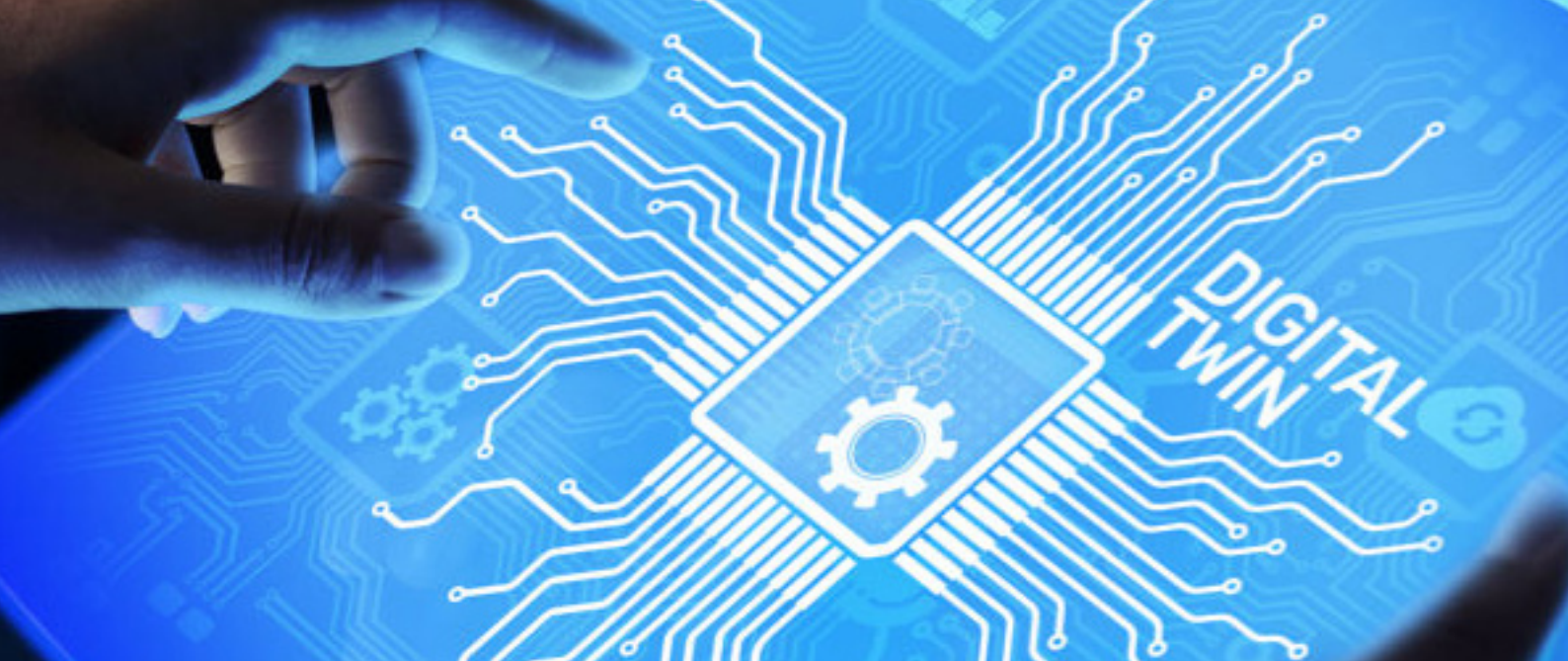




DESARROLLO DE UN GEMELO DIGITAL DE UNA FÁBRICA DE REFRESCOS

Development of a digital twin of a drink factory

RESUMEN

Los gemelos digitales son una de las tecnologías disruptivas presentadas desde la industria 4.0. La posibilidad de tener una representación digital de un sistema de producción brinda la oportunidad de simular y realizar análisis de los procesos industriales, detectar posibles fallas antes de que sucedan, evitando mantenimientos correctivos y además la posibilidad de mejorar su eficiencia generando estrategias de funcionamiento diferentes a las ya establecidas. A partir de la integración de las características técnicas de las plantas de producción, datos históricos de su comportamiento en el tiempo y la aplicación de técnicas de analítica, es posible obtener la representación digital de un sistema real. En este artículo se presenta el diseño e implementación del sistema digital de una fábrica de refrescos didáctica, conformada con equipos industriales. Se realiza

- Geraldine Bolaños Martínez
geraldine.bolanos@uao.edu.co - CEAI
- Ronny Alexis Londoño Martínez
ronny.londono@uao.edu.co - CEAI
- William Gutiérrez Marroquín
william.gutierrez@sena.edu.co - CEAI

AUTORES

la implementación de la representación digital de la fábrica didáctica, a partir de la recopilación de datos técnicos, modelado de piezas, adaptación de señales, diseño de la estrategia de control, comunicación entre dispositivos y validación del gemelo digital. El resultado obtenido es el gemelo digital, que en apariencia y funcionamiento simula con buena aproximación a la planta real. Con este modelo digital es posible

realizar técnicas de puesta en marcha del proceso de manera virtual y establecer comunicación con el sistema real.

Palabras Claves: Control, diseño, gemelo digital, modelado, puesta en marcha virtual, simulación, sistemas ciberfísicos.

ABSTRACT

Digital twins are one of the disruptive technologies introduced since Industry 4.0. The possibility of having a digital representation of a production system provides the opportunity to simulate and perform analysis of industrial processes, detect possible failures before they happen, avoiding corrective maintenance and also the possibility of improving its efficiency by generating operating strategies other than those already established. From the integration of the technical characteristics of the production plants, historical data of their behavior over time and the application of analytical techniques, it is possible to obtain the digital representation of a real system. This article presents the design and implementation of the digital system of a didactic soft drink factory, made up of industrial equipment. The implementation of the digital representation of the didactic factory is carried out, based on the collection of technical data, modeling of parts, adaptation of signals, design of the control strategy, communication between devices and validation of the digital twin. The result obtained is the digital twin, which in appearance and function closely simulates the real plant. With this digital model, it is possible to carry out virtual process start-up techniques and establish communication

with the real system.

Keywords: Control, design, digital twin, modeling, virtual commissioning, simulation, cyber-physical systems.

1. INTRODUCCIÓN

La industria 4.0 se desarrolla bajo el concepto de innovaciones tecnológicas como el internet de las cosas, la computación en la nube, el big data, la fabricación digital, la inteligencia artificial, entre otras, permitiendo que incluso los robots más complejos se conecten de forma remota a sistemas informáticos que supervisan los procesos físicos con muy poca intervención humana (L. Boone, 2019), (L. Joyanes, 2018). Las integraciones de estas tecnologías conforman los sistemas ciberfísicos, los cuales son la unión del mundo real con el mundo digital incorporando componentes físicos con elementos de cómputo, almacenamiento remoto de información y redes de comunicación; que además basan su funcionamiento en el concepto de “sistema de sistemas”. Las computadoras y redes integradas monitorean y controlan los procesos físicos, los cuales retroalimentan y afectan los cálculos y viceversa. Los sistemas ciberfísicos permiten ampliar la capacidad, adaptabilidad, escalabilidad, resiliencia, seguridad y usabilidad de los sistemas industriales actuales (D. U. Campos, 2018), (S. Sunder, 2012).

