

Arquitectura básica de diseño de gemelos digitales para la construcción

Basic architecture of design of digital twins for construction

Héctor Martínez-Manso¹
Tatiana Delgado-Fernández²

Recibido: marzo 23 de 2022

Aceptado: junio 28 de 2022

Resumen

Los gemelos digitales replican el funcionamiento de un objeto o proceso en un modelo virtual que sirve como base para la experimentación. Los modelos de información de la construcción o BIM, están impulsando la digitalización del sector constructivo mediante el uso de modelos multidisciplinares y la colaboración en la nube. El objetivo de este estudio es ofrecer un enfoque para el diseño incremental de un gemelo digital basado en la tecnología BIM, para alcanzar una total gestión operacional de la instalación constructiva. Se ofrecen los elementos conceptuales de los gemelos digitales, con énfasis en su carácter de modelo virtual, que contempla simulación del comportamiento de su gemelo físico en tiempo real. También se revelan los principales enfoques existentes de diseño incremental de gemelos digitales basados en BIM y se presenta una arquitectura general, la cual se sustenta en un nivel de madurez mínimo viable para adoptantes tempranos de esta tecnología.

Palabras clave: gemelo digital, BIM, construcción, internet de las cosas.

Abstract

Digital twins replicate the functioning of an object or process in a virtual model that serves as the basis for experimentation. Building Information Models (BIM), are driving the digitization of the construction sector through the use of multidisciplinary models and collaboration in the cloud. The aim of this study is to offer an approach for the incremental design of a digital twins based on BIM technology, to achieve a total operational management of the construction facility. The conceptual elements of digital twins are offered, with emphasis on their character as a virtual model, which includes simulation of the behavior of their physical twin in real time. The main existing approaches for incremental design of BIM-based digital twins are also revealed and a general architecture is presented, which is based on a minimum viable maturity level for early adopters of this technology.

Keywords: digital twin, BIM, building, internet of things.

1 Ingeniero Industrial, Unión de Construcciones Militares, La Habana, Cuba. E-mail: martinezmanzoh@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3150-5533>

2 Ingeniera en Sistemas Automatizados de Dirección, Doctora en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba. E-mail: tatiana.delgado@uic.cu

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4323-9674>

1. Introducción

La adopción consciente e incremental de avances tecnológicos en la construcción puede contribuir a gestionar más eficientemente los activos físicos y procesos empresariales en este contexto. Los llamados gemelos digitales (DT, por sus siglas en inglés – Digital Twin), tienen el potencial de transformar la industria de la construcción y brindar respuestas a algunos de sus principales desafíos.

La cuarta revolución industrial, también denominada era de la digitalización o Industria 4.0, es un salto paradigmático posible debido al crecimiento exponencial de las Tecnologías de Información y Comunicaciones (TIC), en las últimas décadas, así como, al constante trabajo de las industrias por adoptar y avanzar en la implementación de las mismas (Rozo-García, 2020). Se caracteriza por masificar el acceso a un amplio poder computacional, permitiendo que las organizaciones puedan desarrollar sistemas informáticos de relación ciber-física y llevar a cabo procesos de digitalización a gran escala (Salas & Asencio, 2019).

Una de las tecnologías más prometedoras y auténticas en la Industria 4.0 es el gemelo digital. Tiene como objetivo la minimización de riesgos y costos en la vida real (Wang, 2020). Los gemelos digitales vigilan el ciclo de vida de un proceso replicando su funcionamiento en un modelo virtual que sirve como base para la experimentación. (Varas-Chiquito et al., 2020). La dinámica e integración de estos sistemas responden a una especificación de arquitectura de alto nivel, con manejo de información que permite evaluar el modelo del sistema a través del comportamiento en tiempo real de la imagen del mismo (Andrickson, Chacón & Pabón, 2020).

Como un predecesor importante de los gemelos digitales en el sector de la construcción, se destacan los modelos de información de construcción o BIM (Building Information Modeling). Sin embargo, los gemelos digitales vienen a potenciar los BIM con los sistemas ciber-físicos, basados en Internet de las Cosas (IoT) y la hiperconectividad existente, con lo cual permiten una total gestión operacional de la instalación constructiva. Mientras emergen implementaciones aisladas de gemelos digitales, aún no se comprende el real potencial de esta tecnología y no se han habilitado suficientes modelos y metodologías para su adopción.

