

Gemelo digital aplicado a la logística interna: modernización de una sección de distribución en Temuco

Autor	Andres Atala Rosas
Correo	a.atala01@ufromail.cl
Fecha	04/09/2026

Resumen

Los gemelos digitales permiten representar dinámicamente activos y procesos físicos mediante modelos conectados a datos reales, lo que abre posibilidades para supervisión, simulación, mantenimiento y optimización industrial. Este informe evaluó la aplicación de Digital Twin en una sección logística hipotética de un centro de distribución masiva en Temuco, compuesta por cuatro montacargas, mediante revisión del material de la Semana 03, normas, literatura técnica, precios públicos de componentes y un modelo de costos con supuestos explícitos. El desarrollo de clase mostró que un gemelo digital no corresponde simplemente a una simulación o a una réplica visual: requiere un modelo que conserve relaciones causales relevantes, datos confiables y vinculación con el sistema físico mediante sensores, actuadores e interfaces (Alarcón, 2026b; Alarcón, 2026c). La propuesta consideró cuatro gemelos de activo y un gemelo supervisor de la zona, alojados en una plataforma común, con sensorización de vibración y temperatura, procesamiento en borde e integración de datos operacionales. El presupuesto de referencia obtenido fue de aproximadamente US\$117.000, equivalentes a CLP 110 millones al tipo de cambio observado del 2 de septiembre de 2026, con un rango de planificación aproximado entre US\$88.000 y US\$147.000 debido a incertidumbre de integración. Se concluye que un piloto acotado y escalable resulta más justificable que intentar digitalizar toda la instalación desde el inicio, especialmente cuando se consideran la fidelidad del modelo, la calidad de las mediciones y la necesidad de validar sus predicciones antes de utilizarlas para intervenir un proceso real.

1. Introducción

La automatización industrial ha evolucionado desde sistemas capaces de ejecutar acciones automáticas hacia arquitecturas en las que sensores, redes industriales, modelos matemáticos y software permiten observar, simular y anticipar el comportamiento de los procesos. Dentro de este contexto, el gemelo digital o Digital Twin constituye una herramienta de digitalización que mantiene una representación virtual vinculada con un activo, proceso o instalación real y que se actualiza a partir de datos operacionales.

NIST define el Digital Twin como una representación virtual de una entidad física o percibida del mundo real, mientras que su trabajo reciente destaca que un gemelo útil no corresponde solamente a un modelo estático: debe ser dinámico, estar impulsado por datos y mantener conexión y sincronización con su contraparte física. En manufactura, la norma ISO 23247 proporciona un marco específico para organizar esta tecnología y sus requisitos (ISO, 2021; Voas et al., 2025). Esta distinción coincide con el planteamiento desarrollado en la Semana 03, donde se recalcó que un gemelo digital utiliza modelos y datos vinculados al sistema físico y no es simplemente otro nombre para cualquier simulación (Alarcón, 2026b).

El caso trabajado en clases utilizó dos tanques en cascada para mostrar por qué el modelo es una parte central del gemelo digital. El objetivo consistía en llevar el segundo tanque al 80 % de su altura

máxima y mantenerlo en ese punto. La discusión mostró que una curva que ajuste altura versus tiempo no basta si no conserva la relación causal entre el caudal de entrada y la altura; además, una gráfica visualmente ordenada puede resultar engañosa cuando parte de sus puntos fueron interpolados y no medidos. Por ello, antes de utilizar un modelo para decidir sobre la planta deben conocerse la calidad de los datos, los supuestos físicos y el intervalo en que la representación es válida (Alarcón, 2026b; Alarcón, 2026c).

Para trasladar esos fundamentos a una decisión empresarial, se adoptó como caso hipotético una sección de logística interna de un centro de distribución masiva en Temuco. La sección contiene cuatro montacargas que realizan movimiento de pallets y se propone representarlos individualmente mediante gemelos digitales, además de disponer de un gemelo supervisor que integre el comportamiento de toda la zona. El caso no representa una instalación real de una empresa específica; se utiliza exclusivamente como escenario de ingeniería para estimar arquitectura, número de sistemas, costos, requisitos de integración y beneficios potenciales. Este enfoque coincide con la orientación entregada por el profesor para analizar la adquisición de una solución de Digital Twin considerando proveedores, costos, plazos, ventajas e integración con la planta (Alarcón, 2026c).

