

Evaluación del uso de gemelos digitales en los sistemas de producción.

Evaluation of the use of digital twins in the production systems.

Alexis Bustamante-Limones¹, Ciaddy Rodriguez-Borges², Jesús Alberto Pérez-Rodríguez³
^{1,2,3}Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo - Ecuador

ORCID: ¹[0009-0007-5286-2672](https://orcid.org/0009-0007-5286-2672), ²[0000-0003-1097-4194](https://orcid.org/0000-0003-1097-4194), ³[0000-0002-1578-2565](https://orcid.org/0000-0002-1578-2565)

Recibido: 18 de abril de 2024.

Aceptado: 09 de agosto de 2024.

Publicado: 01 de septiembre de 2024.

Resumen- La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el uso de gemelos digitales empleados en los sistemas de producción, como herramienta de mejoramiento de los procesos para la adaptación organizacional enfocado a la industria 5.0. Utilizando la metodología PRISMA, se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura publicada en los últimos cinco años en las bases de datos de Scielo, Science Direct, Redalyc y Scopus, centrada en identificar, analizar y evaluar los modelos de gemelos digitales aplicados en diferentes contextos de producción. Los resultados indican una variedad de modelos de gemelos digitales, desde sistemas integrados de simulación y análisis de datos hasta soluciones específicas para optimización de procesos y mantenimiento preventivo. Se observó que los gemelos digitales mejoran significativamente la eficiencia operativa, la gestión de inventarios y la capacidad de adaptación en respuesta a las fluctuaciones del mercado. Además, facilitan la integración de nuevas tecnologías y promueven una cultura de mejora continua y adaptabilidad dentro de las organizaciones. En conclusión, los gemelos digitales se presentan como herramientas cruciales para el avance hacia la industria 5.0, ofreciendo beneficios significativos en términos de eficiencia y adaptabilidad operacional. Su implementación permite a las empresas mejorar la toma de decisiones, aumentar la eficiencia operativa, reducir costos, optimizar procesos, además de responder más rápido y efectivo a las demandas del entorno competitivo actual y cambiante.

Palabras clave: gemelos digitales, industria 5.0, optimización de producción, análisis predictivo, mejora continua.

Abstract— The objective of this research was to evaluate the use of digital twins used in production systems as a process improvement tool for organizational adaptation focused on industry 5.0. Utilizing the PRISMA methodology, a systematic literature review was conducted on publications from the last five years from the Scielo, Dialnet, and Scopus databases, focusing on identifying, analyzing, and evaluating the models of digital twins applied in various production contexts. The results indicate a variety of digital twin models, from integrated systems of simulation and data analysis to specific solutions for process optimization and preventive maintenance. It was observed that digital twins significantly improve operational efficiency, inventory management, and adaptability in response to market fluctuations. Additionally, they facilitate the integration of new technologies and promote a culture of continuous improvement and adaptability within organizations. In conclusion, digital twins are presented as crucial tools for advancing towards industry 5.0, offering significant benefits in terms of operational efficiency and adaptability. Their implementation allows companies to improve decision-making, increase operational efficiency, reduce costs, optimize processes, and respond faster and more effectively to the demands of the current and changing competitive environment.

Keywords: digital twins, industry 5.0, production optimization, predictive analysis, continuous improvement.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: alexisbustamant2016@gmail.com (Alexis Bustamante Limones).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: A. Bustamante-Limones, C. Rodriguez-Borges, J. A. Pérez-Rodríguez, "Evaluación del uso de gemelos digitales en los sistemas de producción", *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 12, no. 3, pp. 195-204 2024, doi: [10.15649/2346030X.4382](https://doi.org/10.15649/2346030X.4382)

I. INTRODUCCIÓN

Desde la década de 1990, las simulaciones y emulaciones han evolucionado significativamente, sentando las bases para el desarrollo de los gemelos digitales [1]. Esta técnica, se originó en ambientes técnicos avanzados, como los programas espaciales, donde la necesidad de simulaciones precisas y detalladas es fundamental [2]. No obstante, no fue hasta que las capacidades de procesamiento de datos y las tecnologías de modelado alcanzaron niveles adecuados, que la industria comenzó a adoptar de manera amplia estas herramientas, para replicar sistemas complejos con precisión y fiabilidad [3].

El concepto de gemelo digital fue definido por primera vez en 2002, por Michael Grieves, Este se refiere a una instancia virtual de activos físicos, capaz de reflejar continuamente dichos activos a través de datos actualizados en tiempo real [1], [4]. Desde su introducción, el interés industrial en los gemelos digitales ha crecido exponencialmente, impulsando su aplicación en diversos sectores para mejorar la eficiencia operativa y la toma de decisiones [5].

Un gemelo digital es, esencialmente, un modelo virtual de un objeto físico que permite a las empresas tecnológicas avanzar hacia nuevas etapas de desarrollo y aumentar su competitividad en el mercado [6]. Esta tecnología se utiliza cada vez más en diversas industrias para optimizar procesos de producción y gestión [7], [8].

Además, los gemelos digitales se describen como representaciones digitales de entidades físicas que utilizan datos en tiempo real para comprender mejor las condiciones operativas [9], [10]. Una metodología innovadora para mejorar estos modelos, combina la visión por computadora, aprendizaje automático y realidad aumentada, permitiendo una mayor precisión y corrección en los modelos del gemelo digital [11].

Para complementar esta sección, se detalla a continuación otros conceptos acuñados por varios autores:

Tabla 1: Conceptos de gemelos digitales.

Autor	Año	Definición
Fuller, et al	2019	Un gemelo digital es una representación virtual de un activo físico que permite la integración sin esfuerzo de datos entre una máquina física y virtual en cualquier dirección.
Croatti, et al.	2020	Un gemelo digital se define como una representación digital de un sistema físico que reproduce su modelo de datos, su comportamiento y su comunicación con otros sistemas físicos.
Rasheed, et al	2020	Un gemelo digital puede definirse como una representación virtual de un activo físico habilitada a través de datos y simuladores para la predicción, optimización, monitoreo y toma de decisiones en tiempo real.
Autiosalo, et al.	2020	Un gemelo digital es una entidad virtual vinculada a una entidad del mundo real. Ambas conexiones y la representación virtual se pueden realizar de varias maneras diferentes.
Neethirajan, S., & Kemp, B.	2021	Un gemelo digital es una réplica digital de una entidad del mundo real que simula el estado físico y, tal vez, el estado biológico y el comportamiento de la entidad del mundo real basada en datos de entrada.
Jiang, et al	2021	Un gemelo digital es una réplica virtual de un producto, sistema, ser, comunidades e incluso ciudades del mundo real que se actualiza continuamente con datos de su contraparte física y su entorno.
Pesapane, et al	2022	Un gemelo digital es un modelo virtual desarrollado para reflejar con precisión una cosa física o un sistema.
Muñoz, P.	2022	Un gemelo digital es una réplica virtual de un sistema definido a un cierto nivel de fidelidad y sincronizado a una frecuencia específica.

