

## El Gemelo Digital y su aplicación en la Automática

William D. Chicaiza<sup>a</sup>, Javier Gómez<sup>a</sup>, Adolfo J. Sánchez<sup>b</sup>, Juan M. Escaño<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Dept. de Ing. de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla, España.

<sup>b</sup>Department of Mechanical, Biomedical, Munster Technological University, Cork, Bishopstown, Ireland

**To cite this article:** Chicaiza, William D., Gómez, Javier, Sánchez, Adolfo J., Escaño, Juan M. 2024. Digital Twin: applications in Automatic Control. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 21, 91-115. <https://doi.org/10.4995/riai.2024.20175>

### Resumen

Una de las tecnologías más atractivas y actualmente en auge que se está desarrollando rápidamente es el Gemelo Digital (*Digital Twin* en inglés, *DT*). Es bien conocido como un habilitador para la Industria 4.0. Tanto en la comunidad científica como industrial, el concepto, la tecnología y las aplicaciones asociadas al mismo, van generando controversia. Sigue habiendo una gran variedad de definiciones del mismo concepto. Aparentemente no parece haber una comprensión común de este término en la literatura. Se utiliza de forma diferente en diferentes disciplinas. La simulación basada en modelos ha sido, desde hace mucho tiempo, una herramienta común para el diseño en una fase inicial de planificación, pero no durante el tiempo de trabajo del sistema ya diseñado. En este trabajo se pretende abarcar una revisión histórica de este concepto. Mientras que muchas revisiones bibliográficas existentes se centran principalmente en la industria de manufactura, este artículo hará un enfoque en aplicaciones de los gemelos digitales en el campo de la Automática.

*Palabras clave:* Gemelo Digital, Automática, Observadores y predictores, Sistemas ciber-físicos en control, Simuladores.

### Digital Twin: applications in Automatic Control

#### Abstract

One of the most attractive and currently booming technologies that is rapidly developing is the Digital Twin (DT). It is well known as an enabler for Industry 4.0. In both the scientific and industrial community, the concept, the technology and the applications associated with it, are generating more and more controversy. There is still a wide variety of definitions of the same concept. There does not seem to be a common understanding of the term in the literature. It is used differently in different disciplines. Model-based simulation has long been a common tool for design in an initial planning phase, but not during the working time of the designed system. This paper aims to provide a historical review of this concept. While many reviews of existing literature focus mainly on the manufacturing industry, this paper will focus on the applications of digital twins in the field of automatic control.

*Keywords:* Digital Twin, Automatic Control, Observers and predictors, Cyber-physical systems in control, Simulators.

### 1. Introducción

Los Gemelos Digitales representan la convergencia entre la tecnología digital y la física. Estos utilizan modelos para representar sistemas físicos en un entorno virtual, para simular su comportamiento, estado y rendimiento. Los modelos son una herramienta central en la automática y juegan un papel crucial en el diseño, análisis y control de sistemas dinámicos. En este

estudio, se llevará a cabo una revisión exhaustiva del concepto de Gemelo Digital, con un enfoque particular en su aplicación en el ámbito de la Automática, a diferencia de revisiones anteriores que han centrado su atención principalmente en la industria manufacturera.

Trabajos previos en esta revista han tratado la temática concerniente al Gemelo Digital en el ámbito de la industria de procesos (de Prada et al., 2022). No obstante, hasta el momento no

\*Autor para correspondencia: [jescano@us.es](mailto:jescano@us.es)

se ha realizado un examen exhaustivo en español que profundice en una revisión histórica que analice el concepto y su implementación en el dominio de la automática. El presente trabajo tiene como objetivo colmar esta carencia.

El término gemelo digital tiene su origen en Estados Unidos y no nace como una definición científica de una entidad o un hecho. En español, gemelo es un adjetivo que, dicho de una cosa, implica igualdad, por tanto, misma naturaleza. Así pues, en nuestro idioma, predicar de un gemelo una naturaleza digital, sería contradictorio, si el otro gemelo no fuera también digital. El origen anglófono del adjetivo *twin* hace referencia no solo a la igualdad, sino al emparejamiento, es decir, en inglés, algo es gemelo de otro, también cuando está emparejado en una relación estrecha o necesaria, tal y como define el Merriam Webster (Merriam-Webster, 2023). Traducir el concepto de *digital twin* por *modelo digital* empobrece el concepto original pues, aunque se necesite un modelo para formar un gemelo digital, éste es algo más que eso: el gemelo digital reflejará el estado y el comportamiento de su gemelo físico durante todo su ciclo de vida (Grieves and Vickers, 2017).

El propósito de utilizar el concepto de entidad gemela surgió por primera vez en el programa Apolo de la NASA en la década de 1960 como un "*modelo vivo (living model)*" (Allen, 2021). En este programa, la NASA desarrolló la tecnología de duplicación (*mirroring technology*) para simular sistemas uti-

lizados en el espacio mediante complejas réplicas físicas en la tierra. Construyeron dos naves idénticas simultáneamente: una para la misión espacial en curso y otra que permanecería en tierra, reflejando las condiciones de la nave durante la misión. Así, los vehículos en tierra se denominaban simuladores o gemelos, y se utilizaban extensamente para el entrenamiento de astronautas (definir, probar y perfeccionar las "reglas de la misión") durante la preparación del vuelo (Boschert and Rosen, 2016; Ferguson, 2020).

Como primer ejemplo de gemelo digital se puede citar la misión de rescate del Apolo 13 de la NASA, que tuvo lugar el 13 de abril de 1970, con el objetivo de traer a la tripulación de vuelta a tierra tras la explosión del tanque de oxígeno del vehículo espacial y los daños subsiguientes en su motor principal (NASA, 2020, 2021). Este prototipo de gemelo digital consistía en 15 simuladores de altísima fidelidad y controladores que abarcaban todos los aspectos de la misión. Destacó por la capacidad de los controladores de adaptar y modificar rápidamente las simulaciones para que coincidieran con las condiciones de la nave espacial dañada. Esto permitió evaluar, rechazar y perfeccionar las estrategias necesarias para el retorno seguro. Aunque los simuladores no fueron cruciales en la creación física de la nave espacial, desempeñaron un papel esencial en el establecimiento de sus parámetros operativos. Este ejemplo ilustra uno de los propósitos clave del gemelo digital: probar

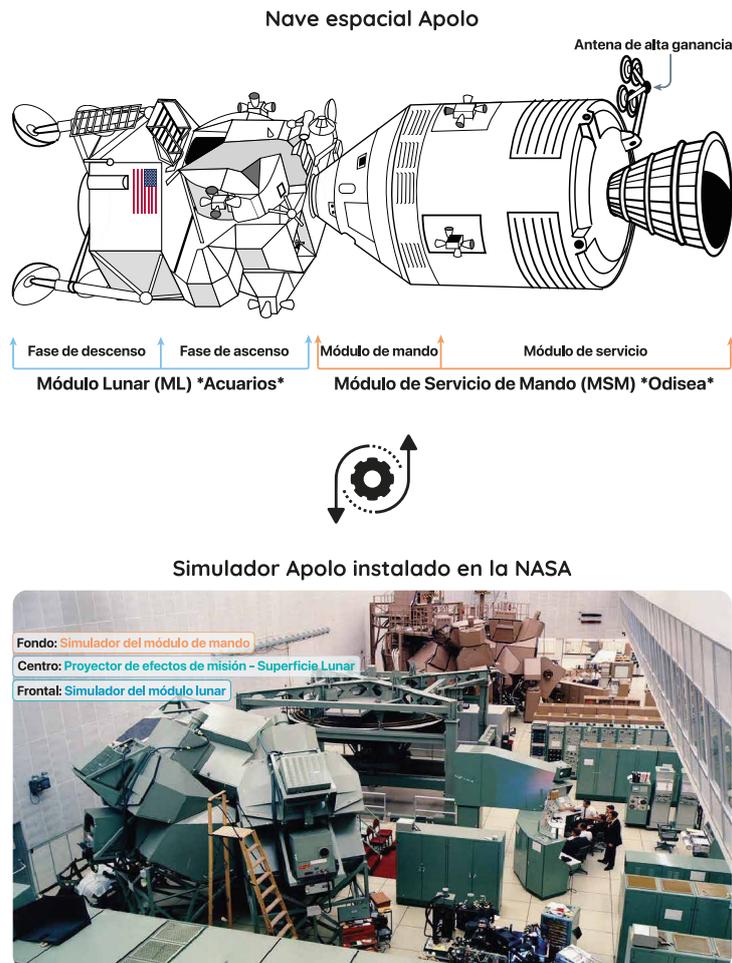


Figura 1: Primer modelo gemelo digital implementado en la Misión Apolo 13 de la NASA. Gráfico creado por el autor, con archivos de Wikimedia Commons de dominio público y una presentación de uso público de la NASA (Allen, 2021).

el activo físico, sus sistemas y procedimientos en una amplia gama de posibles condiciones operativas (Ferguson, 2020).

El modelo (o arquitectura) del gemelo digital implica el uso de tecnologías de comunicaciones para crear una conexión continua y bidireccional de datos entre el activo físico (gemelo físico) y el activo virtual (gemelo digital), logrando así el hermanamiento de ambas entidades. Así, este *hermanamiento/sincronización* (Schleich et al., 2017) se utiliza para actualizar el conjunto de modelos que componen el gemelo digital en respuesta a los cambios en el objeto físico real.

En el Apolo 13, la NASA utilizó tecnología de telecomunicaciones de última generación para mantener el contacto con la nave espacial. Esto permitió utilizar los datos obtenidos para modificar los simuladores y reflejar la condición de la nave espacial averiada. Aunque para la NASA el desarrollo de modelos geométricos y multifísicos no supuso un reto significativo, uno de sus mayores desafíos fue identificar, capturar y actualizar continuamente el gemelo digital con datos que reflejaran el estado del activo físico (Crowley, 2020; Nagler, 2020; Allen, 2021). Además, determinar qué datos recopilar, cómo capturarlos, cómo almacenarlos y, lo más importante, cómo utilizarlos, también se convirtió en un aspecto crucial de este proceso (Hicks, 2019; Ferguson, 2020).

Este concepto de *hermanamiento* continuo o periódico de lo digital con lo físico para reflejar el estado de la entidad física, es lo que separa la creación de prototipos virtuales y la ingeniería basada en modelos, de un gemelo digital (Ferguson, 2020). Aunque el proyecto Apolo 13 ocurrió 40 años antes de que la NASA introdujera el término gemelo digital en 2010, se considera uno de los mejores ejemplos reales de un prototipo de modelo gemelo digital real, auténtico, en acción.

Un estado del arte sobre el gemelo digital en el contexto de la industria (Tao et al., 2019b) clasifica las aplicaciones en los siguientes dominios: diseño (18 %), producción (35 %), mantenimiento de Activos Industriales (Prognostic Health Management o PHM, en inglés) (38 %) y otras áreas (9 %). La investigación concluye que el 38 % de la literatura se ubica en el campo de la PHM, siendo este el enfoque más ampliamente aplicado. Dichos estudios se centran en dos campos muy restrictivos: el aeroespacial (NASA) y el militar (Fuerzas Aéreas de EE. UU.), en el desarrollo de aeronaves. En estos casos, el gemelo digital requiere un modelado múltiple y complejo.

El desarrollo tecnológico ha multiplicado la capacidad de realizar diversas simulaciones con alta fidelidad. Algunos investigadores han propuesto diferentes arquitecturas para modelar el gemelo digital, que varía en la dimensión de sus componentes: (i) Modelo de Gemelo Digital (MGD) de tres dimensiones, introducido por primera vez por Grieves (Grieves, 2002), (ii) MGD de cinco dimensiones, una extensión del modelo tridimensional (Tao et al., 2018c) y (iii) MGD de ocho dimensiones que abarcan el análisis científico y el orientado a la aplicación (Stark et al., 2019).

El uso de un gemelo digital en muchos de los campos no requiere de simulaciones multimodelo, como ya veremos en la norma ISO 23247 que se centra en los gemelos digitales en el ámbito de automatización industrial (International Organization for Standardization, 2021a). Esta norma define el gemelo digital como una representación digital *adaptada a un fin*, de un elemento de fabricación observable con sincronización entre

el elemento y su representación digital. También el Consorcio sobre el Gemelo Digital (Digital Twin Consortium), define el gemelo digital como una representación virtual de entidades y procesos del mundo real, sincronizados con una frecuencia y *fidelidad* determinadas (Digital Twin Consortium, 2020b). Esta adaptación de la simulación, para hacerla determinada a un propósito, abre la puerta al uso en la automática, entre otras disciplinas.

En este artículo se realizará una revisión del concepto de gemelo digital y su aplicación en el ámbito de la automática. La organización del mismo es la siguiente. En la sección 2 se describe la historia del concepto gemelo digital. En la sección 3 se presenta la definición del gemelo digital como una entidad propia, compuesta por una estructura principal y que forma parte de una arquitectura gemela digital propia. En la sección 4 se abordan los tipos de gemelos digitales y se destacan las diferencias entre modelo, sombra y gemelo digital. La relación del gemelo digital con la Automática se presenta en la sección 5, terminando con una sección de conclusiones 6.

## 2. Historia del Gemelo Digital

La idea filosófica de lo que representaría el concepto Gemelo Digital o Digital Twin fue presentada inicialmente por David Gelernter en su libro *Mirror World*, publicado en 1991 (Gelernter, 1991). Donde se menciona que *Mirror World* es un conjunto de modelos de software de alguna parte del mundo real, alimentados por una enorme cantidad de datos, lo que hace posible que el modelo imite cada movimiento de la parte real en cada momento. Según Gelernter (1991), estos modelos prometen ser robustos, atractivos y gigantescos en sus implicaciones. Aunque todavía no existen, la mayoría de los componentes que los forman ya han sido diseñados, desarrollados y probados. Están en fase de ensamblaje para producir prototipos completos, *aunque sea a pequeña escala*.

Sin embargo, la conceptualización de lo que sería el gemelo digital se origina a finales de la década de 1990 por Michael Grieves durante su programa de doctorado en gestión ejecutiva en la Universidad Case Western Reserve de Cleveland (Ohio). Las bases de este concepto comenzaron a tomar forma como parte del *Modelo PLM* presentado por Grieves, inicialmente como su elemento central, denominado Núcleo de Información "*Information Core*" centrado en la integración de los datos y la información del producto. Donde el *núcleo de información* (espacio virtual) engloba los datos, información y procesos del producto e interactúa en cada categoría de la vida del producto: planificación, diseño, construcción, eliminación y reciclaje. Es decir, se encarga de la recepción y envío de información/datos (mecanismo de enlace) desde y hacia las distintas áreas funcionales (espacio físico).

De esta manera, Michael Grieves, considerado el padre del gemelo digital, desarrolló una arquitectura que fue introducida por primera vez como el "Conceptual Ideal for PLM" en 2002 como parte de su investigación sobre la gestión del ciclo de vida del producto (Product Lifecycle Management, PLM) para la fabricación, en un Foro de Gestión de la Sociedad de Ingeniería de Fabricación (Grieves, 2002). Posteriormente, esta arquitectura se utilizó en un curso de formación de centros PLM en la Universidad de Michigan en 2003. Dicha arquitectura fue re-

presentada como un modelo visual<sup>1</sup>, como lo recalca Grieves en un artículo siguiente (Grieves, 2006).

Grieves proporcionó así una solución a la estructura orientada funcionalmente, que predominaba en la industria, la cual provocaba la creación de silos de información en cada área funcional y un uso ineficiente de la información y los datos del producto. Esta nueva visión se enfoca en utilizar el poder de la información y los avances tecnológicos para eliminar ineficiencias a lo largo del ciclo de vida del producto, desde el diseño hasta la retirada y eliminación final.

En un caso ideal, la sustitución de información asociada al producto por el uso ineficiente de tiempo, energía y material, mediante la posibilidad de mover 'bits baratos' en lugar de 'átomos caros', sería una perspectiva innovadora que contribuiría a entender la relación entre el producto físico y toda la información que contiene.

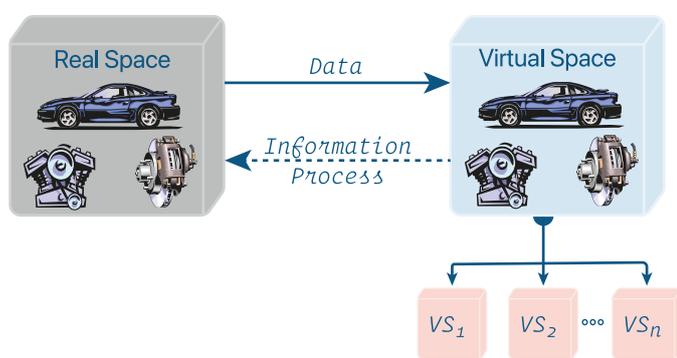


Figura 2: Primer concepto de Modelo Gemelo Digital, introducido como *Conceptual Ideal for PLM* (Grieves, 2002).

La Figura 2 muestra que el concepto inicial, sin un nombre definitivo<sup>1</sup>, aborda un enfoque en el producto, que se centra en la información que éste proporciona a lo largo de su ciclo de vida para su desarrollo. Además, se puede apreciar que el "Conceptual Ideal for PLM" ya contenía todos los elementos principales que componen el Modelo Gemelo Digital.