El objetivo general de este estudio es investigar las bases teóricas que soportan la aplicación de los gemelos digitales en el sector de la construcción, y ofrecer las diferencias y complementariedades de los DT con los BIM, de forma tal que se comprenda qué elementos serían necesarios para construir un gemelo digital en el sector de la construcción. El principal aporte de este artículo está dado en revelar las bases teóricas de los gemelos digitales como una de las tecnologías habilitadoras de mayor potencial en la Industria 4.0, describir enfoques de diseño de los gemelos digitales apoyados en la tecnología BIM y proponer una arquitectura básica con los componentes clave para diseñar gemelos digitales en el ámbito de la construcción.

2. Metodología

Para obtener la arquitectura básica de gemelos digitales en la construcción, se ha seguido una metodología de cuatro fases, ajustada a tal propósito, como se muestra en la figura 1.

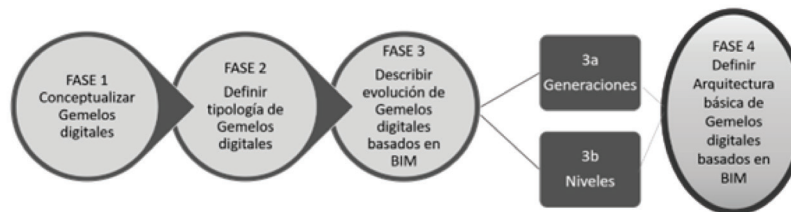


Figura 1. Metodología para la definición de una arquitectura básica de gemelos digitales en la construcción.

La fase 1 parte de un análisis de la literatura sin alcance de revisión sistemática, ya que no era el objetivo del artículo. Se optó en este caso, para conceptualizar los gemelos digitales, por el repositorio y motor de búsqueda del Google académico, debido a su versatilidad, al cubrir una amplia variedad de materiales, como: artículos, libros, actas de congreso y tesis, entre otros. Otra ventaja del Google académico para el propósito de este artículo es que indica la cantidad de citas de cada material y puede ordenarse por relevancia, fecha o idioma, de forma tal que el investigador, con el empleo de filtros y búsquedas avanzadas, puede llegar de forma relativamente sencilla a los artículos más relevantes o más actuales, en el idioma de su preferencia.

En este caso, al motor de búsqueda del Google académico se le aplicó una ecuación compuesta por las palabras clave: "digital twin" y "BIM", con la restricción de que ambas estuvieran incluidas en el título para analizar solamente los que con mayor probabilidad abordaban de forma sustantiva estos conceptos. Se obtuvieron 50 documentos que fueron minuciosamente revisados por los autores para extraer aquellas conceptualizaciones más apropiadas, de acuerdo al objetivo del artículo. Mediante este proceso, además de sistematizar las principales definiciones de Gemelo digital, se identifican sus características comunes, es decir, aquellas que están reiteradamente incluidas en las principales definiciones analizadas.

La segunda fase profundiza en los tipos de gemelos digitales en el ámbito de la construcción. En la fase 3 se analiza el diseño incremental de gemelos digitales desde los BIM, lo cual reveló

las tendencias en el diseño de gemelos desde los modelos BIM, con énfasis en unos dos enfoques evolutivos principales: por generaciones (3a) y por niveles (3b). Habiendo recorrido estas tres fases, la siguiente, la fase 4, es la encargada de definir y analizar la arquitectura básica de gemelos digitales en el ámbito de la construcción, basada en BIM.

3. Resultados y discusión

3.1 Conceptualización de gemelos digitales en el sector de la construcción

Un gemelo digital es la visión holística de un activo real en el mundo digital. Ampliamente conocidos como Digital Twin (DT), por su origen en idioma inglés, los mismos se consideran sistemas de gran utilidad, debido a lo cual, empresas en diversos segmentos aspiran a contar con herramientas de esta naturaleza (Salas & Ascencio, 2019).

