidos según año de publicación (n = 25)



Nota. Elaboración propia a partir de los 25 estudios incluidos en la revisión (véase tabla 1).

Figura 3

Distribución de los estudios incluidos según revista de publicación (n = 25)

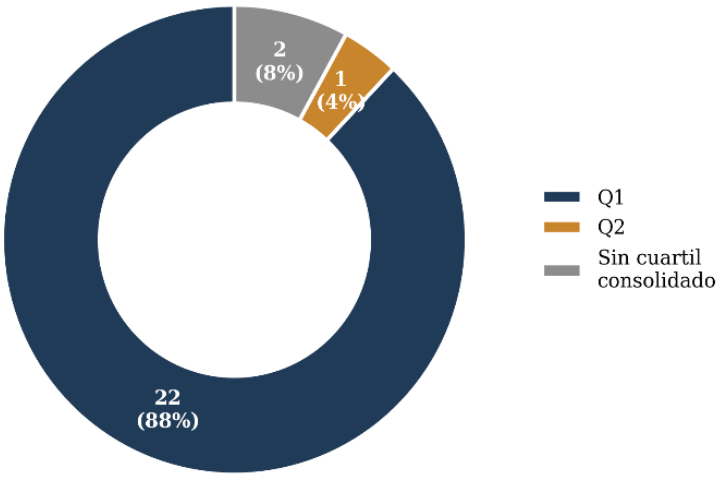


Nota. Elaboración propia a partir de los 25 estudios incluidos en la revisión (véase tabla 1).

Respecto a la calidad editorial de las fuentes seleccionadas, la Figura 4 evidencia que 22 estudios (88 %) fueron publicados en revistas clasificadas en el primer cuartil (Q1) del Scimago Journal Rank, mientras que un estudio correspondió al segundo cuartil (Q2). Los dos estudios restantes pertenecieron a revistas cuyo posicionamiento en Scimago no pudo ser confirmado debido a su reciente incorporación a las bases de indexación. Este resultado indica que la evidencia analizada provino principalmente de publicaciones científicas con elevada visibilidad e impacto académico, fortaleciendo la confiabilidad del conjunto documental evaluado.

Figura 4

Distribución de los estudios incluidos según cuartil Scimago de la revista de publicación (n = 25)

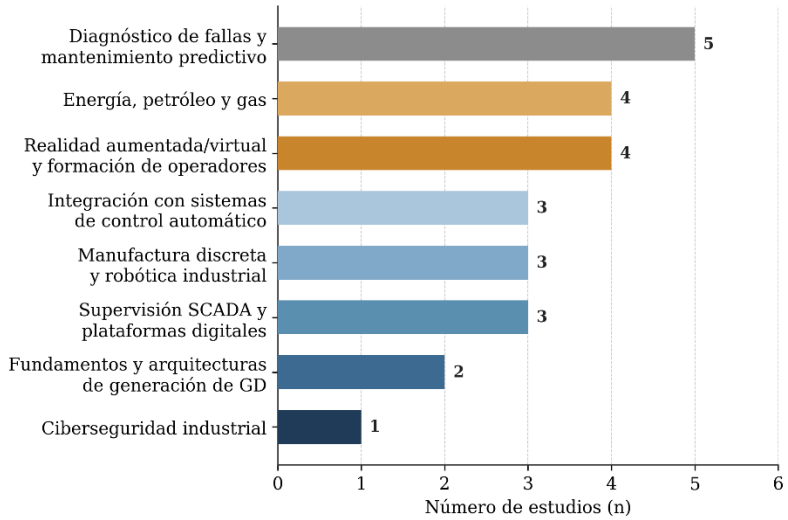


Nota. Elaboración propia a partir de los 25 estudios incluidos en la revisión (véase tabla 1).

La distribución temática presentada en la Figura 5 muestra que el diagnóstico de fallas y mantenimiento predictivo constituyó la categoría con mayor frecuencia de aparición (n = 5). Le siguieron la formación de operadores mediante realidad aumentada y realidad virtual, así como las aplicaciones sectoriales en energía, petróleo y gas (n = 4 respectivamente). Por otra parte, la ciberseguridad industrial presentó menor representación cuantitativa; sin embargo, los estudios identificados evidenciaron su importancia creciente debido a la integración de gemelos digitales con infraestructuras críticas de control industrial.