En 2005, Grieves modificó la terminología con la que presentó su modelo conceptual, denominándolo el "Modelo Espacial Reflejado" (Mirrored Space Model, MSM) (Grieves, 2005). Este modelo mantuvo la arquitectura y los tres elementos clave presentados en su primera versión: espacio real, espacio(s) virtual(es) y un mecanismo de enlace. Este último incluía el flujo de datos y la conexión de información/proceso entre el espacio real y el espacio(s) virtual(es).

Adicionalmente, introdujo la descripción detallada de cada uno de los elementos de este modelo visual. En este trabajo, el MSM se presentó como la clave para la construcción de espacios virtuales (*compartidos y universalmente accesibles*) que reflejan sustancialmente el estado de los objetos del mundo real a los que se puede acceder y manipular, donde los datos se recogen y transmiten del espacio real al virtual, y que la información y los procesos se transfieren desde el espacio virtual al real. El autor destaca la importancia de la *sincronización* entre el espa-

cio real y virtual mediante un *mecanismo de enlace en ambas direcciones*. Esto incluye un enlace entre el espacio virtual y su homólogo real, enfatizando la necesidad de que ambos sean sólidos, precisos y oportunos.

Además, Grieves propuso que la funcionalidad deseada, que implica reflejar la descripción y manipulación de objetos complejos, podría lograrse. En este contexto, señaló que estos objetos podrían combinarse para formar estructuras más complejas dentro de un espacio virtual compartido. Sin embargo, el pleno desarrollo de esta propuesta se vio obstaculizado por limitaciones tecnológicas existentes. Esta idea se materializó en 2016, a través de un trabajo en el cual el autor estableció que el gemelo digital puede clasificarse en tipos: prototipo de gemelo digital, instancia de gemelo digital, agregado de gemelo digital y entorno de gemelo digital (Grieves, 2016; Grieves and Vickers, 2017). Gracias a los avances tecnológicos de esa década, se sentaron las bases para el crecimiento continuo del Modelo Gemelo Digital. La clasificación de los tipos de Gemelos Digitales, junto con sus definiciones, será abordada más adelante en la Sección 4.

La terminología MSM fue reemplazada por el "Modelo de Reflejo de la Información" (Information Mirroring Model (IMM)) en el libro seminal de PLM en 2006 (Grieves, 2006). Una evolución del modelo anterior que se presenta como una subestructura que identifica y conecta las áreas funcionales con los datos, la información y los procesos centrados en el producto en toda la organización. Donde el IMM es la implementación del núcleo de información, que captura una visión ampliada de la representación de la información, cuya arquitectura mantiene los tres elementos iniciales del MSM. Pero en este caso, los espacios virtuales de simulación ( $VS_1$ ,  $VS_2$ , ...  $VS_n$ ) se consideran como otro componente (ver Figura 2). Grieves señala que la ventaja fundamental del espacio virtual es la posibilidad de disponer de espacios subvirtuales, lo que permitiría realizar diversas simulaciones de procesos y diseños en estos espacios virtuales, algo que en el mundo físico resultaría prohibitivamente caro.

El concepto se amplió considerablemente en el libro *Virtually Perfect* en 2011, aunque aquí siguió llamándose IMM (Grieves (2011)). Grieves adjuntó el término *Gemelo Digital (Digital Twin)* al modelo conceptual. Este descriptor se lo atribuyó a su compañero John Vickers, un tecnólogo de fabricación y materiales avanzados de la NASA (Grieves, 2014, 2016; Grieves and Vickers, 2017; Grieves, 2019). Dado que el término era muy descriptivo, fue utilizado desde entonces. Además, en este libro se argumenta que, al utilizar productos virtuales, se lograrían mejores productos físicos, ya que los avances tecnológicos, como los ordenadores, las comunicaciones y el software, han hecho posible separar la información sobre el producto del propio producto para almacenarla y manipularla. Esta transición ha hecho posible que los productos virtuales impulsen nuevos productos físicos de forma más eficiente e innovadora, ya que permite sustituir recursos físicos por información (*bits, en lugar de átomos*).

<sup>1</sup>Los modelos visuales dan forma a los conceptos, pero proporcionan un elemento de ambigüedad sin restricciones; dan forma a los conceptos sin restringirlos en exceso, permitiendo a los usuarios completarlos, enfocarlos, interpretarlos y generar su propia comprensión (Grieves, 2006).

<sup>1</sup>Grieves utilizaría inicialmente el término *dobleganger*, pero en su investigación sobre PLM, descartó este calificativo anglo-alemán y presentó su revolucionaria idea como *Conceptual Ideal for PLM* (Grieves, 2019; Waffenschmidt, 2018).



Figura 3: Línea temporal del concepto de Modelo Gemelo Digital.

Sin embargo, antes de que el término *Gemelo Digital* se aduntara al libro *Virtual Perfect*, la NASA ya lo utilizaba en sus hojas de rutas tecnológicas (Shafto et al., 2010; Piascik et al., 2010). Así, en 2010 este término fue presentado formalmente por Jhon Vickers, como seudónimo, dentro de un concepto avanzado a largo plazo, "*Virtual Digital Fleet Leader (VDFL) (a.k.a. Digital Twin)*" en el borrador de la hoja de ruta tecnológica espacial de la NASA dentro del Área Tecnológica 12: Materiales, Estructuras, Sistemas Mecánicos y Fabricación y, después, en la versión final de la misma (Piascik et al., 2010, 2012). Aquí se menciona que el gemelo digital está en fase conceptual, pero que las capacidades de sus componentes se encuentran en distintas fases de desarrollo (TRL1+). Además, este término tenía interdependencias con el *DRAFT Space Technology Roadmap* de la NASA dentro del Área Tecnológica 11: Modelado, Simulación, Tecnología de la Información (Shafto et al., 2010, 2012), donde aparecía la primera definición de gemelo digital y que se mantuvo en la versión final de la misma.

En una investigación conjunta, en 2012, la NASA y LA Fuerza Aérea de los Estados Unidos presentaron el paradigma del gemelo digital (Glaessgen and Stargel, 2012). Este concepto presenta una visión de futuro para la certificación, la gestión de flotas y las prácticas de mantenimiento aplicadas al desarrollo de vehículos de futura generación. Este paradigma describe los atributos del gemelo digital, como los modelos de ultra alta fidelidad, la alta capacidad de cálculo, procesamiento de datos, la integración de los datos de los sensores del sistema de gestión de la salud del vehículo y la integración de los datos de la flota (informes de la flota, datos históricos) a través de la minería de datos. En consecuencia, este conjunto de modelos constituye la columna vertebral del gemelo digital, junto con la integración de datos de sensores y el intercambio de información.

Siguiendo la misma línea, en 2014, el concepto de gemelo digital como representación virtual de un producto físico se introdujo en un *White Paper* (Grieves, 2014), que señala la comparación del gemelo digital con su diseño de ingeniería, una perspectiva de lo diseñado frente a lo producido, enfatizando el vínculo existente entre el diseño y la ejecución, junto con

una *estructura tridimensional de gemelo digital*, que fue ampliamente difundida.

Se puede considerar que a partir del año 2012 empieza la fase de desarrollo de los gemelos digitales, que inicialmente muestra aplicaciones aeroespaciales y luego se extrapoló a los diferentes sectores como la Industria 4.0 (Uhlemann et al., 2017; Tao et al., 2019a), la automoción (Biesinger and Weyrich, 2019), edificios inteligentes (Khajavi et al., 2019), petróleo y el gas (Wanasinghe et al., 2020), almacenamiento de energía (Li et al., 2020), la atención sanitaria y la medicina (Golse et al., 2021), sistemas energéticos (Zhou et al., 2019; Salazar et al., 2022), ciudades inteligentes (Mylonas et al., 2021), fabricación inteligente (Tao and Zhang, 2017; Tao et al., 2018a), entre otras. Ámbitos donde el desarrollo tecnológico de las últimas décadas ha permitido a varias organizaciones considerar la importancia y el gran potencial de esta tecnología (Tao et al., 2019c). Así, a partir de ese momento, las publicaciones que usan las palabras *Gemelo Digital*, han ido creciendo exponencialmente (Singh et al., 2021). Por otra parte, un estudio sobre la revolución en la tecnología de gemelo digital, analiza las bases de datos mundiales de patentes para descubrir la trayectoria de desarrollo de las patentes de gemelos digitales en EE.UU., China, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual y las naciones europeas. Los resultados de este estudio indican que el gemelo digital aún está en su fase inicial de desarrollo y no constituye una tecnología integralmente conectada (Wang et al., 2020).

Entre 2017 y 2019, el gemelo digital fue considerado una de las diez tendencias tecnológicas estratégicas de la próxima década (Gartner, 2016). Esto indicaba que, para 2021, la mitad de las grandes empresas industriales utilizarían el concepto de MGD, lo que les supondría ganar un 10% en efectividad (Gartner, 2017). Se espera que esta tendencia alcance un valor estimado de ingresos de \$183 billones para 2031, según Gartner (2022). Mientras tanto, el gemelo digital fue declarada uno de los avances científicos y tecnológicos más importantes para la fabricación inteligente por la Asociación de Fabricación Inteligente de la Asociación China para la Ciencia y la Tecno-

logía (Zhang et al., 2020). De forma similar, la tecnología del gemelo digital aparece entre las principales tendencias tecnológicas previstas por Lockheed Martin para 2018 (Murray, 2017), señalando que estará en el centro en los próximos años de la industria aeroespacial y de defensa. Además, se prevé que el tamaño del mercado mundial de gemelos digitales crezca de 6.750 millones de dólares en 2021 a 96.490 millones de dólares en 2029, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 40,6 % durante el periodo de previsión, 2022-2029 (Fortune-Business-Insights, 2021).

El Gemelo Digital alcanzó en 2018 el *pico máximo* dentro del Hiper ciclo de Tecnología Emergente entre los *Ecosistemas Digitalizados*, como una de las cinco tendencias tecnológicas emergentes, señalando que alcanzará el punto de equilibrio en 5 a 10 años (Gartner, 2018). Este Hiper ciclo proporciona una visión intersectorial de las tendencias tecnológicas que afectarán significativamente a los mercados mundiales, las empresas y la sociedad. Además, en el siguiente Hiper ciclo, el *Gemelo Digital de la persona* aparece en el área Desencadenante de la Innovación dentro del Yo Digital en 2020. De forma similar, el *Gemelo Digital de un cliente* emerge dentro del tema Evolución/expansión de las experiencias inmersivas en 2022, ambos en una fase temprana que genera una gran incertidumbre sobre su evolución.

En el año 2020 se creó el Digital Twin Consortium®, con GE Digital como socio fundador. A esta iniciativa se unieron varias empresas tecnológicas, como Microsoft y Northrop Grumman, con el objetivo de reunir al mundo académico, industrial y gubernamental en una asociación colaborativa. Cuya misión es promover el conocimiento, la adopción y proporcionar coherencia en la arquitectura, seguridad e interoperabilidad de la tecnología de gemelos digitales (Digital Twin Consortium, 2020c; GE Digital, 2018).

En ese mismo año, pocos meses después, la Federación Alemana de Ingeniería (VDMA) y la Asociación Alemana de Fabricantes Eléctricos y Electrónicos (ZVEI), junto con la Asociación Alemana de Tecnologías de la Información, Telecomunicaciones y Nuevos Medios (Bitkom) y otras 20 empresas, fundaron la Asociación del Gemelo Digital Industrial, también conocida como *Industrial Digital Twin Association* (IDTA) (infoPLC, 2020; XITASO, 2021). El objetivo de la IDTA es impulsar el desarrollo del gemelo digital e interoperar esta tecnología en el ámbito industrial, utilizando tecnologías de código abierto en la creación de sus conceptos técnicos y demostrando su aplicabilidad con casos prácticos de uso en la industria (IDTA, 2023).

Asimismo, en 2020, las organizaciones fundadoras vinculadas al consorcio del proyecto SPHERE, enmarcado dentro del Horizon 2020 Grant Agreement No. 820805 (European Commission, 2018), establecieron la Building Digital Twin Association (BDTA) con el propósito de fomentar el uso y el desarrollo de gemelos digitales en la industria de la construcción. La BDTA utiliza una plataforma digital basada en BIM para optimizar los ciclos de vida, reducir costos y mejorar la eficiencia energética en la edificación (IDP, 2022; Building Digital Twin Association, 2022). Además, en 2021, el Digital Twin Consortium y la Industrial Digital Twin Association firmaron un acuerdo de enlace para crear y desarrollar tecnologías que permitan la implementación de gemelos digitales en la industria. El objeti-

vo de este acuerdo es acelerar la adopción y monetización de la tecnología del gemelo digital en la industria (Digital Twin Consortium, 2021).

En la actualidad la adopción de la tecnología del gemelo digital por parte de la industria es alta y va en aumento en sectores objetivo como la aeroespacial, donde surgió el concepto, automoción, consumo electrónico, energía - petróleo - gas, fabricación, tecnología e informática, equipamiento industrial, entre otros. El 69 % de organizaciones dentro de estos sectores afirma que actualmente aprovecha la tecnología de gemelos digitales, mientras que el 23 % declara que no lo hace, y un 8 % manifiesta no estar seguro. Dentro de las organizaciones que utilizan la tecnología de gemelos digitales, ( $N = 1,393$ ) organizaciones, el 71 % afirma que comenzó a invertir en esta tecnología en el último año. Por otro lado, dentro del grupo que no aprovecha la tecnología del gemelo digital, ( $N = 614$ ) organizaciones, el 44 % espera adoptarla en los próximos tres años y el 11 % en los próximos seis meses. Estos datos se refuerzan en el informe mundial sobre el gemelo digital del año 2022, cuyos resultados se extraen de una encuesta independiente e internacional a 2.007 profesionales empleados en estos sectores, que desempeñan funciones laborales relacionadas con la ciencia de datos, IoT y analítica, ingeniería de software, investigación y desarrollo (I+D), ingeniería, tecnología de la información (TI) y sistemas de información (SI), desarrollo de productos y gestión ejecutiva (Altair, 2022).

En cuanto a la comprensión de la tecnología del gemelo digital, la encuesta señala que el 54 % de profesionales tiene un conocimiento limitado o nulo; o bien consideran que entender las soluciones de gemelos digitales es confuso. Por lo cual el 37 % muestran un alto interés por una “definición concisa y estandarizada” que explique claramente el significado de gemelo digital. Además, el 43 % de los encuestados cree que las soluciones de gemelos digitales harán obsoleta la necesidad de pruebas físicas en los próximos cuatro años o antes, en comparación con solo el 4 % que afirma que los gemelos digitales nunca eliminarán la necesidad de prototipos físicos (Altair, 2022).

Un aspecto interesante que incluye el informe mundial es el uso y la justificación de la tecnología del gemelo digital dentro de las organizaciones que lo utilizan (Altair, 2022), representado por un 69 %. A la pregunta “¿Cómo usa la tecnología de gemelo digital su organización?”, los encuestados respondieron de la siguiente forma: un (42 %) lo utiliza para la simulación de productos que aún no están conectados a objetos físicos reales, un (50 %) lo usa en la supervisión digital (casi) en tiempo real del estado y el comportamiento de objetos físicos existentes, un (47 %) lo utiliza por la capacidad de prever el estado y el comportamiento futuros de activos físicos mediante análisis predictivos, y por último, un (51 %) lo utiliza para la creación de objetos digitales inteligentes capaces de auto diagnosticarse y recomendar acciones correctivas o preventivas en activos físicos. Se puede ver que aproximadamente el 50 % de los encuestados utilizan la tecnología de gemelos digitales dentro de todas estas categorías. Además, el informe destaca los impactos positivos más comunes de la tecnología del gemelo digital en las organizaciones de este grupo, como la supervisión y control en tiempo real, la eficiencia, seguridad y ahorro de costos, e indica que mejora la sostenibilidad de sus productos y procesos.

### 3. Definiciones del modelo gemelo digital

El modelo del Gemelo Digital es un concepto que se ha extendido a diversos campos, como la industria, la construcción, la sanidad, el transporte, la energía, la fabricación, el mundo académico y la empresa, entre otros. Se extiende a cada una de las ramificaciones que pueden surgir de estos campos. Cada sector ha desarrollado o añadido su propia interpretación teórica o “definición” del modelo Gemelo Digital, según su aplicación específica. A pesar de su corta existencia, sigue siendo un concepto abstracto para la sociedad, pero ha contribuido significativamente al desarrollo optimizado de componentes, productos o sistemas en diversas áreas, posiblemente respaldado por conceptos PLM.

En su etapa inicial, el gemelo digital se definió como una representación virtual o digital de una entidad física; es decir, una construcción de información digital sobre un producto, vinculada a su contraparte física a lo largo de su ciclo de vida. El modelo de referencia del Gemelo Digital (Grieves, 2006, 2014; Grieves and Vickers, 2017) o *Modelo Gemelo Digital* (véase la Figura 2), se compone de tres elementos principales: espacio real, espacio virtual y un mecanismo de enlace.