Un DT se refiere a la copia o modelo virtual de cualquier entidad física, donde ambos están interconectados mediante el intercambio de datos en tiempo real. Un DT imita el estado de su gemelo físico en tiempo real y viceversa (Singh et al., 2021). El gemelo digital es un modelo digital en evolución propia o una simulación de un sujeto u objeto de la vida real, que representa el estado exacto de su gemelo físico en cualquier momento dado, mediante el intercambio de datos en tiempo real (Singh et al., 2021). A partir del análisis de varias definiciones, se puede apreciar que un gemelo digital está caracterizado por las partes o elementos conceptuales que se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis de la definición de gemelo digital.

Elemento conceptual	Autores
Modelo virtual	(Wang, 2020; Varas-Chiquito et al., 2020)
Datos en tiempo real	(Singh et al., 2021; Muñoz-La Rivera et al., 2021; Opoku et al., 2021; Torrecilla-García, Pardo-Ferreira & Rubio-Romero, 2021)
Simulación y predicciones	(Deng, Menassa & Kamat, 2021; Singh et al., 2021; Opoku et al., 2021)

Modelos BIM y gemelos digitales en la construcción

El modelado de información de construcciones (BIM), es un elemento destacado de la tecnología inteligente basada en un proceso de modelado que facilita la colaboración, diseño y gestión del proyecto durante todo el ciclo de vida. BIM es un sistema complejo que requiere una planificación cuidadosa en cada fase de diseño del edificio y en la etapa de gestión (Oyarhossein, Ghiasi & Khiali, 2021). Se considera la fuerza que está impulsando la digitalización del sector constructivo mediante el uso de modelos multidisciplinares y la colaboración en la nube, con los cuales se da forma al diseño y la gestión de los proyectos constructivos y de los sistemas que estos contienen (Autodesk, 2021).

En el futuro, la mayoría de los DT de la construcción irán integrados en el proceso BIM para que todas las personas involucradas en un proyecto obtengan información más completa en un entorno estandarizado. El valor de esta información va mucho más allá de un proyecto concreto: los datos capturados pueden reintroducirse en las fases de planificación y diseño de nuevos proyectos, aplicando así el aprendizaje de datos para mejorarlos continuamente (Autodesk, 2021). En la literatura están emergiendo casos exitosos de creación de gemelos digitales basados en BIM, por ejemplo, una investigación sobre la adopción de BIM en un proyecto de construcción de una estación de tren (Kaewunruen & Xu, 2018).

El BIM puede actuar como catalizador hacia una adopción más profunda de la digitalización, y también promueve: la comunicación, la integración de equipos, modelado paramétrico, generación automática de documentos, simulaciones y gestión a lo largo de su ciclo de vida (Muñoz-La Rivera et al., 2021). Los gemelos digitales aprovechan el potencial de BIM al máximo, mediante la conexión de los datos y los procesos con una gestión de la información que es dinámica, bidireccional y en tiempo real. Pueden crearse DT sin BIM, pero, para que alcancen su máximo potencial, hay que empezar en cualquier caso por unos flujos de trabajo integrados y por la transmisión de información. Por esta razón, para crear un DT para la construcción, lo más eficiente es partir de esta tecnología (Autodesk, 2021) (Muñoz-La Rivera et al., 2021).

De hecho, la mayoría de los estudios sobre la aplicación de gemelos digitales en la industria de la construcción se han centrado en la tecnología BIM, especialmente en la etapa de diseño e ingeniería. Sin embargo, aunque BIM y DT tienen similitudes, existen diferencias en su propósito, tecnología, usuarios finales, así como en la etapa de vida de la instalación, según señalaran Khajavi y colaboradores (2019). Actualmente, las tecnologías disponibles que respaldan la utilización de DT en la industria de la construcción incluyen BIM, redes de sensores inalámbricos (WSN), analítica de datos y aprendizaje de máquina (Opoku et al., 2021). La figura 2 muestra los componentes esenciales para crear un gemelo digital de un edificio y la diferencia con un BIM.