2. Objetivo

Evaluar la aplicación de tecnología de gemelo digital en una sección logística hipotética de un centro de distribución masiva en Temuco, mediante la definición de una arquitectura de Digital Twin, la estimación de la cantidad de sistemas y de su costo de implementación, y el análisis de requisitos de modelado, datos e integración, con el propósito de determinar un alcance razonable para una modernización industrial inicial.

3. Metodología

3.1. Enfoque y fuentes

El informe se desarrolló mediante revisión documental y estimación técnico-económica. Como fuente primaria del curso se revisaron la transcripción de cátedra del 31 de agosto y el laboratorio del 2 de septiembre de 2026. A partir de ese material se extrajeron los criterios de modelado, calidad de datos, integración de sensores e interpretación del Digital Twin discutidos durante la Semana 03. Luego se contrastaron esos fundamentos con definiciones y marcos de referencia de NIST e ISO y con literatura sobre usos industriales, beneficios, costos y ciberseguridad. Para el componente económico se utilizaron precios públicos de sensores y gateways industriales disponibles al 2 de septiembre de 2026, junto con un estudio académico de costos de desarrollo de Digital Twin en manufactura. Finalmente, se construyó un presupuesto de ingeniería mediante supuestos explícitos para un piloto de cuatro activos y un gemelo supervisor.

El costo se expresó en dólares estadounidenses (USD) y pesos chilenos (CLP). Para la conversión se mantuvo el dólar observado del Banco Central de Chile del 2 de septiembre de 2026, equivalente a CLP 936,86 por USD, fecha en que se efectuó la estimación económica original. Los valores corresponden a una estimación académica y no a una cotización comercial; por ello se incorporó un rango de planificación de $\pm 25\%$ alrededor del presupuesto central. El análisis distinguió además entre costos de hardware y aquellos asociados al desarrollo, calibración, integración y validación del modelo, coherente con lo observado en clase: disponer de sensores o de una réplica visual no garantiza por sí solo un gemelo digital útil.

El material de Semana 03 se utilizó como base conceptual para ampliar el informe. En particular, el caso de los dos tanques evidenció cuatro criterios aplicados posteriormente al escenario logístico: (1) el modelo debe relacionar entradas y salidas relevantes; (2) los datos deben provenir de procedimientos de medición trazables y no confundirse con valores interpolados; (3) las aproximaciones lineales deben declarar sus supuestos y validarse dentro del intervalo de operación; y

(4) la instrumentación analógica existente puede integrarse mediante conversión, adquisición y dispositivos de borde sin obligar a reemplazar todos los sensores (Alarcón, 2026b; Alarcón, 2026c).

3.2. Caso de estudio y supuestos

Se supuso una sección logística con cuatro montacargas que operan en recepción, almacenamiento y despacho. El alcance del piloto considera dos mediciones de condición por vehículo -vibración y temperatura en dos puntos críticos-, un gateway industrial por montacargas y acceso a variables ya disponibles en el equipo, como horas de operación, estado de batería, alarmas y posición cuando la interfaz del fabricante lo permita. Sobre esta base se definieron cuatro gemelos de activo y un gemelo supervisor de la zona. Siguiendo la lógica del caso de tanques, el propósito no es ajustar únicamente curvas históricas, sino conservar relaciones entrada-salida útiles, por ejemplo entre carga de trabajo, ruta, consumo de batería, temperatura, vibración, disponibilidad y tiempo de ciclo.

El modelo de costos separó hardware de adquisición de datos, conectividad e instalación, servicios de plataforma, trabajo de modelado e integración y una reserva para ciberseguridad, validación y capacitación. La partida de modelado e integración es deliberadamente la mayor, porque la literatura de costos de Digital Twin muestra que el desarrollo de modelos, software y actividades de datos puede superar ampliamente el costo del sensor físico (Su et al., 2025). Asimismo, la clase mostró que un modelo debe ser calibrado y contrastado con mediciones reales antes de utilizarse para tomar decisiones, por lo que la validación se considera una actividad del proyecto y no un paso opcional posterior (Alarcón, 2026c).

3.3. Uso de IA

Se utilizó ChatGPT, modelo GPT-5.6 Sol, para apoyar la investigación, contrastar fuentes, organizar el análisis formal, revisar cálculos, redactar el borrador y actualizar el documento con los materiales de Semana 03. Andres Atala Rosas seleccionó la temática de Gemelo digital (Digital Twin), definió el interés por una aplicación industrial concreta, proporcionó las transcripciones de clase y solicitó explícitamente que el informe se corrigiera para reflejar lo efectivamente visto durante la semana. La metodología fue compartida: el autor definió el foco y aportó las fuentes primarias del curso, mientras que la IA organizó el procedimiento de revisión, integración y redacción.