Figura 5

Distribución temática de los estudios incluidos según su enfoque principal (n = 25)



Nota. Elaboración propia a partir de los 25 estudios incluidos en la revisión (véase tabla 1).

Supervisión de procesos mediante arquitecturas SCADA y plataformas digitales

Uno de los principales enfoques identificados en los estudios analizados corresponde a la integración de los gemelos digitales con sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA). En este sentido, Bastos Boschoski y de Sousa Santos (2026) desarrollaron una herramienta computacional que

integra simuladores de procesos químicos con la plataforma SCADA de código abierto ScadaBR mediante el protocolo Modbus, permitiendo el monitoreo bidireccional de modelos dinámicos aplicados a un proceso de hidrocraqueo catalítico y una red de intercambiadores de calor.

De manera similar, Rodríguez-Alonso et al. (2024) propusieron una plataforma de gemelo digital basada en una arquitectura de microservicios para una planta de tratamiento de aguas residuales. Esta solución estuvo orientada a optimizar los procesos de operación y mantenimiento mediante la integración de modelos de información de construcción y técnicas de aprendizaje automático, con capacidad de despliegue en entornos de computación en el borde.

Asimismo, Vyskočil et al. (2023) plantearon una arquitectura de sistema de ejecución de manufactura distribuido basada en gemelos digitales y planificación asistida mediante inteligencia artificial. El sistema permitió recalcular en tiempo real los planes de producción ante variaciones inesperadas del proceso, evidenciando la convergencia entre sistemas SCADA, sistemas de ejecución de manufactura (MES) y plataformas inteligentes de gestión industria.

Integración de gemelos digitales con sistemas de control automático

Respecto a la integración de los gemelos digitales con sistemas de control automático, Dapkute et al. (2024) desarrollaron una plataforma inteligente acoplada a un lazo de control PID aplicado a la estabilización de temperatura en una caldera de biomasa. Los resultados demostraron mejoras en el desempeño del sistema respecto a la sintonización convencional del regulador.

Por otra parte, Sierla et al. (2020) propusieron una metodología semiautomática para la generación de gemelos digitales de estado estacionario en plantas industriales tipo *brownfield*, es decir, instalaciones con varios años de operación. La propuesta permitió extraer información desde diagramas de tuberías e instrumentación, reduciendo los esfuerzos de ingeniería asociados con la construcción inicial del modelo digital.

En esta misma línea, Fudyma et al. (2025) introdujeron el concepto de balance de masa virtual como una extensión del gemelo digital aplicado a procesos continuos. La propuesta fue validada mediante el proceso Tennessee Eastman y evidenció su potencial de aplicación en industrias como petróleo y gas.

Diagnóstico de fallas y mantenimiento predictivo

El diagnóstico de fallas y el mantenimiento predictivo representan una de las áreas de aplicación más frecuentes de los gemelos digitales dentro del ámbito industrial. Abd Wahab et al. (2024), mediante una revisión sistemática sobre mantenimiento predictivo y gemelos digitales, identificaron que las investigaciones se concentran principalmente en diagnóstico de fallas, detección de anomalías y estimación de la vida útil remanente de equipos.

Además, los autores señalaron que estas aplicaciones se han extendido hacia sectores emergentes como la gestión inteligente del agua y la agricultura de precisión. Complementariamente, Zhang et al. (2025) combinaron simulación estructural mediante elementos finitos, redes de regresión de procesos gaussianos y transformadas wavelet para el diagnóstico de fallas en engranajes industriales, alcanzando una precisión superior al 99 %.

Bofill et al. (2023) analizaron los métodos predictivos utilizados en gemelos digitales para monitoreo de fallas en sectores como manufactura, energía y transporte, identificando al aprendizaje automático como una de las técnicas predominantes.

De manera complementaria, Mikołajewska et al. (2025) evaluaron el papel de la inteligencia artificial generativa en gemelos digitales orientados al diagnóstico de fallas, destacando su capacidad para generar datos sintéticos frente a la limitada disponibilidad de registros reales de fallas industriales.