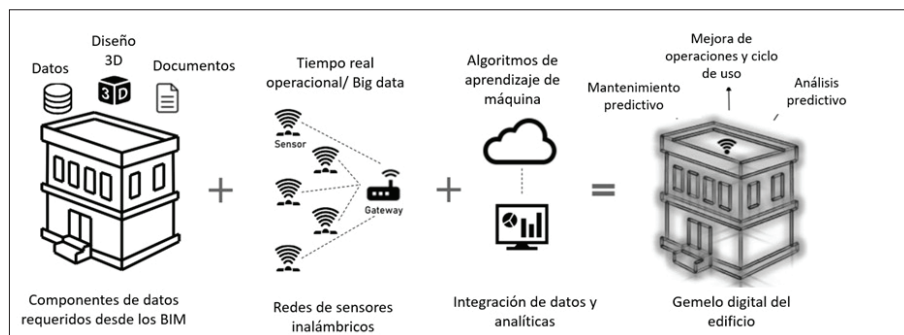


Figura 2. Componentes esenciales del gemelo digital de un edificio (Khajavi et al., 2019).

Tipos de gemelos digitales en la construcción

Dependiendo de las necesidades de los gemelos digitales, estos pueden dividirse en dos grandes grupos (Muñoz-Alcázar, 2019):

Gemelos basados en datos: se emplean datos del funcionamiento del sistema y junto con los algoritmos necesarios se hacen simulaciones para optimizar el sistema físico y controlar su funcionamiento de forma automática.

Gemelos con representación virtual: requieren el modelado en 3D del objeto físico y de su entorno. Además de partir de los datos necesarios para el funcionamiento del sistema, consideran la interacción que realiza el sistema con el entorno físico, mediante modelos tridimensionales.

Los gemelos basados en datos tienen en los BIM también un importante aliado, y es que el verdadero poder de los BIM reside en la "I" (información). Un buen modelo BIM puede incluir información basada en materiales de la construcción, así como: información geoespacial, financiera, de adquisiciones y de logística. Esta información en un modelo BIM se comparte a través de un espacio en línea de acceso mutuo conocido como entorno de datos colaborativo (CDE). Los modelos de información se pueden utilizar en todas las etapas de la vida de un edificio; desde el inicio hasta el funcionamiento, e incluso renovaciones y nuevos procesos constructivos (Manosalva-Muñoz, 2020). Un CDE o Entorno de Datos Colaborativo es una herramienta que permite a los diferentes agentes implicados en un proyecto trabajar de forma interconectada en la nube. Dentro de un CDE, la información pertenece al que la produce, es decir, solo la puede modificar su autor. Sin embargo, esto no impide que cualquiera la pueda compartir y reutilizar.

En relación a los estándares de BIM que son aprovechables en los DT, se destaca openBIM, un conjunto de estándares de datos de código abierto para el intercambio de información entre herramientas de validación y creación de BIM. Dentro de estos estándares es importante

mencionar el formato de datos de código abierto IFC, que admite el intercambio de información relacionada con BIM. El objetivo general de IFC es respaldar el intercambio de información dentro de un estándar de código abierto durante toda la vida útil de los activos, y este objetivo amplio lo convierte en un modelo de información extensible (Lu et al., 2019).

En los gemelos con representación virtual, frecuentes en la construcción, se requiere la modelación tridimensional del entorno edificado que se desea gestionar como uno de los pasos iniciales para la adopción de estas tecnologías. En la industria de la construcción, una de las herramientas más utilizadas y que arroja mejores resultados a la hora de diseñar el modelo 3D de una edificación es un modelo soportado en nubes de puntos. Un modelo de nube de puntos es una copia virtual del edificio, basada en la captura de puntos de forma automatizada con tecnologías como los escáner láser (García-Gómez, de Gorostiza & Moraza, 2011; Salas & Asencio, 2019).

Las nubes de puntos obtenidas a partir del escaneado láser terrestre integradas con herramientas BIM, tales como Autodesk Revit, utilizada para la gestión de datos, permite manejar e intercambiar información más fácilmente, lo que reconoce una intervención de construcción más integrada y coherente. Autodesk Revit facilita el modelado tridimensional de edificios, terrenos y elementos y también hace los cálculos necesarios del modelo, genera una base de datos bidireccional y gestiona la información del edificio (Opoku et al., 2021).

3.2 Enfoques de diseño incremental de DT basados en BIM para la construcción

Varios enfoques de la literatura apuntan a la creación de gemelos digitales a partir de la tecnología BIM. Por ejemplo, en Boje et al. (2020), BIM se considera como la plataforma inicial potencial para comenzar una evolución de tres generaciones de desarrollo de gemelos digitales en el ambiente construido:

Generación # 1 - plataformas de monitoreo. Permiten la detección de un activo utilizando informes y capacidades de análisis limitadas. Los modelos digitales heredados que se utilizan en combinación con sensores es el primer paso hacia la integración en tiempo real de la detección del activo y los modelos digitales.