El aspecto clave de esta tecnología de ciberfísicos es el gemelo digital, una copia virtual de un sistema físico que simula su funcionamiento en tiempo real para optimizar procesos, prevenir errores y

analizar diferentes escenarios. Hasta hace pocos años el gemelo digital no era recurrente debido a las limitaciones de las tecnologías digitales de las empresas, sin embargo, el incremento de la disponibilidad y accesibilidad de los datos operativos en tiempo real, la reducción en los costos de implementación y el mejoramiento de la computación, tanto en las capacidades de IA como en la potencia de cómputo, han llevado a combinar las tecnologías de la información y las tecnologías operativas dando paso al gemelo digital, el cual permite a las empresas tener una huella digital de sus productos desde el diseño hasta el final de su ciclo de vida lo que amplía el conocimiento tanto del producto como del sistema que lo construye, esto además aumenta el valor en la comercialización, en el mejoramiento de los procesos, en la reducción de defectos y en nuevos modelos de negocio emergentes (A. Parrott & L. Warshaw, 2017), (C. Koulamas y A. Kalogeras, 2018).

El gemelo digital desarrolla un papel importante en la fabricación inteligente integrando diferentes etapas de manufactura y digitalizando los procesos a través de múltiples tecnologías con el objetivo de comunicar, analizar, predecir y optimizar los activos físicos (Q. Qi & F. Tao, 2018).

2. ANTECEDENTES TEORICOS

Los gemelos digitales son una tecnología que están en constante desarrollo y que han ido ganando popularidad a través de los últimos años; incluso la consultora Gartner la ha posicionado entre las 10 principales tendencias tecnológicas en los años 2017, 2018 y 2019 (Kasey Panetta,

2016), (Kasey Panetta, 2017), (Kasey Panetta, 2018); incluyendo además que la consultora planteó una relación entre el gemelo digital de una organización con la hiperautomatización, una de las tendencias tecnológicas del 2020 (Kasey Panetta, 2019). La idea del gemelo digital no surgió recientemente, las primeras definiciones se le atribuyen a Michael Grieves por su presentación acerca de gestión de ciclo de vida del producto a inicios del año 2000 (J. Camposano, K. Smolander, & T. Ruippo, 2021), (M. Grieves & J. Vickers, 2016). Desde ese tiempo empezó un crecimiento en la publicación de literatura acerca del concepto del gemelo digital, debido a esto se ha descrito de diversas formas, aun así la definición comúnmente aceptada es “una representación virtual interconectado a un sistema físico y actualizado mediante el intercambio de información” (E. VanDerHorn & S. Mahadevan, 2021), (M. Liu et al., 2020).

El concepto del gemelo digital permite crear y ampliar modelos de negocio basado en la supervisión y el control de sistemas; permitiendo gestionar ciclos de vida, estimar tiempos de vida, acelerar tiempos de producción, integrar enfoques de trabajo o probar escenarios en simulación (Malakuti et al., 2019), (A. Mussomeli et al., 2018). Sin embargo, aplicar este tipo de tecnología debe estar respaldado por un previo estudio sobre el valor agregado y la viabilidad de esta decisión para conocer su potencial y sus limitantes; y por consiguiente evitar tomar riesgos como añadir complejidad adicional a un proceso, aumentar costos en integración de nuevas tecnologías o directamente no satisfacer las necesidades necesarias (Sony Shetty, 2017). En (A.

Rasheed, O. San, & T. Kvamsdal, 2020) se exponen y analizan los desafíos que el gemelo digital debe abordar especialmente desde una perspectiva de modelado, así como las tecnologías que se deben desarrollar para tratar esos desafíos.

Dentro de las áreas de aplicación del gemelo digital hay sectores que pueden verse altamente beneficiados gracias a las ventajas que ofrece esta tecnología, como es el caso del sector de la salud que puede aprovechar la aparición de dispositivos digitales, almacenamiento organizado de dato, medicación personalizada y dirigida (A. Rasheed, O. San, & T. Kvamsdal, 2020). También se han expuesto ideas novedosas e innovadoras como por ejemplo la creación de prototipos de gemelos digitales para la realización de cirugías remotas (H. Laaki, Y. Miche, & K. Tammi, 2019). En (K. Bruynseels, F. Santoni, & J. van den Hoven, 2018) se detalla la aplicación en el cuerpo humano para la representación dinámica a nivel molecular, fisiológico y de estilo de vida a lo largo de la vida, obteniendo información biofísica importante de la persona. En (E. Oran et al., 2009) se propone el concepto de un hombre computacional, el cual permitirá ejecutar los principales sistemas fisiológicos del cuerpo humano, lo que permitirá analizar e indagar información relevante de estas zonas.

Otro sector beneficiado a futuro es la meteorología especialmente por la capacidad de prevención de los gemelos digitales basados en el manejo del big data. En (J. Lazo et al., 2011) se describe que la sensibilidad climática afecta en la producción económica de EE.UU, abriendo

camino a una aplicación del gemelo digital para estimar la variabilidad climática a partir de datos e historiales económicos y observaciones meteorológicas de años anteriores. Este tipo de aplicaciones para predecir datos es muy común en escenarios con gran variabilidad en alguno de sus aspectos. (P. Bauer, A. Thorpe & G. Brunet, 2015), (R. Ronda et al., 2017) son otros ejemplos de esto.

En las industrias de fabricación predomina la necesidad por abarcar modelos de manufactura que permitan la personalización del producto, pero además se buscan otras características como los servicios en la nube (T. Borangiu et al., 2019); el uso de macrodatos o big data que apoye el diseño, la fabricación y el servicio del producto (F. Tao et al., 2018); o como en (F. Tao et al., 2019) que se concluyó que el área de aplicación más popular es en el desarrollo de sistemas de pronóstico avanzado y gestión de la salud.

En el sector académico se puede lograr un impacto, principalmente indagando en aplicaciones donde predomine la personalización del aprendizaje y se optimice la enseñanza de los alumnos ajustándose a las necesidades de cada uno (H. Yu et al., 2017). Hay muchas propuestas donde se mejora el método de aprendizaje a través del manejo de datos; el mejoramiento de los medios y la disponibilidad de los recursos; y la implementación de entornos inteligentes (Y. Mitrofanova, A. Sherstobitova, & O. Filippova, 2019), (H. Peng, S. Ma, & J. Spector, 2019), (M. Abdel-Basset et al., 2019); las cuales se abordan desde la inteligencia artificial. Aun así la IA es una tecnología compatible con el

gemelo digital, y por lo tanto la integración de ambas es viable. Con la combinación de ambas tecnologías se vuelve posible la creación de tecnologías novedosas; en (S. Sepasgozar, 2010) se describen cinco tecnologías que incluyen además realidad aumentada y virtual agregando valor a la literatura que se imparte en el ámbito académico. Y así las áreas de aplicación del gemelo digital se extienden por muchos más sectores.