Finalmente, Hueros-Barrios et al. (2025) propusieron un marco híbrido para el diagnóstico de fallas en convertidores de corriente continua de plantas fotovoltaicas. El modelo integró un gemelo digital de cinco dimensiones con clasificadores de aprendizaje automático, permitiendo identificar fallas de hardware y ataques de inyección de datos falsos con una tasa de falsos positivos inferior al 2,5 %.

Ciberseguridad de los gemelos digitales en sistemas de control industrial

La ciberseguridad constituye una dimensión crítica dentro de la implementación de gemelos digitales, debido a que estas tecnologías incrementan la interacción entre sistemas de información y sistemas de operación industrial. En este contexto, Sayghe (2025) desarrolló un marco de detección de intrusiones basado en gemelos digitales para sistemas SCADA industriales aplicado a una planta de tratamiento de agua.

La propuesta integró simulación de procesos de alta fidelidad, modelado de sensores en tiempo real y detección híbrida de anomalías, alcanzando una puntuación F1 de detección del 96,3 % y una latencia inferior a 500 milisegundos. Estos resultados evidencian el potencial de los gemelos digitales como mecanismos complementarios para fortalecer la resiliencia de infraestructuras industriales críticas frente a amenazas cibernéticas.

Realidad aumentada, realidad virtual y formación de operadores

Otro grupo de investigaciones se orientó al uso de gemelos digitales como soporte para la formación de operadores y la interacción humano-máquina mediante tecnologías inmersivas. Caiza y Sanz (2023) desarrollaron un gemelo digital integrado con realidad aumentada para el control y monitoreo de un entorno ciberfísico industrial, logrando comunicación bidireccional entre los entornos físico y virtual con tiempos cercanos a los 100 milisegundos. Ortiz et al. (2025) implementaron una herramienta de aprendizaje activo basada en gemelos digitales para la supervisión y control de un proceso industrial de producción de cacao. Los resultados mostraron una reducción del 38 % en el tiempo de ejecución de tareas respecto a métodos tradicionales de enseñanza.

Asimismo, Filipescu et al. (2024) integraron tecnologías IoT, computación en la nube, redes privadas virtuales y gemelos digitales para el monitoreo remoto de una celda robótica multifuncional en contextos de Industria y Educación 4.0 y 5.0. En esta misma línea, Chang et al. (2025) diseñaron y validaron una plataforma de control basada en fusión de realidad virtual impulsada por gemelos digitales para robots industriales.

Aplicaciones en manufactura discreta y robótica industrial

En el contexto de manufactura discreta, Almusaed et al. (2024) presentaron un caso de optimización de un sistema de manufactura flexible mediante simulación y gemelos digitales, incorporando mecanismos automáticos para la identificación y evacuación de piezas defectuosas. Cai et al. (2025) desarrollaron un sistema inteligente de monitoreo basado en gemelos digitales para procesos de cableado robotizado en manufactura aeroespacial. La propuesta empleó un modelo de cinco dimensiones y una red neuronal optimizada mediante enjambre de partículas para predecir la calidad del proceso.

Por su parte, Alfaro-Viquez et al. (2025) realizaron una revisión de aplicaciones de gemelos digitales basados en inteligencia artificial en manufactura, clasificándolas en tres dimensiones: operador, proceso y producto. Los autores identificaron que la dimensión del proceso se orienta principalmente hacia la optimización del flujo productivo, detección de cuellos de botella y reconfiguración dinámica de sistemas industriales.

Aplicaciones sectoriales en energía, petróleo y gas

Diversos estudios documentaron aplicaciones de gemelos digitales en sectores energéticos específicos. Ersan y Irmak (2024) desarrollaron un modelo para una planta hidroeléctrica orientado a la predicción y prevención de errores de sensores mediante un controlador lógico programable, permitiendo diferenciar fallas reales de errores de medición sin detener la operación. Bohačík y Fujdiak (2024) analizaron los desafíos asociados con la integración de gemelos digitales en sistemas de control electroenergético, identificando aspectos relacionados con seguridad de datos y actualización continua de modelos.

En el sector petrolero y gasífero, Mitacc Meza et al. (2024) revisaron herramientas, tecnologías y marcos de referencia empleados en el desarrollo de gemelos digitales, clasificando 98 estudios según metodologías, objetivos y tecnologías de adquisición y análisis de datos. Finalmente, Yun et al. (2024) compararon modelos predictivos aplicados a un gemelo digital para estabilización de presión en sistemas de suministro de gas urbano, identificando que ARIMA presentó el mejor desempeño frente a modelos basados en regresión.