Desde que apareció la idea conceptual del modelo gemelo digital, varios investigadores han intentado definir su concepto. Empezando por el ámbito aeroespacial, la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio presentó formalmente el término *Gemelo Digital* al público en sus Borradores de Hoja de Ruta de Tecnología Espacial (Piascik et al., 2010; Shafto et al., 2010) y formalizó su primera definición en el Área Tecnológica 11 de dichos borradores, que se describe como: “*Una simulación integrada multifísica, multiescalar y probabilística de un vehículo o sistema que utiliza los mejores modelos físicos disponibles, actualizaciones de sensores, historial de flotas, etc., para reflejar la vida de su gemelo volador... Además de la columna vertebral de modelos físicos de alta fidelidad, el gemelo digital integra los datos de los sensores del sistema de gestión integrada de la salud del vehículo (IVHM), el historial de mantenimiento, y todos los datos históricos y de flota disponibles obtenidos mediante minería de datos y minería de textos...*” (Shafto et al., 2010).

La industria ha centrado su atención en el gemelo digital, explotando el gran potencial del concepto (Tao et al., 2019c; Augustine, 2020; de Prada et al., 2022), debido a que abarca todo el ciclo de vida de un producto (entidad funcional) desde su fase de diseño hasta su fase de retirada y eliminación, gracias a la conexión/vinculación bidireccional entre el producto físico y el producto virtual/digital. De ahí que se haya convertido en un elemento ineludible para la empresa, ya que aporta una visión más amplia a los negocios, que, combinada con sus productos, ofrece un valor añadido para su difusión y crecimiento.

En este contexto, el modelo Gemelo Digital ha ido ganando progresivamente interés en los ámbitos académico e industrial, con la incorporación de definiciones más amplias que varían según el área de investigación (Negri et al., 2017; Kritzinger et al., 2018; Jones et al., 2020). La Tabla 1 enumera algunas de las definiciones proporcionadas por estos ámbitos.

El concepto de *Gemelo Digital* se ha popularizado recientemente en el sector de la Industria 4.0 y es una de las tecnologías más prometedoras aplicadas para avanzar hacia la fabricación inteligente (Tao et al., 2019a). Además, varios trabajos proporcionan una revisión exhaustiva de la conceptualización, tipos, metodologías y técnicas para la construcción de gemelos digitales, desde la perspectiva de la modelización y la industria de procesos (Grieves and Vickers, 2017; Tao et al., 2019b; Saracco, 2019; Rasheed et al., 2020; Perno et al., 2022). Hoy en día, el concepto de gemelo digital es popular con varias aplicaciones en la industria y la academia. Por ejemplo, el trabajo publicado por (Tao et al., 2019b) presenta una visión completa del concepto, tipos, desarrollo y señala el área de PHM como el principal campo de aplicación. Por otro lado, (Rasheed et al., 2020) presenta metodologías y técnicas para el desarrollo de gemelos digitales desde la perspectiva del modelado. Además, en un trabajo reciente (de Prada et al., 2022), se examina la arquitectura y función de los gemelos digitales en el marco de la Industria 4.0., acompañado de un análisis de una experiencia específica relacionada con la red de hidrógeno de una refinería de petróleo, ilustrando las oportunidades y desafíos asociados con la implementación de gemelos digitales en la industria de procesos.

Como se puede observar en la Tabla 1 varios son los conceptos teóricos que diversos autores han dado al *Gemelo Digital* a lo largo de su corta historia. Casi todos ellos señalan que el Gemelo Digital es una construcción virtual/digital de información asociada a un producto que existe actualmente o existirá en el espacio físico con un alto nivel de detalle (fiel, satisfactorio) construido en el espacio virtual/digital. Esta construcción digital se compone de un conjunto de modelos de alta fidelidad a niveles geométricos, físicos, comportamiento y reglas, que se utiliza para simulación y pruebas virtuales a múltiples escalas, que comprende todas las características y describe completamente el sistema físico real o previsto. Esta entidad digital/virtual también conocido como *Gemelo Digital* debe indicar el estado, comportamiento y funcionamiento de una manera casi exacta o de alta fidelidad de su entidad física también conocido como *Gemelo Físico*. Para ello, el conjunto de modelos debe sincronizarse con el estado de la entidad física mediante un *mecanismo de enlace*, que es el que crea el puente entre el mundo físico y el virtual, para que los datos e información fluyan desde el gemelo digital hacia el gemelo físico, y viceversa.

En gran medida, estos conceptos teóricos mantienen los elementos centrales del *modelo gemelo digital*<sup>2</sup> desde su conceptualización inicial, que se describen a continuación:

1. *Entidad física*: en la literatura, es común el uso de términos específicos en cada campo, como vehículo, componente, producto, sistema, objeto, artefacto, entre otros. A pesar de sus diferencias, todas estas entidades comparten la característica de existir en el mundo real o físico. Con el fin de englobar todos los tipos y lograr una concordancia universal, se utiliza el término “entidad física”(Grieves, 2005; Digital Twin Consortium, 2020b; Jones et al., 2020) .

<sup>2</sup>Para que el modelo gemelo digital alcance todo su potencial, el vínculo entre la entidad virtual en el mundo virtual y su contraparte física deberá ser sólido, preciso y oportuno (Grieves, 2005).

Tabla 1: Definición de Gemelo Digital en el mundo académico e industrial

Referencia	Concepto teórico
Glaessgen and Stargel (2012)	<i>Un gemelo digital es una simulación multifísica, multiescala y probabilística integrada de un vehículo o sistema as-built que utiliza los mejores modelos físicos disponibles, actualizaciones de sensores, historial de flotas, etc..., para reflejar la vida de su correspondiente gemelo volante.</i>
Boschert and Rosen (2016)	<i>El Gemelo Digital se refiere a la descripción de un componente, producto o sistema mediante un conjunto de modelos ejecutables bien alineados. El gemelo digital es la colección enlazada de los artefactos digitales pertinentes, incluidos los datos de ingeniería, los datos de funcionamiento y las descripciones de comportamiento a través de varios modelos de simulación.</i>
Grieves and Vickers (2017)	<i>El Gemelo Digital es un conjunto de construcciones de información virtual que describe completamente un producto manufacturado físico potencial o real desde el nivel micro atómico hasta el nivel macro geométrico. En su estado óptimo, cualquier información que pudiera obtenerse de la inspección de un producto manufacturado físico puede obtenerse de su Gemelo Digital.</i>
Negri et al. (2017)	<i>El gemelo digital consiste en una representación virtual de un sistema de producción capaz de ejecutarse en diferentes disciplinas de simulación que se caracteriza por la sincronización entre el sistema virtual y el real, gracias a datos sensados y dispositivos inteligentes conectados, modelos matemáticos y elaboración de datos en tiempo real.</i>
Schleich et al. (2017)	<i>Adaptado por el autor: El Gemelo digital es una integración de modelos de alta fidelidad para simulación y pruebas virtuales a múltiples escalas (sofisticados modelos de simulación) que comprende todas las características y describe completamente el producto físico (gemelo físico) a nivel conceptual a lo largo de todo su ciclo de vida. Se trata de un modelo abstracto completo (su "representación" virtual) que garantiza propiedades importantes como la escalabilidad, la interoperabilidad, la expansibilidad y la fidelidad, así como distintas operaciones sobre este modelo compacto, como la composición, la descomposición, la conversión y la evaluación.</i>
Tao et al. (2018a)	<i>El gemelo digital es una simulación integrada multifísica, multiescala y probabilística de un producto complejo, y utiliza los mejores modelos físicos disponibles, actualizaciones de sensores, etc., para reflejar la vida de su correspondiente gemelo. Puede trasladar correctamente todo tipo de datos físicos del producto a un espacio virtual.</i>
Rasheed et al. (2020)	<i>El gemelo digital puede definirse como una representación virtual de un activo físico habilitada mediante datos y simuladores para la predicción, optimización, supervisión, control y mejora de la toma de decisiones en tiempo real.</i>
Minerva et al. (2020)	<i>Un Gemelo Digital es una representación informática completa de un objeto físico individual. Incluye las propiedades, condiciones y comportamiento(s) del objeto real a través de modelos y datos. Un gemelo digital es un conjunto de modelos realistas que pueden simular el comportamiento de un objeto en el entorno desplegado. El gemelo digital representa y refleja a su gemelo físico y sigue siendo su homólogo virtual durante todo el ciclo de vida del objeto.</i>
Singh et al. (2021)	<i>Un gemelo digital es un modelo o simulación digital/virtual dinámico y autoevolutivo de un sujeto u objeto de la vida real (pieza, máquina, proceso, ser humano, etc.) que representa el estado exacto de su gemelo físico en un momento dado mediante el intercambio de datos en tiempo real y la conservación de los datos históricos. No es sólo el gemelo digital el que imita a su gemelo físico. sino que cualquier cambio en el Gemelo Digital es imitado también por el gemelo físico.</i>
NIH-IMAG (2019)	<i>Un gemelo digital es una réplica digital de una entidad física viva o no viva, como un proceso de fabricación, un dispositivo médico, un equipo médico e incluso una persona... para obtener información sobre los estados operativos presentes y futuros de cada físico.</i>
IBM (2020)	<i>Un gemelo digital es una representación virtual de un objeto o sistema que abarca su ciclo de vida, se actualiza mediante el uso de datos en tiempo real y utiliza simulaciones, aprendizaje automático y ayuda razonable para tomar decisiones.</i>
MIT Sloan (2019)	<i>Un gemelo digital es una réplica virtual de un objeto, ser o sistema que se puede actualizar continuamente con datos de su contraparte física.</i>
Digital Twin Consortium (2020b)	<i>Un gemelo digital es una representación virtual de entidades y procesos del mundo real, sincronizados a una frecuencia y fidelidad específicas.</i>
International Organization for Standardization (2021a)	<i>Un gemelo digital en la fabricación es una representación digital adaptada a un fin, de un elemento de fabricación observable con sincronización entre el elemento y su representación digital.</i>

2. *Entidad virtual*: conformada por un conjunto de modelos digitales correlacionados y datos de apoyo que proporcionan información cohesionada sobre el producto o sistema. Los modelos digitales abarcan niveles geométricos, físicos, comportamiento y reglas (Grieves and Vickers, 2017; Tao and Zhang, 2017; Tao et al., 2018c; Digital Twin Consortium, 2020b). Por ejemplo, modelos CAD 3D, ecuaciones matemáticas, algoritmos de control etc.
3. *Mecanismo de enlace*: une y vinculan indisolublemente la entidad física y virtual (los sincroniza), para que la entidad virtual refleje o coincida con el estado de la entidad física y/o hace que la entidad física coincida más con la representación virtual de un estado deseado (Digital Twin Consortium, 2020b). Habilita la interacción entre el mundo físico y virtual mediante la sincronización/hermanamiento (Schleich et al., 2017) entre ambas entidades, promueve un flujo de datos e información de manera bidireccional, donde los datos se recogen y transmiten desde la entidad física hacia la entidad virtual, y la información y procesos efectuados en la entidad virtual se propagan hacia la entidad física (Grieves, 2005; Jones et al., 2020). Esto se puede realizar a través de las tecnologías IT y OT.

Cabe mencionar que la frecuencia de sincronización/hermanamiento a través del mecanismo de enlace de los modelos que conforman el gemelo digital, cambiará dependiendo de la rapidez con la que la entidad física cambie, pudiendo ser ésta en tiempo real, diariamente, por hitos, etc. (Digital Twin Consortium, 2020b; Jones et al., 2020). Sin embargo, el flujo de datos e información entre ambas entidades deberá ser necesariamente casi en tiempo real o en tiempo real, puesto que el gemelo digital debe reflejar el estado y comportamiento de su homólogo físico. Además, es importante señalar que la fidelidad, el grado de precisión y exactitud aplicado a la entidad virtual ha de ser suficiente para cada ámbito en el que se desarrolla (Digital Twin Consortium, 2020b).

Por otra parte, como se predijo en (Grieves, 2006), el constante avance tecnológico ha hecho que el modelo conceptual inicial evolucione cada vez más. La forma en que se adquiere organiza y utiliza la información sobre un producto ha cambiado: los sensores, las nuevas tecnologías de la información, IoT, IIOT, la potencia y capacidad de cálculo, la conectividad, la velocidad de transmisión de datos, internet y los espacios compartidos (almacenamiento y procesamiento en la nube) han provocado una nueva forma de ver los productos y su información.

Basado en el modelo visual presentado por Grieves (2022) (ver Figura 2) para lo que sería el Modelo Gemelo Digital y su origen, éste presenta una naturaleza dinámica que cambia (se actualiza) a lo largo del ciclo de vida del producto o sistema. El modelo muestra que uno de sus elementos principales es un producto o entidad física fabricada en el espacio físico, conectado a su homólogo virtual o digital mediante un mecanismo de enlace que refleja el estado y el comportamiento del producto físico. Por lo tanto, con este supuesto establecido, la entidad física fabricada ya debería existir para que se produzca esta conexión (vínculo) entre ambas entidades. En este contexto, se podría concluir que el Gemelo Digital solo existe una vez que el producto ha sido fabricado.

Analizando la definición propuesta por (Grieves and Vickers, 2017): *El Gemelo Digital es un conjunto de construcciones de información virtual que describe completamente un producto potencial o producto manufacturado físico real desde el nivel micro atómico hasta el nivel macro geométrico. En el mejor de los casos, cualquier información que pudiera obtenerse de la inspección de un producto fabricado físicamente puede obtenerse de su gemelo digital.* Esta definición resalta que la construcción de información virtual debe describir completamente un producto potencial o un producto manufacturado físico real, lo que sugiere que este producto se fabricará o ya se ha fabricado.

Esta afirmación se ve reforzada en un trabajo posterior de (Grieves, 2022) en su concepto teórico del Modelo Gemelo Digital (véase la Figura 2), donde se expone que: *El Modelo Gemelo Digital es un concepto que consta de tres elementos principales: un elemento físico real o previsto en el lado izquierdo que existe actualmente o existirá en el mundo físico (el "Gemelo Físico"), la contraparte virtual en el lado derecho que existe en el mundo virtual (el "Gemelo Digital") y el canal de comunicación de datos e información entre estos dos elementos.* Este concepto indica que puede tratarse de un producto físico existente o de uno previsto que llegará a existir en el espacio físico. Por lo tanto, la suposición anterior queda descartada por ser incompleta. La premisa de que el gemelo digital existe antes que su homólogo físico se reafirma en (International Organization for Standardization, 2021a; Grieves, 2022), donde se enfatiza que *el gemelo digital es especialmente valioso durante la fase de creación*, siendo ésta una de las cinco razones por las que un gemelo digital no requiere un producto físico previo.

Asimismo, en este artículo reciente se discute que la idea de que el gemelo digital solo existe después de que haya el producto físico indica una comprensión fragmentaria del concepto (Grieves, 2022). En él, se señala que, desde la conceptualización inicial de Gemelo digital, su propósito fundamental es asegurar su presencia y utilidad a lo largo de las cuatro etapas del ciclo de vida de un producto. Intrínsecamente, la información del producto existe a lo largo de todo su ciclo de vida, siendo el diseño y desarrollo digital colaborativo la fase inicial. Durante esta primera etapa, se construye el núcleo de información (construcción digital) que contiene los detalles (diseño digital, modelos digitales, modelos virtuales, simuladores) y requerimientos (comportamiento, servicios) funcionales del producto con los cuales se desarrollan el Gemelo Digital, con la finalidad de probar, testear o dar soporte de forma virtual a un intento de producto; añadiendo la información del Gemelo Digital para mejorar el diseño del mismo (Tao et al., 2019b), y, cuando cumpla con los requerimientos impuestos, pasar a la fase de materialización (construcción, manufactura), operación, retirada y eliminación.

Dicho de otra manera, el diseño de modelos digitales de alta precisión, para usarlos como etapa inicial de la creación de un producto, ya convierte a dicho modelo en un gemelo digital, pues la misma fabricación del producto irá provocando la actualización de la información en el modelo y viceversa. Simplemente, a lo largo de su fabricación, recibe diferentes nombres, como modelo digital, diseño digital o modelo de sistemas digitales. Sin embargo, en su mayoría, presentan las características del Prototipo de Gemelo Digital (PGD).