Por último, al momento de implementar un gemelo digital, la discusión acerca de que arquitectura usar toma importancia. Se pueden encontrar distintos artículos enfocados en definir una arquitectura que permita implementar y usar de manera eficiente un gemelo digital (S. Malakuti & S. Grüner, 2018), (K. Alam & A. El Saddik, 2017), (B. Ashtari et al., 2019), (Oracle Cloud, s.f.). Hay cuatro aspectos fundamentales; la estructura interna y su contenido; las APIS, que permitan el procesamiento e intercambio de información; una integración eficiente entre la contraparte física y digital; y un entorno de ejecución (S. Malakuti & S. Grüner, 2018). Aprovechando la integración del modelo de referencia de un sistema ciberfísico basado en la nube se logra escalar y potenciar el almacenamiento y procesamiento de datos (K. Alam & A. El Saddik, 2017). En (B. Ashtari et al., 2019) se discuten diferentes arquitecturas existentes y se propone una para gemelos digitales aplicado a un sistema de automatización inteligente. En (K. Park et al., 2020) se describe una arquitectura dedicada a la producción personalizada resolviendo las limitantes que se exponen relacionadas con la implementación de ese concepto.

3. METODOLOGÍA

El proceso de creación del gemelo digital se basó en recopilación de información, modelado de la planta, adaptación de sensores y actuadores al modelo, diseño del programa de control, comunicación entre modelo y planta, y por último la validación del proyecto, con el fin de lograr una puesta en marcha virtual o virtual commissioning (J. Brazina et al., 2020), (M. Grethler, J. Ovtcharova, & M. Marinov, 2020), (G. Barbieri et al., 2021).

Los softwares que se usaron en el proyecto fueron Solidworks, Siemens NX MCD, TIA Portal y Siemens PLCSIM Advanced.

En la primera etapa del proyecto se revisa la documentación técnica de la planta de Festo MPS PA en donde se analizan las hojas de datos de los componentes, los diagramas P&ID de cada estación y los manuales del sistema para conocer el funcionamiento y los elementos que conforman cada parte de la fábrica (Sistema completo MPS® PA 204, s. f.), (Technical details MPS, s. f.). En la figura 1 se puede ver el diagrama P&ID de la estación de llenado en el cual se pueden identificar los sensores y actuadores de la misma, así como la función y la posición de los elementos dentro de la planta. La figura 2 muestra los datos técnicos generales para todas las estaciones del sistema desde el cual se puede obtener información relevante para el diseño del gemelo digital como el caudal de la bomba, el volumen de los depósitos y las medidas de los tubos.

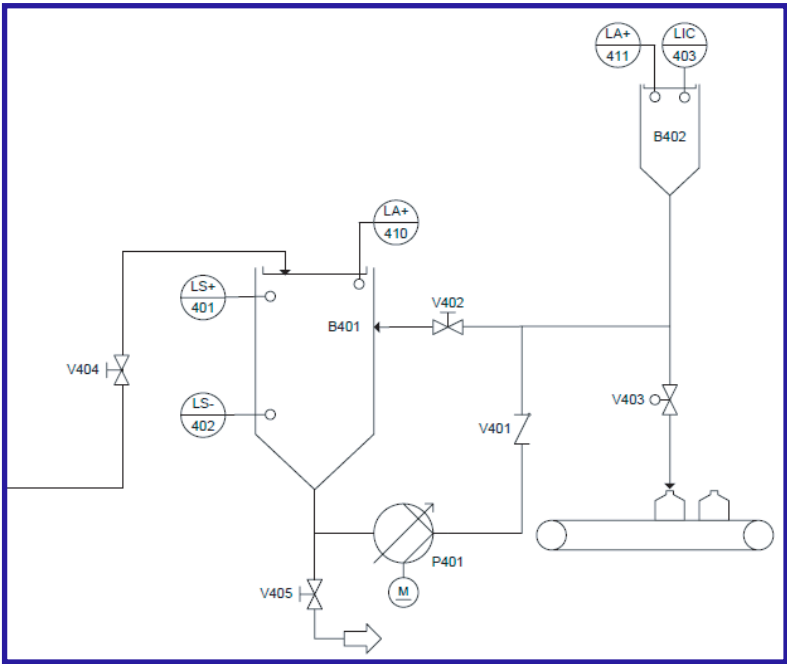


Figura 1. P&ID de la planta de llenado.

Una vez se identifica y reconoce cada componente del sistema se modela la planta, Esta etapa se desarrolla en Solidworks, aprovechando la versatilidad de esta herramienta. El modelado de los componentes se realiza con base a las medidas tomadas de la planta física y las hojas de datos de los elementos, además se usan modelos CAD de algunos componentes proporcionados por Festo y su catálogo virtual PARTdataManager. El ensamblaje se realiza de tal manera que coincidan con la forma en que está ordenada la planta real. En este software también se modela el elemento que representa el agua durante la simulación.

Parámetros		Valores
Presión de funcionamiento máxima en los tubos		50 KPa (0.5 bar)
Alimentación de tensión para la estación		24 V DC / 4,5 A
Panel de prácticas perfilado		700 x 700 x32 mm
Caudal de la bomba		0...6 l/min
Depósito de dosificación		3 l máx.
Depósito principal		10 l máx.
Sistema de tubos flexibles		DN15 (φ, 15mm)
Entradas digitales		8
Salidas digitales		6
Entradas analógicas		1
Salidas analógicas		1 (2)
Cantidad de recipientes		2
Margen de señales para actuadores	Bombas (0...24 VDC) con accionamiento del motor (digital)	On/Off (tensión de mando 24 VDC) 0...10 V
Margen de los emisores de señales	Sensor d e ultrasonido (analógico), eléctrico	Margen de medición 500...150 mm p...10 VDC

Tabla 1. Datos técnicos de las estaciones.

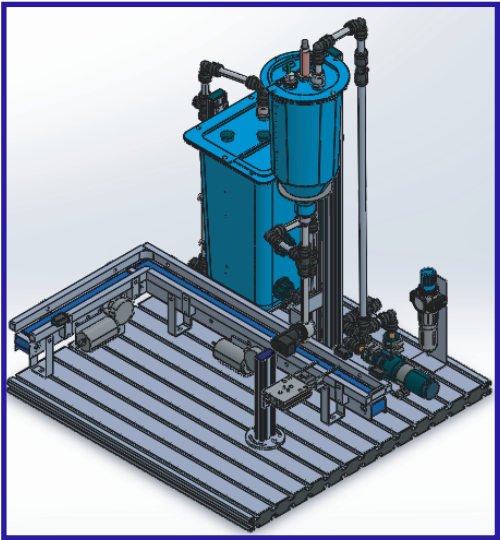


Figura 2. Modelado de la estación de llenado. [Imagen capturada del programa NX 12 MCD].