Fuente: Elaboración propia.

Lv et al. [12] destacan cómo los gemelos digitales facilitan una transición suave y eficiente hacia sistemas de producción más adaptativos y centrados en el ser humano, apoyando así una integración sin precedentes de las capacidades tecnológicas y humanas.

Por este motivo, Cinar et al [13], indican que los gemelos digitales emergen como catalizadores fundamentales, en la transición hacia la Industria 5.0, un paradigma donde la interacción entre tecnología y humanismo se intensifica para mejorar la eficiencia y personalización de los procesos de producción [14], [15]. En esta nueva etapa industrial se centra no solo en la automatización, sino también en la incorporación del bienestar humano dentro del ciclo productivo [16], generar mayor seguridad en los ambientes de trabajo [17], promete revolucionar las prácticas industriales al integrar inteligencia artificial, datos en tiempo real y simulaciones avanzadas [12], [18].

Por otro lado, Modoni et al. [19], exploran una dimensión aún más centrada en el individuo, al proponer un marco innovador donde los gemelos digitales no solo reproducen componentes mecánicos o procesos, sino que también modelan las interacciones humanas dentro del entorno de trabajo, lo que podría significar un avance significativo en la personalización del trabajo y la ergonomía industrial.

Estas perspectivas se complementan con los hallazgos de Jagatheesaperumal et al. [20], quienes examinan las aplicaciones prácticas de los gemelos digitales en el ámbito profesional, resaltando su potencial para mejorar no solo la eficiencia operativa sino también para adaptar los ambientes de trabajo a las necesidades humanas. En conjunto, estos estudios trazan un futuro donde la tecnología y la humanidad convergen de manera integral, redefiniendo lo que significa la innovación en la era de la Industria 5.0.

En el ámbito de la ingeniería industrial, la evolución de las tecnologías de la información y la comunicación ha propiciado el surgimiento de herramientas innovadoras que facilitan la adaptación a nuevos paradigmas productivos [21], [22]. Entre estas herramientas, los gemelos digitales se destacan por su capacidad para simular con precisión el comportamiento de los sistemas de producción, ofreciendo una base sólida para la toma de decisiones y la mejora continua [23].

La implementación de gemelos digitales en sistemas de producción, ha demostrado ser particularmente valiosa por varias razones: Facilita un monitoreo constante y en tiempo real del desempeño de las máquinas y los procesos [24], lo cual es fundamental para la optimización continua y la prevención de paradas no programadas [11], [22]. Además, presenta la capacidad de simular cambios en el proceso de producción sin alterar la operación física, desde el proceso de fabricación hasta la cadena de suministro completa [25] lo que permite a las empresas experimentar con configuraciones más eficientes y que reducen los costos operativos [11].

No obstante, la adopción de gemelos digitales también presenta desafíos considerables, desde una perspectiva técnica, la creación y gestión de un gemelo digital, requieren de sofisticadas capacidades de análisis de datos y sistemas integrados que pueden representar una barrera significativa, especialmente para empresas con limitaciones en infraestructura tecnológica o capital humano especializado [26]. Desde el punto de vista estratégico, la inversión inicial y el mantenimiento de sistemas de gemelos digitales exigen un compromiso financiero y organizativo considerable, lo que puede disuadir a algunas empresas de adoptar esta tecnología [27]. Los desafíos técnicos y éticos, como la integridad de los datos en tiempo real y los riesgos relacionados con la privacidad y la vigilancia, representan barreras adicionales para la adopción de gemelos digitales [28].

A pesar de estos desafíos, las perspectivas a largo plazo para los gemelos digitales en la ingeniería industrial son ampliamente positivas. Se anticipa que el continuo avance en tecnologías de inteligencia artificial y análisis de datos ampliará aún más las capacidades de estos sistemas, permitiendo no solo replicar y simular, sino también prever y adaptar los procesos de producción de manera autónoma [27]. Esta evolución es congruente con los principios de la industria 5.0, que no solo busca la eficiencia, sino también una mayor personalización en la producción y una integración armoniosa entre la tecnología y el bienestar humano.

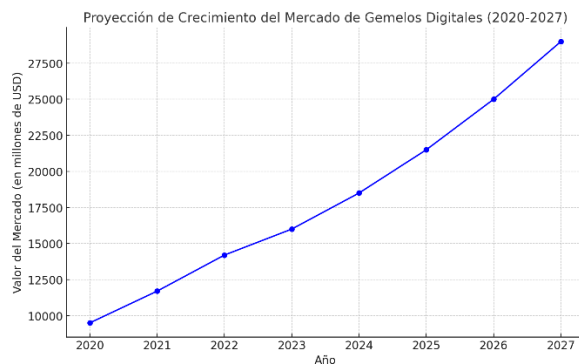


Figura 1: Proyección de crecimiento de los gemelos digitales.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Datos obtenidos de De Luca (2023) y del informe de DatacenterDynamics.

La creciente adopción de los gemelos digitales en la industria manufacturera ha demostrado ser un elemento clave para la optimización y mejora de los procesos productivos, en este contexto, Ojsteršek et al. [29] han resaltado la importancia de la selección precisa de datos de entrada para los gemelos digitales, subrayando sus capacidades predictivas y los beneficios financieros que ofrecen; su estudio revela cómo la integración de gemelos digitales en sistemas de manufactura inteligente puede llevar a una optimización significativa, permitiendo a las empresas no solo anticipar problemas potenciales sino también tomar decisiones informadas que mejoren la eficiencia y reduzcan costos.

Complementariamente, Abdoli [30] propone un enfoque innovador para el desarrollo de gemelos digitales experimentables destinados a la validación virtual de sistemas de manufactura, permitiendo la evaluación de diferentes alternativas de diseño y su impacto en el rendimiento del sistema; esta metodología proporciona una plataforma para pruebas y ajustes sin necesidad de interrupciones físicas en el proceso productivo, convirtiéndose así en una herramienta valiosa para ingenieros y diseñadores, facilitando la optimización continua y la mejora del diseño de sistemas.

El estudio de Lee et al. [31] avanza en esta línea al desarrollar un sistema basado en gemelos digitales que permite el análisis y optimización de líneas de producción en tiempo real; este sistema no solo facilita la monitorización de cambios dinámicos en el diseño de procesos, sino que también permite la adaptación rápida a nuevas condiciones y requerimientos del mercado, siendo la capacidad de responder en tiempo real a variaciones en el entorno productivo un factor crucial para mantener la competitividad en mercados altamente dinámicos y exigentes.