Generación # 2 - plataformas semánticas inteligentes. Se puede habilitar utilizando un marco de lenguaje web común para integrar el gemelo digital con todos sus dispositivos de IoT. Esta generación implica importantes interacciones humanas para lograr la optimización y el funcionamiento del gemelo digital.

Generación # 3 - plataformas socio-técnicas impulsadas por agentes. Un gemelo digital completamente semántico que es capaz de aprovechar el conocimiento adquirido con el uso de agentes habilitados para inteligencia artificial. El funcionamiento se vuelve completamente autónomo y solo requiere alguna supervisión humana.

Otro enfoque que describe la evolución de los gemelos digitales a partir de BIM, se presenta a continuación (Deng, Menassa & Kamat, 2021):

Nivel 1: En esta etapa, se utiliza BIM como una herramienta para la visualización 3D estática para mantener la información necesaria con vistas a respaldar los métodos tradicionales de diseño de edificios, programación de la construcción, etc.

Nivel 2: En este nivel, los modelos BIM comienzan a utilizarse para análisis y simulaciones. Los

modelos BIM se utilizan como fuentes de datos para realizar análisis del rendimiento del edificio o los procesos de construcción.

Nivel 3: en este nivel, los modelos digitales del edificio están integrados con sensores en tiempo real (IoT), para monitorear y administrar el entorno del edificio. Los datos en tiempo real se pueden recopilar y visualizar en los modelos digitales.

Nivel 4: En este nivel, la gestión y el seguimiento del entorno del edificio se mejoran mediante la integración de algoritmos para predicciones en tiempo real gracias a los datos recopilados a través de los sensores.

Nivel 5: En este nivel el DT incluye las capacidades mencionadas anteriormente para los diferentes niveles, como visualización y predicción en tiempo real que apoya la toma de decisiones; no obstante, también admite el control automático y la retroalimentación inteligente.

3.3 Arquitectura básica de gemelo digital para la construcción basada en BIM

Tomando en consideración estos enfoques para el diseño de gemelos digitales para la construcción basados en generaciones y niveles evolutivos, se propone una arquitectura de diseño del gemelo digital semántico basado en BIM como se muestra en la figura 3.

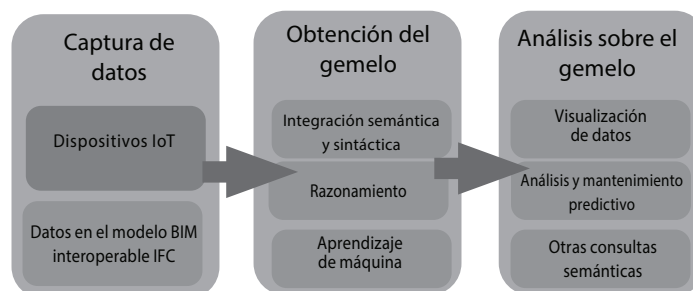


Figura 3. Arquitectura básica de gemelo digital basado en BIM para la construcción.

La arquitectura propuesta tiene tres bloques principales. Un primer bloque que se denomina "captura de datos" e incluye la captura desde dos fuentes principales de datos: desde dispositivos IoT y desde el BIM. Esta arquitectura se abstrae de la forma en que los datos se integran y conforman el BIM, ya que una de las premisas de la arquitectura es justamente tener el modelo BIM. Para la captura de los datos desde dispositivos IoT se pueden emplear plataformas IoT de código abierto, como FIWARE, la cual ha demostrado un grupo de ventajas respecto a otras plataformas IoT disponibles (Berbes-Villalón *et al.*, 2022). Una plataforma de Internet de las Cosas tiene la función de extracción, carga y transformación (ELT- Extract, Load, Transform), lo cual garantiza que lleguen al próximo bloque filtrados y con un nivel apropiado de calidad, aunque no se asegura que estén integrados y contextualizados a partir de la funcionalidad para la cual está diseñado el DT. Bajo el protocolo interoperable IFC, la segunda funcionalidad de este bloque realiza la extracción de datos desde el BIM para ponerla a disposición del próximo bloque.