Fundamentos, arquitecturas y experiencias de implementación

Finalmente, algunos estudios aportaron una perspectiva transversal sobre arquitecturas y experiencias prácticas de implementación. Birk et al. (2022) analizaron mecanismos de generación y actualización automática de gemelos digitales para estimación y control industrial, diferenciando enfoques basados en aprendizaje automático y modelos fundamentados en ecuaciones.

Hassan et al. (2024) documentaron la implementación de gemelos digitales para mantenimiento industrial durante un periodo de evaluación de 18 meses. Los autores compararon los resultados obtenidos por el gemelo digital con registros de mantenimiento y sistemas de control, demostrando su capacidad para identificar discrepancias operativas antes de la aparición de fallos críticos.

4. Discusión y limitaciones

Interpretación general de los resultados

Los hallazgos de la presente revisión evidencian que la aplicación de los gemelos digitales en la supervisión y el control automático de procesos industriales ha experimentado una evolución significativa, pasando de modelos orientados principalmente a la simulación hacia arquitecturas inteligentes capaces de integrar monitoreo, predicción y toma de decisiones en tiempo real.

Esta transformación confirma que el gemelo digital se ha consolidado como una tecnología transversal dentro de la Industria 4.0, con aplicaciones que abarcan la supervisión mediante sistemas SCADA, el control de procesos, el diagnóstico de fallas, la ciberseguridad industrial y la formación de operadores. Estos resultados coinciden con Alfaro-Viquez et al. (2025), quienes identifican la dimensión del proceso como uno de los principales ámbitos de desarrollo de los gemelos digitales basados en inteligencia artificial.

Asimismo, los resultados son consistentes con Abd Wahab et al. (2024), quienes reportan un crecimiento sostenido de investigaciones relacionadas con mantenimiento predictivo y gemelos digitales. En conjunto, estas evidencias sugieren que la principal contribución actual de los gemelos digitales no se limita a representar activos físicos, sino que reside en su capacidad para integrar datos, modelos analíticos y mecanismos de optimización orientados a mejorar la eficiencia operacional.

Uno de los aspectos más relevantes identificados corresponde a la integración creciente entre gemelos digitales e inteligencia artificial. Una proporción importante de los estudios analizados combinó técnicas de aprendizaje automático para diagnóstico de fallas (Zhang et al., 2025; Hueros-Barrios et al., 2025) y generación de datos sintéticos destinados a superar limitaciones asociadas con la disponibilidad de registros históricos de fallos (Mikołajewska et al., 2025).

Esta tendencia evidencia que el valor estratégico del gemelo digital depende cada vez más de su capacidad para actuar como una infraestructura de datos confiable, capaz de alimentar modelos predictivos y facilitar decisiones anticipadas sobre el comportamiento del sistema industrial. Este resultado coincide con Bofill et al. (2023), quienes destacan el papel predominante del aprendizaje automático en aplicaciones de monitoreo predictivo basadas en gemelos digitales.

De igual manera, los resultados muestran una integración progresiva entre gemelos digitales y mecanismos de ciberseguridad aplicados a sistemas de control industrial. En particular, Sayghe (2025) evidencia el potencial de estas tecnologías para detectar anomalías y ataques en infraestructuras críticas, como plantas de tratamiento de agua.

Esta convergencia resulta especialmente relevante debido al incremento de la interconexión entre tecnologías de información (TI) y tecnologías de operación (TO), donde la protección de los canales de comunicación entre el entorno físico y virtual se convierte en un requisito fundamental para garantizar la confiabilidad operacional. Esta situación también fue identificada por Boschoski y Santos (2026) en sistemas SCADA aplicados a procesos químicos.

Limitaciones de la evidencia incluida

A pesar de los avances identificados, la evidencia disponible presenta algunas restricciones que deben considerarse al interpretar los resultados. La mayoría de los estudios incluidos corresponden a implementaciones experimentales, entornos de laboratorio o plantas piloto, mientras que son todavía limitados los casos documentados en instalaciones industriales de gran escala con condiciones operativas reales y variables altamente dinámicas.