Esta perspectiva se refleja claramente en aplicaciones aeroespaciales, que es el campo donde se originó el concepto de gemelo digital. En este contexto, por ejemplo, se emplea para predecir la vida útil de la estructura de una aeronave, se utiliza un conjunto de modelos de alta fidelidad que componen el gemelo digital, junto con la *cuantificación de la incertidumbre* de estos modelos (Tuegel et al., 2011); para el desarrollo de un nuevo modelo estructural para el diseño y mantenimiento de fuselajes habilitado por computación de alto rendimiento (Tuegel, 2012); en prácticas de certificación, gestión de flotas y mantenimiento aplicadas al desarrollo de vehículos de generación futura a través del paradigma del gemelo digital, donde un conjunto de modelos forma su columna vertebral (Glaessgen and Stargel, 2012); como metodología multidisciplinaria basada en la física, para predecir micro fisuras físicas en una etapa temprana (Reifsnider and Majumdar, 2013); sobre la geometría as-manufactured para predecir trayectorias de grietas (Cerro-ne et al., 2014); en cuanto a la toma de decisiones en tiempo real y a bordo con el apoyo de enfoques y algoritmos de modelado DDDAS (Allaire et al., 2014); para un entorno digital mediante el desarrollo de un formalismo de razonamiento que proporciona un marco integral para definir y desarrollar sistemas inteligentes (Mavris et al., 2018); en una aproximación al diseño y aplicación de tecnologías de gemelos e hilos digitales, utilizando la gestión de Fuentes de Registro en análisis de ingeniería para transformar la información en un gemelo digital (Kraft, 2018)

En consecuencia, se llega a la determinación de que el MGD y el gemelo digital son relativamente diferentes: la primera engloba a la segunda. Antes de desarrollar el gemelo digital, es necesario planificar y diseñar su estructura principal: modelos que serán necesarios para simular el sistema o proceso físico en el marco de los dominios físico, geométrico, de comportamiento y de reglas (Tao and Zhang, 2017; Tao et al., 2018a); cómo se relacionarán entre sí y cómo interactuarán con la contraparte física. Además, este *gemelo digital* requiere su propia arquitectura (*modelo gemelo digital*), es decir, un conjunto de principios y normas que guíen su diseño y construcción (Boschert and Rosen, 2016; de Prada et al., 2022). Esto incluye aspectos como la recopilación y almacenamiento de datos, el hermanamiento, la integración de diferentes modelos, la interoperabilidad con otras herramientas, sistemas y tecnologías y la seguridad y privacidad de los datos. El diseño previo de la estructura principal y la arquitectura del gemelo digital es esencial para garantizar que el modelo holístico resultante sea preciso, esté actualizado y resulte útil para la optimización de los sistemas y procesos físicos.

Por otra parte, la Organización Internacional de Normalización (ISO) en el año 2021 desarrolló la norma *ISO 23247* para Sistemas de Automatización e Integración - Marco de Gemelos Digitales para la fabricación (International Organization for Standardization, 2021a,b,c,d), la cual refuerza el hecho de que el MGD engloba a la entidad *gemela digital*. La norma propone una arquitectura de referencia del gemelo digital para la fabricación (International Organization for Standardization, 2021b), que abarca modelos de referencia desde el punto de vista de dominio y entidad, siendo uno de ellos el dominio y la entidad gemela digital. La norma *ISO 23247* se divide en cuatro partes cuyos ámbitos de aplicación se señalan a continuación:

1. *ISO 23247-1*: Principios generales y requisitos para el desarrollo de gemelos digitales en la fabricación.
2. *23247-2*: Arquitectura de referencia con vistas funcionales.
3. *ISO 23247-3*: Lista de atributos de información básicos para los elementos de fabricación observables.
4. *ISO 23247-4*: Requisitos técnicos para el intercambio de información entre entidades dentro de la arquitectura de referencia.

#### 4. Tipos de gemelo digital

La capacidad de procesamiento informático es uno de los avances tecnológicos que ha revolucionado el mundo virtual, debido a que permite desarrollar las funcionalidades deseadas en lo relacionado con reflejar la descripción y manipulación de sistemas o productos físicos complejos en un entorno digital; y cambia la perspectiva de los procesos de fabricación, que actualmente comienzan su fase de creación de forma digital/virtual. Esto permite la creación de una sola pieza de un sistema único o de un sistema muy complejo (sistemas de sistemas "SoS") con el que se puede interactuar en el mundo virtual antes de construirlo físicamente. El gemelo digital puede manifestarse en diferentes tipos asociados a la fase del ciclo de vida del producto, empezando por su diseño y creación, construcción, operación y eliminación (Grieves, 2016; Grieves and Vickers, 2017; Grieves, 2022). Estos tipos de gemelos digitales son prototipos, instancias y agregados que operan en un entorno común denominado entorno gemelo digital. A continuación, se ofrece una breve descripción de cada uno de ellos:

1. *Prototipo de gemelo digital (PGD)*. Representa detalladamente la contrapartida virtual (construcción digital) de un producto físico previsto o real. Está asociado a la fase de diseño y creación. Contiene información exhaustiva que describe en detalle el producto, como sus requisitos, un conjunto de modelos de alta fidelidad, simuladores, servicios, etc..., e información para su implementación.
2. *Instancia gemela digital (IGD)*. Especifica los PGD construidos (as-built) y se asocia a la fase de construcción, es decir, a la materialización individual de cada producto físico específico "Gemelo Físico" al que su homólogo virtual permanecerá sincronizado a lo largo de la vida de dicho producto.
3. *Agregación de gemelos digitales (AGD)*. Describe la integración de los IGD o productos físicos construidos. Está asociada a la fase de operación. La sincronización del IGD con el PGD se produce formando el AGD, que tiene acceso a todos los productos físicos sincronizados durante su ciclo de vida de forma ad hoc o proactiva para recopilar información física/virtual.
4. *Entorno de Gemelos Digitales (EGD)*. Describe una integración holística de aplicaciones físicas multidominio en un espacio único para operar en Gemelos Digitales. Contiene toda la arquitectura del gemelo digital (Digital Twin Model) para permitir el funcionamiento, análisis de su comportamiento y realizar simulaciones y pruebas multiescala en este entorno virtual, en sincronía con su homólogo físico para conocer su estado o predecir su comportamiento.

Por otro lado, (IBM, 2020) presenta tipos de gemelos digitales en función del nivel de aumento de un producto que difieren principalmente en el ámbito de aplicación y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Tipos de gemelos digitales según el nivel de aumento del producto

Nivel GD	Descripción
<i>Componente</i>	La unidad básica del gemelo digital, una sola pieza de equipo.
<i>Activo</i>	La integración de dos o más componentes de un equipo.
<i>Sistema o unidad</i>	La unión de los distintos activos para formar un sistema funcional completo.
<i>Proceso</i>	La integración de varios sistemas funcionales para formar una instalación de producción completa.

Además, (Madni et al., 2019) propone la definición de cuatro niveles de los gemelos digitales con propósitos y alcances específicos, así como las características que los definen. Estos niveles gemelos digitales son los siguientes: Gemelo Pre-digital, Gemelo Digital, Gemelo Digital Adaptable y Gemelo Digital Inteligente. Cabe señalar que, los grupos de clasificación del gemelo digital aquí presentados, tienen una relación con el *Gemelo digital de tres niveles* en la fabricación; que representa una perspectiva jerárquica como (i) nivel de unidad, (ii) nivel de sistema, y (iii) nivel de sistema de sistemas (SoS), descrito ampliamente en (Tao et al., 2019a,d).

#### 4.1. Modelo digital, sombra digital y gemelo digital

Según las definiciones propuestas del gemelo digital en diversos ámbitos y contextos, la comprensión común es que se identifica como el equivalente digital (construcción informática) de un producto/objeto físico real o previsto. El concepto de sombra digital y gemelo digital está muy extendido. En principio, la sombra digital traslada el proceso productivo real al mundo virtual. Basándose en esto, el gemelo digital puede proporcionar una imagen de la realidad *construcción informática* que sea lo más idéntica posible a través de un modelo de proceso y simulación de acuerdo con (Bauernhansl et al., 2016). Donde se destaca que la sombra digital es uno de los elementos estructurales fundamentales que constituyen los sistemas ciberfísicos (CPS) que conforman el núcleo tecnológico de la Industria 4.0. Además, (Stark et al., 2017) indica que el gemelo digital de un activo físico consta de un maestro digital universal, su sombra digital y un enlace inteligente.

De acuerdo con (Kritzinger et al., 2018), el modelo digital es una representación digital de un objeto físico existente o previsto. Esta representación puede incluir una descripción más o menos completa del objeto físico. No hay integración automática de datos entre ambos. Los datos digitales de los objetos físicos pueden utilizarse en el desarrollo de estos modelos, en los que el intercambio de datos se realiza manualmente. Por otra parte, la sombra digital es la imagen detallada y digital de los procesos, la información y los datos de una empresa. Se basa en el concepto de modelo digital y se caracteriza por tener un flujo de datos automatizado unidireccional a través de conexiones

desde el espacio físico al virtual. Por último, el gemelo digital es una construcción virtual/digital de información que comprende todas las características y describe completamente un producto que existe actualmente o existirá en el mundo real con un alto nivel de detalle. Esta construcción digital es un elemento clave de una arquitectura gemela digital, tiene la singularidad de reflejar el estado y el comportamiento de su homólogo físico (gemelo físico) durante su ciclo de vida. Mediante un mecanismo de enlace que conecta y vincula la entidad física y virtual con un flujo de datos automatizado en ambas direcciones, se logra una integración total.

Así pues, los términos *Modelo Digital*, *Sombra Digital* y *Gemelo Digital* representan conceptos diferentes. Esta premisa se aclara en la exhaustiva revisión bibliográfica sobre el Gemelo digital en la fabricación en (Kritzinger et al., 2018), señalando que varias definiciones suelen utilizar estos términos indistintamente, como si fueran sinónimos. Esta investigación indica que los conceptos de modelo digital, sombra digital y gemelo digital difieren en función del nivel de integración de datos con el sistema o producto físico. En ella se resalta que los modelos digitales se utilizan con fines de ingeniería, y que el gemelo digital se centra en el diseño de planificación y procesos reconfigurables. Los resultados de la investigación muestran que el 19 % de las publicaciones indican casos no definidos, el 28 % se centran en el modelo digital, el 35 % en la sombra digital y sólo el 18 % de los artículos describen un Gemelo Digital con un flujo de datos bidireccional. Por ejemplo, en trabajos como los de (Ben Amor, 2022) y (Ebadpour et al., 2022), se presentan modelos sofisticados como gemelos digitales. Sin embargo, no existen evidencias de una comunicación efectiva entre las entidades real y virtual, lo que impide su sincronización con una frecuencia determinada.

#### 4.2. Hilo Digital

La expresión *Hilo Digital*, en inglés *Digital Thread*, fue acuñada por primera vez en el informe Global Horizons 2013 de la USAF Global Science and Technology Vision Task Force (Science and Force, 2013). Posteriormente, en 2018, se define el término *Digital Thread* como una "arquitectura basada en datos que enlaza la información generada a lo largo del ciclo de vida del producto y se prevé que sea la plataforma principal o autorizada para los datos y la comunicación de los productos de una empresa en cualquier momento" (Singh and Willcox, 2018).

En un sentido más específico, el hilo digital se utiliza para hacer referencia al nivel más detallado de diseño y especificación de una representación digital de un objeto físico. El *hilo digital* desempeña un papel crítico en la ingeniería de sistemas basada en modelos. Sirve como base para la creación de un gemelo digital, pues el análisis de datos generados por los cambios de parámetros del sistema físico permite perfeccionar el modelo virtual. Asimismo, la expresión *hilo digital* también se utiliza para describir la trazabilidad del gemelo digital hasta los requisitos, las piezas y los sistemas de control que conforman el activo físico.

En el campo aeroespacial, las Fuerzas Aéreas de EE. UU. combinan la tecnología de gemelo digital y la aplican al marco analítico de Hilo Digital (o Digital Thread) para proporcionar capacidades de análisis de ingeniería y apoyo a la toma de decisiones a lo largo de todo el ciclo de vida de los vehículos

aéreos (Kraft, 2015, 2016). Ambas tecnologías juntas abarcan el marco analítico de ingeniería basado en modelos a lo largo de todo el ciclo de vida, desde la investigación inicial hasta la planificación del desarrollo, el diseño, la fabricación, las pruebas, las operaciones, el mantenimiento y la formación del sistema. En este sentido, la tecnología de Hilo Digital fusiona datos y modelos basados en la física para generar una *representación digital del sistema en cada etapa* de la aeronave. Dicho estudio destaca que la computación de alto rendimiento (High-Performance Computing, HPC) es un habilitador esencial que proporciona simulaciones multidisciplinares, multifísicas y multifidelidad del vehículo aéreo. Además, se presenta un enfoque para el desarrollo y la aplicación de tecnologías de gemelos e hilos digitales de un vehículo aéreo (Kraft, 2016).

## 5. Gemelo digital y su relación con la Automática

Los estudios muestran el gran potencial del modelo gemelo digital en diversas áreas dentro de una empresa y su amplia gama de aplicaciones. En (Tao et al., 2017, 2018a,b) se señala que el gemelo digital puede aplicarse en áreas como la optimización del plan de producción y el control operativo en una planta de producción. Las técnicas de control contemplan, de manera natural, la conexión ciber-física (a través del lazo de control y la actuación sobre la planta).

Aunque el diseño de los sistemas de control suele desarrollarse en la última fase del diseño del producto, es decir, una vez que los subsistemas están totalmente definidos, la ingeniería concurrente que se apoya en la integración multidisciplinar cambia esta perspectiva introduciendo un enfoque denominado *codiseño de control* (CCD) (García-Sanz, 2019). Éste aplica conceptos de control para diseñar el sistema completo desde sus fases más tempranas para alcanzar soluciones óptimas. Dado que el concepto de MGD considera la interacción interdisciplinar de las distintas áreas funcionales implicadas en el diseño del producto, donde se comparte el flujo de información y datos entre departamentos y tiene un enfoque centrado en el producto (Grievés, 2005, 2006) desde la primera fase del ciclo de vida, apoya la mejora continua del producto y la innovación. De este modo, los problemas pueden predecirse y resolverse antes de que se produzcan en el mundo real.

Sin embargo, tal y como se menciona en una revisión bibliográfica sobre el gemelo digital, en el contexto de las aplicaciones de fabricación (Cimino et al., 2019), un aspecto imprescindible a tener en cuenta para disponer de un MGD completo, es la integración del gemelo digital con el sistema de control, lo que permitiría la actualización de los parámetros del controlador del sistema real desde el gemelo digital una vez que se haya verificado su funcionamiento óptimo en el gemelo digital. Además, la investigación indica que el gemelo digital necesita ofrecer más servicios en el mismo entorno, ya que ayudará en la toma de decisiones complejas.

La tecnología utilizada en el proceso de sincronización/hermanamiento entre la entidad física y la digital debe satisfacer esta característica bidireccional de flujo de información para formar el MGD completo. En el ámbito industrial, los procesos automatizados se organizan y clasifican en lo que se conoce como la pirámide de automatización, un concepto que ha sido aplicado durante décadas. En ella, se describe una estructura

jerárquica que consta de cinco capas: sensores y actuadores, controladores lógicos programables (PLC) / sistemas de control distribuido (DCS) y SCADA/HMI, la capa del sistema de ejecución de fabricación (MES) y la capa de planificación de recursos empresariales (ERP). La capa de control se compone de las tres primeras capas.

En esta arquitectura, la información fluye desde la entidad física en una única dirección para ser utilizada por las capas MES y ERP, que, en combinación con los diferentes modelos de sistema y software de simulación, forman su sombra digital (Cimino et al., 2019). Bajo esta premisa, el MGD puede tomar como base esta arquitectura ya desarrollada, para conseguir la bidireccionalidad del flujo de información y lograr esta sinergia con la ingeniería de control.

Por ejemplo, en el artículo (Waschull et al., 2018) sobre industria 4.0 y fabricación inteligente se propone una integración del gemelo digital dentro de la capa superior de la pirámide de automatización junto con el MES, formando de esta manera una capa superior completa. Donde el GD es central en la esfera MES, recibe y reporta información desde y hacia otros sistemas industriales integrados (ERP, PLM, CAE). Así, (Waschull et al., 2018) presentan una modificación de la pirámide de automatización, lo que permitiría lograr la sinergia de la ingeniería de control en este nuevo paradigma.

Siendo estricto con la definición de la norma ISO 23247-1 (International Organization for Standardization, 2021a), un sistema de supervisión (SCADA) podría ya considerarse un gemelo digital, pues representa digitalmente un elemento observable de fabricación, sincronizado con él mismo. También, de acuerdo con la definición del Digital Twin Consortium, el SCADA constituye una representación virtual de entidades y procesos del mundo real, sincronizado con una frecuencia específica. Sin embargo, un gemelo digital, abarca algo más y ofrece un nivel mucho más elevado de información y funcionalidad. Un SCADA es una representación del estado actual, mientras que el gemelo digital representa cualquier estado en el tiempo, incluyendo el futuro, mediante la predicción y simulación. Así pues, la definición del Digital Twin Consortium incluye lo siguiente: “Los gemelos digitales utilizan datos históricos y en tiempo real para representar el pasado y el presente y simular futuros previstos” (Digital Twin Consortium, 2020a). La norma ISO 23247 establece, para la arquitectura del gemelo digital, en su dominio, acoger aplicaciones y servicios como la simulación y el análisis.

El desarrollo del modelo gemelo digital tiene en cuenta estas características de flexibilidad, que permiten la adaptabilidad tanto del activo físico (gemelo físico) como del activo digital (gemelo digital). Una característica distintiva de este MGD es que los datos fluyen bidireccionalmente, es decir, los datos fluyen desde el gemelo físico para reflejar su estado y comportamiento en el gemelo digital, pero también ofrece la posibilidad de actuar desde el gemelo digital hacia el gemelo físico, ofreciendo servicios de monitorización, optimización y toma de decisiones sobre el sistema de control (French and Miled, 2017; Cimino et al., 2019).

Además, el MGD también permite la monitorización en tiempo real de la entidad física y la detección de situaciones anómalas (Tao et al., 2019e). Por ejemplo, ante la aparición de una anomalía el sistema puede activar alarmas o tomar medidas

automáticas para solucionar el problema, mejorando la reacción ante emergencias y la seguridad del sistema.