Es entonces en el segundo bloque donde se obtiene el gemelo digital. La primera funcionalidad del mismo es la integración de los datos que se capturaron en la etapa anterior, con el requerimiento que dicha integración debe ser sintáctica y semántica. Para garantizar la integración de datos desde un enfoque semántico, se sugiere una filosofía de acceso/integración a datos basado en ontologías (OBDA - Ontology-Based Data Access) es la más ventajosa y se recomienda el uso de Grafos de conocimiento que constituyen las estructuras más flexibles y escalables (Delgado *et al.*, 2021; Stuart, Delgado & Delgado, 2021).

El grafo de conocimiento es la estructura recomendable del modelo de datos de los gemelos digitales basados en BIM, el cual contextualiza la información proveniente de los dispositivos IoT con la gestionada desde los modelos BIM del edificio. También desde un grafo de conocimiento se facilita el razonamiento y el aprendizaje de máquina, lo cual permite el descubrimiento de nuevos conocimientos a partir de la aplicación

de reglas asociadas al grafo. Además, es posible desarrollar ciertas analíticas sobre el grafo del DT que tributarían a los resultados de análisis del gemelo digital propiamente, que es el bloque tercero y último de la arquitectura básica de gemelo digital basado en BIM para la construcción.

En la etapa de análisis de datos para la toma de decisiones sobre el gemelo digital, además de visualizar el gemelo con toda la información histórica y en tiempo real mediante diferentes perspectivas, se habilitan los mantenimientos predictivos u otros análisis basados en la información integrada mediante consultas semánticas al grafo de conocimientos del gemelo digital obtenido.

Uno de los valores principales de la arquitectura propuesta es la flexibilidad que ofrece su diseño para la integración de la información de la construcción proveniente del BIM, de los dispositivos de IoT y del control de las edificaciones. El enfoque semántico de esta integración, basado en grafos de conocimiento, también proporciona una ventaja sobre otros modelos, por cuanto la estructura del grafo es muy adaptable a cualquier situación o cambio y, además, es escalable.

Aunque el valor práctico deberá evaluarse en una segunda etapa de la investigación, cuando se desarrollen las primeras aplicaciones de gemelos digitales basadas en la arquitectura propuesta, se puede prever un efecto en el entorno práctico, al habilitar a la comunidad de desarrolladores con un conjunto mínimo viable de componentes para diseñar servicios y aplicaciones de gemelos digitales de segunda generación, que consideren plataformas semánticas inteligentes, y en el nivel evolutivo 3 de gemelos digitales con algunos elementos del nivel 4, al incluir bloques de inteligencia artificial y de analíticas predictivas.

4. Conclusiones

Un gemelo digital es un modelo virtual de un proceso u objeto físico, basado en datos en tiempo real, que refleja su comportamiento du-

rante su ciclo de vida, y a través de simulación permite predecir también su comportamiento futuro, para lo cual, se apoya en otras tecnologías como Big Data, Inteligencia Artificial e Internet de las Cosas. Los modelos de datos de los BIM se pueden utilizar en todas las etapas de la vida de un edificio y constituyen la base de los gemelos digitales en este sector. El diseño incremental de los gemelos digitales en la construcción a partir de los BIM facilita su adopción.

La arquitectura básica de gemelo digital basado en BIM para la construcción, propuesta en este artículo, se enmarca en el objetivo de satisfacer la visión de la generación # 2, que implica el uso de plataformas semánticas inteligentes, y en el nivel evolutivo 3 de gemelos digitales con algunos elementos del nivel 4, bajo el supuesto que corresponde al diseño de un gemelo básico viable, evolutivamente superior al BIM.

La principal contribución de este artículo radica en ofrecer los elementos clave a considerar para el diseño de gemelos digitales en la construcción, con un enfoque incremental, junto a una arquitectura básica orientada a “adoptantes tempranos”. No obstante, la investigación tiene limitaciones por cuanto no aborda “cómo” se diseña el gemelo, sino solamente “qué” hay que considerar para ello. En este sentido, se requiere profundizar más en un método sistemático que guíe a los implementadores y adoptantes tempranos de los gemelos digitales basados en BIM. El trabajo a futuro se dirigirá en esa dirección, con énfasis en la integración de modelos de datos de IoT y de los modelos IFC de BIM, mediante enfoques semánticos.