Evaluación de contribuciones realizada por GPT-5.6 Sol según el marco Ciencia Generativa (Alarcón, 2026a):

Andres Atala Rosas (Humano): Conceptualización, Metodología, Revisión y edición.

GPT-5.6 Sol (IA): Metodología, Investigación, Análisis formal, Redacción del borrador original y Revisión y edición.

La Validación no se asigna automáticamente al autor humano: corresponde incorporarla únicamente después de que revise las fuentes, supuestos, cálculos y conclusiones y confirme que el documento representa correctamente su trabajo.

4. Resultados

4.1. Definición y arquitectura del Digital Twin

De acuerdo con NIST, un Digital Twin es una representación digital de una entidad del mundo real. En aplicaciones industriales, su valor proviene de la conexión con datos de operación que permiten actualizar el estado del modelo. NIST identifica como elementos esenciales la sensorización, la conectividad IIoT, el manejo de datos y modelos capaces de apoyar análisis predictivos; ISO 23247 estructura estos componentes dentro de un marco específico para manufactura (NIST, 2025; ISO, 2021). El material de Semana 03 agrega un criterio operacional importante: el modelo debe conservar relaciones causales relevantes y sus predicciones deben contrastarse con mediciones antes de intervenir el sistema físico (Alarcón, 2026b; Alarcón, 2026c).

En el desarrollo de Semana 03, el caso de los tanques se utilizó para mostrar cómo un balance de caudales puede transformarse en una representación entrada-salida y, mediante una aproximación lineal, en una función de transferencia de primer orden. El objetivo pedagógico no fue afirmar que toda planta deba utilizar ese modelo específico, sino demostrar que un gemelo digital requiere una representación capaz de explicar cómo una entrada modifica el estado del proceso y que cualquier simplificación matemática debe validarse frente a datos reales (Alarcón, 2026c).

La arquitectura propuesta para el caso de Temuco se resume en la Tabla 1. Los cinco gemelos son entidades lógicas dentro de una misma solución de software; por tanto, no requieren cinco plataformas independientes. La arquitectura considera una capa de adquisición y borde porque, como se discutió en cátedra, incluso sensores analógicos existentes pueden conservarse si sus señales se digitalizan y se comunican mediante módulos de adquisición o dispositivos de borde (Alarcón, 2026b).

Tabla 1. Arquitectura propuesta de gemelos digitales para la sección logística.

Gemelo	Entidad física/proceso	Datos principales	Propósito
DT-MH1	Montacargas 1	Vibración, temperatura, batería, horas, alarmas, posición	Condición y operación del activo
DT-MH2	Montacargas 2	Vibración, temperatura, batería, horas, alarmas, posición	Condición y operación del activo
DT-MH3	Montacargas 3	Vibración, temperatura, batería, horas, alarmas, posición	Condición y operación del activo
DT-MH4	Montacargas 4	Vibración, temperatura, batería, horas, alarmas, posición	Condición y operación del activo
DT-ZONA	Zona logística	Estados de los cuatro activos, colas, rutas, disponibilidad y carga de trabajo	Vista supervisora, simulación y análisis de capacidad

El número requerido para el piloto es, por tanto, de cinco gemelos digitales lógicos: cuatro de nivel activo y uno de nivel proceso. A nivel físico se estiman ocho sensores combinados de vibración y temperatura -dos por montacargas- y cuatro gateways de borde. Si los montacargas ya exponen telemetría suficiente mediante su sistema de control, parte de la sensorización adicional podría eliminarse.

4.2. Estimación de costo del proyecto

Para construir la estimación se utilizaron como referencias públicas un sensor Banner QM30VT2 de temperatura y vibración listado a US\$320 y un gateway Siemens SIMATIC IOT2050 listado a US\$981,84. La literatura académica de Su et al. (2025) reporta que un Digital Twin de manufactura puede variar significativamente según la cantidad de señales y actividades de datos, con un caso de estudio entre £4.780 y £39.285 para dos años de servicio, y muestra que software, servicios y trabajo de desarrollo dominan el costo frente al hardware. La Tabla 2 presenta el presupuesto central adoptado para el piloto. El presupuesto no asume el reemplazo total de la instrumentación existente: cuando un activo ya dispone de señales útiles, estas podrían integrarse mediante adquisición o conversión, lo que puede reducir hardware pero no elimina el trabajo de integración, modelado y validación (Alarcón, 2026b).

Tabla 2. Presupuesto de referencia para un piloto de Digital Twin en cuatro montacargas y una zona logística.

Partida	Cálculo	USD	Base
Sensores vibración/temperatura	8 × US\$320	2.560	Precio público Banner QM30VT2
Gateways industriales	4 × US\$981,84	3.927	Precio público Siemens SIMATIC IOT2050
Montaje, cableado y conectividad	35 % del hardware anterior	2.271	Supuesto de ingeniería
Plataforma, almacenamiento y servicios cloud	Reserva anual	8.300	Supuesto alineado con costos de servicios reportados por Su et al. (2025)
Modelado, integración y desarrollo	Proyecto piloto de 5 gemelos lógicos	85.000	Supuesto de ingeniería calibrado con la literatura de costos de DT
Ciberseguridad, validación, capacitación y contingencia	15 % del subtotal	15.309	Supuesto de proyecto
TOTAL ESTIMADO		117.367	≈ CLP 109.956.000 al 02/09/2026

El presupuesto central corresponde aproximadamente a US\$117.000, equivalentes a CLP 110 millones. Aplicando un margen de ± 25 % para reflejar incertidumbre de integración, licencias, importación y disponibilidad de datos del fabricante, el rango de planificación es aproximadamente US\$88.000-US\$147.000, equivalente a CLP 82,5-137,4 millones. El cálculo no incluye IVA ni eventuales aranceles o costos específicos de importación.

4.3. Ventajas esperadas de la modernización

La literatura revisada permite identificar beneficios que son directamente aplicables al caso. La Tabla 3 relaciona cada ventaja con el mecanismo mediante el cual el gemelo digital podría aportar valor en la sección logística.

Tabla 3. Ventajas potenciales del Digital Twin en el caso de estudio.

Ventaja	Aplicación al caso	Evidencia/antecedente
Mantenimiento predictivo	Combinar vibración, temperatura, horas y alarmas para detectar degradación y priorizar inspecciones.	NIST identifica mantenimiento predictivo como uno de los principales usos de DT; McKinsey lo asocia a gemelos de activo.
Simulación de escenarios	Probar cambios de rutas, turnos, puntos de carga o incorporación de nuevos equipos antes de intervenir físicamente.	Los DT permiten análisis “what-if” y pruebas virtuales sin experimentos costosos o riesgosos en el activo real.
Detección de cuellos de botella	Integrar colas, disponibilidad y tiempos de ciclo para identificar puntos de bloqueo o espera.	McKinsey reporta casos de reducción de tiempo total de proceso cercana al 4 % mediante secuenciación apoyada por DT.
Optimización de costos y planificación	Evaluar programación de tareas, carga de baterías y utilización de activos con datos actualizados.	Un caso industrial citado por McKinsey logró ahorros mensuales de 5-7 % tras rediseñar la programación con un gemelo de fábrica.
Trazabilidad y decisión	Mantener una vista unificada del estado actual e histórico de los activos y del proceso.	NIST destaca que los DT permiten representar, diagnosticar, predecir, optimizar y controlar sus contrapartes.
Pruebas seguras y reducción del ensayo-error	Evaluar cambios de configuración, carga o reglas operacionales en el modelo antes de aplicarlos sobre equipos reales.	En Semana 03 se enfatizó que, ante procesos complejos o riesgosos, el análisis debe comenzar con antecedentes, modelos y simulaciones antes de intervenir el sistema real (Alarcón, 2026b).

4.4. Requisitos técnicos derivados del caso de Semana 03

Los fundamentos trabajados en clase permiten traducir el concepto de Digital Twin en requisitos concretos para una compra o integración industrial. Primero, la solución debe disponer de un modelo que relacione variables manipuladas y respuestas del proceso, no solo reproducir curvas históricas. Segundo, debe establecerse un procedimiento de adquisición y validación de datos que distinga claramente mediciones de estimaciones o interpolaciones. Tercero, si se utilizan modelos simplificados, debe declararse el rango de validez y calibrar sus parámetros con datos de operación. Cuarto, la arquitectura debe especificar cómo se conectarán sensores, actuadores y sistemas existentes, incluyendo conversión analógico-digital cuando corresponda. Finalmente, antes de usar el gemelo para recomendar cambios en la planta, sus predicciones deben compararse con el comportamiento real. Estos criterios se obtienen directamente del desarrollo de los tanques de Semana 03 y son aplicables al piloto logístico propuesto (Alarcón, 2026b; Alarcón, 2026c).

5. Discusión

A partir de los resultados, considero que el mayor valor de un gemelo digital en una sección logística no está en crear una representación tridimensional atractiva, sino en conectar una representación suficientemente fiel con datos confiables y utilizarla para responder preguntas operacionales concretas. Esta idea quedó especialmente clara en la cátedra: el supervisor del caso imaginaba una

réplica visual llamativa, pero la dificultad técnica real era determinar qué modelo y qué datos permitirían que esa representación fuera útil (Alarcón, 2026b). Si el sistema solo muestra una imagen virtual sin sincronización, relaciones causales ni validación, su aporte sería cercano al de una simulación aislada o un dashboard y no justificaría el costo de integración.

El caso de cinco gemelos lógicos parece razonable como piloto porque mantiene una escala suficientemente pequeña para validar la arquitectura y, al mismo tiempo, permite estudiar interacciones que no se observan al modelar una sola máquina. El gemelo supervisor es especialmente importante: cuatro montacargas pueden estar individualmente disponibles, pero el proceso completo puede seguir teniendo colas, recorridos ineficientes o conflictos en puntos de carga. Al igual que en los tanques, donde el interés no estaba en una sola medición de altura sino en comprender cómo las entradas y salidas determinaban el comportamiento del conjunto, el nivel de proceso permite observar relaciones que exceden a cada activo por separado.

La estimación económica muestra que los sensores y gateways representan una fracción menor del presupuesto. Esto coincide con Su et al. (2025), quienes muestran que el costo de un Digital Twin está dominado por software, datos, modelado e integración. La clase aporta una explicación concreta de por qué: incluso un modelo matemático aparentemente sencillo requiere definir variables, supuestos, parámetros, procedimiento de medición y validación experimental. Por ello, comprar sensores no equivale a implementar un gemelo digital; la inversión significativa aparece al construir modelos confiables, sincronizar fuentes de datos, calibrar la representación y mantenerla durante su ciclo de vida.

También existen limitaciones relevantes. La primera es la fidelidad del modelo: una predicción incorrecta puede inducir una decisión incorrecta. El ejercicio de Semana 03 mostró que una regla proporcional podía conducir a estimar 10 L/s para alcanzar 2 m, mientras que el balance físico basado en la descarga por raíz cuadrada llevó a una estimación preliminar cercana a 3,91 L/s; la diferencia ilustra el riesgo de asumir linealidad sin justificarla (Alarcón, 2026b; Alarcón, 2026c). La segunda limitación es la calidad de los datos: puntos interpolados no deben confundirse con mediciones y los procedimientos deben estandarizarse. La tercera corresponde al acceso a telemetría y a ciberseguridad. NIST IR 8356 advierte que los gemelos digitales heredan riesgos tradicionales y agregan desafíos derivados de la conexión entre representaciones digitales, instrumentación y sistemas de control. Por lo tanto, la modernización debería incorporar autenticación, segmentación de red, control de acceso, registro de eventos y validación continua del modelo desde la fase de diseño.

En cuanto al uso real de IA en este informe, su aporte fue alto en investigación, estructuración, cálculo y escritura. La actualización con las transcripciones de Semana 03 redujo un riesgo presente en la versión anterior: basar el documento casi exclusivamente en fuentes externas sin conectar suficientemente el análisis con lo discutido por el curso. La IA fue útil para sintetizar el material y relacionarlo con la estimación económica, pero la evidencia de clase también recuerda que una representación ordenada no garantiza validez; de manera análoga, un texto bien estructurado debe seguir siendo revisado contra sus fuentes, supuestos y cálculos. Antes de una inversión real sería necesario solicitar propuestas a integradores, confirmar protocolos de los montacargas, levantar la red existente y definir qué decisiones operacionales se espera que el gemelo apoye.

6. Conclusiones

El Digital Twin puede entenderse como una representación digital dinámica y conectada con una entidad o proceso real, cuyo valor industrial proviene de la sincronización de datos y de la capacidad de diagnosticar, simular, predecir u optimizar el comportamiento del sistema. El desarrollo de Semana 03 permite precisar que no basta con una réplica visual o un ajuste de curvas: la representación debe conservar relaciones relevantes entre entradas y salidas, utilizar datos confiables y ser validada frente al proceso físico.

Para el caso hipotético analizado se propone implementar cinco gemelos digitales lógicos -cuatro correspondientes a montacargas y uno supervisor de la zona- dentro de una plataforma común. Con los supuestos definidos, el proyecto piloto requiere aproximadamente ocho sensores adicionales, cuatro gateways de borde y una capa de software e integración que concentra la mayor parte del presupuesto. La arquitectura puede reutilizar parte de la instrumentación existente cuando sea técnicamente accesible, incorporándola mediante adquisición y procesamiento de borde.

La inversión central estimada es de aproximadamente US\$117.000 o CLP 110 millones, con un rango de planificación de US\$88.000-US\$147.000 debido a la incertidumbre propia de integración, licenciamiento y disponibilidad de datos. La cifra demuestra que el costo relevante de un gemelo digital no se encuentra solamente en los sensores, sino en el desarrollo, conexión, calibración, validación y mantenimiento de la representación digital.

El aporte concreto de la modernización sería disponer de una base digital para mantenimiento predictivo, análisis de capacidad, identificación de cuellos de botella y simulación de cambios antes de ejecutarlos físicamente. El material de clase refuerza especialmente este último beneficio: modelar y simular permite orientar pruebas más seguras y eficientes y reducir el ensayo-error sobre sistemas costosos o potencialmente riesgosos. Sin embargo, su conveniencia depende de que existan datos confiables, un propósito operacional definido, un modelo validado y controles adecuados de ciberseguridad. Por ello, para una empresa de tamaño medio resulta recomendable comenzar con un piloto acotado como el propuesto, medir su precisión y beneficios y solo después ampliar el gemelo hacia otras áreas de la instalación.

7. Licencia

Este trabajo se disponibiliza bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0), que permite compartir y adaptar el material siempre que se reconozca adecuadamente la autoría.

8. Bibliografía

- Alarcón, C. (2026a). Generative Science as an analytical framework for integrating the full capabilities of generative artificial intelligence into scientific research while preserving scientific recognition. *Generative Science Preprints*, 2026(07), 19055673.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.19055673>
- Alarcón, C. (2026b, 31 de agosto). Clase Semana 03 cátedra módulo 01: automatización, internet de las cosas y planteamiento del gemelo digital. Material docente del Curso de Automatización, Universidad de La Frontera.
- Alarcón, C. (2026c, 2 de septiembre). Modelado de un sistema de tanques para un gemelo digital. Laboratorio Semana 03, módulo 02. Material docente del Curso de Automatización, Universidad de La Frontera.
- Banco Central de Chile. (2026, 2 de septiembre). Indicadores diarios: dólar observado.
<https://si3.bcentral.cl/Bdemovil/BDE/IndicadoresDiarios>
- Camarella, S., Conway, M. P., Goering, K., & Huntington, M. (2024, 10 de enero). Digital twins: The next frontier of factory optimization. McKinsey & Company.
<https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization>
- DigiKey. (s.f.). Banner Engineering QM30VT2 - Temperature and vibration sensor.
<https://www.digikey.com/en/products/detail/banner-engineering-corporation/QM30VT2/10652478>
- DigiKey. (s.f.). Siemens SIMATIC IOT2050 (6ES76470BB001YA2).
<https://www.digikey.com/en/products/detail/siemens/6ES76470BB001YA2/22554264>
- International Organization for Standardization. (2021). ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing - Part 1: Overview and general principles.
<https://www.iso.org/standard/75066.html>
- Lin, S.-W., Watson, K., Shao, G., Stojanovic, L., & Zarkout, B. (2023). Digital Twin Core Conceptual Models and Services. Industry IoT Consortium.
<https://www.nist.gov/publications/digital-twin-core-conceptual-models-and-services>
- National Institute of Standards and Technology. (2025, 4 de diciembre). Essential Elements: Digital twins.
<https://www.nist.gov/digital-twins/essential-elements>
- Su, S., Nassehi, A., McClenaghan, A., Langridge, A., & Hicks, B. (2025). A methodology for estimating the cost of a digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 80, 841-858.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.04.004>
- Voas, J., Mell, P., Laplante, P., & Piroumian, V. (2025). Security and Trust Considerations for Digital Twin Technology (NIST IR 8356). National Institute of Standards and Technology.
<https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8356>