Esta situación limita la generalización de los resultados hacia otros sectores productivos, especialmente aquellos donde existen restricciones relacionadas con infraestructura tecnológica, disponibilidad de datos históricos y requerimientos estrictos de seguridad operacional.

Por otra parte, se observó una concentración relevante de publicaciones en revistas pertenecientes a un mismo grupo editorial. Aunque esta característica no implica necesariamente una disminución en la calidad científica de los estudios incluidos, puede representar una posible fuente de sesgo editorial, por lo que futuras revisiones deberían ampliar la cobertura hacia diferentes bases bibliográficas y editoriales.

Limitaciones del proceso de revisión

Respecto al proceso metodológico de la revisión, una de las principales limitaciones estuvo relacionada con la inclusión exclusiva de estudios disponibles en acceso abierto y con DOI verificable. Si bien este

criterio favoreció la transparencia y reproducibilidad del análisis, pudo excluir investigaciones relevantes publicadas en revistas de acceso restringido que aportaran evidencia complementaria sobre la implementación industrial de gemelos digitales.

Asimismo, dos de las revistas incluidas (*Frontiers in Control Engineering* y *Methane*) no contaban con un cuartil Scimago consolidado durante el desarrollo de la revisión debido a su reciente incorporación a las bases bibliográficas de Scopus. Su inclusión se justificó por la pertinencia temática directa, la indexación disponible y la relevancia del contenido para responder al objetivo planteado.

Finalmente, aunque el proceso de búsqueda, cribado y extracción de información fue apoyado mediante herramientas asistidas por inteligencia artificial, estas herramientas fueron utilizadas únicamente como apoyo operativo y no como sustituto del análisis crítico de los investigadores. En consecuencia, la ausencia de una evaluación independiente por duplicado constituye una limitación metodológica, considerando las recomendaciones establecidas por PRISMA 2020 para reducir posibles sesgos durante la selección de estudios (Page et al., 2021).

Implicaciones para la práctica, la política y la investigación futura

Desde una perspectiva aplicada, los resultados sugieren que las organizaciones industriales interesadas en implementar gemelos digitales deberían adoptar estrategias progresivas de integración tecnológica. En una primera etapa, la conexión con sistemas SCADA existentes puede constituir un punto de entrada viable, debido a que permite aprovechar infraestructuras previamente implementadas antes de incorporar capacidades avanzadas de inteligencia artificial y análisis predictivo.

Esta estrategia coincide con las experiencias reportadas por Rodríguez-Alonso et al. (2024) y Bastos Boschoski y de Sousa Santos (2026), quienes demostraron la viabilidad de integrar gemelos digitales con plataformas industriales existentes para mejorar la supervisión y gestión operacional.

Desde el ámbito de investigación, los resultados permiten identificar varias líneas prioritarias. Entre ellas destacan la estandarización de arquitecturas de gemelos digitales, el desarrollo de metodologías automatizadas o semiautomatizadas para la generación de modelos en plantas industriales existentes (*brownfield*) y el fortalecimiento de mecanismos de ciberseguridad aplicados a las interfaces entre los sistemas físicos y sus representaciones virtuales.

Además, resulta necesario promover estudios longitudinales en ambientes industriales reales que permitan evaluar el desempeño de estas tecnologías durante periodos prolongados, considerando aspectos como retorno de inversión, mantenimiento de modelos digitales, escalabilidad e impacto sobre la eficiencia operacional.

5. Conclusiones

A partir de la revisión sistemática de 25 estudios seleccionados mediante la metodología PRISMA 2020, se concluye que los gemelos digitales se han consolidado como una tecnología habilitadora clave para la transformación digital de los procesos industriales, debido a su capacidad para integrar modelos virtuales, datos en tiempo real y mecanismos avanzados de análisis orientados a la supervisión y el control automático.

Los estudios analizados evidencian que sus aplicaciones abarcan desde la integración con sistemas SCADA y lazos de control PID hasta soluciones avanzadas de diagnóstico predictivo de fallas mediante inteligencia artificial, aprendizaje automático y tecnologías inmersivas para la formación de

operadores. Esta diversidad confirma que los gemelos digitales han evolucionado desde herramientas de simulación hacia plataformas inteligentes de apoyo a la toma de decisiones industriales.

La evidencia revisada muestra que el diagnóstico de fallas y el mantenimiento predictivo constituyen las aplicaciones con mayor presencia dentro de la literatura analizada, seguidas por la supervisión remota mediante plataformas digitales y la capacitación de operadores mediante realidad aumentada y realidad virtual.

Asimismo, se identificaron aplicaciones relevantes en sectores como manufactura discreta, energía hidroeléctrica y fotovoltaica, petróleo y gas, tratamiento de agua y robótica industrial. Estos resultados reflejan la naturaleza transversal de los gemelos digitales y su capacidad de adaptación a diferentes contextos productivos dentro de los paradigmas de Industria 4.0 y 5.0.

No obstante, la adopción generalizada de esta tecnología aún enfrenta desafíos asociados con la escalabilidad de las soluciones fuera de ambientes experimentales, la interoperabilidad entre plataformas, la estandarización de arquitecturas y la protección de los canales de comunicación entre los sistemas físicos y virtuales.

En este sentido, las futuras investigaciones deberían orientarse hacia la validación de gemelos digitales en instalaciones industriales de gran escala, el desarrollo de estándares técnicos comunes y la creación de metodologías de implementación accesibles para organizaciones con diferentes niveles de madurez tecnológica.

Los hallazgos de esta revisión aportan una visión integral del estado actual del conocimiento sobre la aplicación de gemelos digitales en la supervisión y el control automático de procesos industriales. Además, proporcionan una base de referencia para investigadores y profesionales interesados en identificar oportunidades de innovación y estrategias de adopción tecnológica dentro de los ecosistemas industriales inteligentes.

Referencias

Abd Wahab, N., Hasikin, K., Lai, K., Xia, K., Bei, L., Huang, K., & 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

Alfaro-Viquez, D., Zamora-Hernandez, M., Fernandez-Vega, M., Garcia-Rodriguez, J., & Azorin-Lopez, J. (2025). A comprehensive review of AI-based digital twin applications in manufacturing: Integration across operator, product, and process dimensions. *Electronics*, *14*(4), 646. https://doi.org/10.3390/electronics14040646

Almusaed, A., Yitmen, I., & Almssad, A. (2024). Digital twin for flexible manufacturing systems and optimization through simulation: A case study. *Machines, 12*(11), 785. https://doi.org/10.3390/machines12110785

Birk, W., Hostettler, R., Razi, M., Atta, K., & Tammia, R. (2022). Automatic generation and updating of process industrial digital twins for estimation and control – A review. *Frontiers in Control Engineering, 3*, 954858. https://doi.org/10.3389/fcteg.2022.954858

Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. A. (2023). Exploring digital twin-based fault monitoring: Challenges and opportunities. *Sensors, 23*(16), 7087. https://doi.org/10.3390/s23167087

Bohačík, A., & Fujdiak, R. (2024). The problem of integrating digital twins into electro-energetic control systems. *Smart Cities, 7*(5), 2702–2740. https://doi.org/10.3390/smartcities7050105

Boschoski, R., & de Santos, L. (2026). Supervisory monitoring and control using chemical process simulators and SCADA systems. *Methane, 5*(1), 8. https://doi.org/10.3390/methane5010008

Cai, J., Ding, H., Wang, P., Guo, X., Hou, H., Jiang, T., & Qiao, X. (2025). Digital twin-based intelligent monitoring system for robotic wiring process. *Sensors, 25*(19), 5978. https://doi.org/10.3390/s25195978

Caiza, G., & Sanz, R. (2023). Digital twin to control and monitor an industrial cyber-physical environment supported by augmented reality. *Applied Sciences, 13*(13), 7503. https://doi.org/10.3390/app13137503

Chang, W., Sun, W., Chen, P., & Xu, H. (2025). Construction and validation of a digital twin-driven virtual-reality fusion control platform for industrial robots. *Sensors, 25*(13), 4153. https://doi.org/10.3390/s25134153

Dapkute, A., Siozinys, V., Jonaitis, M., Kaminickas, M., & Siozinys, M. (2024). Enhancing industrial process control: Integrating intelligent digital twin technology with proportional-integral-derivative regulators. *Machines, 12*(5), 319. https://doi.org/10.3390/machines12050319

Ersan, M., & Irmak, E. (2024). Development and integration of a digital twin model for a real hydroelectric power plant. *Sensors, 24*(13), 4174. https://doi.org/10.3390/s24134174

Filipescu, A., Simion, G., Ionescu, D., & Filipescu, A. (2024). IoT-cloud, VPN, and digital twin-based remote monitoring and control of a multifunctional robotic cell in the context of AI, Industry, and Education 4.0 and 5.0. *Sensors, 24*(23), 7451. https://doi.org/10.3390/s24237451

Fudyma, J., Kura, Ł., & Gębicki, J. (2025). Development of digital twins for continuous processes: Concept description of virtual mass balance based on the Tennessee Eastman process. *Processes, 13*(2), 337. https://doi.org/10.3390/pr13020337

Hassan, M., Svadling, M., & Björsell, N. (2024). Experience from implementing digital twins for maintenance in industrial processes. *Journal of Intelligent Manufacturing, 35*, 875–884. https://doi.org/10.1007/s10845-023-02078-4

Hueros-Barrios, P., Rodríguez Sánchez, F., Martín Sánchez, P., Santos-Pérez, C., Sangwongwanich, A., Novak, M., & Blaabjerg, F. (2025). Digital twin approach for fault diagnosis in photovoltaic plant DC–DC converters. *Sensors, 25*(14), 4323. https://doi.org/10.3390/s25144323

Mikołajewska, E., Mikołajewski, D., Mikołajczyk, T., & Paczkowski, T. (2025). Generative AI in AI-based digital twins for fault diagnosis for predictive maintenance in Industry 4.0/5.0. *Applied Sciences, 15*(6), 3166. https://doi.org/10.3390/app15063166

Mitacc Meza, E., Borges de Souza, D., Copetti, A., Barbosa Sobral, A., Vaz Silva, G., Tammela, I., & Cardoso, R. (2024). Tools, technologies and frameworks for digital twins in the oil and gas industry: An in-depth analysis. *Sensors, 24*(19), 6457. https://doi.org/10.3390/s24196457

Ortiz, J., Quishpe, E., Sailema, G., & Guamán, N. (2025). Digital twin-based active learning for industrial process control and supervision in Industry 4.0. *Sensors, 25*(7), 2076. https://doi.org/10.3390/s25072076

Page, M., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E., Brennan, S., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M., Li, T.,

Loder, E., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Rodríguez-Alonso, C., Pena-Regueiro, I., & García, Ó. (2024). Digital twin platform for water treatment plants using microservices architecture. *Sensors, 24*(5), 1568. https://doi.org/10.3390/s24051568

Sayghe, A. (2025). Digital twin-driven intrusion detection for industrial SCADA: A cyber-physical case study. *Sensors, 25*(16), 4963. https://doi.org/10.3390/s25164963

Sierla, S., Sorsamäki, L., Azangoo, M., Villberg, A., Hytönen, E., & Vyatkin, V. (2020). Towards semi-automatic generation of a steady state digital twin of a brownfield process plant. *Applied Sciences*, *10*(19), 6959. https://doi.org/10.3390/app10196959

Vyskočil, J., Douda, P., Novák, P., & Wally, B. (2023). A digital twin-based distributed manufacturing execution system for Industry 4.0 with AI-powered on-the-fly replanning capabilities. *Sustainability*, *15*(7), 6251. https://doi.org/10.3390/su15076251

Yun, J., Kim, S., & Kim, J. (2024). Digital twin technology in the gas industry: A comparative simulation study. *Sustainability, 16*(14), 5864. https://doi.org/10.3390/su16145864

Zhang, Q., Wu, Z., An, B., Sun, R., & Cui, Y. (2025). Digital twin-based technical research on comprehensive gear fault diagnosis and structural performance evaluation. *Sensors*, *25*(9), 2775. https://doi.org/10.3390/s25092775

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

Contribución de autoría

Johana Beatriz Samaniego Palacios: Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos, supervisión.

Juan Diego Erazo Rodríguez: Metodología, software, validación, análisis formal, investigación, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, supervisión.

Byron Daniel Erazo Rodríguez: Conceptualización, software, investigación, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento.

Wilian Andres Nuñez Yanez: Análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.