Referencias

- Andrickson, J., Chacón, E., & Pabón, M. (2020). Industria 4.0, un Enfoque Discreto. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 3(2), 65-89. <https://doi.org/10.22206/cyap.2020.v3i2.pp65-89>
- Autodesk. (2021). Gemelo digital: el modelo inteligente de datos, futuro de la edificación. <https://redshift.autodesk.es/gemelo-digital//>
- Berbes-Villalón, D. M., Sánchez-Jiménez, L., de la Iglesia-Campos, M., Díaz-Aguirre, M. E., Delgado-Fernández, T. (2022). Una arquitectura IoT para ciudades inteligentes basada en la plataforma FIWARE. *Revista de Ciencia y Tecnología – RECYT*. 37(2).
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114 (1), 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- Delgado-Fernández, T., Stuart-Cárdenas, M. L., & Delgado-Fernández, M. (2021). Grafos de conocimiento para gestionar información epidemiológica sobre COVID-19. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*, 32(4).
- Deng, M., Menassa, C., & Kamat, V. (2021). From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations. *Journal of Information Technology in Construction*, 26 (5), 58-83.
- García-Gómez, I., de Gorostiza, M. F., & Moraza, A. M. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios. *Arqueología de la Arquitectura*, 8, 25-44. <https://doi.org/10.3989/arqarqt.2011.10019>
- Kaewunruen, S., & Xu, N. (2018). Digital twin for sustainability evaluation of railway station buildings. *Frontiers in Built Environment*, 4, 77. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00077>
- 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. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>
- Lu, Q., Xie, X., Heaton, J., Parlikad, A. K., & Schooling, J. (2019). From BIM towards digital twin: strategy and future development for smart asset management. En C. Springer, International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, 392-404. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1_30.
- Manosalva-Muñoz, D. (2020). *El método BIM: efectividad y beneficios en los proyectos de edificación*. (Trabajo de titulación para optar al título de Técnico Universitario en Construcción). Universidad Técnica Federico Santamaría.
- Muñoz-Alcázar, J. (2019). *Aplicación del concepto de Gemelo Digital a un SCADA Industrial*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.

- Muñoz-La Rivera, F., Mora-Serrano, J., Valero, I., & Oñate, E. (2021). Methodological-technological framework for Construction 4.0. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28 (2), 689-711. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09455-9>
- Opoku, D. G., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 102726. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102726>
- Oyarhossein, M. A., Ghiasi, S. H., & Khiali, V. (2021). Identifying barriers of Implementing BIM in Construction. *Technium*, 9-20. <https://doi.org/10.47577/technium.v3i6>
- Rozo-García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *Revista UIS Ingenierías*, 19 (2), 177-192. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020019>
- Salas, J. L., & Asencio, F. (2019). Desarrollo de un gemelo digital 3D para 3 unidades en la refinería de Cartagena de Ecopetrol. *XXI Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos*. Bogotá, Colombia.
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchey, E. P., Qiao, Y. M., & Devine, D. (2021). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*, 4 (2), 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
- Stuart-Cárdenas, M. L., Delgado-Fernández, T., Delgado-Fernández, M., & Piedra-Salomón, Y. (2020). Datos empresariales enlazados: revisión sistemática desde una perspectiva organizacional. *Alcance*, 9 (23), 153-176.
- Torrecilla-García, J., Pardo-Ferreira, M., & Rubio-Romero, J. (2021). Aproximación inicial al enfoque basado en BIM-based Digital Twinning en la toma de decisiones sobre Seguridad y Salud Laboral en la industria de la construcción. *Dirección y Organización*, 74, 31-38. <https://doi.org/10.37610/dyo.v0i74.600>
- Varas-Chiquito, M., García-Plua, J. C., Bustamante-Chong, A., & Bustamante-Chong, C. (2020). Gemelos digitales y su evolución en la industria. *Recimundo*, 4 (4), 300-308. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).noviembre.2020.300-308](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).noviembre.2020.300-308)
- Wang, Z. (2020). Digital Twin Technology Industry 4.0-Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76554>