Charrier et al. [32] aportan un marco metodológico que mejora las funcionalidades de los gemelos digitales mediante la identificación, recopilación y análisis de datos del sistema de producción; este enfoque se centra en la supervisión del proceso y en la mejora continua del rendimiento del gemelo digital, asegurando que los datos utilizados sean precisos y relevantes, permitiendo así una visión más completa y detallada del sistema, facilitando la toma de decisiones y la identificación de áreas de mejora.

Por otro lado, Dong et al. [33] abordan la evaluación del estado y la predicción de fallos en sistemas de protección basados en gemelos digitales aplicados en subestaciones inteligentes; su metodología permite una operación y mantenimiento más eficaces, reduciendo el riesgo de fallos imprevistos y mejorando la confiabilidad del sistema, siendo la capacidad de predecir y prevenir fallos antes de que ocurran un beneficio significativo, especialmente en sistemas críticos donde la continuidad del servicio es vital.

Schäfer et al. [34] presentan un enfoque proactivo para la planificación de la producción utilizando gemelos digitales; su investigación dentro del proyecto ProProS destaca cómo estos modelos pueden anticipar necesidades futuras y planificar recursos de manera más eficiente, reduciendo desperdicios y mejorando la utilización de recursos, convirtiéndose la planificación proactiva en un elemento esencial para la optimización de la cadena de suministro y la gestión de la producción.

Zakharchenko y Stepanets [35] ofrecen una solución basada en la orquestación de activos informáticos mediante modelos Python y la plataforma Controller para la comunicación entre modelos y elementos externos de gemelos digitales; este enfoque mejora la fiabilidad y escalabilidad de los sistemas, permitiendo una integración más efectiva y eficiente de múltiples modelos y datos, siendo la capacidad de orquestar estos componentes fundamental para el desarrollo de gemelos digitales robustos y adaptativos.

Asimismo, Magalhães et al. [36] conciben un gemelo digital para sistemas de manufactura flexible, utilizando sensores en componentes clave para enviar información en tiempo real a la entidad digital; este enfoque demuestra la eficiencia del sistema MES (Manufacturing

Execution System) en la integración y gestión de datos en tiempo real, facilitando la adaptabilidad y flexibilidad del sistema productivo, siendo la capacidad de ajustar y optimizar procesos en tiempo real crucial para mantener la eficiencia y competitividad en un entorno industrial en constante cambio.

En base a lo anterior, esta investigación tiene como objetivo evaluar el uso de gemelos digitales empleados en los sistemas de producción, como herramienta de mejoramiento de los procesos productivos.

II. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

En esta investigación, se adoptó un enfoque cuantitativo para realizar una revisión sistemática siguiendo las directrices de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), la cual está diseñada para mejorar la transparencia y exhaustividad en la presentación de revisiones sistemáticas y metaanálisis [37], [38]. Esta metodología permitió una estructura clara para la recolección, evaluación y síntesis de estudios, garantizando que el proceso fuera reproducible y de alta calidad [39].

El diseño de investigación corresponde a una revisión sistemática descriptiva, donde se analizaron fuentes secundarias de datos. El nivel de investigación es exploratorio, dado que busca identificar tendencias emergentes y áreas de oportunidad en el uso de gemelos digitales dentro de la Industria 5.0. La población de estudio se conformó por artículos académicos y estudios de caso relacionados con la implementación de gemelos digitales en sistemas de producción. Se establecieron criterios de inclusión y exclusión que se basaron en la actualidad, relevancia y calidad metodológica de los estudios.

El diseño de la investigación bajo la metodología PRISMA, se fundamentó en una estructura predefinida de búsqueda, selección, análisis y síntesis de los estudios primarios. Se siguen criterios establecidos para asegurar la transparencia y replicabilidad del proceso [38]. En la aplicación de estas metodologías fueron necesarias realizar las siguientes actividades:

1. Definición de la pregunta de investigación de forma clara y específica que guiará la revisión sistemática. Esto se hace comúnmente utilizando el modelo PICO (Población, Intervención, Comparador y Resultado) [39].
2. Desarrollo del protocolo de revisión que permitió establecer los criterios de inclusión/exclusión, las bases de datos a consultar y los métodos de análisis. En las bases de datos fueron seleccionados los documentos que están publicados en los últimos cinco años, asegurando así la vigencia de la información obtenida. El uso de palabras clave como "gemelos digitales", "sistemas de producción", "Industria 5.0", "simulación de procesos" y "optimización de producción" permitió una búsqueda exhaustiva, maximizando la relevancia de los estudios seleccionados.
3. Búsqueda exhaustiva de la literatura, se realizó de forma estructurada en bases de datos académicas (tales como Scielo, Science Direct, Redalyc y Scopus, IEEE Xplore, entre otras). La estrategia de búsqueda debe ser replicable y transparente, utilizando términos específicos y operadores booleanos, tal como se presenta en la Figura 1.
4. Selección de estudios, contemplo revisar títulos y resúmenes para eliminar estudios irrelevantes, aplicando los criterios de inclusión y exclusión establecidos previamente. Esto debe ser realizado por al menos dos revisores independientes para evitar sesgos.
5. Extracción de datos, planteo recolectar los datos relevantes de los estudios seleccionados utilizando una plantilla estructurada que incluya información sobre la metodología, resultados y conclusiones principales de cada estudio.
6. Evaluación de la calidad de los estudios, empleando criterios definidos por los autores tal como la aplicación de la tecnología en procesos industriales.
7. Síntesis de resultados, se analizó la información encontrada, Para el análisis de los datos, se aplicó una técnica de análisis documental, evaluando la metodología, resultados y conclusiones de los estudios seleccionados, con el fin de garantizar su aporte significativo al marco teórico. La extracción de información se centró en características clave como las tecnologías empleadas, los beneficios observados y los desafíos reportados en la implementación de gemelos digitales.
8. Redacción del informe final, Actividad: se procedió con la redacción del artículo utilizando la metodología PRISMA. A continuación, se esquematiza en la Figura 1, mediante un flujograma cada una de las etapas del proceso.