Hay un número grande de artículos sobre el modelo Digital Twin, que incorporan aspectos centrados en el ámbito de la

ingeniería de control. En este trabajo, se ha hecho una clasificación, especificando el uso concreto de los mismos, como se expone a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3: Gemelo digital en el marco del control automático

Referencia	Dominio	Aplicación
(Jiang et al., 2023)	Automatización en la construcción	<p>Se utilizan gemelos digitales de construcción (CDT) y equipamiento para la supervisión en tiempo real y el control dinámico, mediante una plataforma de colaboración de gemelos digitales basada en blockchain y un modelo integrado de diseño basado en el dominio (IDDD). Se estructura en tres capas principales:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Capa de dominio técnico</i>: detecta los estados en tiempo real de los objetos de construcción inteligentes (SCOs) y la información circundante para actualizar sus correspondientes gemelos digitales.</li> <li>2. <i>Capa de dominio empresarial</i>: compuesta por gemelos digitales centrales (CDTs) y gemelos digitales secundarios (SDTs) que realizan la detección en tiempo real y control dinámico, basados en los flujos de datos de la interoperación bidireccional.</li> <li>3. <i>Capa de dominio de gestión</i>: aplica un modelo de flujo de trabajo basado en una red de Petri coloreada (PN dinámica) para la colaboración de gemelos digitales multi-dominio. Su estructura y atributos de comportamiento proporcionan la base para el control automático durante los procesos de equipamiento MiC in situ y remotos.</li> </ol>
(Bono et al., 2022)	Inspección estructural	<p>Se utiliza el gemelo digital de un puente para definir un conjunto de trayectorias de referencia y diseñar el controlador de posición para la navegación autónoma de una flota de UAVs en inspecciones de infraestructuras.</p> <p><i>Creación digital de gemelos</i> : (i) Modelo 3D en BIM, (ii) Digitalización del proyecto en papel (CAD 3D, fotogrametría mediante LIDAR)</p> <p>Localización eficiente de <i>puntos de referencia</i> de la infraestructura del puente a través de su gemelo digital.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Basándose en el gemelo digital, se realizaron simulaciones creadas del controlador y de las trayectorias de referencia.</li> <li>2. El gemelo digital se utiliza en un entorno numérico para probar una metodología de gestión para el control automático y la planificación de la trayectoria de un dron para la futura interpolación sobre un enjambre de UAVs.</li> </ol>
(Schmid and Winkler, 2022)	Industria 4.0	<p>Integración de un Gemelo Digital con métodos de inteligencia artificial, que permite una simulación precisa y en tiempo real del sistema de producción. Para proporcionar información a un sistema de apoyo a la toma de decisiones (interacción humana) para una óptima toma de decisiones.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El <i>sistema híbrido de gestión de la producción</i> se compone de tres áreas de control: interacción humana, área híbrida y autocontrol.</li> <li>2. <i>La Arquitectura del gemelo digital</i> es escalable y actualizable, la cual integra diferentes módulos que interactúan entre sí: Sistema de Producción, Big Data, Gemelo Digital, Inteligencia Artificial, Feedback Reply.</li> </ol>

Continúa en la página siguiente

Tabla 3: Gemelo digital en el marco del control automático (Continuación)

Referencia	Dominio	Aplicación
(Tajadura et al., 2022)	Control automático	<p>Auto-</p> <p>Uso del gemelo digital para ayudar al campo del control automático, facilitando el diseño y optimización de algoritmos de control sin comprometer la integridad del sistema físico controlado. La <i>arquitectura propuesta</i> intercomunica sistemas y comparte información a través de librerías implementadas en Simulink e IEC61131, diseñados específicamente para implementar controladores.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. La comunicación está diseñada para <i>flujo de datos bidireccional</i>, de PLC a Simulink o de Simulink a PLC, donde el intercambio de datos entre librerías se basa en UDP.</li> <li>2. Aplicación sobre un esquema controlador-planta en el que se exploran diferentes configuraciones: Controlador Virtual y Entidad Virtual, Controlador Virtual y Entidad Real, Controlador Real y Entidad Virtual, Controlador Real y Entidad Real.</li> </ol>
(Saifutdinov and Tolujevs, 2021)	Transporte y Telecomunicaciones	<p>El concepto de gemelo digital se utiliza para desarrollar y probar software para sistemas de control automático previstos para el futuro, que resolverán tareas de control centralizado. El modelo propuesto pone de relieve la utilidad de separar las aplicaciones del propio espacio del gemelo digital, en lugar de tratarlas como parte del espacio del gemelo digital.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El modelo GD se caracteriza por los principios de discretización temporal del proceso observado y del espacio en el que tiene lugar el movimiento de los vehículos terrestres y las aeronaves.</li> <li>2. El GD recoge y almacena todo el flujo de datos creado por el modelo de simulación, donde el intercambio de información es bidireccional.</li> <li>3. El GD sirve como fuente de datos para implementar sistemas de aprendizaje automático en el desarrollo de sistemas de control automático.</li> </ol>
(Ding and Li, 2021)	Ingeniería de control	<p>de</p> <p>La integración del concepto de Gemelo Digital con los métodos de monitorización del rendimiento del control (CPM), ampliamente aceptados y aplicados en la industria para evaluar bucles de control, así como para detectar y diagnosticar parámetros defectuosos y fallos en los componentes del proceso. Una combinación innovadora denominada Gemelo Digital CPM.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El núcleo del Gemelo Digital CPM es el modelo centrado en los residuos de la dinámica del sistema y el modelo de rendimiento para la supervisión y predicción del rendimiento del sistema, que en el entorno industrial debe poder actualizarse para adaptarse a los cambios en las condiciones de trabajo y a las incertidumbres que rodean al proceso de producción.</li> <li>2. Los gemelos digitales integran elementos fundamentales como los observadores de estado y la supervisión de procesos con diagnóstico de fallos en la producción industrial.</li> </ol>
(Kulikov et al., 2021)	Sistemas eléctricos complejos	<p>elec-</p> <p>Arquitectura del gemelo digital aplicado a sistemas de energía eléctrica centrado en la recuperación de emergencias y los bucles de control. Integración de un modelo matemático (representa de forma detallada y formal el sistema) para predecir y responder rápidamente a los incidentes.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El objetivo del control del sistema de EPS es devolver el sistema de un conjunto de estados defectuosos a un estado normal.</li> <li>2. La tecnología de gemelos digitales puede reducir la proporción de control automatizado y disminuir la tasa de error humano en la EPS.</li> <li>3. Las conexiones entre el gemelo digital y los objetos reales y los esquemas de control se realizan mediante relaciones categóricas.</li> </ol>

Continúa en la página siguiente

Tabla 3: Gemelo digital en el marco del control automático (Continuación)

Referencia	Dominio	Aplicación
(Dobrescu et al., 2020)	Teoría de Sistemas, Control y Computación	<p>Uso de la tecnología del gemelo digital para la evaluación de soluciones de control automático en procesos de fabricación. El enfoque utiliza la simulación Hardware in the Loop y Software in the Loop para evaluar la eficiencia de los procedimientos de control y la infraestructura hardware de los controladores. Se emplearon tres variantes: el uso de un Digital Twin (DT) que integra todos los componentes; la simulación Control-Hardware-In-the-Loop (C-HIL) interconectada con un modelo de proceso industrial (tipo Markov) en la plataforma de simulación; y la integración de dos instancias diferentes de Digital Twin (DTI), SIL-DT y HIL-DT.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El Gemelo Digital se ha desarrollado utilizando el enfoque de Diseño Basado en Modelos (MBD) para integrar elementos de control, seguridad, calidad y disponibilidad en los procesos de fabricación.</li> <li>2. El gemelo digital ha sido implementado en una plataforma de simulación CIDSAC-TEH con una arquitectura de 6 niveles, donde las conexiones entre las entidades del GD se establecen a través del nivel 3 mediante un servidor OPC UA.</li> </ol>
(Zolin and Ryzhkova, 2020)	Automatización	<p>El gemelo digital aplicado en la operación de subestaciones digitales, para evaluar sus ventajas y características en redes de transporte y distribución.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. La tecnología GD mejora la información del sistema de control automático y permite un análisis automatizado de los parámetros controlados para una representación completa del estado de funcionamiento de la subestación.</li> <li>2. El uso de la tecnología de gemelos digitales en las redes de transporte y distribución de electricidad permite integrar la información y automatizar el análisis de los parámetros para mejorar el control automático de la red.</li> <li>3. Estos gemelos digitales contienen una única base de datos que se sincroniza automáticamente con los datos recibidos de distintas fuentes, creando un modelo digital correspondiente a la red física.</li> </ol>
(Dorrer, 2020)	Modelado de procesos empresariales	<p>Desarrollo de un modelo predictivo de alto nivel del rendimiento organizativo en una organización educativa. Dicho modelo forma parte del concepto de Gemelo Digital de un Proceso de Negocio (DTBP) como parte integral del Gemelo Digital de una Organización (DTO). La estructura del subsistema DTBP está conformada por:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Interfaz del sistema ejecutivo de la empresa</li> <li>2. Subsistema de control y ejecución, Subsistema de simulación (modelización)</li> <li>3. Subsistema de entrada, que permite un flujo de datos bidireccional.</li> </ol>
(Kabaldin et al., 2019)	Dinámica de Sistemas Técnicos	<p>Desarrollo de gemelos digitales de sistemas híbridos de procesamiento ciber-físico (máquinas CNC) para aplicar controladores neuromórficos en sistemas de control adaptativo.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El GD se ha obtenido en condiciones de laboratorio, reflejando el estado ideal de los procesos de transformación híbrida.</li> <li>2. El GD se compone de modelos de redes neuronales mejorados mediante algoritmos Bagging y Boosting, así como la técnica PCA para reducir la dimensionalidad de los datos.</li> <li>3. La estrategia de neurocontrol para la transformación híbrida ajusta la impresión 3D y el corte en base al análisis de las señales de emisión vibroacústica obtenidas a través de sensores y convertidores analógico-digitales (ADCs) conectados bidireccionalmente al controlador neuromórfico para el ajuste de las acciones de control.</li> </ol>

Continúa en la página siguiente

Tabla 3: Gemelo digital en el marco del control automático (Continuación)

Referencia	Dominio	Aplicación
(Washull et al., 2018)	Fabricación inteligente para la Industria 4.0	<p>El gemelo digital en la pirámide de la automatización. En la pirámide de la automatización, la función principal de los MES es la creación de gemelos digitales de productos, que contienen información detallada sobre parámetros de funcionamiento y datos ambientales. El desarrollo del GD requiere la aportación de diversas fuentes, como la entrada de datos procedentes de sensores y controladores automáticos, instrucciones detalladas de fabricación u otros documentos de diseño. Se presenta una adaptación de la pirámide de automatización.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El MES no se sitúa como una capa entre los sistemas ERP y el de control en la pirámide de la automatización.</li> <li>2. Se adaptan la capa superior de la pirámide de automatización a una capa superior completa. El GD es central en la esfera MES; recibe y reporta información desde y hacia otros sistemas industriales integrados (ERP, PLM, CAE).</li> <li>3. Su característica distintiva es el flujo bidireccional de información con los distintos niveles de la pirámide de automatización.</li> </ol>
(Ponomarev et al., 2017)	Fabricación Inteligente y Automatización	<p>La tecnología del Gemelo Digital se aplica al desarrollo de modelos digitales “vivos” y simuladores virtuales para el análisis operativo y el aumento de la eficiencia de los equipos industriales. Se indica que el gemelo digital y el sistema de control de procesos automatizados (ACS) abarcan prácticamente todos los niveles de la pirámide de la automatización. El gemelo digital se presenta como un sistema multicapa compuesto por cinco niveles. Cada nivel se representa como un subsistema independiente del propio gemelo digital.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Capa ciber-física: realiza la estabilización de los parámetros de modo y el control lógico de programa del objeto.</li> <li>2. Capa primaria de procesamiento/almacenamiento de datos: recoge los datos de los dispositivos representados por la capa ciber-física y su procesamiento primario.</li> <li>3. Capa de computación distribuida y almacenamiento: Esta capa es el núcleo del gemelo digital.</li> <li>4. Capa de modelos y algoritmos: En esta capa se pueden almacenar modelos matemáticos, estadísticos, de redes neuronales y modelos CAD.</li> <li>5. Capa de visualización e interfaces de usuario: Esta capa permite a los usuarios acceder al gemelo digital mediante una interfaz gráfica.</li> </ol>

### 5.1. Coexistencia de diferentes modelos en el gemelo digital

Como puede observarse en la bibliografía mencionada en este artículo, la tecnología de gemelos digitales se identifica como una construcción digital de un sistema físico compuesta por un conjunto de modelos multifísicos de alta fidelidad o de acuerdo con el fin, cada uno de los cuales simula un aspecto específico del sistema. Estos modelos interactúan entre sí y con sus homólogos físicos a lo largo del ciclo de vida del sistema, lo que permite la optimización práctica de las aplicaciones de ingeniería. La tecnología Digital Twin se implementa en el marco de una arquitectura de gemelos digitales (Tao et al., 2018c; Stark and Damerau, 2019) en sinergia con otras, como modelado 3D, IA, RA, RV, nuevas IT, que se integra con cada una de las dimensiones de este modelo GD. El resultado es una simulación integrada (multifísica, multiescala y probabilística) que refleja su respectivo gemelo físico, lo que permite simular y analizar el comportamiento y rendimiento del sistema en un entorno virtual. De este modo, el GD permite detectar problemas y oportunidades de mejora antes de que se produzcan en el mundo real, lo que redundará en una mejora continua del sistema.

El conjunto de modelos que componen el GD en el mundo virtual, integra múltiples escalas, capacidades y variables

de su gemelo físico para reproducir sus geometrías, propiedades físicas, comportamiento y reglas para reflejarlo (Tao et al., 2018c,a). En la Tabla 4 se presenta una clasificación de los modelos en los distintos ámbitos que requiere el GD.

Estos modelos proporcionan al gemelo digital capacidades de evaluación, optimización y predicción del sistema a través de los subespacios virtuales (Grieves, 2005) o módulos funcionales (de Prada et al., 2022), que permiten la toma de decisiones en tiempo real y la planificación a largo plazo, haciendo posible explorar diferentes escenarios de forma rápida y sencilla una vez implementado el gemelo digital. Está claro que, el Gemelo Digital proporciona una interfaz donde coexisten diferentes modelos y datos con múltiples niveles de granularidad (Jones et al., 2020). A medida que el sistema físico cambia en las distintas etapas de su ciclo de vida, estos modelos y sus distintos parámetros se actualizan para ajustarse a la realidad y reflejar sus homólogos físicos de forma coherente. En cuanto al modelo, la granularidad se refiere al nivel de fidelidad con el que los modelos reflejan la realidad en distintos ámbitos (Rosen et al., 2015; Boschert and Rosen, 2016; Schleich et al., 2017). Es esencial garantizar que los modelos sean de alta fidelidad y puedan responder a preguntas de diseño específicas. Además,

Tabla 4: Modelos que componen un GD.

Modelos de dominio	Descripción
<i>Geometría</i>	Describe los parámetros geométricos del gemelo físico, como formas, tamaños y relaciones de ensamblaje. Suele utilizar herramientas CAD para su desarrollo.
<i>Física</i>	Contiene las propiedades físicas con las que se pueden reflejar los fenómenos físicos de la entidad, como la deformación, la delaminación, la fractura y la corrosión. En este ámbito, se aplica ampliamente el método de los elementos finitos (MEF).
<i>Comportamiento</i>	Describe los mecanismos de respuesta y los comportamientos de la entidad física, bajo los conductores (comandos de control) o perturbaciones (interferencia humana) del mundo externo. Mediante, modelado metafísico, máquinas de estado y otros.
<i>Reglas</i>	Proporciona un conjunto de reglas de asociación, restricciones y deducciones extraídas del sistema físico y sus datos históricos. Estas reglas funcionan como el cerebro del gemelo digital dotándolo de capacidad de juicio, evaluación, optimización y/o predicción. Actualmente, las técnicas de IA se están aplicando ampliamente en este ámbito.

en (Tao et al., 2018c,a, 2019b,e) se ha destacado la necesidad de que el gemelo digital integre y fusione diferentes tipos de modelos para describir la entidad física desde múltiples perspectivas exhaustivas.

Sin embargo, antes de desarrollar el DT, es necesario planificar y diseñar su estructura principal. Por ejemplo, determinar qué modelos serán necesarios para simular el sistema o proceso físico en el marco de los dominios mencionados en la Tabla 4, cómo se relacionarán entre sí, y cómo interactuarán con la contraparte física. Además, el DT requiere su propia arquitectura (Boschert and Rosen, 2016). Es decir, un conjunto de principios y normas que guíen su diseño y construcción. Esto incluye aspectos como la recopilación y almacenamiento de datos, la integración de diferentes modelos, la interoperabilidad con otras herramientas, sistemas y tecnologías, y la seguridad y privacidad de los datos. El diseño previo de la estructura principal y la arquitectura del gemelo digital es esencial para garantizar que el modelo holístico resultante sea preciso, esté actualizado y resulte útil para la optimización de los sistemas y procesos físicos.