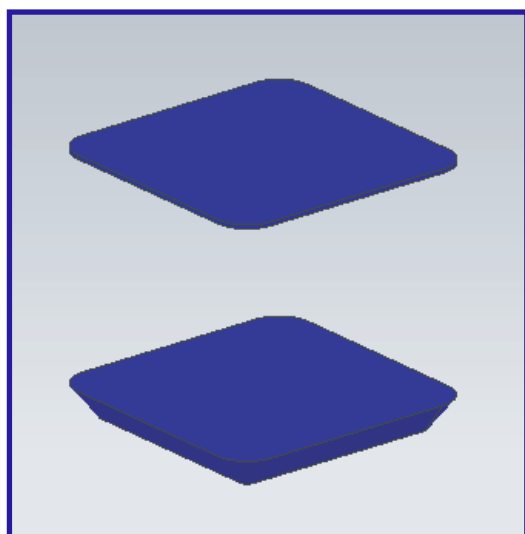


Figura 3. Modelado de la representación del agua. [Imagen capturada del programa NX 12 MCD].

Con respecto a NX 12 MCD, la revisión inicial de los manuales de operación de la aplicación (Siemens, s.f.), (Siemens ingennity for life, s.f.) confieren un mayor entendimiento en su uso. Este software permite dotar al modelo de la fábrica de todos los elementos necesarios para representar el proceso de funcionamiento de la misma, tales como sensores, actuadores y la física básica, junto con las restricciones de relación de los componentes que conforman el sistema, se establecen configuraciones para modificar la transparencia y el color de los depósitos. Para lograr esta etapa primero se definen los elementos que influyen directamente en el proceso a simular como cuerpos rígidos y de colisión, es decir que se les añade masa y una superficie capaz de interactuar con otras. Luego se crean las juntas y restricciones que limitan el movimiento de algunos elementos. Una

vez con la física básica y las restricciones creadas se añaden los sensores y controles para simular el comportamiento de sus contrapartes físicas. Se incluyen otros componentes como fuente de objetos, transformador de objetos, transmisores, etc. con el fin de recrear el proceso de la planta. Con todos los elementos necesarios para replicar el proceso de la fábrica, se definen todas las señales para comunicarse con el programa de control, que constan del estado de los sensores y los actuadores. Con las señales se crean las condiciones que controlan la activación de los componentes en el gemelo digital y rigen la secuencia de funcionamiento.

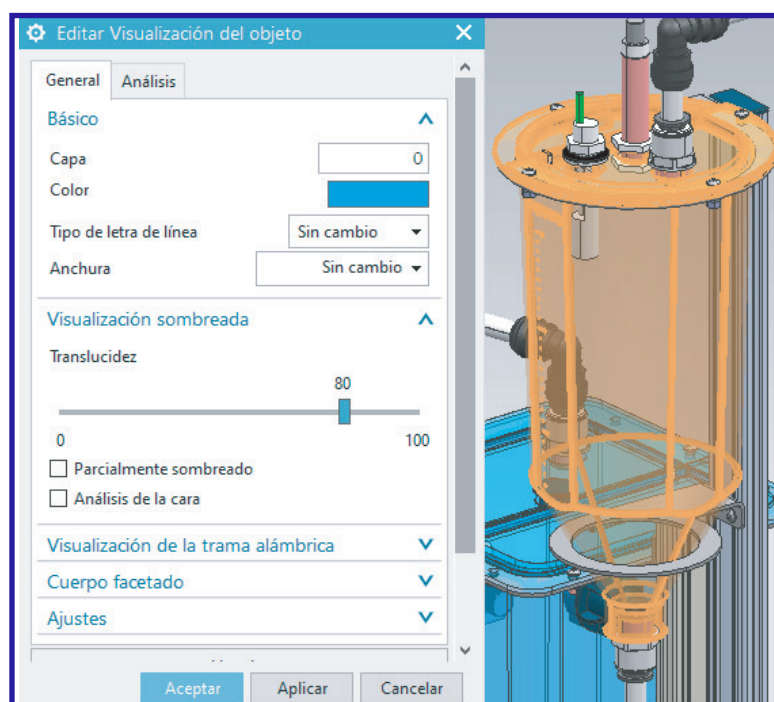


Figura 4. Modificación de la visualización de los depósitos. [Imagen capturada del programa NX 12 MCD].

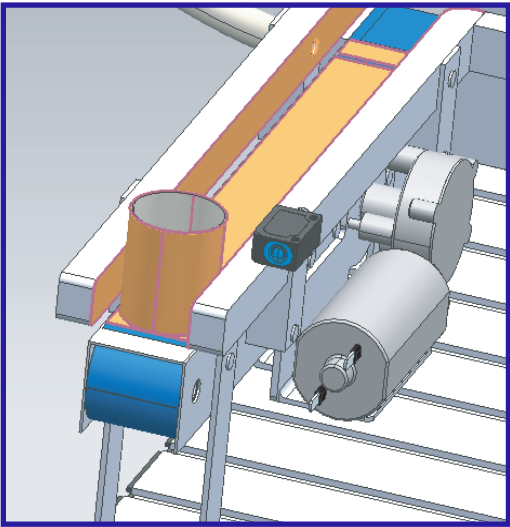


Figura 5. Configuración de cuerpos de colisión. [Imagen capturada del programa NX 12 MCD].

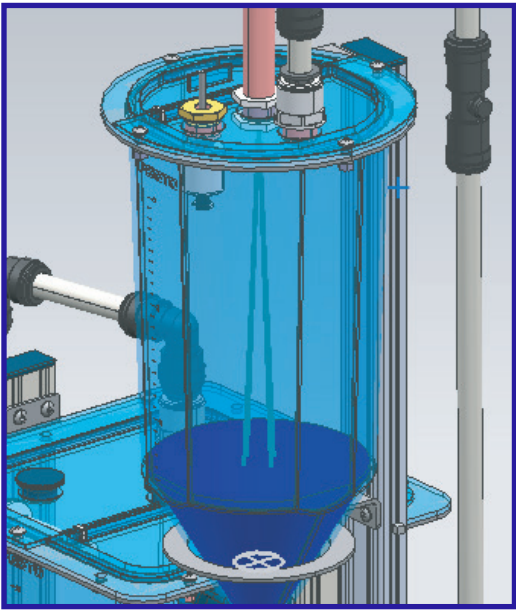


Figura 6. Sensor de distancia. [Imagen capturada del programa NX 12 MCD].

En el TIA Portal se implementa el código y la interfaz de usuario que controla al gemelo digital de acuerdo a su secuencia de funcionamiento. El código está organizado

en cuatro bloques de programa dentro del bloque Main, cada uno controlando el proceso de una estación y que constan a su vez de los bloques que rigen el algoritmo del sistema. La interfaz de usuario tiene un modo manual y uno automático.

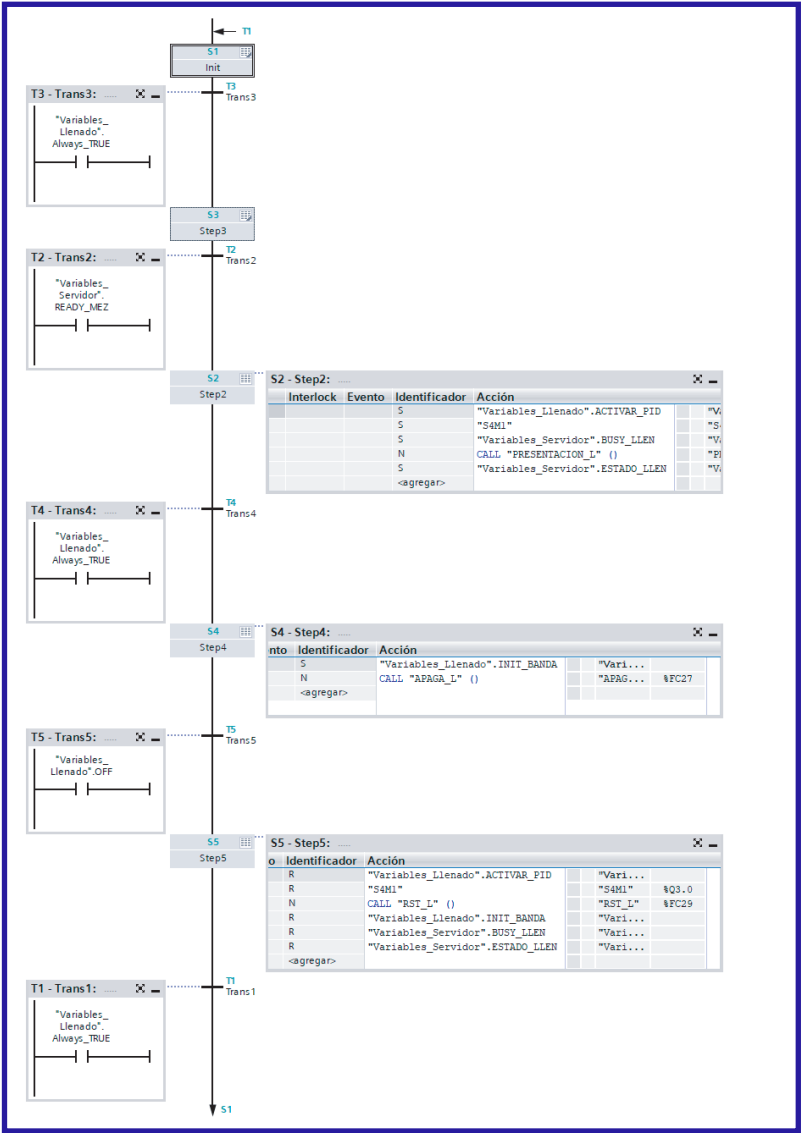


Figura 7. Grafcet de estación de llenado. [Imagen capturada del programa TIA Portal].

Para enlazar las señales del modelo de NX y las variables del TIA Portal se utiliza

la aplicación PLCSIM Advanced mediante la cual se crea una instancia de un PLC virtual en donde se carga el programa de control previamente compilado para la comunicación entre el modelo y el control.

Para la validación del proyecto se ponen en marcha la planta física y el gemelo digital de manera simultánea cargando el código tanto en el PLC virtual y el PLC físico y a través del sistema de supervisión implementado se puede interactuar con los dos sistemas y visualizar su comportamiento a la vez.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño del gemelo digital se basa en la réplica de la apariencia de la planta física y en la simulación de su proceso principal, por lo que es esencial el estudio de las especificaciones técnicas de cada componente de la planta y el funcionamiento de su rutina. La información recopilada de los manuales y hojas de especificaciones suministradas por la empresa Festo, permite diseñar un modelo 3D fiel de cada estación de la fábrica de refrescos; con estos modelos es posible simular cada uno de los procesos unitarios de la planta física, como lo son el proceso de filtración, calentamiento, mezcla y llenado.



Figura 8. Planta física.

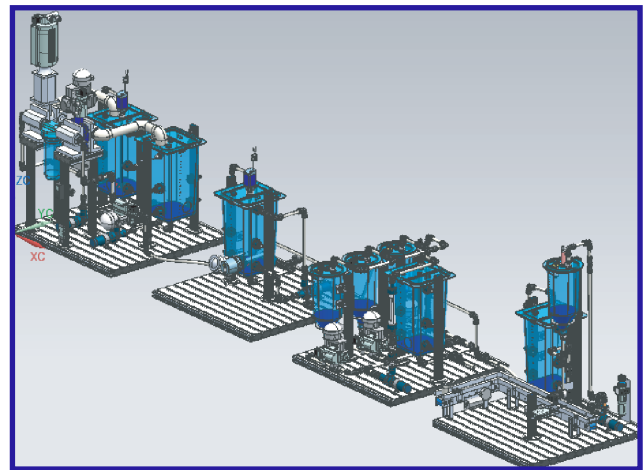


Figura 9. Planta virtual. [Imagen capturada del programa NX 12 MCD].

En las figuras 9 y 10 se muestran la planta física y la planta virtual respectivamente y en ellas se logra apreciar y comparar la similitud entre el mundo real y digital. En el funcionamiento principal de la máquina se destacan dos tipos de procesos, el llenado de agua en los depósitos (Figura 11) y el recorrido de los vasos en la banda transportadora (Figura 12). Ambos procesos son los que se simulan en el gemelo digital, estos se controlan bajo ciertas condiciones de activación en base a los actuadores y

sensores del sistema.

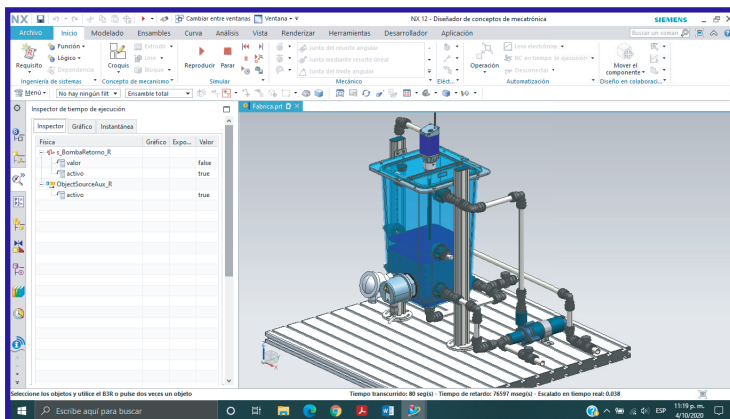


Figura 10. Llenado de agua en los depósitos. [Imagen capturada del programa NX 12 MCD].

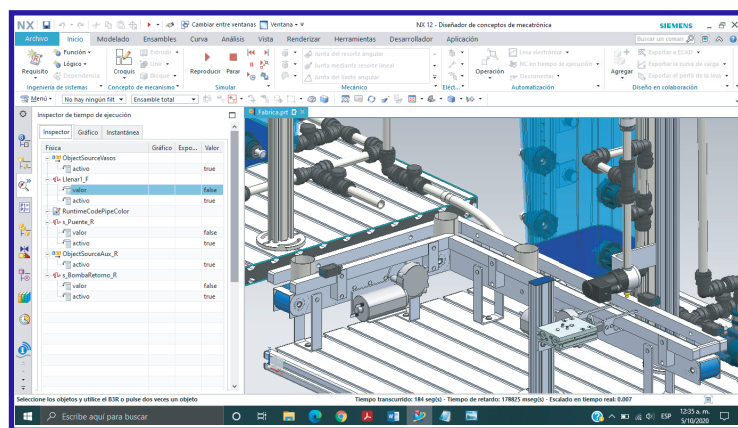


Figura 11. Recorrido de los vasos en la banda transportadora. [Imagen capturada del programa NX 12 MCD].

El gemelo digital funciona de manera simultánea con la planta física, controlados respectivamente con un PLC virtual (Figura 13) y uno físico con el programa de control cargado en cada uno de ellos. El programa consta del código en lenguaje ladder y una interfaz de usuario, que controla la activación de los actuadores de la máquina.

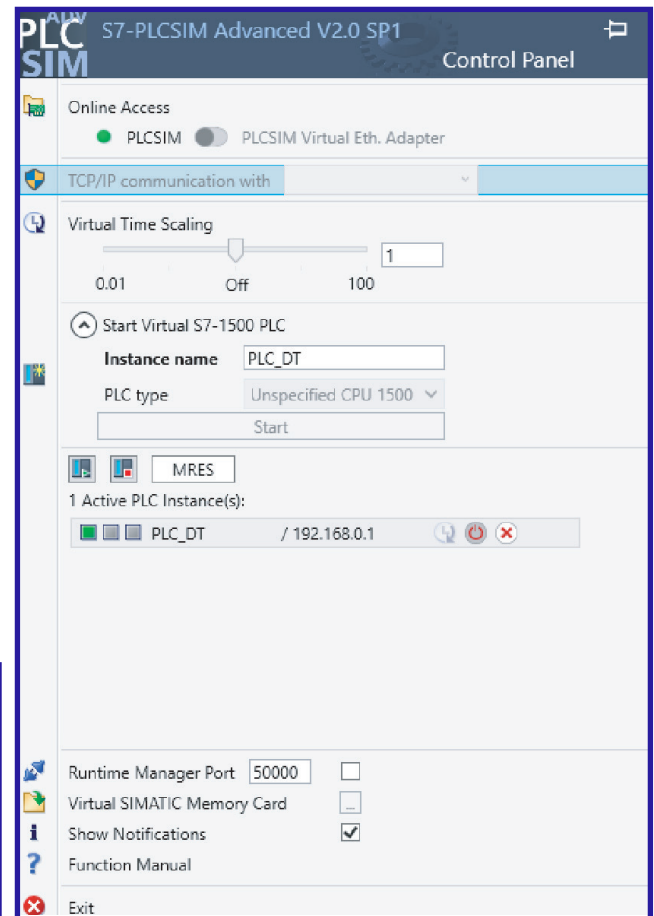


Figura 12. PLCSIM – PLC virtual. [Imagen capturada del programa PLCSIM].



Figura 13. Interfaz de usuario. [Imagen capturada del programa TIA Portal].

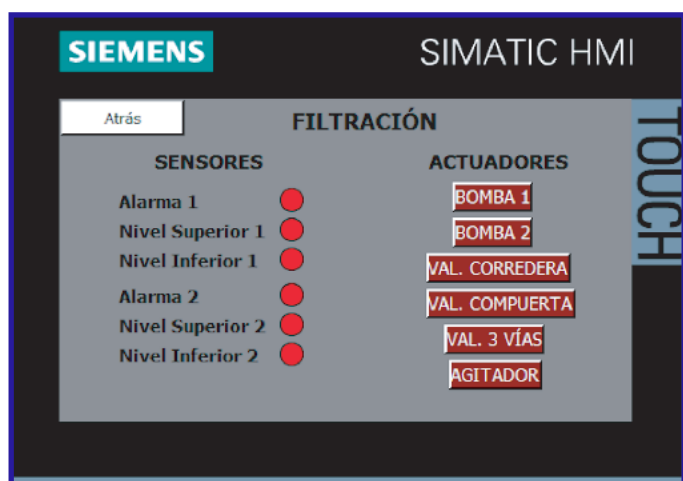


Figura 14. Interfaz de usuario modo manual.
[Imagen capturada del programa TIA Portal].

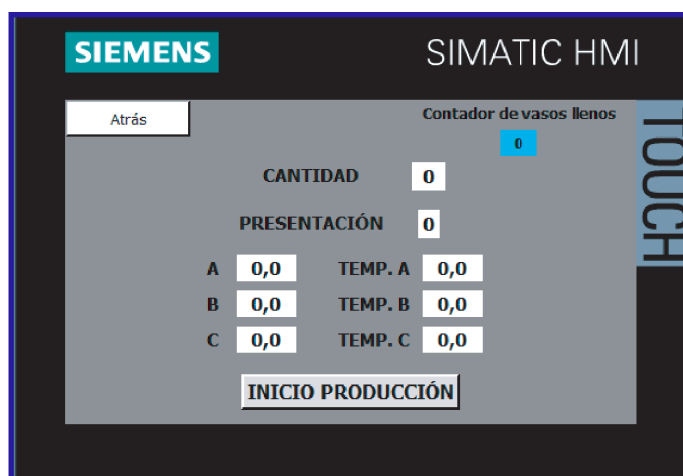


Figura 15. Interfaz de usuario modo automático.
[Imagen capturada del programa TIA Portal]

La interfaz de usuario (Figura 14), permite el accionamiento en forma manual y automática del sistema de control. En el modo manual (Figura 15) se puede controlar en forma individual los actuadores de una estación de la planta, a la vez que se puede visualizar el estado de los sensores. El modo automático (Figura 16) permite poner en funcionamiento

el proceso general del sistema e ingresar los parámetros necesarios, cantidad de productos, presentación y receta.

El gemelo digital desarrollado funciona como un sistema de puesta en marcha virtual que permite principalmente preparar el entorno físico relacionado, observar los tiempos de producción y simular escenarios. Al tratarse de un sistema que usa un líquido como su flujo de material principal, no se presentan cálculos de esfuerzos; además teniendo en cuenta las herramientas propias del software (Siemens NX MCD) tampoco hay análisis de temperatura, presión o flujo.

Un gemelo digital diseñado con tecnologías más potentes aporta en la mejora de la competitividad de los modelos de negocio, los procesos de toma de decisiones, la calidad de la producción y la innovación continua dentro del entorno de la industria, así como en la reducción de costes, en el tiempo de producción y en la prevención de riesgos. De esta manera se pueden probar todas las tecnologías antes de aplicarlas e integrarlas en el mundo real evaluando pros y contras (Redacción APD, 2020), (Jan Howells, 2019).

Es indiscutible que a nivel industrial, la reducción de tiempos y costos es la mayor ventaja de integrar el gemelo digital a los procesos, permitiendo poseer sistemas ciberfísicos capaces de realizar puestas en marcha virtual de sistemas de fabricación, lo que se traduce en el incremento de la calidad final y en toma de decisiones acertadas (M. Ayani, M. Ganebäck, & A. H. C. Ng, 2018), (Q. Qi et al., 2018), (K. Lim, P. Zheng, & C. Chen, 2020).

La implementación del gemelo digital se realiza en un sistema didáctico de fabricación, pero esto no limita su aplicación a un entorno industrial real, dada las características técnicas de los componentes del sistema didáctico y las aplicaciones utilizadas. El modelo digital consta de todos los componentes mecánicos e hidráulicos que actúan en el proceso permitiendo identificar y analizar cómo se compone la planta, listar los componentes o estudiar las funcionalidades de los elementos en el proceso. Por otro lado, la conexión entre los sensores y actuadores virtuales y físicos permite seguir de cerca el proceso que se lleva a cabo en la fábrica; incluso si no se dispone de la planta física, se pueden simular escenarios e incluso cambiar el valor de ciertas características en la simulación, como por ejemplo variar el caudal de entrada del primer tanque. Con esto dicho, el proyecto se puede seguir complementado a futuro para lograr una eficiencia mayor en los objetivos que se plantean.

Para lograr emular la planta virtual se hace indispensable el disponer de herramientas con alto desempeño computacional y una buena capacidad de almacenamiento. El modelo creado usa en promedio 90 niveles de agua por tanque lleno, es decir que añade un modelo CAD adicional cada vez que se emule el aumento del nivel del agua de los tanques para representar una porción del agua. Esto representa un gran carga computacional que se debe sobrellevar con un equipo capaz de correr la emulación del gemelo digital de manera eficiente, ya que el funcionamiento en paralelo de la planta física y virtual es una de los aspectos más importantes del proyecto.

5. CONCLUSIONES

- Se logra analizar de manera precisa las ventajas que un gemelo digital tiene a la hora de ser implantado en el sector industrial. Las principales ventajas de esta tecnología son la disminución de costes y tiempo producción, es decir, la optimización de procesos, el poder controlar las operaciones y poder simular cambios o mejoras en las máquinas sin necesidad de usar la planta física.
- Las tecnologías emergentes de la industria 4.0 se pueden combinar entre sí para un mejor rendimiento y disminuir la complejidad de conexión, como es el caso de la relación entre el gemelo digital y el virtual commissioning que se dio durante desarrollo de este proyecto.
- En cuanto a la parte de diseño tanto el software NX MCD, como Solidworks cumplen funciones específicas en el proceso de elaboración del gemelo digital. Por un lado Solidworks permitió modelar y ensamblar de manera fácil y rápida los modelos 3D; mientras que NX MCD permitió añadir las funcionalidades y simulaciones del gemelo digital de manera más completa.
- Al tener la máquina real ya lista, es decir, diseñada y montada facilita enormemente el desarrollo de su copia digital, debido a que se tienen a la mano planos, mediciones, especificaciones y se sabe la funcionalidad de cada parte de la máquina, y además se tiene la posibilidad de poder estudiar formas factibles de optimización de diferentes factores.
- El diseño de un gemelo digital se ve

mayormente beneficiado cuando se encuentra la información suficiente para modelar las piezas de una planta de manera fiel a la realidad al igual que al conocer en mayor profundidad el funcionamiento de la planta y como trabajan todas sus partes lo que permite crear una lógica de control mejor estructurada que abarque todas las funcionalidades del activo físico. Aunque este último aspecto también se ve afectado por la capacidad de la máquina en la que se simula el gemelo digital.

- Se espera que la implementación del modelo digital facilite el aprendizaje fuera de línea de un proceso con características industriales, para posteriormente utilizar el sistema físico real, esto garantiza una mejor utilización de los recursos disponibles y la posibilidad de entrenamiento evitando posibles daños a los sistemas reales.
- Como sugerencia para futuros proyectos relacionados a gemelos digitales, es recomendable analizar los recursos computacionales con los que se cuenta antes de iniciar un proyecto que pueda requerir mayor potencia de la que se dispone.

AGRADECIMIENTOS

En este apartado queremos agradecer a Ángela Patricia Ibarra Quiroga, subdirectora del Centro de Electricidad y Automatización Industrial (CEAI) por brindarnos la oportunidad de realizar nuestra pasantía en la institución a cargo para optar por el título de ingeniero mecatrónico en la Universidad Autónoma de Occidente.

Referencias

- A. Mussomeli, B. Meeker, S. Shepley, and D. Schatsky. (2018). "Signals for Strategists Expecting digital twins Adoption of these versatile avatars is spreading across industries."
- A. Parrott y L. Warshaw. (2017). "Industry 4.0 and the Digital Twin," Deloitte University Press, 2017. <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
- A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal. (2020). "Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective," IEEE Access, vol. 8, pp. 21980–22012, 2020. 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
- B. Ashtari Talkhestani et al. (2019). "An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System," At-Automatisierungstechnik, vol. 67, no. 9, pp. 762–782, Sep. 2019. 10.1515/auto-2019-0039.
- C. Koulamas y A. Kalogeras. (2018). "Cyber-Physical Systems and Digital Twins in the Industrial Internet of Things", Computer, vol. 51, pp. 95-98, nov., 2018. 10.1109 / MC.2018.2876181. <https://www.computer.org/csdl/magazine/co/2018/11/08625931/17D45WYQJ7p>
- D. U. Campos Delgado. (2018). "¿Qué Son Los Sistemas Ciberfísicos?," Universitarios Potosinos. Divulgando Mirador de la Ciencia, pp. 36 – 37, no. 224, jun., 2018. <http://www.uaslp.mx/ComunicacionSocial/Documents/Divulgacion/Revista/Quince/universitarios%20potosinos%20224.pdf>
- E. S. Oran, C. R. Kaplan, K. Kailasanath, and J. P. Boris. (2009). "The Computational Man: A Predictive Dynamic Model of Human Physiology,"

- E. VanDerHorn and S. Mahadevan. (2021). "Digital Twin: Generalization, characterization and implementation," *Decis. Support Syst.*, p. 113524, Feb. 2021. 10.1016/j.dss.2021.113524.
- F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee. (2019). "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, Apr. 2019. 10.1109/TII.2018.2873186.
- F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui. (2018). "Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 9–12, pp. 3563–3576, Feb. 2018. 10.1007/s00170-017-0233-1.
- G. Barbieri et al. (2021). "A virtual commissioning based methodology to integrate digital twins into manufacturing systems," *Prod. Eng.*, vol. 1, p. 3, Mar. 2021. 10.1007/s11740-021-01037-3.
- H. Laaki, Y. Miche, and K. Tammi. (2019). "Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control over Mobile Networks: Application of Remote Surgery," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 20235–20336, 2019. 10.1109/ACCESS.2019.2897018.
- H. Peng, S. Ma, and J. M. Spector. (2019). "Personalized adaptive learning: an emerging pedagogical approach enabled by a smart learning environment," *Smart Learn. Environ.*, vol. 6, no. 1, p. 9, Dec. 2019. 10.1186/s40561-019-0089-y.
- H. Yu, C. Miao, C. Leung, and T. J. White. (2017). "Towards AI-powered personalization in MOOC learning," *npj Sci. Learn.*, vol. 2, no. 1, p. 15, Dec. 2017. 10.1038/s41539-017-0016-3.
- J. Brazina, J. Vetiska, V. Stanek, F. Bradac, and M. Holub. (2020). "Virtual commissioning as part of the educational process," in *Proceedings of the 2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika*, ME 2020, Dec. 2020. 10.1109/ME49197.2020.9286613.
- J. C. Camposano, K. Smolander, and T. Ruippo. (2021). "Seven metaphors to understand digital twins of built assets," *IEEE Access*, pp. 1–1, Feb. 2021. 10.1109/access.2021.3058009.
- J. K. Lazo, M. Lawson, P. H. Larsen and D. M. Waldman. (2011). "US economic sensitivity to weather variability", *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, vol. 92, no. 6, pp. 709-720, 2011.
- Jan Howells (2019). "Virtual siblings reduce the cost of prototyping | Orange Business Services." <https://www.orange-business.com/en/blogs/digital-twins-virtual-siblings-reduce-cost-real-world-prototyping>
- K. Bruynseels, F. Santoni de Sio, and J. van den Hoven. (2018). "Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm," *Front. Genet.*, vol. 9, no. FEB, p. 31, Feb. 2018. 10.3389/fgene.2018.00031.
- K. M. Alam and A. El Saddik. (2017). "C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 2050–2062, 2017. 10.1109/ACCESS.2017.2657006.
- K. T. Park, J. Lee, H. J. Kim, and S. Do Noh. (2020). "Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 106, no. 5–6, pp. 1787–1810, Jan. 2020. 10.1007/s00170-019-04653-7.
- K. Y. H. Lim, P. Zheng, and C. H. Chen. (2020). "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. Springer, pp. 1313–1337, Aug. 01, 2020. 10.1007/s10845-019-01512-w.
- Kasey Panetta. (03 de octubre de 2017). Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2018. Smarter With Gartner. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018/>
- Kasey Panetta. (15 de octubre de 2018). Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. Smarter With Gartner. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/>
- Kasey Panetta. (18 de octubre de 2016). Gartner's Top 10 Strategic Technology Trends for 2017. Smarter With Gartner. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017/>
- Kasey Panetta. (21 de octubre de 2019). Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2020. Smarter With Gartner. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2020/>
- L. Boone. (2019). "Industry 4.0 (Fourth Industrial Revolution)," Salem Press Encyclopedia. Salem Press. <http://ezproxy.uao.edu.co:2048/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=119214086&lang=es&site=eds-live>
- L. Joyanes Aguilar (2018). "Industria 4.0: La cuarta Revolución Industrial," Alfaomega: Bogotá, 1a ed., p. 271.
- M. Abdel-Basset, G. Manogaran, M. Mohamed and E. Rushdy. (2019). "Internet of Things in smart education environment: Supportive framework in the decision-making process", Concurrency Comput. Pract. Exper., vol. 31, no. 10, May 2019.
- M. Ayani, M. Ganebäck, and A. H. C. Ng. (2018). "Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning," in Procedia CIRP, Jan. 2018, vol. 72, pp. 243–248. 10.1016/j.procir.2018.03.139.
- M. Grethler, J. Ovtcharova, and M. B. Marinov. (2020). "Service prototyping based on digital twins for virtual commissioning scenarios," in 11th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2020 - Proceedings, Jul. 2020. 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305142.
- M. Grieves and J. Vickers. (2016). "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems," in Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches, Springer International Publishing, 2016, pp. 85–113.
- M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu. (2020). "Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications," J. Manuf. Syst., vol. 58, pp. 346–361, Jan. 2020. 10.1016/j.jmsy.2020.06.017.
- Malakuti, Somayeh & Schlake, Jan & Ganz, Christopher & Harper, K. Eric & Petersen, Heiko. (2019). Digital Twin: An Enabler for New Business Models.
- Oracle Cloud (s.f.). "About the Oracle IoT Digital Twin Implementation." <https://docs.oracle.com/en/cloud/paas/iot-cloud/iotgs/oracle-iot-digital-twin-implementation.html>
- P. Bauer, A. Thorpe and G. Brunet (2015). "The quiet revolution of numerical weather prediction", Nature, vol. 525, no. 7567, pp. 47-55, Sep. 2015.
- Q. Qi and F. Tao. (2018). "Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison," IEEE Access, vol. 6, pp. 3585-3593, 2018. 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
- Q. Qi, F. Tao, Y. Zuo, and D. Zhao. (2018). "Digital Twin Service towards Smart

- Manufacturing,” in *Procedia CIRP*, Jan. 2018, vol. 72, pp. 237–242. 10.1016/j.procir.2018.03.103.
- R. J. Ronda, G. J. Steeneveld, B. G. Heusinkveld, J. J. Attema and A. A. M. Holtslag. (2017). “Urban finescale forecasting reveals weather conditions with unprecedented detail”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 98, no. 12, pp. 2675-2688, Dec. 2017.
- Redacción APD. (2020). ¿Qué es un Gemelo Digital? Ventajas de trabajar sobre la ‘copia exacta’ de tu modelo de negocio. “apd”. <https://www.apd.es/que-es-gemelo-digital-ventajas/>
- S. M. E. Sepasgozar. (2010). “Digital Twin and Web-Based Virtual Gaming Technologies for Online Education: A Case of Construction Management and Engineering,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 13, p. 4678, Jul. 2020. 10.3390/app10134678.
- S. Malakuti and S. Grüner. (2018). “Architectural aspects of digital twins in IIoT systems,” in *ACM International Conference Proceeding Series*, Sep. 2018, pp. 1–2. 10.1145/3241403.3241417.
- S. S. Sunder. (2012). “Cyber-Physical Systems”. UC Berkeley, Mar. 2012. <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/cps/>
- Siemens ingenuity for life. (s.f.). “Diseño de conceptos mecatrónicos | Siemens Digital Industries Software.” <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/mechanical-design/mechatronic-concept-design.html>
- Siemens. (s.f.). “Documentación de Siemens: Ayuda de NX 12.” https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help/#uid:index
- Sistema completo MPS® PA 204 (s. f.). “<https://www.festo-didactic.com/>”
- <https://www.festo-didactic.com/es-es/productos/automatizacion-de-procesos/estaciones/sistema-completo-mps-pa-204.htm?fbid=ZXMuZXMuNTQ3LjE0LjE4LjEwODluNDc4NA>.
- Sony Shetty. (08 de junio de 2017). How to Use Digital Twins in Your IoT Strategy. Smarter With Gartner. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/how-to-use-digital-twins-in-your-iot-strategy/>
- T. Borangiu, D. Trentesaux, A. Thomas, P. Leitão, and J. Barata. (2019). “Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization,” *Computers in Industry*, vol. 108. Elsevier B.V., pp. 150–162, Jun. 01, 2019. 10.1016/j.compind.2019.01.006.
- Technical details MPS PA (Colección de hojas de datos) (s. f.). “<https://www.festo-didactic.com/>” <https://www.festo-didactic.com/es-es/servicio-y-asistencia/software/mps-pa/technical-details-mps-pa.htm?fbid=ZXMuZXMuNTQ3LjE0LjMyLjE1NTguNjM5Nw>
- Y. S. Mitrofanova, A. A. Sherstobitova, and O. A. Filippova. (2019). “Modeling smart learning processes based on educational data mining tools,” in *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2019, vol. 144, pp. 561–571. 10.1007/978-981-13-8260-4_49.