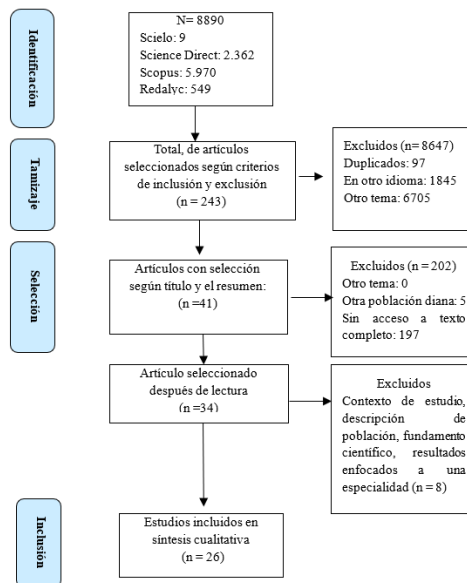


Figura 1: Flujograma de la búsqueda sistemática y la selección de artículos.
Fuente: Elaboración propia.

III. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

En la presente sección, se evaluó una variedad de modelos de gemelos digitales empleados actualmente en sistemas de producción, los cuales reflejan su aplicación en diferentes contextos industriales y su capacidad para adaptarse a diversas necesidades operativas. La diversidad y especificidad de estos modelos demuestra cómo los avances tecnológicos pueden ser aprovechados para mejorar procesos y resultados.

Tabla 1: Modelos de gemelos digitales empleados en sistemas de producción.

Autor(es)	Año	Título del Estudio	Modelo de gemelo digital descrito	Contexto de aplicación
Cinar, et al.	2019	Digital Twins for Industry 4.0: A Review	Modelo integrado de simulación y análisis de datos	Revisión general en la industria 4.0
Li, et al.	2019	Research on Digital Twin Technology for Production Line Design and Simulation	Modelo de simulación para diseño y optimización de líneas de producción	Diseño y simulación de líneas de producción en la industria automotriz
Tao, et al	2019	Digital Twin in Industry: State-of-the-Art	Gemelo digital basado en datos en tiempo real y machine learning	Aplicaciones industriales diversas
Židek, et al	2020	Digital Twin of Experimental Smart Manufacturing Assembly System for Industry 4.0 Concept	Modelo experimental para ensamblaje inteligente	Sistemas de ensamblaje en manufactura inteligente
Makarov, et al	2019	Developing digital twins for production enterprises	Modelo de gestión y operaciones basado en gemelos digitales	Empresas de producción variadas

Fuente: Elaboración propia

Conforme al criterio de Cinar et al. [13], se explora la implementación de un modelo integrado de simulación y análisis de datos en la industria 4.0. Este enfoque destaca la versatilidad de los gemelos digitales para integrar y procesar información en tiempo real. La capacidad de estos sistemas para proporcionar insights en tiempo real ofrece un marco poderoso para mejorar la toma de decisiones y la eficiencia operacional, elementos cruciales en un entorno industrial competitivo. Este análisis revela que los gemelos digitales no solo son herramientas para la simulación, sino también plataformas dinámicas para el aprendizaje y la adaptación continua.

Transicionando desde la perspectiva de integración tecnológica de Cinar et al. [13] hacia aplicaciones más concretas, Li et al. [40] examinan un modelo de simulación diseñado específicamente para el diseño y optimización de líneas de producción en la industria automotriz. La precisión en la simulación de escenarios de producción sin interrumpir las operaciones en curso ilustra la capacidad de los gemelos digitales para efectuar mejoras significativas en los procesos de manufactura. Este estudio subraya la importancia de aplicar modelos de gemelos digitales en escenarios donde la minimización de errores y costos es primordial.

Además, Tao et al. [22] aportan una perspectiva sobre un gemelo digital basado en datos en tiempo real y machine learning, aplicado en diversas industrias. Este enfoque resalta cómo la adaptabilidad y el aprendizaje automático integrado pueden llevar a mejoras significativas en la optimización y automatización de procesos. La habilidad de los gemelos digitales para aprender de los datos y ajustarse en consecuencia es particularmente relevante en entornos industriales donde las condiciones cambian rápidamente y la capacidad de respuesta es clave para el éxito.

Por otra parte, Židek et al. [41] exploran las posibilidades de los gemelos digitales en sistemas de ensamblaje inteligente. Este modelo experimental demuestra la utilidad de integrar tecnologías avanzadas para mejorar la coordinación y eficiencia. La discusión de Židek et al. (2020) amplía la comprensión de cómo los gemelos digitales pueden ser específicamente configurados para mejorar sistemas de manufactura, alineándose con los objetivos estratégicos de las empresas para lograr una producción más inteligente y eficiente.

Cabe resaltar que, Makarov et al. [42] investigan cómo los gemelos digitales pueden ser aplicados en la gestión y operaciones de empresas de producción variadas. Este estudio proporciona una perspectiva sobre la aplicación de gemelos digitales más allá de la mera simulación,

abarcando la gestión integral y la optimización de operaciones. La investigación de Makarov et al. [42] sugiere que los gemelos digitales son herramientas versátiles que pueden adaptarse a diferentes tipos de industrias y necesidades de producción, lo que los convierte en elementos esenciales para la transformación digital.

Por otra parte, se encontró en la revisión sistemática que los gemelos digitales no solo sirven como representaciones virtuales de sistemas físicos, sino que también juegan un papel crucial en la optimización de diversos procesos de producción. La Tabla 2 ilustra cómo diferentes estudios han aplicado estos modelos para mejorar la eficiencia, precisión y adaptabilidad en varios contextos industriales. Estos casos de estudio revelan que, más allá de la simple simulación, los gemelos digitales pueden conducir a mejoras significativas en la operación y mantenimiento de sistemas de producción, alineándose así con los principios de la industria 5.0 que buscan la automatización inteligente y la personalización en la manufactura.

Tabla 2: Aplicaciones específicas de gemelos digitales en la optimización de procesos de producción.

Autor(es)	Año	Título del Estudio	Aplicación Específica del Gemelo Digital	Beneficios Reportados	Contexto de Aplicación
Ait-Alla, et al.	2019	Simulation-based Analysis of the Interaction of a Physical and a Digital Twin in a Cyber-Physical Production System	Simulación de la interacción entre componentes físicos y digitales	Mejora en la eficiencia operativa y reducción de costos de mantenimiento	Sistemas ciberfísicos en producción
Glatt, et al.	2020	Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation	Modelado de flujos de material para optimización en tiempo real	Incremento en la precisión de la planificación y reducción de desechos	Industria manufacturera
Jeon, S., & Schuesslbauer, S.	2020	Digital Twin Application for Production Optimization	Optimización de la producción mediante análisis predictivo y adaptativo	Aumento de la productividad y eficiencia energética	Industria de componentes electrónicos
Ojsteršek, et al.	2023	Optimizing smart manufacturing systems using digital twin	Optimización de sistemas de manufactura inteligente mediante gemelos digitales	Mejora en la toma de decisiones y en la adaptabilidad operacional	Manufactura inteligente
Wang, et al.	2020	Construction and Optimization of Digital Twin Model for Hardware Production Line	Construcción y optimización de líneas de producción mediante gemelos digitales	Mejoras en la gestión de inventarios y logística	Industria de hardware

Fuente: Elaboración propia.

El estudio de Ait-Alla et al. [43] ofrece un ejemplo claro de cómo la simulación de la interacción entre componentes físicos y digitales puede ser aprovechada para mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos de mantenimiento en sistemas ciberfísicos. Este enfoque permite a las empresas anticipar problemas antes de que ocurran, optimizando el mantenimiento y evitando paradas no planificadas que podrían resultar costosas. Este tipo de aplicación es especialmente valioso en entornos industriales donde la continuidad y fiabilidad del proceso productivo son esenciales.

Glatt et al. [44] profundizan en la importancia del modelado de flujos de material basado en simulaciones físicas para optimizar operaciones en tiempo real en la industria manufacturera. La capacidad de prever y ajustar los flujos de material no solo mejora la precisión de la planificación, sino que también contribuye significativamente a la reducción de desechos, alineando la producción con prácticas más sostenibles y eficientes. Este enfoque destaca cómo los gemelos digitales pueden ser utilizados para una gestión más eficiente de los recursos, un aspecto crítico en el contexto de la creciente presión global por la sostenibilidad en la manufactura.

Jeon y Schuesslbauer [45] exploran la aplicación de gemelos digitales en la industria de componentes electrónicos para la optimización de la producción mediante análisis predictivo y adaptativo. La incorporación de gemelos digitales en este sector permite no solo aumentar la productividad y la eficiencia energética, sino también mejorar la capacidad de respuesta ante las fluctuaciones del mercado y las demandas cambiantes de los consumidores. Este estudio subraya la capacidad de los gemelos digitales para adaptar la producción de manera eficiente y dinámica, una ventaja competitiva clave en industrias de alta tecnología.

Ojsteršek, et al., [29] demuestran cómo los gemelos digitales pueden optimizar sistemas de manufactura inteligente. Su investigación se centra en la mejora de la toma de decisiones y la adaptabilidad operacional, dos factores que son vitales para mantener la competitividad en un entorno de producción cada vez más automatizado y orientado a datos. Los resultados de su estudio indican que los gemelos digitales no solo soportan la optimización de procesos, sino que también facilitan la integración de nuevas tecnologías y metodologías en la planta de producción.

Finalmente, Wang et al. [46] describen el uso de gemelos digitales para la construcción y optimización de líneas de producción en la industria del hardware. Este enfoque permite una gestión más efectiva de inventarios y logística, optimizando el flujo de trabajo y reduciendo los tiempos de inactividad. La capacidad de simular y optimizar procesos de producción en tiempo real ofrece a las empresas una herramienta poderosa para mejorar la eficiencia operacional y reducir costos, asegurando que los procesos productivos se adapten continuamente a las necesidades cambiantes y a las condiciones del mercado.

Continuando con la evaluación del uso de gemelos digitales como herramientas para mejorar la eficiencia de los procesos productivos, la Tabla 3 proporciona una visión detallada de cómo estos sistemas están siendo utilizados para optimizar la gestión y operación en diversas industrias. A través de los estudios seleccionados, se puede observar un impacto significativo en la eficiencia operativa, la gestión del ciclo de vida de los productos, y la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial.

Tabla 3: Evaluación del impacto de gemelos digitales en la mejora de la eficiencia productiva.

Autor(es)	Año	Título del Estudio	Resultados Clave	Impacto en la Eficiencia
Fuller, et al.	2020	Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research	Análisis de las tecnologías habilitadoras y los desafíos de los gemelos digitales	Mejoras potenciales en la gestión del ciclo de vida de los productos
Huang, et al.	2021	A Survey on AI-Driven Digital Twins in Industry 4.0: Smart Manufacturing and Advanced Robotics	Integración de AI en gemelos digitales para automatización avanzada	Aumento de la precisión operacional y eficiencia de producción
Lim, et al.	2020	A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives	Discusión sobre la gestión del ciclo de vida del producto y la innovación empresarial con gemelos digitales	Optimización de recursos y procesos de fabricación
Kenett, R. S., & Bortman, J.	2021	The digital twin in Industry 4.0: A wide-angle perspective	Evaluación de aplicaciones de gemelos digitales en diversos sectores industriales	Mejora en la integración de procesos y sistemas de información
Mihai, et al.	2022	Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects	Estudio sobre las tendencias actuales y futuras en la tecnología de gemelos digitales	Potencial para aumentar la eficiencia y la adaptabilidad en la producción

Fuente: Elaboración propia.

Fuller, et al., [26] analizan las tecnologías habilitadoras y los desafíos asociados con los gemelos digitales, destacando las mejoras potenciales en la gestión del ciclo de vida de los productos. Este estudio subraya cómo los gemelos digitales permiten una visión más profunda y detallada del rendimiento del producto a lo largo de su vida útil, lo que facilita una mejor planificación y optimización de recursos. La capacidad de anticipar y resolver problemas antes de que afecten la producción o la calidad del producto puede llevar a significativas reducciones en costos y tiempos de inactividad.

Huang et al. [47] se centran en la integración de la inteligencia artificial en los gemelos digitales para la automatización avanzada en la manufactura inteligente. Su estudio evidencia un aumento notable en la precisión operacional y la eficiencia de producción, destacando cómo los gemelos digitales potenciados por IA pueden predecir fallos y ajustar automáticamente los parámetros de producción en tiempo real. Esta capacidad de adaptación continua es crucial para mantener la competitividad en entornos de producción dinámicos y altamente tecnificados.

Lim, et al., [48] discuten cómo los gemelos digitales influyen en la gestión del ciclo de vida del producto y la innovación empresarial. Ellos identifican que la implementación de estos sistemas contribuye a una optimización sustancial de los recursos y los procesos de fabricación. Al proporcionar una plataforma que replica exactamente el entorno de producción, los gemelos digitales permiten experimentar con cambios en el diseño y la producción sin riesgos, lo que resulta en una mejora continua y eficiente.

Kenett y Bortman [49] evalúan las aplicaciones de los gemelos digitales en diversos sectores industriales y cómo estos contribuyen a mejorar la integración de procesos y sistemas de información. Este enfoque holístico no solo mejora la eficiencia operativa sino también facilita la toma de decisiones basada en datos, una ventaja estratégica que transforma la gestión tradicional de las plantas industriales.

Asimismo, Mihai et al. [50] proporcionan una perspectiva sobre las tendencias actuales y futuras en la tecnología de gemelos digitales, subrayando el potencial para aumentar la eficiencia y la adaptabilidad en la producción. Este estudio sugiere que, a medida que la tecnología de gemelos digitales evoluciona, su aplicación podría extenderse aún más, permitiendo a las empresas adaptarse rápidamente a las nuevas condiciones de mercado y tecnológicas.

Tabla 4: Perspectivas generales sobre el uso y desafíos de los gemelos digitales en la industria.

Autor(es)	Año	Título del Estudio	Descripción General	Desafíos Identificados
Amthiou, et al.	2023	Digital Twins in Industry 4.0: A Literature Review	Revisión exhaustiva sobre el uso y desarrollo de gemelos digitales en la industria 4.0	Integración de sistemas y manejo de datos en tiempo real
Cimino, et al.	2019	Review of digital twin applications in manufacturing	Análisis de aplicaciones específicas de gemelos digitales en la manufactura	Costos de implementación y complejidad tecnológica
Durão, et al.	2018	Digital Twin Requirements in the Context of Industry 4.0	Discusión sobre los requisitos necesarios para la implementación efectiva de gemelos digitales	Necesidad de estándares y protocolos de seguridad
Halenár, et al.	2019	Virtualization of Production Using Digital Twin Technology	Estudio de la virtualización de la producción mediante tecnología de gemelos digitales	Escalabilidad y dependencia de infraestructura de TI
Korovin, G.	2021	THE OPPORTUNITIES FOR USING DIGITAL TWINS IN INDUSTRY	Exploración de oportunidades para los gemelos digitales en diversas industrias	Alineación con objetivos empresariales a largo plazo
Kuts, et al.	2020	Digital Twin: Collaborative Virtual Reality Environment for Multi-Purpose Industrial Applications	Estudio del uso de entornos de realidad virtual colaborativa con gemelos digitales	Integración con tecnologías existentes
Lugaresi, G., & Matta, A.	2021	Automated manufacturing system discovery and digital twin generation	Investigación sobre la generación automatizada de sistemas de manufactura y gemelos digitales	Requerimientos de datos precisos y actualizados
Pires, et al.	2019	Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges	Panorama de las tecnologías, aplicaciones y retos de los gemelos digitales en la industria 4.0	Adaptación cultural y capacitación de personal
Rolle, et al.	2020	Architecture for Digital Twin implementation focusing on Industry 4.0	Descripción de una arquitectura para la implementación de gemelos digitales	Mantenimiento y actualización continuos
Suyatinov, S.	2019	Conceptual Approach to Building a Digital Twin of the Production System	Propuesta de un enfoque conceptual para la creación de gemelos digitales de sistemas productivos	Coordinación entre equipos de IT y producción

Fuente: Elaboración propia.

La revisión sistemática revela que, si bien los gemelos digitales son prometedores para la transformación industrial, enfrentan desafíos significativos que requieren atención meticulosa para su integración y operación efectiva. Estos desafíos abarcan desde la gestión de datos en tiempo real hasta la necesidad de estándares de seguridad robustos, cada uno influyendo en la eficacia con la que estos sistemas pueden ser implementados en entornos de producción.

Amthiou, et al., [51] proporcionan una visión exhaustiva de cómo la integración de sistemas y el manejo eficiente de datos en tiempo real son fundamentales, pero también representan desafíos significativos para las empresas. Esta capacidad para gestionar datos con precisión es esencial, ya que la efectividad de los gemelos digitales depende en gran medida de la calidad y la inmediatez de la información que procesan.

Adicionalmente, Cimino, et al., [21] identifican los costos de implementación y la complejidad tecnológica como barreras considerables. Sin embargo, resaltan que superar estos obstáculos es posible mediante una planificación adecuada y la selección de tecnologías escalables. Esta estrategia no solo facilita la adopción inicial, sino que también asegura que los sistemas de gemelos digitales puedan evolucionar con las necesidades cambiantes de la empresa.

Por otro lado, Durão et al., [23] discuten la importancia de desarrollar estándares y protocolos de seguridad robustos para proteger tanto los datos como los procesos de producción. Este aspecto es crucial en un momento en que la seguridad cibernética se convierte en una preocupación central para todas las operaciones industriales que dependen cada vez más de soluciones digitales.

Además, la investigación de Halenár et al., [52] sobre la virtualización de la producción resalta cómo los desafíos relacionados con la escalabilidad y la dependencia de la infraestructura de TI pueden gestionarse a través de inversiones en tecnología adecuada y capacitación especializada. Esto no solo mejora la funcionalidad del sistema de gemelos digitales, sino que también asegura que la fuerza laboral pueda utilizar estas herramientas de manera efectiva.

En una línea similar, Korovin [53] explora las oportunidades que los gemelos digitales ofrecen en diversas industrias, insistiendo en la necesidad de alinear estos sistemas con los objetivos empresariales a largo plazo. Este enfoque garantiza que los beneficios de los gemelos digitales se traduzcan en mejoras tangibles y sostenibles para la empresa.

Kuts et al., [54], al estudiar los entornos de realidad virtual colaborativa, por su parte, Lugaresi y Matta (2021), al investigar la generación automatizada de sistemas de manufactura, ambos subrayan la importancia de la integración tecnológica y los requisitos de datos precisos. Estos estudios colectivamente apuntan a la necesidad de una infraestructura de TI robusta y adaptable como un pilar para la implementación exitosa de gemelos digitales.

Finalmente, Pires et al. [55] y Rolle, et al., [56] reflejan sobre cómo los desafíos de adaptación cultural y la necesidad de mantenimiento y actualización continuos pueden ser abordados mediante programas de capacitación continua y un enfoque en la arquitectura flexible de sistemas.

IV. CONCLUSIONES

La revisión sistemática llevada a cabo ha permitido identificar una amplia gama de modelos de gemelos digitales empleados actualmente en los sistemas de producción, subrayando su diversidad y adaptabilidad a diferentes entornos industriales. Desde modelos integrados de simulación y análisis de datos hasta sistemas especializados para el diseño y optimización de líneas de producción, los gemelos digitales se han mostrado como herramientas versátiles que pueden ajustarse para satisfacer las necesidades específicas de cada sector. La capacidad de estos modelos para simular de manera precisa tanto los procesos como las interacciones en entornos de producción real destaca su valor en la mejora continua de las operaciones industriales.

En cuanto a la aplicación de estos modelos en los procesos de producción, se ha evidenciado que los gemelos digitales son fundamentales no solo para la planificación y la simulación, sino también para funciones críticas como la previsión y el mantenimiento. La capacidad de realizar análisis predictivos y adaptativos permite a las empresas anticiparse a posibles fallos y adaptar la producción a las condiciones cambiantes del mercado, lo que resulta en un aumento significativo de la eficiencia operacional y la reducción de costos. Estos sistemas han demostrado su eficacia en la optimización de la cadena de suministro, la gestión de inventarios y la logística, contribuyendo a un ciclo de producción más ágil y menos susceptible a interrupciones.

Finalmente, la evaluación del impacto de los gemelos digitales en la mejora de la eficiencia de los procesos productivos ha revelado que estos sistemas no sólo optimizan las operaciones existentes, sino que también promueven la innovación y la adaptabilidad en las prácticas de manufactura. Los gemelos digitales facilitan una integración más fluida de nuevas tecnologías y procesos en el entorno de producción, mejorando la capacidad de respuesta ante las demandas del mercado y fomentando un entorno de mejora continua. A través de su implementación, las empresas pueden no solo mantenerse competitivas en un panorama industrial en rápida evolución, sino también avanzar hacia una producción más sostenible y eficiente en recursos.

V. REFERENCIAS

- [1] E. Ferko, A. Bucaioni, and M. Behnam, "Architecting Digital Twins," IEEE Access, vol. PP(1), 2022.
- [2] J. A. P. Rodriguez, C. G. R. Borges, A. V Pérez, and C. A. Bowen, "Emulation of System as Strategy for Teaching of Mechanical System," International Journal of Psychosocial Rehabilitation, vol. 24, no. 2, 2020.
- [3] A. Filipescu et al., "Digital Twin for a Mechatronics Line with Integrated Mobile Robotic Systems," in 2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2022.
- [4] L. Zhao, Z. Nie, Y. Xia, and H. Li, "Virtual-Physical Tracking Control for a Car-Like Mobile Robot Based on Digital Twin Technology," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, doi: [10.1109/TIE.2024.3384585](https://doi.org/10.1109/TIE.2024.3384585).

- [5] S. Sai, M. Prasad, A. Garg, and V. Chamola, "Synergizing Digital Twins and Metaverse for Consumer Health: A Case Study Approach," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2024, doi: [10.1109/TCE.2024.3367929](https://doi.org/10.1109/TCE.2024.3367929).
- [6] P. M. Ariza and A. J. Vallecillo-Moreno, "¿Qué es un Gemelo Digital? Una Propuesta de Arquitectura para su Implementación," 2023.
- [7] M. S. Amjad, M. Z. Rafique, and M. A. Khan, "Leveraging optimized and cleaner production through industry 4.0," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 26, pp. 859–871, 2021.
- [8] D. A. Sosfenov, "DIGITAL TWIN: HISTORY OF ORIGIN AND DEVELOPMENT PROSPECTS," *Intellect. Innovations. Investments*, 2023, doi: [10.25198/2077-7175-2023-4-35](https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-35).
- [9] S. de López Diz, R. M. López, F. J. R. Sánchez, E. D. Llerena, and E. J. B. Peña, "A real-time digital twin approach on three-phase power converters applied to condition monitoring," *Applied Energy*, vol. 334, p. 120606, 2023.
- [10] M. Kim and S. Kim, "Development of a dedicated process simulator for the digital twin in apparel manufacturing: a case study," *International Journal of Clothing Science and Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 629–645, 2024.
- [11] B. Moya, A. Badias, I. Alfaro, F. Chinesta, and E. Cueto, "Digital twins that learn and correct themselves," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 123, no. 12, pp. 3034–3044, 2020, doi: [10.1002/nme.6535](https://doi.org/10.1002/nme.6535).
- [12] Z. Lv, "Gemelos digitales en la Industria 5.0," *Research*, vol. 6, 2023.
- [13] Z. Cinar, A. A. Nuhu, Q. Zeeshan, and O. Korhan, "Digital Twins for Industry 4.0: A Review," 2019.
- [14] A. A. Adamou and C. Alaoui, "Energy efficiency model-based digital shadow for induction motors: towards the implementation of a digital twin," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 44, p. 101469, 2023.
- [15] M. Trstenjak and P. Cosic, "Process planning in Industry 4.0 environment," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 1744–1750, 2017, doi: [10.1016/j.promfg.2017.07.303](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.303).
- [16] D. Yan et al., "Digital twin and parameter correlation-enabled variant design of production lines," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 1–22, 2023, doi: [10.1080/0951192X.2023.2294447](https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2294447).
- [17] R. van Dinter, B. Tekinerdogan, and C. Catal, "Reference architecture for digital twin-based predictive maintenance systems," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 177, p. 109099, 2023, doi: [10.1016/j.cie.2023.109099](https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109099).
- [18] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee, and B. Yin, "Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6505–6519, 2017.
- [19] G. E. Modoni and M. Sacco, "Un marco basado en gemelos digitales humanos impulsando la centricidad humana hacia la Industria 5.0," *Sensores (Basilea, Suiza)*, vol. 23, 2023.
- [20] S. Jagatheesaperumal et al., "Architecting Digital Twins," *IEEE Access*, vol. 24, no. 1, p. 7539, 2023.
- [21] C. Cimino, E. Negri, and L. Fumagalli, "Review of digital twin applications in manufacturing," *Computers in Industry*, vol. 113, 2019.
- [22] Q. Qi and F. Tao, "Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 3585–3593, 2018, doi: [10.1109/ACCESS.2018.2793265](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265).
- [23] L. F. C. S. Durão, S. Haag, R. Anderl, K. Schützer, and E. Zancul, "Digital Twin Requirements in the Context of Industry 4.0," 2018.
- [24] A. Padovano, F. Longo, L. Manca, and R. Grugni, "Improving safety management in railway stations through a simulation-based digital twin approach," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 187, p. 109839, 2024, doi: [10.1016/j.cie.2023.109839](https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109839).
- [25] H. D. Perez, J. M. Wassick, and I. E. Grossmann, "A digital twin framework for online optimization of supply chain business processes," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 166, p. 107972, 2022, doi: [10.1016/j.compchemeng.2022.107972](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107972).
- [26] A. Fuller, Z. Fan, and C. Day, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2019.
- [27] D. Opoku, S. Perera, R. Osei-Kyei, M. Rashidi, K. Bamdad, and T. Famakinwa, "Barriers to the Adoption of Digital Twin in the Construction Industry: A Literature Review," *Informatics*, 2023, doi: [10.3390/informatics10010014](https://doi.org/10.3390/informatics10010014).
- [28] P. D. Winter and T. Chico, "Using the Non-Adoption, Abandonment, Scale-Up, Spread, and Sustainability (NASSS) Framework to Identify Barriers and Facilitators for the Implementation of Digital Twins in Cardiovascular Medicine," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 23, no. 14, 2023, doi: [10.3390/s23146333](https://doi.org/10.3390/s23146333).
- [29] R. Ojsteršek, A. Javernik, and B. Buchmeister, "Optimizing smart manufacturing systems using digital twin," *Advances in Production Engineering & Management*, 2023, doi: [10.14743/apem2023.4.486](https://doi.org/10.14743/apem2023.4.486).
- [30] S. Abdoli, "Experimentable Digital Twin for Virtual Validation of Manufacturing Systems," in *Proceedings of the 2023 10th International Conference on Industrial Engineering and Applications*, 2023.
- [31] D. Lee et al., "Digital Twin-Based Analysis and Optimization for Design and Planning of Production Lines," *Machines*, vol. 10, no. 12, p. 1147, 2022.
- [32] Q. Charrier et al., "Towards the Augmentation of Digital Twin Performance," *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2023.
- [33] Y. Dong, Q. Chen, W. Ding, N. Shao, G. Chen, and G. Li, "State Evaluation and Fault Prediction of Protection System Equipment Based on Digital Twin Technology," *Applied Sciences*, vol. 12(15), p. 7539, 2022.
- [34] N. C. Schäfer, P. Burggräf, and T. Adlon, "Application of a Digital Twin for Proactive Production Planning," in *Day 2 Wed, September 28, 2022*, 2022, doi: [10.5957/smc-2022-058](https://doi.org/10.5957/smc-2022-058).
- [35] A. Zakharchenko and O. Stepanets, "Orchestration of model computing assets for the development of digital twins," *Modeling Control and Information Technologies*, 2023, doi: [10.31713/mcit.2023.072](https://doi.org/10.31713/mcit.2023.072).
- [36] L. Magalhães et al., "Conceiving a Digital Twin for a Flexible Manufacturing System," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 19, p. 9864, 2022, doi: [10.3390/app12199864](https://doi.org/10.3390/app12199864).
- [37] Q., Xie, E.J., Schenck, H. S., Yang, Y., Chen, Y., Peng and F. Wang, "Faithful AI in Medicine: A Systematic Review with Large Language Models and Beyond," *Research Square*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, 2023. DOI: [10.21203/rs.3.rs-3661764/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3661764/v1).
- [38] E., Hechler, M., Weihrauch and Y. Wu, "Data Fabric and Data Mesh Approaches with AI," *Apress*, vol. 4, pp. 1–19, 2023. DOI: [10.1007/978-1-4842-9253-2_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9253-2_8).
- [39] Y., Kang, H., Du, A., Forkan, P., Jayaraman, A., Aryani and T. Sellis, "ExpFinder: A Hybrid Model for Expert Finding From Text-based Expertise Data," *Expert Systems with Applications*, vol. 211, pp. 118691, 2023. DOI: [10.1016/j.eswa.2022.118691](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118691).
- [40] X. Li, J. Du, X. Wang, D. Yang, and B. Yang, "Research on Digital Twin Technology for Production Line Design and Simulation," in *ICMSO 2019*, 2019, pp. 516–522. doi: [10.1007/978-3-030-34387-3_64](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34387-3_64).
- [41] K. Židek, J. Pitel, M. Adamek, P. Lazorik, and A. Hošovský, "Digital Twin of Experimental Smart Manufacturing Assembly System for Industry 4.0 Concept," *Sustainability*, 2020, doi: [10.3390/su12093658](https://doi.org/10.3390/su12093658).
- [42] V. Makarov, A. Bakhtizin, and G. Beklaryan, "Developing digital twins for production enterprises," *Business Informatics*, vol. 13, no. 4, pp. 7–16, 2019, doi: [10.17323/1998-0663.2019.4.7.16](https://doi.org/10.17323/1998-0663.2019.4.7.16).

- [43] A. Ait-Alla, M. Kreutz, D. Rippel, M. Lütjen, and M. Freitag, "Simulation-based Analysis of the Interaction of a Physical and a Digital Twin in a Cyber-Physical Production System," in IFAC-PapersOnLine, 2019.
- [44] M. Glatt, C. Sinnwell, L. Yi, S. Donohoe, B. Ravani, and J. Aurich, "Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation," *Journal of Manufacturing Systems*, 2020.
- [45] S. Jeon and S. Schuesslbauer, "Digital Twin Application for Production Optimization," in 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2020, pp. 542–545.
- [46] B. Wang, L. Yuan, X. Yu, and L. Ou, "Construction and Optimization of Digital Twin Model for Hardware Production Line," in IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2020, pp. 4756–4761. doi: [10.1109/IECON43393.2020.9254967](https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254967).
- [47] Z. Huang, Y. Shen, J. Li, M. Fey, and C. Brecher, "A Survey on AI-Driven Digital Twins in Industry 4.0: Smart Manufacturing and Advanced Robotics," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 21(19), 2021.
- [48] K. Y. H. Lim, P. Zheng, and C.-H. Chen, "A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 31, no. 6, pp. 1313–1337, 2020, doi: [10.1007/s10845-019-01512-w](https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w).
- [49] R. S. Kenett and J. Bortman, "The digital twin in Industry 4.0: A wide-angle perspective," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 38, pp. 1357–1366, 2021.
- [50] S. Mihai et al., "Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 2255–2291, 2022, doi: [10.1109/COMST.2022.3208773](https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773).
- [51] H. Amthiou, M. Arioua, and T. Benbarrad, "Digital Twins in Industry 4.0: A Literature Review," in ITM Web of Conferences, 2023.
- [52] I. Halenár, M. Juhás, B. Juhásová, and D. Borkin, "Virtualization of Production Using Digital Twin Technology," in 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2019.
- [53] G. Korovin, "The Opportunities For Using Digital Twins In Industry," *Transbaikal State University Journal*, vol. 27, no. 8, pp. 124–133, 2021.
- [54] V. Kuts, T. Otto, Y. Bondarenko, and F. Yu, "Digital Twin: Collaborative Virtual Reality Environment for Multi-Purpose Industrial Applications," in Volume 2B: Advanced Manufacturing, 2020.
- [55] F. Pires, A. Cachada, J. Barbosa, A. Moreira, and P. Leitão, "Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges," in 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2019, pp. 721–726. doi: [10.1109/INDIN41052.2019.8972134](https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972134).
- [56] R. P. Rolle, V. O. Martucci, and E. P. Godoy, "Architecture for Digital Twin implementation focusing on Industry 4.0," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, pp. 889–898, 2020, doi: [10.1109/TLA.2020.9082917](https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082917).