Por otra parte, en la modelización, cuantificar la incertidumbre es esencial para tener un control sobre la exactitud de los resultados. La elección de la fidelidad y la escala del modelo puede afectar a la magnitud de la incertidumbre. Sin embargo, es importante señalar que una mayor fidelidad y una escala más fina no siempre garantizan una reducción significativa de la incertidumbre. Además, hay que tener en cuenta el coste computacional a la hora de elegir la fidelidad y la escala del modelo. Es aconsejable comprender el impacto de las opciones de escala y fidelidad en la incertidumbre antes de realizar cualquier simulación (Tuegel et al., 2011; Tuegel, 2012; Kraft, 2018; Rasheed et al., 2020).

Por ejemplo, en el campo aeroespacial, los métodos de muestreo como las simulaciones Monte Carlo (Tuegel et al., 2011) se utilizan habitualmente para determinar la incertidumbre, pero pueden ser costosas desde el punto de vista computacional; otra técnica es la inferencia bayesiana (Tuegel, 2012). Además, los métodos probabilísticos sofisticados pueden ser mejores que los métodos de muestreo, en términos de cuantificación de la incertidumbre (Kraft, 2018; Rasheed et al., 2020).

El gran volumen de datos y la complejidad de los modelos utilizados en la tecnología de gemelos digitales pueden crear importantes demandas computacionales. Una solución para aliviar esta carga es la aplicación de modelos de orden reducido. Estos modelos son una técnica para simplificar modelos complejos captando rápidamente las características esenciales de los fenómenos que tienen lugar. A menudo, no es necesario calcular todos los detalles de un modelo de orden completo para cumplir las restricciones del tiempo real. Estos modelos son especialmente útiles en situaciones en las que el tiempo de cálculo es un factor crítico, como en la toma de decisiones en tiempo real (por ejemplo, (Chicaiza et al., 2021)). Además, los modelos de orden reducido también pueden utilizarse para optimizar y controlar sistemas complejos, ya que permiten una representación compacta de los sistemas y su comportamiento. Esto puede ayudar a mejorar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas, reduciendo el tiempo y los costes de análisis y simulación (Rasheed et al., 2020).

En cuanto al modelado en sus diferentes dominios, la literatura científica ha observado un mayor enfoque en el modelado geométrico y físico en comparación con el modelado de comportamiento y de reglas, como se menciona en (Tao et al., 2019b,e). Sin embargo, es importante señalar que la integración de todos estos enfoques es esencial para lograr una descripción completa del gemelo físico desde múltiples perspectivas. En (Rasheed et al., 2020) se presenta una revisión exhaustiva que aborda las diferentes metodologías y técnicas relacionadas con la implementación del DT desde un enfoque de modelado. Se centra en el modelado de comportamiento y reglas, donde las técnicas híbridas con ML y big data están ganando gran aplicabilidad. También, presenta varias aplicaciones en los campos de la salud, la meteorología, la fabricación y la tecnología de procesos, la educación, las ciudades, el transporte y el sector energético. Además, (Chicaiza et al., 2021; Salazar et al., 2022) desarrolló un modelo neurofuzzy de predicción de un campo solar Fresnel y un generador de alta temperatura (HTG), en el marco del modelado de reglas como parte de un gemelo digital.

## 5.2. Gemelo digital para el diseño de controladores

Las herramientas de simulación dinámica han estado asociadas al diseño de los sistemas de control desde hace mucho tiempo. Sin embargo, la técnica de actualizar los parámetros de un modelo de simulación, para el diseño actualizado de sistemas de control, tal y como se describe en (Friedmelt and Rohlf, 2003), no es una práctica común. Si se permite la sincronización, para usar el gemelo digital de un sistema, la experimentación realista se hace más accesible y menos costosa, pudiendo desarrollarse y validarse diversas técnicas de control apropiadas en el mundo virtual. Así, los procesos de optimización pueden proponerse en el espacio virtual y propagarse después al sistema real.

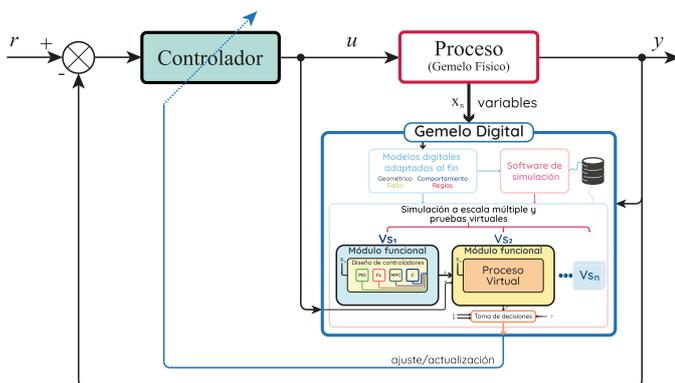


Figura 4: Gemelo digital usado para diseño de controlador

Por ejemplo, el gemelo digital de un sistema de sistemas puede proponer automáticamente un nuevo plan de control y ajustarlo según las condiciones de operación, haciéndolos más adaptables y robustos (Tao et al., 2019b). Así, en el gemelo digital se puede analizar, evaluar y optimizar un esquema de programación a través de la autoorganización y el autoaprendizaje, mientras que en la planta (gemelo físico) se controla y supervisa el estado de la producción en tiempo real. La Figura 4 es una representación de este esquema.

El conjunto de modelos que componen el gemelo digital en el mundo virtual integra múltiples escalas, capacidades y variables de su gemelo físico para reproducir sus geometrías, propiedades físicas, comportamiento y reglas para reflejarlo (Tao et al., 2018c,a). Dichos modelos se enmarcan en los niveles geométricos, físicos, comportamiento y reglas de la entidad funcional física para simularla. Por otra parte, la arquitectura de referencia para el gemelo digital propuesta por la norma ISO 23247 incluye modelo de referencia desde el punto de vista de dominio y entidad (usuario, gemelo digital y comunicación de dispositivos), formando así el marco gemelo digital que reflejara los elementos de fabricación observables (International Organization for Standardization, 2021b).

Así, estos modelos proporcionan al gemelo digital capacidades de evaluación, optimización y predicción del sistema, que permiten la toma de decisiones en tiempo real y la planificación a largo plazo, haciendo posible explorar diferentes escenarios de forma rápida y sencilla una vez implementado el gemelo digital. Además, proporciona una interfaz donde coexisten diferentes modelos y datos con múltiples niveles de granularidad (Jones et al., 2020). A medida que el sistema físico cambia en

las distintas etapas de su ciclo de vida, estos modelos y sus distintos parámetros se actualizan para ajustarse a la realidad y reflejar sus homólogos físicos de forma coherente. En cuanto al modelo, la granularidad se refiere al nivel de fidelidad con el que los modelos reflejan la realidad en distintos ámbitos (Rosen et al., 2015; Boschert and Rosen, 2016; Schleich et al., 2017).

Para un fabricante, es esencial garantizar que los modelos sean de alta fidelidad y puedan responder a preguntas de diseño específicas. Para las aplicaciones de control automático, esto no es necesario. La computación en tiempo real exige una reducción de complejidad de los modelos, para adaptarlos al fin, ahorrando una carga de computación innecesaria, como se expresa claramente en la definición dada por la norma ISO 23247: “Un gemelo digital en la fabricación es una *representación digital adaptada a los fines*, de un elemento de fabricación observable con sincronización entre el elemento y su representación digital”.

Una vez construido el modelo gemelo digital, adaptado a la aplicación de control deseada, se pueden simular diferentes escenarios y optimizar los parámetros de control para lograr el mejor rendimiento del sistema. De este modo, se mejoran la eficiencia y la seguridad, ya que los posibles problemas pueden detectarse y prevenirse antes de que se produzcan.

El flujo de información bidireccional está garantizado y el modelo debe estar adaptado al propósito del diseño del controlador. Así pues, no será necesario en muchos casos un modelo con una granularidad muy fina. Mediante estos modelos, se puede sintonizar automáticamente el controlador (Vered and Elliott, 2023a).

En (Rosen et al., 2015) se muestra la importancia en la (re)programación automática de la producción (bucle de control) como parte de la planificación de fábricas, identificando el enfoque Digital Twin como la próxima ola en tecnología de modelado, simulación y optimización. Donde el gemelo digital desempeña un papel crucial en la consecución de un nuevo nivel de flexibilidad en los sistemas de automatización.

En (Torres et al., 2022) se presenta la implementación de un sistema de comunicaciones que permite el intercambio de datos en tiempo real entre el sistema físico y el Gemelo Digital, sobre una célula de fabricación flexible como marco de diseño de estrategias de automatización. De forma similar, (Olivar et al., 2022) desarrolla el gemelo digital de un alimentador de bandejas de una célula de fabricación flexible, integrado en un sistema de realidad virtual, que permite al usuario interactuar con todos los elementos presentes en la célula de fabricación para su automatización y supervisión.

## 5.3. Gemelos Digitales y MPC

El MPC es una estrategia avanzada de control que aprovecha los modelos matemáticos de un sistema para hacer predicciones sobre su comportamiento y luego utiliza esas predicciones para controlar el sistema en tiempo real (Camacho and Bordons, 2007). La principal ventaja del MPC es su capacidad para gestionar restricciones y garantizar la estabilidad manteniendo el rendimiento, además de suministrar parámetros de ajuste, lo cual lo ha constituido en una de las técnicas más usadas de control avanzado de procesos industriales.

Partiendo de la premisa de que el gemelo digital se compone de un conjunto de modelos de alta fidelidad, *suficientes para*

cada ámbito en el que se desarrolla y que constituyen su columna vertebral (Glaessgen and Stargel, 2012), y considerando que el núcleo de MPC es *algún tipo de modelo (por ejemplo, lineal, no lineal, gris o de caja negra)* (Jones et al., 2020) del sistema o proceso a controlar, se presenta esta estrategia como el paradigma de control donde el uso del gemelo digital presenta una utilidad incuestionable. Al integrar las ventajas del MPC relacionadas con el control y la optimización, estas se pueden ampliar y aplicarse al gemelo digital, principalmente a los modelos dentro del dominio de comportamiento y reglas que comprenden la estructura interna del gemelo digital.

La similitud entre el gemelo digital y el control predictivo basado en modelos radica en que ambos conceptos tienen la *capacidad de captar e interpretar el estado actual de una entidad física* y utilizar esa información para alterar su estado futuro, ya sea para optimizar su rendimiento o para reaccionar ante los problemas. Por otra parte, la similitud de la ingeniería de control sobre el “sensor-controlador” y el “controlador-actuador” con las características de interacción del espacio físico-virtual y virtual-físico del modelo de gemelo digital pone de relieve las ventajas del enfoque de bucle cerrado, tal como se introdujo inicialmente el modelo de gemelo digital (Grieves, 2005; Piascik et al., 2010; Grieves and Vickers, 2017).

El concepto de sincronización entre entidad física y digital permite una actualización de los modelos, permitiendo un mejor desempeño del MPC. Así pues, la relación entre MPC y Digital Twin es sinérgica y encierra un gran potencial para mejorar el control y la optimización de los sistemas físicos. La combinación de estos conceptos proporciona una poderosa herramienta a ingenieros e investigadores para diseñar, probar e implementar estrategias de control avanzadas para diversas aplicaciones.

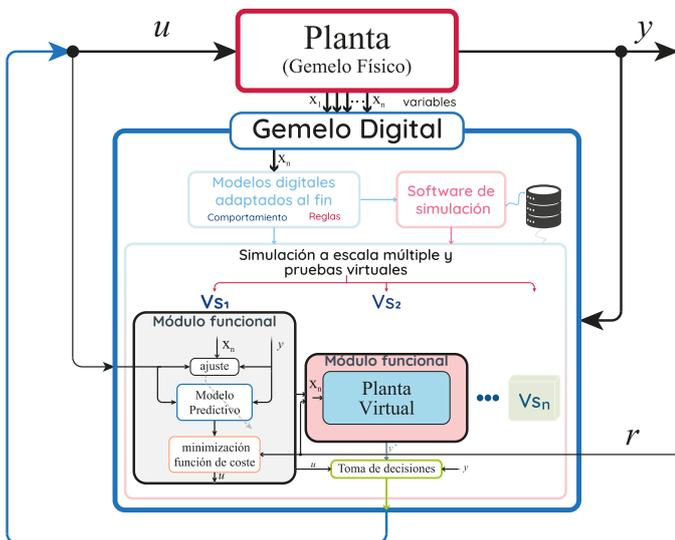


Figura 5: Esquema de MPC con actualización del modelo

La Figura 5 representa el esquema de una estrategia MPC con la actualización del modelo mediante la sincronización del gemelo digital.

Normalmente, para control predictivo se usan modelos reducidos (subrogados), pues la resolución del problema de optimización con modelos de muchas ecuaciones diferenciales o

de parámetros distribuidos, con los que se consigue mucha precisión, puede resultar impracticable. Por ejemplo, en (Reveillère, Adrien et al., 2019) se explica una aplicación con MPC, con gemelo digital. Se usa AMESIM para modelar el proceso (bomba de calor), se alimenta de datos reales, para el control se usa Matlab, linealizando en un punto de operación. Se valida también el MPC sobre la simulación del gemelo digital. La linealización permite usar modelos simples, bien conocidos y con buen comportamiento en el entorno de un punto de trabajo.

Sin embargo, la precisión no tiene que estar reñida con la computación exhaustiva. En este sentido, (Chicaiza et al., 2021; Machado et al., 2023; Salazar et al., 2022) presentan modelos neuroborrosos para la predicción de la temperatura de salida del fluido caloportador de un campo solar Fresnel y de un generador de alta temperatura (HTG), cuya computación y sincronización se reducen a niveles de los modelos simples.

#### 5.4. Gemelos Digitales y observadores

Además de las propiedades de predicción de variables de control, los gemelos digitales se pueden usar en la estimación u observación de variables de estado. Por ejemplo, en (Vered and Elliott, 2023b) se emplea un gemelo digital para garantizar la estabilidad de un sistema mecánico con una holgura no lineal incierta. Dicho gemelo digital permite actualizar y optimizar el rendimiento y la estabilidad de un sistema de control realimentado en presencia de elementos no lineales variables en el tiempo, como la holgura en un husillo. El gemelo digital estima el ángulo de la holgura en tiempo real y rediseña la zona muerta del controlador para mejorar la estabilidad y el rendimiento del sistema en todo momento. El esquema se muestra en la Figura 6.

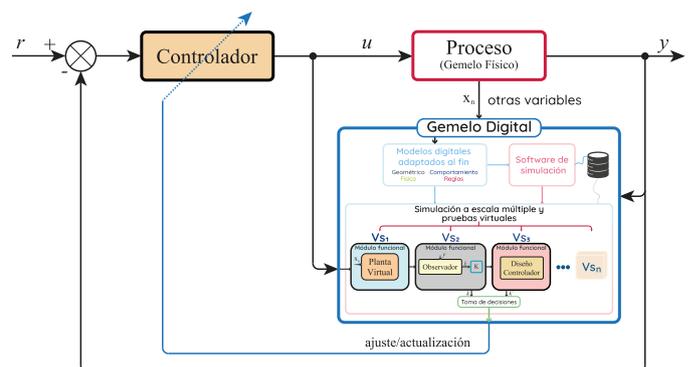


Figura 6: Observador dentro de un Gemelo Digital

Otro esquema se presenta en el trabajo (Ben Amor, 2022), donde se usa un modelo sofisticado, presentado como gemelo digital para el diseño de un observador de un KPI en un sistema de optimización en un proceso de producción de colada continua de acero. Esta idea se representa en la Figura 7. La misma idea se muestra en (Ebadpour et al., 2022), donde, a partir de un modelo más sofisticado y preciso, presentado también como gemelo digital, se obtiene un observador del tipo Kalman extendido en el control de flujo orientado de un motor asíncrono.

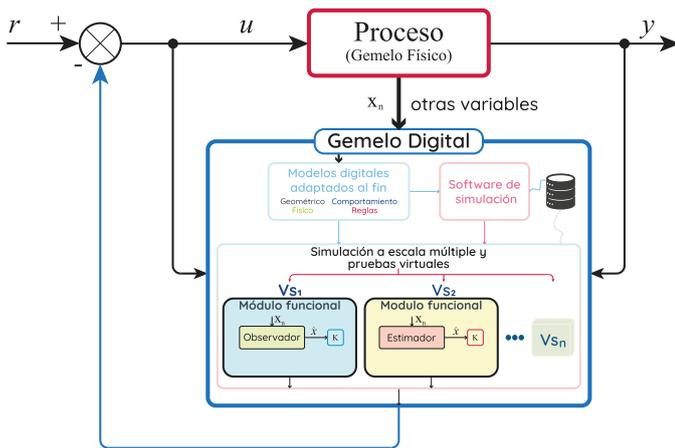


Figura 7: Actualización de observador mediante un Gemelo Digital

## 6. Conclusiones

Se ha realizado una revisión histórica del concepto de Gemelo Digital, analizando cómo ha evolucionado a lo largo del tiempo y cómo ha sido utilizado en diferentes contextos. Con esta perspectiva histórica se ha intentado proporcionar una visión más completa de su desarrollo.

El Gemelo Digital ha ganado un considerable atractivo en diversos ámbitos, generando un gran interés y evolucionando rápidamente. Su relación con la Industria 4.0 lo coloca en el centro de la transformación digital en el sector industrial. Como se ha podido observar en el trabajo desarrollado, a pesar de su popularidad, el Gemelo Digital aún suscita discrepancia tanto en la comunidad científica como en la industrial. Las definiciones del concepto varían ampliamente y no existe una comprensión unificada en la literatura. Esto refleja la diversidad de interpretaciones y enfoques dentro de diferentes disciplinas. En este trabajo se ha realizado un esfuerzo por compilar diversas definiciones.

De acuerdo con la reciente norma ISO 23247, los conceptos Gemelo Digital y Modelo Gemelo digital son ineludiblemente diferentes. Este último representa una arquitectura (o marco) que contiene al Gemelo Digital. Como puede observarse en la Sección 3, antes de la aparición de esta norma, ha existido una gran confusión entre estos conceptos, entre la comunidad científica e industrial. La norma propone que el Gemelo Digital requiera su propia arquitectura, que abarca principios y normas que guían su diseño y construcción.

Los autores desean destacar que la adopción de la normativa contribuye a disipar las confusiones resultantes de las variaciones conceptuales prevalecientes. Por consiguiente, antes de comenzar el desarrollo del Gemelo Digital, resulta fundamental llevar a cabo una planificación cuidadosa y diseñar meticulosamente su estructura principal, de acuerdo con la norma, y así garantizar la precisión, actualización y utilidad del modelo holístico resultante en la optimización de sistemas y procesos físicos.

En el ámbito industrial, la adopción de la tecnología del Gemelo Digital es alta y la mayoría de las inversiones en esta tecnología se han producido en los últimos tres años. El mayor uso del Gemelo Digital se da en la simulación de productos

que aún no están conectados a objetos físicos reales, la supervisión digital en tiempo real del estado y el comportamiento de objetos físicos existentes, la capacidad de prever el estado y el comportamiento futuros de activos físicos mediante análisis predictivos, y la creación de objetos digitales inteligentes capaces de auto diagnosticarse y recomendar acciones correctivas o preventivas en activos físicos. Además, los participantes en este sector muestran un alto interés en una definición sencilla y estandarizada que explique claramente el significado de los Gemelos Digitales.

A diferencia de muchas revisiones previas que se centran principalmente en la industria de la manufactura, este artículo se ha enfocado en las aplicaciones de los Gemelos Digitales en el campo de la Automática. En el ámbito de esta disciplina, es común equivocadamente asociar el término Gemelo Digital solamente con el modelo de la planta. Es muy importante que los conceptos de GD y MGD estén claros dentro de la automatización y el control automático. De acuerdo con la normalización, el Gemelo Digital requiere de una arquitectura cuando se lleva a cabo el hermanamiento con su homólogo físico, con el propósito de que tanto los modelos, sus parámetros y funciones se actualicen de manera sincronizada con el activo físico, permitiendo que refleje su estado y comportamiento a lo largo de su ciclo de vida.

Asimismo, al emplear un modelo, observador o estimador, es posible que algunos autores utilicen incorrectamente el término Gemelo Digital para referirse a los mismos. Esto puede dar lugar a una mayor confusión y a inconsistencias en el futuro, ya que todo lo correcto y lo incorrecto se hereda de un artículo a otro. Algo muy similar ocurre con los términos Modelo Digital, Sombra Digital y Gemelo Digital, donde los autores a menudo los utilizan como sinónimos. Sin embargo, es importante destacar que cada uno de estos conceptos representa algo diferente y difieren en función del nivel de integración de datos con el sistema o producto físico. En este sentido, la Sombra Digital engloba al Modelo Digital, mientras que el Gemelo Digital abarca la Sombra Digital.

Generalmente se tiende a pensar que la simulación tradicional junto con los simuladores son el equivalente al Gemelo Digital, pero los modelos que se usan para ese propósito suelen presentar una naturaleza invariable en el sentido de que sus parámetros, funciones, propiedades físicas, se mantienen a lo largo del ciclo de vida, algo que en la realidad no ocurre pues estos cambiarían por el envejecimiento del producto. Además, los simuladores por lo general no están conectados en tiempo real al sistema físico y no interactúa con el de manera bidireccional. En la práctica se utilizan para hacer pruebas fuera de línea, con datos históricos.

Por otra parte, el paradigma de Gemelo Digital toma, como un componente metodológico esencial, a la ingeniería de sistemas y a la sub-rama de la ingeniería de sistemas basada en modelos (MBSE), la cual refuerza la verificación de los requisitos impuestos al sistema, mediante la simulación y las pruebas virtuales a múltiples escalas. El Gemelo Digital también se ocupa de los análisis estáticos y dinámicos, donde la simulación continua puede detenerse en cualquier punto o intervalo de tiempo a través del hilo digital para examinar el comportamiento del sistema.

Es innegable que el modelo gemelo digital está estrechamente ligado a los avances tecnológicos y ha evolucionado de manera significativa gracias a estos, en particular a las tecnologías desarrolladas y utilizadas para establecer los vínculos entre el espacio real y el espacio virtual. Esto ha permitido reducir la brecha entre el mundo físico y el mundo virtual. En los primeros años del siglo XXI, el acceso al concepto y la filosofía del Gemelo Digital parecía inalcanzable (casi utópico), no solo debido a los elevados costos asociados a su desarrollo, sino también a las demandas de capacidad computacional, junto con la tecnología en fase de desarrollo o inexistente. Sin embargo, en la actualidad, tanto la capacidad computacional como los avances tecnológicos han avanzado significativamente, y los costos se han reducido de manera sustancial, lo que ha hecho posible el desarrollo del Gemelo Digital en diversas industrias, permitiéndoles aprovechar sus ventajas.

En la actualidad se está alcanzando un consenso científico para definir e implementar el marco de desarrollo (arquitectura de referencia) del gemelo digital, así como para desarrollar una plataforma universal para su diseño, en la que puedan integrarse los diferentes modelos que lo conforman. También se está trabajando en la gestión de los datos necesarios para reflejar el comportamiento y estado de la entidad funcional, lo cual está estrechamente relacionado con su almacenamiento y procesamiento. En otras palabras, se busca una forma eficiente e inteligente de gestionarlos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Europea la financiación de este trabajo en el marco del proyecto DENiM. Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención n° 958339.

The authors thanks to the European Commission for funding this work under project DENiM. This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 958339.

## Referencias

Allaire, D., Kordonowy, D., Lecerc, M., Mainini, L., Willcox, K., 2014. Multifidelity ddds methods with application to a self-aware aerospace vehicle. *Procedia Computer Science* 29, 1182–1192, 2014 International Conference on Computational Science.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.106>

Allen, B. D., 2021. Digital twins and living models at nasa. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699>, accessed: 2022-08-18.

Altair, 2022. 2022 digital twin global survey report. <https://altair.com/resource/digital-twin-summary-report>, accessed: 2023-02-05.

Augustine, P., 2020. Chapter four - the industry use cases for the digital twin idea. In: Raj, P., Evangeline, P. (Eds.), *The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments: The Industry Use Cases*. Advances in Computers. Elsevier, pp. 79–105.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2019.10.008>

Bauernhansl, T., Krüger, J., Reinhart, G., 2016. Wgp-standpunkt industrie 4.0. *Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik*, 1–51.  
URL: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/07f8968-438f-436a-85d3-ae92912bce12/details>

Ben Amor, N. a., 2022. Ai based state observer for optimal process control: Application to digital twins of manufacturing plants. Master's thesis, Universidad Politécnica de Cataluña.  
URL: <http://hdl.handle.net/2117/385629>

Biesinger, F., Weyrich, M., Oct 2019. The facets of digital twins in production and the automotive industry. In: 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), pp. 1–6.  
DOI: [10.1109/ICMECT.2019.8932101](https://doi.org/10.1109/ICMECT.2019.8932101)

Bono, A., D'Alfonso, L., Fedele, G., Filice, A., Natalizio, E., 2022. Path planning and control of a uav fleet in bridge management systems. *Remote Sensing* 14 (8).  
DOI: [10.3390/rs14081858](https://doi.org/10.3390/rs14081858)

Boschert, S., Rosen, R., 2016. Digital twin-the simulation aspect. In: Hehenberger, P., Bradley, D. (Eds.), *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*. Springer International Publishing, Cham, pp. 59–74.  
DOI: [10.1007/978-3-319-32156-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5)

Building Digital Twin Association, 2022. The 2nd BDTIC is an international conference dedicated to Building Digital Twins. <https://buildingdigitaltwin.org/bdtic-2022>.

Camacho, E. F., Bordons, C., 2007. *Model Predictive control*. Springer London, London.  
DOI: [10.1007/978-0-85729-398-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5_2)

Cerrone, A., Hochhalter, J., Heber, G., Ingraffea, A., 2014. On the effects of modeling as-manufactured geometry: Toward digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering* 2014.  
DOI: [10.1155/2014/439278](https://doi.org/10.1155/2014/439278)

Chicaiza, W. D., Sánchez, A. J., Gallego, A. J., Escaño, J. M., 2021. Neuro-fuzzy modelling of a linear fresnel-type solar collector system as a digital twin. In: Joint Proceedings of the 19th World Congress of the International Fuzzy Systems Association (IFSA), the 12th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT), and the 11th International Summer School on Aggregation Operators (AGOP). Atlantis Press, pp. 242–249.  
DOI: <https://doi.org/10.2991/asum.k.210827.033>

Cimino, C., Negri, E., Fumagalli, L., 2019. Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry* 113, 103130.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>

Crowley, C., 2020. It's been 50 years since apollo 13's safe return to earth. <https://earthsky.org/space/apollo-13-safe-return-to-earth-anniversary/>, accessed: 2022-08-18.

de Prada, C., Galán-Casado, S., Pitarch, J. L., Sarabia, D., Galán, A., Gutiérrez, G., mar. 2022. Gemelos digitales en la industria de procesos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 19 (3), 285–296.  
DOI: [10.4995/riai.2022.16901](https://doi.org/10.4995/riai.2022.16901)

Digital Twin Consortium, 2020a. The definition of a digital twin. <https://www.digitaltwinconsortium.org/hot-topics/the-definition-of-a-digital-twin/>, accessed: 2022-07-19.

Digital Twin Consortium, 2020b. Digital twin consortium defines digital twin. <https://www.digitaltwinconsortium.org/2020/12/digital-twin-consortium-defines-digital-twin/>, accessed: 2022-07-19.

Digital Twin Consortium, 2020c. Digital twin consortium is the authority in digital twin. <https://www.digitaltwinconsortium.org/about-us/>, accessed: 2022-07-19.

Digital Twin Consortium, 2021. Digital Twin Consortium Announces Liaison with the Industrial Digital Twin Association. <https://www.digitaltwinconsortium.org/press-room/12-02-21>.

Ding, S. X., Li, L., 2021. Control performance monitoring and degradation recovery in automatic control systems: A review, some new results, and future perspectives. *Control Engineering Practice* 111, 104790.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104790>

Dobrescu, R., Chenaru, O., Florea, G., Geampalia, G., Mocanu, S., Oct 2020. Hardware-in-loop assessment of control architectures. In: 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), pp. 880–885.  
DOI: [10.1109/ICSTCC50638.2020.9259636](https://doi.org/10.1109/ICSTCC50638.2020.9259636)

Dorrer, M. G., nov 2020. The prototype of the organizational maturity model's digital twin of an educational institution. *Journal of Physics: Conference Series* 1691 (1), 012121.  
DOI: [10.1088/1742-6596/1691/1/012121](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012121)

Ebadpour, M., Talla, J., Jamshidi, M. B., Peroutka, Z., 2022. Ekf digital twinning of induction motor drives for the metaverse. In: 2022 20th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), pp. 1–6.  
DOI: [10.1109/ME54704.2022.9983341](https://doi.org/10.1109/ME54704.2022.9983341)

European Commission, 2018. Service Platform to Host and Share RESidential data (SPHERE). <https://cordis.europa.eu/project/id/820805>.

Ferguson, S., 2020. Apollo 13: The first digital twin. <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>,

- accessed: 2022-08-18.
- Fortune-Business-Insights, 2021. Digital twin market size, share & analysis | growth up to 2029. <https://www.fortunebusinessinsights.com/digital-twin-market-106246>, accessed: 2022-07-14.
- French, M. O., Miled, Z. B., 2017. Towards a reasoning framework for digital clones using the digital thread. In: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Grapevine, Texas, pp. 1–12.  
DOI: 10.2514/6.2017-0873
- Friehmelt, H., Rohlf, D., 2003. Fast model updates and simulation for efficient flight control software design. IFAC Proceedings Volumes 36 (16), 387–392, 13th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2003), Rotterdam, The Netherlands, 27–29 August, 2003.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)34792-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34792-4)
- García-Sanz, M., 2019. Control co-design: An engineering game changer. *Advanced Control for Applications* 1, 1–10.  
DOI: 10.1002/adc2.18
- Gartner, 2016. Gartner's top 10 technology trends 2017. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-technology-trends-2017>, accessed: 2022-07-19.
- Gartner, 2017. Prepare for the impact of digital twins. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/prepare-for-the-impact-of-digital-twins>, accessed: 2022-07-19.
- Gartner, 2018. Gartner identifies five emerging technology trends that will blur the lines between human and machine. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-08-20-gartner-identifies-five-emerging-technology-trends-that-will-blur-the-lines-between-human-and-machine>, accessed: 2022-07-08.
- Gartner, 2022. Emerging technologies: Revenue opportunity projection of digital twins. <https://www.gartner.com/en/documents/4011590>, accessed: 2022-07-08.
- GE Digital, 2018. Digital twin. <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>, accessed: 2022-07-19.
- Gelernter, D., 1991. *Mirror Worlds: Or: The Day Software Puts the Universe in a Shoebox...How It Will Happen and What It Will Mean*. Oxford University Press.  
DOI: 10.1093/oso/9780195068122.001.0001
- Glaessgen, E., Stargel, D., 2012. The digital twin paradigm for future nasa and u.s. air force vehicles. In: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 1–13.  
DOI: 10.2514/6.2012-1818
- Golse, N., Joly, F., Combari, P., Lewin, M., Nicolas, Q., Audebert, C., Samuel, D., Allard, M.-A., Sa Cunha, A., Castaing, D., Cherqui, R., Adam, R., Vibert, E., Vignon-Clementel, I. E., 2021. Predicting the risk of post-hepatectomy portal hypertension using a digital twin: A clinical proof of concept. *Journal of Hepatology* 74 (3), 661–669.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2020.10.036>
- Grievies, M., 2002. SME Management Forum Completing the Cycle: Using PLM Information in the Sales and Service Functions [Slide]. <https://www.researchgate.net/publication/356192963>.
- Grievies, M., 2006. *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking*. McGraw-Hill Education.
- Grievies, M., 2011. *Virtually perfect: driving innovative and lean products through product lifecycle management*. Space Coast Press.
- Grievies, M., 2014. *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication*. White paper 01, 1–7.
- Grievies, M., 2016. *Origins of the digital twin concept*. Florida Institute of Technology.  
DOI: 10.13140/RG.2.2.26367.61609
- Grievies, M., 2019. *Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins*. In: Flumerfelt, S., Schwartz, K. G., Mavris, D., Briceno, S. (Eds.), *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 175–200.  
DOI: 10.2514/5.9781624105654.0175.0200
- Grievies, M., 2022. *Intelligent digital twins and the development and management of complex systems [version 1; peer review: 4 approved]*. *Digital Twin* 2, 1–24.  
DOI: 10.12688/digitaltwin.17574.1
- Grievies, M., Vickers, J., 2017. *Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems*. In: Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., Alves, A. (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Springer International Publishing, Cham, pp. 85–113.  
DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4
- Grievies, M. W., 2005. *Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises*. *International Journal of Product Development* 2 (1/2), 71–84.  
DOI: 10.1504/IJPD.2005.006669
- Hicks, B., 2019. *Industry 4.0 and Digital Twins: Key lessons from NASA*. <https://www.thefuturefactory.com/blog/24>, accessed: 2022-08-21.
- IBM, 2020. *What is a digital twin?* <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>, online; accessed 08 August 2022.
- IDP, 2022. *Segunda edición del Building Digital Twin International Congress*. <https://www.idp.es/noticias/segunda-edicion-del-buildin-g-digital-twin-international-congress>.
- IDTA, 2023. *About the Industrial Digital Twin Association (IDTA)*. <https://industrialdigitaltwin.org/en/career>.
- infoPLC, 2020. *Nace la Industrial Digital Twin Association*. <https://www.infopl.net/plus-plus/tecnologia/item/108421-fundada-industrial-digital-twin-association>.
- International Organization for Standardization, 2021a. *(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>, accessed: 2023-02-05.
- International Organization for Standardization, 2021b. *(ISO 23247-2:2021) Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 2: Reference architecture*. <https://www.iso.org/standard/78743.html>, accessed: 2023-02-05.
- International Organization for Standardization, 2021c. *(ISO 23247-3:2021) Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 3: Digital representation of manufacturing elements*. <https://www.iso.org/standard/78744.html>, accessed: 2023-02-05.
- International Organization for Standardization, 2021d. *(ISO 23247-4:2021) Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 4: Information exchange*. <https://www.iso.org/standard/78745.html>, accessed: 2023-02-05.
- Jiang, Y., Liu, X., Wang, Z., Li, M., Zhong, R. Y., Huang, G. Q., 2023. *Blockchain-enabled digital twin collaboration platform for fit-out operations in modular integrated construction*. *Automation in Construction* 148, 104747.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104747>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., Hicks, B., 2020. *Characterising the digital twin: A systematic literature review*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 29, 36–52.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Kabaldin, Y. G., Shatagin, D. A., Kolchin, P. V., Galkin, A. A., 2019. *Neuro-morphic adaptive control of hybrid processing on cnc machines*. *AIP Conference Proceedings* 2188 (1).  
DOI: 10.1063/1.5138388
- Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., Holmström, J., 2019. *Digital twin: Vision, benefits, boundaries, and creation for buildings*. *IEEE Access* 7, 147406–147419.  
DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2946515
- Kraft, E., 2015. *Hpcmp create&trade;-av and the air force digital thread*. In: 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Kissimmee, Florida, pp. 1–22.  
DOI: 10.2514/6.2015-0042
- Kraft, E. M., 2016. *The us air force digital thread/digital twin - life cycle integration and use of computational and experimental knowledge*. In: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics, San Diego, California, USA, pp. 1–22.  
DOI: 10.2514/6.2016-0897
- Kraft, E. M., 2018. *Developing a digital thread / digital twin aerodynamic performance authoritative truth source*. In: 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Atlanta, Georgia, pp. 1–12.  
DOI: 10.2514/6.2018-4003
- Kritzing, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sih, W., 2018. *Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification*. *IFAC-PapersOnLine* 51 (11), 1016–1022, 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Kulikov, G., Antonov, V., Rodionova, L., Suleymanova, A., Abdunagimov, A., Nov 2021. *A digital twin model for electricity systems*. In: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). pp. 239–244.

- DOI: 10.1109/IC0ECS52783.2021.9657362
- Li, W., Rentemeister, M., Badedá, J., Jöst, D., Schulte, D., Sauer, D. U., 2020. Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation. *Journal of Energy Storage* 30, 101557.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101557>
- Machado, D. O., Chicaiza, W. D., Escaño, J. M., Gallego, A. J., de Andrade, G. A., Normey-Rico, J. E., Bordons, C., Camacho, E. F., 2023. Digital twin of a fresnel solar collector for solar cooling. *Applied Energy* 339, 120944.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120944>
- Madni, A. M., Madni, C. C., Lucero, S. D., 2019. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems* 7 (1).  
DOI: 10.3390/systems7010007
- Mavris, D. N., Balchanos, M. G., Pinon-Fischer, O. J., Sung, W. J., 2018. Towards a digital thread-enabled framework for the analysis and design of intelligent systems. In: 2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech @ Aerospace. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Kissimmee, Florida, pp. 1–18.  
DOI: 10.2514/6.2018-1367
- Merriam-Webster, 2023. Twin.  
URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/twin>
- Minerva, R., Lee, G. M., Crespi, N., Oct 2020. Digital twin in the iot context: A survey on technical features, scenarios, and architectural models. *Proceedings of the IEEE* 108 (10), 1785–1824.  
DOI: 10.1109/JPROC.2020.2998530
- MIT Sloan, 2019. Digital twin overview. <https://sloanreview.mit.edu/article/how-digital-twins-are-reinventing-innovation/>, accessed: 2022-08-08.
- Murray, L., 2017. Lockheed martin forecasts tech trends for defense in 2018. <https://dallasinnovates.com/lockheed-martin-forecasts-tech-trends-for-defense-in-2018/>, accessed: 2022-08-01.
- Mylonas, G., Kalogeras, A., Kalogeras, G., Anagnostopoulos, C., Alexakos, C., Muñoz, L., 2021. Digital twins from smart manufacturing to smart cities: A survey. *IEEE Access* 9, 143222–143249.  
DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3120843
- Nagler, A., 2020. 50 years ago: How simulators saved apollo 13. <https://televue.com/televueopticstalk/2020/05/13/50-years-a-go-how-simulators-saved-apollo-13/>, accessed: 2022-08-18.
- NASA, 2020. The apollo 13 flight journal. <https://history.nasa.gov/afj/ap13fj/index.html>, accessed: 2022-08-18.
- NASA, 2021. Apollo 13 in real time. <https://apolloinrealtime.org/13/>, accessed: 2022-08-18.
- Negri, E., Fumagalli, L., Macchi, M., 2017. A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. *Procedia Manufacturing* 11, 939–948, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- NIH-IMAG, 2019. Digital twin overview. <https://www.imagwiki.nih.gov/content/digital-twin-overview>, accessed: 2022-08-08.
- Olivar, M., Jiménez, J., Castaño, F., Escaño, J., 09 2022. Desarrollo de gemelo digital de un alimentador de bandejas e integración en entorno de realidad virtual. pp. 591–598.  
DOI: 10.17979/spudc.9788497498418.0591
- Perno, M., Hvam, L., Haug, A., 2022. Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Computers in Industry* 134, 103558.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558>
- Piascik, B., Vickers, J., Lowry, D., Scotti, S., Stewart, J., Calomino, A., 2010. Draft materials, structures, mechanical systems, and manufacturing roadmap technology area 12. National Aeronautics and Space Administration, 1–36.  
URL: [https://www.nasa.gov/pdf/501625main\\_TA12-MSMSM-DRAFT-Nov2010-A.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/501625main_TA12-MSMSM-DRAFT-Nov2010-A.pdf)
- Piascik, B., Vickers, J., Lowry, D., Scotti, S., Stewart, J., Calomino, A., 2012. Modeling, simulation, information technology & processing roadmap. National Aeronautics and Space Administration, 1–38.  
URL: [https://www.nasa.gov/pdf/501625main\\_TA12-ID\\_rev6\\_NRC-wTASR.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/501625main_TA12-ID_rev6_NRC-wTASR.pdf)
- Ponomarev, K., Kudryashov, N., Popelnukha, N., Potekhin, V., 2017. Main principals and issues of digital twin development for complex technological processes. In: *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. p. 523 – 528.  
DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.074
- Rasheed, A., San, O., Kvamsdal, T., 2020. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access* 8, 21980–22012.  
DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143
- Reifsnider, K., Majumdar, P., 2013. Multiphysics stimulated simulation digital twin methods for fleet management. 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.  
DOI: 10.2514/6.2013-1578
- Reveillere, Adrien, Longeon, Martin, Rossi, Iacopo, 2019. Dynamic simulation of a combined cycle for power plant flexibility enhancement. *E3S Web Conf.* 113, 01005.  
DOI: 10.1051/e3sconf/201911301005
- Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K. D., 2015. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine* 48 (3), 567–572, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Saifutdinov, F., Tolujevs, J., 2021. Time and space discretization in the digital twin of the airport transport network. *Transport and Telecommunication Journal* 22 (3), 257–265.  
DOI: doi:10.2478/ttj-2021-0019
- Salazar, W. C., Machado, D. O., Len, A. J. G., Gonzalez, J. M. E., Alba, C. B., de Andrade, G. A., Normey-Rico, J. E., 2022. Neuro-fuzzy digital twin of a high temperature generator. *IFAC-PapersOnLine* 55 (9), 466–471, 11th IFAC Symposium on Control of Power and Energy Systems CPES 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.081>
- Saracco, R., 2019. Digital twins: Bridging physical space and cyberspace. *Computer* 52, 58–64.  
DOI: 10.1109/MC.2019.2942803
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., Wartzack, S., 2017. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals* 66 (1), 141–144.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- Schmid, S., Winkler, H., 2022. Hybrid production management system in the context of industry 4.0. In: 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). pp. 1573–1577.  
DOI: 10.1109/IEEM55944.2022.9990000
- Science, U. G., Force, T. V. T., 2013. Global horizons final report. Tech. rep., United States Air Force.  
URL: <https://web.archive.org/web/20210930134509/https://www.hsd1.org/?view&did=741377>
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., Wang, L., 2010. Draft modeling, simulation, information technology & processing roadmap technology area 11. National Aeronautics and Space Administration, 1–32.  
URL: [https://www.nasa.gov/pdf/501321main\\_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf)
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., Wang, L., 2012. Modeling, simulation, information technology & processing roadmap technology area 11. National Aeronautics and Space Administration, 1–38.  
URL: [https://www.nasa.gov/pdf/501321main\\_TA11-ID\\_rev4\\_NRC-wTASR.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-ID_rev4_NRC-wTASR.pdf)
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., Devine, D., 2021. Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation* 4 (2).  
DOI: 10.3390/asi4020036
- Singh, V., Willcox, K. E., 2018. Engineering design with digital thread. *AIAA Journal* 56 (11), 4515–4528.  
DOI: 10.2514/1.J057255
- Stark, R., Damerou, T., 2019. Digital twin. In: Chatti, S., Tolio, T. (Eds.), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1–8.  
DOI: 10.1007/978-3-642-35950-7\_16870-1
- Stark, R., Fresemann, C., Lindow, K., 2019. Development and operation of digital twins for technical systems and services. *CIRP Annals* 68 (1), 129–132.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.024>
- Stark, R., Kind, S., Neumeyer, S., 2017. Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals* 66 (1), 169–172.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>
- Tajadura, I., Sierra-García, J. E., Santos, M., 2022. Communication Library to Implement Digital Twins Based on Matlab and IEC61131. In: Brito Palma, L., Neves-Silva, R., Gomes, L. (Eds.), *CONTROLO 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 930. Springer, Cham, pp. 262 – 271.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-10047-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-10047-5_23)
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., Sui, F., Feb 2018a. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94 (9), 3563–

3576.  
DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1
- Tao, F., Liu, W., Liu, J., Liu, X., Liu, Q., Qu, T., Hu, T., Zhang, Z., Xiang, F., Xu, W., et al., 2018b. Digital twin and its potential application exploration. *Computer Integrated Manufacturing Systems* 24 (1), 1–18.  
DOI: 10.13196/j.cims.2018.01.001
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., Nee, A., 2019a. Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering* 5 (4), 653–661.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. Y. C., 2019b. Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 15 (4), 2405–2415.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Tao, F., Zhang, M., 2017. Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access* 5, 20418–20427.  
DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756069
- Tao, F., Zhang, M., Cheng, J., Qi, Q., 2017. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop. *Computer Integrated Manufacturing Systems* 23 (1), 1–9.  
URL: <http://www.cims-journal.cn/CN/10.13196/j.cims.2017.01.001>  
DOI: 10.13196/j.cims.2017.01.001
- Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., Nee, A., 2018c. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Annals* 67 (1), 169–172.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.055>
- Tao, F., Zhang, M., Nee, A., 2019c. Chapter 1 - background and concept of digital twin. In: Tao, F., Zhang, M., Nee, A. (Eds.), *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press, pp. 3–28.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817630-6.00001-1>
- Tao, F., Zhang, M., Nee, A., 2019d. Chapter 12 - digital twin, cyber-physical system, and internet of things. In: Tao, F., Zhang, M., Nee, A. (Eds.), *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press, pp. 243–256.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817630-6.00012-6>
- Tao, F., Zhang, M., Nee, A., 2019e. Chapter 3 - five-dimension digital twin modeling and its key technologies. In: Tao, F., Zhang, M., Nee, A. (Eds.), *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press, pp. 63–81.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817630-6.00003-5>
- Torres, A., Jiménez, J., Escaño, J., 09 2022. Interconexión de gemelo digital de célula de fabricación flexible con PLC, para el aprendizaje automático de parámetros. pp. 241–247.  
DOI: 10.17979/spudc.9788497498418.0241
- Tuegel, E. J., 2012. The airframe digital twin: Some challenges to realization. In: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., pp. 1–8.  
DOI: 10.2514/6.2012-1812
- Tuegel, E. J., Ingrassia, A. R., Eason, T. G., Spottswood, S. M., 2011. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering* 2011, 1–14.  
DOI: 10.1155/2011/154798
- Uhlemann, T. H.-J., Lehmann, C., Steinhilper, R., 2017. The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. *Procedia CIRP* 61, 335–340, the 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>
- Vered, Y., Elliott, S. J., 2023a. The use of digital twins to remotely update feedback controllers for the motion control of nonlinear dynamic systems. *Mechanical Systems and Signal Processing* 185, 109770.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109770>
- Vered, Y., Elliott, S. J., 2023b. The use of digital twins to remotely update feedback controllers for the motion control of nonlinear dynamic systems. *Mechanical Systems and Signal Processing* 185, 109770.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109770>
- Waffenschmidt, S., 2018. Digital twin in the industry 4.0 interview with a pioneer. *BEST PRACTICE: The Digital Twin*, 14–15.  
URL: <https://www.t-systems.com/de/en/newsroom/best-practice/03-2018-digital-twin>
- Wanasinghe, T. R., Wroblewski, L., Petersen, B. K., Gosine, R. G., James, L. A., De Silva, O., Mann, G. K. I., Warrian, P. J., 2020. Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE Access* 8, 104175–104197.  
DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998723
- Wang, K.-J., Lee, T.-L., Hsu, Y., Apr 2020. Revolution on digital twin technology—a patent research approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107 (11), 4687–4704.  
DOI: 10.1007/s00170-020-05314-w
- Waschull, S., Wortmann, J. C., Bokhorst, J. A. C., 2018. Manufacturing execution systems: The next level of automated control or of shop-floor support? In: Moon, I., Lee, G. M., Park, J., Kiritsis, D., von Cieminski, G. (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0*. Springer International Publishing, Cham, pp. 386–393.
- XITASO, 2021. XITASO se convierte en miembro de la Industrial Digital Twin Association (IDTA). <https://xitaso.com/es/miembro-de-la-industrial-digital-twin-association>.
- Zhang, M., Sui, F., Liu, A., Tao, F., Nee, A., 2020. Chapter 1 - digital twin driven smart product design framework. In: Tao, F., Liu, A., Hu, T., Nee, A. (Eds.), *Digital Twin Driven Smart Design*. Academic Press, pp. 3–32.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818918-4.00001-4>
- Zhou, M., Yan, J., Feng, D., Sep. 2019. Digital twin framework and its application to power grid online analysis. *CSEE Journal of Power and Energy Systems* 5 (3), 391–398.  
DOI: 10.17775/CSEEJPES.2018.01460
- Zolin, D. S., Ryzhkova, E. N., Sep. 2020. Digital twins for electric grids. In: 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). pp. 175–180.  
DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208080

## Nomenclatura

### Abreviaturas

ACS	Automatic Control Systems
ADC	Analogue to Digital Converter
AGD	Agregación de Gemelos Digitales
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
BDTA	Building Digital Twin Association
BIM	Building Information Modeling
C-HIL	Control-Hardware-In-the-Loop
CAD	Computer-Aided Design
CAE	computer-aided engineering
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CCD	control Co-Design
CDT	Construction Digital Twin
CDTs	Core Digital Twins
CNC	Computer Numerical Control
CPM	control Performance Monitoring
CPPS	Cyber Physical Production System
CPS	Cyber Physical System
DCS	Distributed Control System
DENiM	Digital intelligence for collaborative ENergy management in Manufacturing
DT	Digital Twin
DTBP	Digital Twin of a Business Process
DTM	Digital Twin Model
DTO	Digital Twin of an Organization
EGD	Entorno de Gemelos Digitales
EPS	Electric Power Systems
ERP	Enterprise Resource Planning)
FEM	Finite Element Method
GD	Gemelo Digital
GE	General Electric
HD	Hilo Digital
HIL	Hardware-In-the-Loop

HMI	Human Machine Interface	NASA	National Aeronautics and Space Administration
HPC	High-Performance Computing	OPC	OLE for Process Control
HTG	High Temperature Generator	OT	Operational Technology
IA	Inteligencia Artificial	PCA	Principal Component Analysis
ICT	Information Communication Technology	PGD	Prototipo de Gemelo Digital
IDDD	Integrated Domain-Driven Design	PHM	Prognostic Health Management
IDT	Intelligent Digital Twin	PLC	Programmable Logic Controller
IDTA	Industrial Digital Twin Association	PLM	Product Lifecycle Management
IEC	International Electrotechnical Commission	PN	Petri Net
IGD	Instancia Gemela Digital	RA	Realidad Aumentada
IIoT	Industrial Internet of Things	RV	Realidad Virtual
IMM	Information Mirroring Model	SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
IoT	Internet of things	SCOs	smart Construction Objects
IP	Internet Protocol	SD	Sombra Digital
ISO	International Organization for Standardization	SDTs	Sub Digital Twins
IT	Information Technology	SE	System Engineering
IVHM	integrated vehicle health management system	SIL	Software-In-the-Loop
KPI	Key Performance Indicator	SoS	System of Systems
LiDAR	Laser imaging Detection and Ranging	SPHERE	Service Platform to Host and SharE RESidential data
MBSE	Model Based Engineering Systems	TCP	Transmission Control Protocol
MD	Modelo Digital	TRL	Technology Readiness Level
MES	Manufacturing Execution Systems	UAV	Unmanned Aerial Vehicle
MGD	Modelo Gemelo Digital	UDP	User Datagram Protocol
MiC	Modular Integrated Construction	VDFL	Virtual Digital Fleet Leader
ML	Machine learning	VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
MPC	Model-based Predictive Control	VS	Vitual Space
MSM	Mirrored Space Model	ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie