



SPHERE
BIM DIGITAL TWIN PLATFORM

Diciembre 2019

GEMELO DIGITAL DEFINICIONES PARA LA EDIFICACIÓN

Cómo trasladar el entorno de Gemelo Digital

al sector de **AECO**



Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención N° 820805.

AUTORES

- Sr. E. Loscos, IDP Ingeniería y Arquitectura
- Dr. Haiyan (Sally) Xie, Laing O'Rourke Centre for Construction Engineering and Technology
- Dr. R. H. E. M. Koppelaar, Ekodenge
- Sr. M. Borràs, IDP Ingeniería y Arquitectura
- Dr. D. Martín-Moncunill, Comet Technology
- Dr. E. Coloma, UPC
- Sr. I. Pérez Arnal, BIM Academy.es
- Sr. R. Alonso, R2M
- Sr. M. Elagiry, R2M
- Sr. Sergio Velásquez, IDP Ingeniería y Arquitectura
- Sr. J. Porkka, VTT
- Sr. P. Vicente Legazpi, Empresarios Agrupados Internacional
- Sra. A. M. Veleiro Blanco, Empresarios Agrupados Internacional
- Sr. Daan Oostinga, Semmtech

CONTRIBUCIONES

- Dr. Michael Grieves – Digital Twin Institute
- Dr. Ioannis Brilakis – Cambridge University
- Sr. Germain Adell - NOBATEK
- Sra. Montserrat Armengol – C+A
- Sr. Esa Nykanen – VTT
- Dr. Andrea Costa – R2M
- Sr. Angel Font – Comsa
- Sr. Alejandro Adell – Octopussy
- Dr. Juan Caubet – Eurecat
- Sr. Konstantinos Kampouropoulos – Eurecat
- Dr. Fausto Sainz – Comet Technology
- Sr. Ir. Wouter Borsboom – TNO
- Sr. Bart Driessen – TNO
- Sr. Alejandro Calvo-Costa – BASF
- Sr. Peter Imbrechts – Neanex
- Sr. Ralph Burger – Neanex
- Sr. Emre Yontem – Ekodenge
- Sr. Olli Nummelin – Caverion
- Sra. Leonie Neff – CREE by Rhomberg
- Sr. Eduardo Silva-Maza – CREE by Rhomberg
- Sr. Pietro Decinque – De5
- Dra. Desiree Arias – National University of Ireland Galway
- Dr. Marcus Keane – National University of Ireland Galway
- Sr. Neill Ryan – VRMTECH
- Sr. Andrew Lovern – VRMTECH
- Sr. Anouar Mabrouk – Ascora
- Sra. Veronica y Alexandra Zerpa – Comet Technology
- Sra. Marina Baggetto – Comet Technology
- Sra. Jessica Clifton, Ekodenge

AVISO LEGAL

La opinión expresada en este informe refleja la opinión de los autores y no la de la Comisión Europea.

Todos los derechos de propiedad intelectual son propiedad de los miembros del consorcio SPHERE y están protegidos por las leyes aplicables. No se autoriza la reproducción sin previo acuerdo escrito.

El uso comercial de cualquier información contenida en este documento puede requerir una licencia del propietario de dicha información.

RECONOCIMIENTO

Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en el marco del convenio de subvención No 820805.



ACERCA DE SPHERE

SPHERE es un proyecto Horizonte 2020 de 4 años de duración y desarrollado por 20 socios, que tiene como objetivo la mejora y optimización del diseño, la construcción, el rendimiento y la gestión energética de los edificios, reduciendo los costes de construcción y sus impactos medioambientales.

SPHERE busca desarrollar un Entorno Gemelo Digital (DTE) centrado en el sector de la edificación, involucrando no sólo el proyecto y la construcción del edificio, sino también la fabricación de materiales y la explotación y gestión del mantenimiento.

www.sphere-project.eu



RESUMEN

En los últimos años, las comunidades industriales y de investigación han dedicado un gran esfuerzo a la digitalización de los procesos de AECOO con el objetivo principal de conseguir un nuevo paradigma para las fases de proyecto y obra de los edificios, que permita la tan deseada mejora de la productividad del sector.

El eje básico de esta revolución lo han constituido los crecientes niveles de implantación de la metodología BIM en todo el mundo, que recientemente han alcanzado un importante hito con la creación del estándar internacional ISO 19650, incluyendo la migración de datos desde las fases previas de proyecto y obra hacia la fase de explotación, o sea, la fase de Gestión de Activos (FM). Además de esta tendencia, actualmente se está impulsando otro cambio de paradigma en el sector de la producción industrial, que está evolucionando hacia el concepto de Industria 4.0, mediante la mejora de la metodología de Gestión del Ciclo de Vida del Producto (PLM) basada en Sistemas Inteligentes de Productos Conectados (SCPS) o Gemelo Digital (DT).

A continuación, el documento presenta el análisis de la vanguardia tecnológica con vistas a desarrollar una definición genérica para la construcción del Gemelo Digital, así como su adaptación como extensión de los actuales procedimientos

de SoA AECOO, basados en esta ISO 19650. Esto permite una mejor asimilación del concepto PLM en el sector de AECOO y también tiene en cuenta los actores inmobiliarios más significativos durante la explotación y el mantenimiento.

Las definiciones propuestas han sido diseñadas dentro del ámbito del Proyecto SPHERE EU y tienen como objeto definir un entorno de trabajo estandarizado para el futuro desarrollo del Gemelo Digital en edificación, en el que se ejecutarán los Sistemas Inteligentes de Activos Conectados (SCAS) a lo largo de todo su ciclo de vida.

PALABRAS CLAVE

- *Gemelo Digital*
- *Gemelos Físicos*
- *BIM*
- *Edificio*
- *Activos Inmobiliarios*
- *Gestión de Activos*
- *Gestión del Ciclo de Vida del Producto (PLM)*
- *Sistemas Inteligentes de Productos Conectados (SCPS)*
- *Interconexión Digital de Productos (IoT)*
- *BIM SPHERE abierto*



Imagen 1: conceptualización de servicios interoperativos del Gemelo Digital para edificios (esquema de: M. Borràs)

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	7
1. Introducción: digitalización en el Sector AECO	
	10
2. Estado actual de la digitalización en AECO para el Gemelo Digital	
	19
3. Definiciones de Gemelo Digital en la Industria	
	25
4. Definiciones de Gemelo Digital que emergen en AECO	
	30
5. Nuevas definiciones de Gemelo Digital en Edificación en AECO a partir de SPHERE	
	37
6. Vinculación de los estándares BIM con el Gemelo Digital en Edificación	
	40
7. Nuevos roles y procesos para implantar el Gemelo Digital en Edificación	
	45
8. Nuevos usuarios finales del Gemelo Digital en Edificación en el sector AECO	
	48
9. Próximos pasos del Gemelo Digital en Edificación en el sector AECO en el marco del proyecto SPHERE	



1. INTRODUCCIÓN: DIGITALIZACIÓN EN EL SECTOR AECO

En las últimas décadas la digitalización en el sector de la construcción ha recibido un impulso sin precedentes. Desde el año 2000, los avances en tecnología digital han permitido almacenar, manipular y obtener datos de un modo más económico y sencillo, haciendo posible implementar bases de datos digitales multidimensionales para definir un edificio o una infraestructura (Baldwin 2019). Estos avances han dado su fruto en el Modelado de Información de Edificios (BIM) que permite la creación de versiones digitales de edificios. Esta nueva disciplina se está convirtiendo en un estándar en el sector de la Arquitectura, Ingeniería, Construcción, Propietarios y Operadores (AECO) de edificios (Volk et al. 2014).

La metodología del Modelado de Información de Construcción (BIM) facilita el desarrollo de la gestión de la información digital y la utilización de los activos inmobiliarios y de las infraestructuras (Bradley et al.2016). Se están llevando a cabo diversos esfuerzos para integrar otros conjuntos de datos con el BIM. Esto incluye datos espaciales (georreferenciados) procedentes de Sistemas de Información Geográfica (GIS) (Wang et al. 2019), datos de sensores utilizando Interconexión Digital de Productos (IoT) (Tang et al. 2019), software y datos de gestión de instalaciones (Matarneh et al. 2019) para crear sistemas de Gestión Inteligente de Inmuebles (FIM) (Hu et al. 2019), y Datos de Rendimiento Medioambiental de las Infraestructuras (Wong y Zhou 2015).

¿Qué es el Gemelo Digital?

La capacidad que tiene BIM de almacenar un conjunto extendido de datos de un edificio o de una infraestructura, junto con la capacidad de operar con otras aplicaciones, así como el hecho de poder realizar operaciones casi en tiempo real, está propiciando la aparición de una nueva disciplina dentro del sector de AECOO, denominada Infraestructura de Gemelo Digital (Lu et al. 2020). Se podría definir como una tecnología que permite tener una réplica “virtualizada” de un edificio, vinculando lo real con lo digital, según el objetivo deseado (Bolton et al. 2018), y donde los aspectos físicos de un equipo o de una instalación del edificio, se “hermanan” con su representación digital (Alonso et al. 2019).

La investigación e implementación del Gemelo Digital para obtener réplicas virtuales de objetos físicos, utilizando datos del ciclo de vida de sus componentes, comenzó aproximadamente en 2010, cuando la NASA empezó a incorporar Gemelos Digitales en sus hojas de ruta tecnológicas (Piascik, et al. 2012). Se aplicó en el desarrollo de vehículos de exploración espacial (Caruso, et al. 2010). Este concepto fue propuesto para la siguiente generación de aviones de combate y vehículos de la NASA (Glaessgen y Stargel, 2012), junto con una descripción de los objetivos (Tuegel, et al. 2011) y su definición según lo construido (Cerrone, et al. 2014). La industria aeroespacial es el buque insignia de la implantación del Gemelo Digital. Este concepto aúna la Interconexión Digital de Productos (IoT) con la Gestión del Ciclo de Vida del Producto en Industria 4.0 (Zheng et al. 2019). La metodología del Gemelo Digital está dando lugar a una revolución en los sectores de fabricación dentro del marco de la Industria 4.0. Este concepto es utilizado en la ingeniería de productos, maquinaria de fabricación e incluso en las líneas de producción. Pero todavía no ha llegado plenamente al sector de AECOO (Alonso et al. 2019).

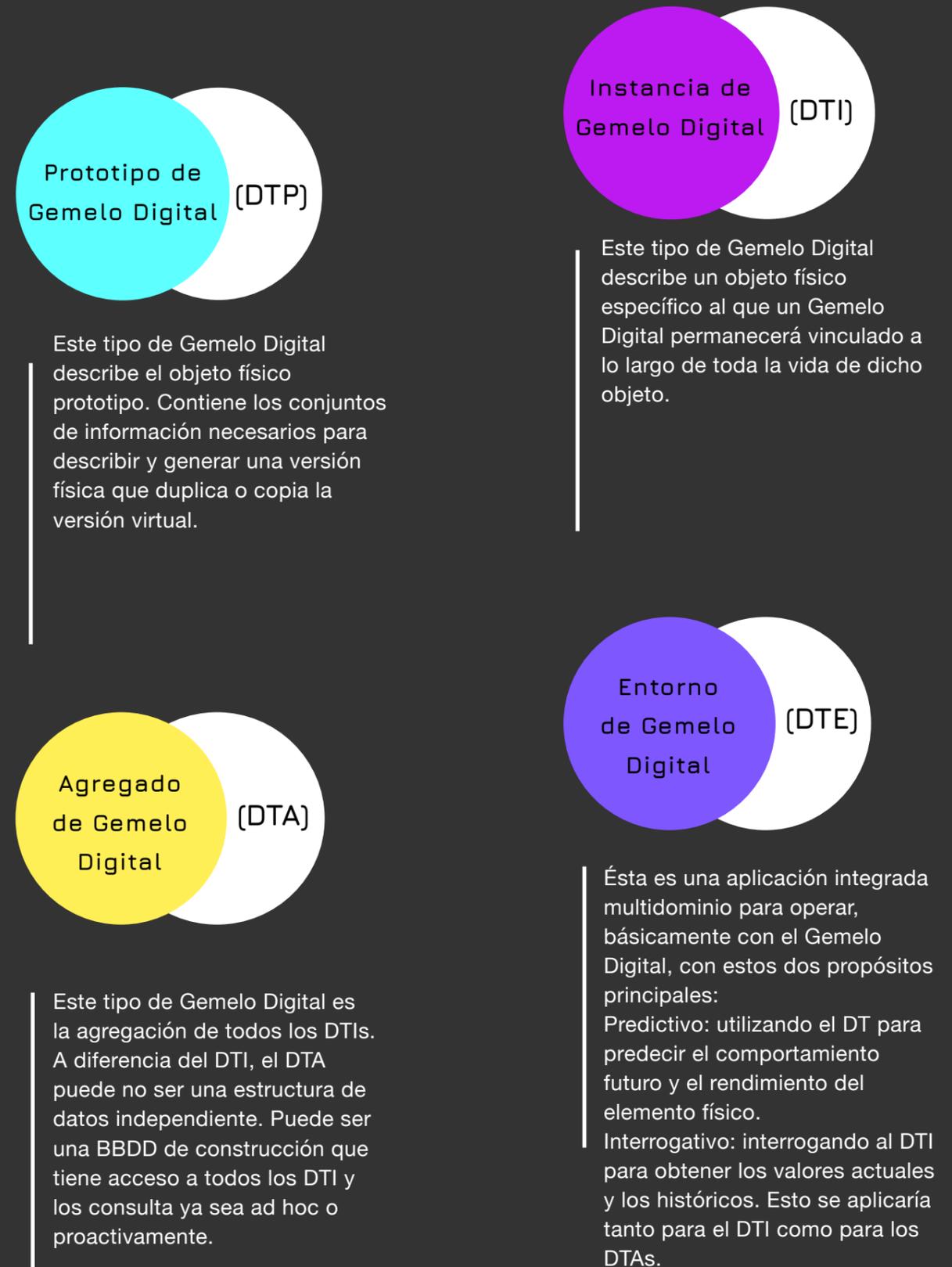
¿Sabemos qué es el Gemelo Digital en el sector de AECOO?

Entre las barreras actuales para su implantación está la falta de una definición universal del concepto de Gemelo Digital en un edificio o en una infraestructura. Se necesitan definiciones claras y transparentes que permitan desarrollar software para definir un marco físico-digital estandarizado para el Gemelo Digital (Batty, 2018), sus correspondientes protocolos de implementación, el desarrollo de código software y, finalmente, el desarrollo de aplicaciones estandarizadas construidas sobre el Gemelo Digital.

En este documento se analiza la labor realizada hasta la fecha, así como las definiciones universales, comenzando por las conocidas definiciones genéricas establecidas por el creador del concepto de Gemelo Digital, Michael Grieves, del Departamento de Sistemas de Ingeniería del Instituto Tecnológico de Florida (Grieves 2016). Partiendo de un análisis de la Arquitectura orientada a Servicios (SoA) y otras definiciones que tienen en cuenta la metodología BIM, se busca el mejor encaje de estos nuevos términos en el sector de AECOO, tratando de englobar y ampliar las normas y procedimientos actuales.



ESQUEMA I. TIPOS DE GEMELO DIGITAL



2. ESTADO ACTUAL DE LA DIGITALIZACIÓN DE AECOO PARA EL GEMELO DIGITAL

BIM como metodología de digitalización para los proyectos de AECOO

Como es sabido, hoy en día el Building Information Modelling (ahora también conocido como Building Information Managing) se basa en la gestión de Modelos de Información que representan digitalmente el activo (edificio o infraestructura) que se proyecta construir o explotar (Poljansk 2017). Un Modelo de Información es un conjunto de contenedores de información estructurados y no estructurados, siendo los Modelos de Información de Construcción (Modelos BIM) el principal contenedor estructurado, por lo que el resto de la información dentro de los otros contenedores debe hacer referencia a él (ISO 19650-1: 2018).

En un modelo BIM, la representación de un elemento no se dibuja, sino que se define a través de sus características físicas y funcionales utilizando parámetros y propiedades (Joblot et al. 2017). Esta información se va especificando progresivamente durante el ciclo de vida del activo: desde el inicio del proyecto, pasando por la etapa de construcción y a lo largo de la fase de Operación y Mantenimiento (O&M) del edificio. Además, el modelo BIM es desarrollado por varios actores que simultáneamente aportan el resultado de su trabajo. Para realizar este trabajo colaborativo deben establecerse ciertos procedimientos, arquitecturas de herramientas TIC y formatos de archivos (por ejemplo, IFC o BCF) en lo que comúnmente se denomina Entornos Comunes de Datos (Halmetoja 2019).

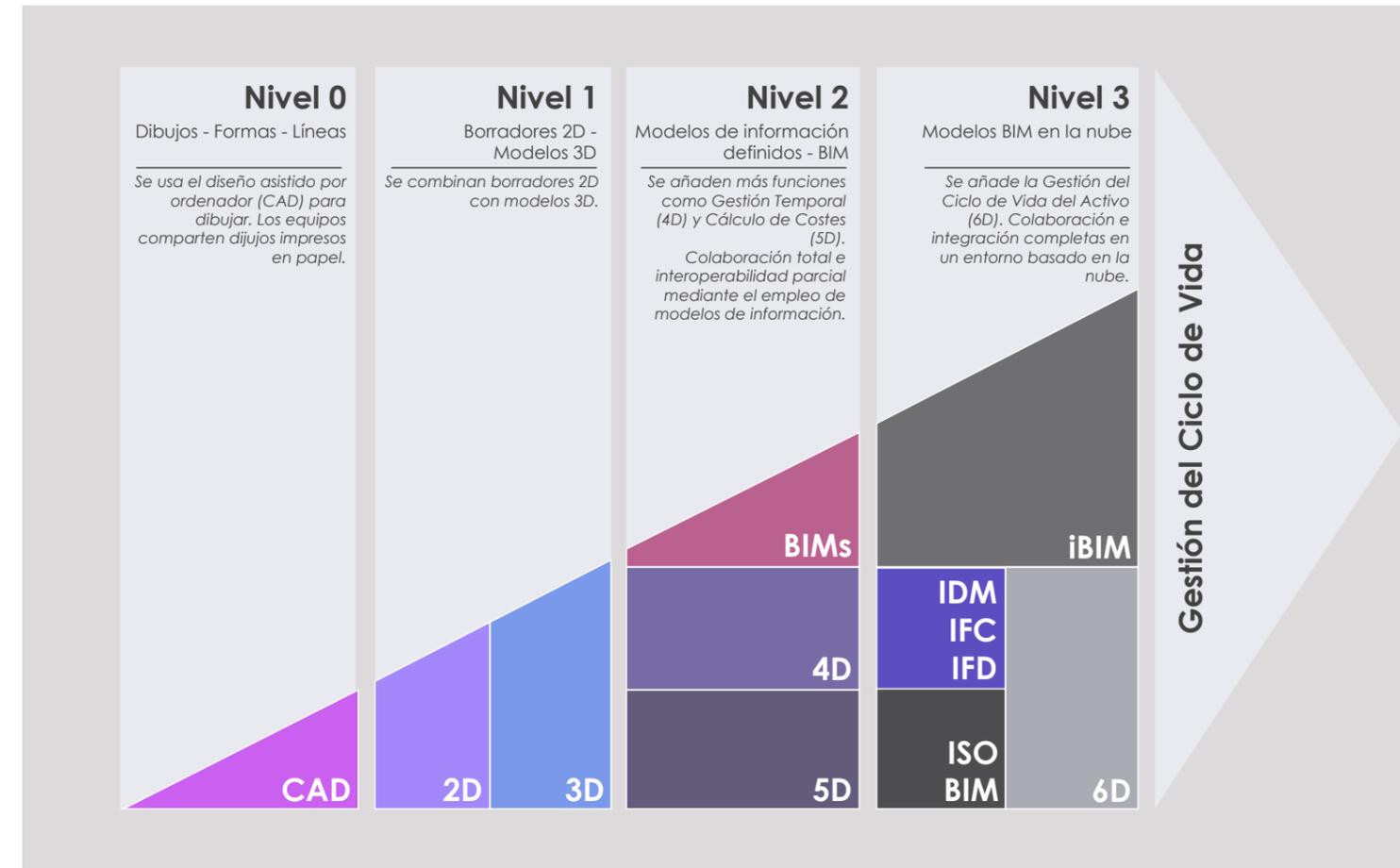


Imagen 2: niveles de madurez del BIM (esquema de: M. Elagiry basado en PAS 1192-2 e ISO 19650-1)

Toda esta información está sujeta a la trazabilidad de los cambios que se produzcan durante todo el ciclo de vida. En el enfoque actual, las variables de tiempo y coste tienden a ser integradas en los Modelos BIM (Ganbat et al. 2018) y vinculadas a la Gestión de Activos Asistida por Ordenador (CAFM) y a la Gestión de Mantenimiento Asistida por Ordenador (CMMS) utilizando el mismo Entorno Común de Datos (CDE) durante todo el ciclo de vida (Matarneh et al. 2019). En general, hoy por hoy se utiliza un sistema durante la fase de Diseño y Construcción del edificio y otro durante la fase de Operación del mismo (Eastman et al. 2011).

Además, la utilización de los modelos BIM (Matarneh et al. 2019) facilita la aplicación de los nuevos métodos colaborativos de construcción de edificios, como la Entrega Integrada de Proyectos (IPD) (Fischer et al. 2014; Jones 2014) y los Sistemas Integrados de Diseño y Entrega (IDDS) (London y Singh 2013), así como los procesos/tecnologías complementarios como el Sistema de Gestión de Proyectos de Construcción (CPMS) (Alonso et al. 2019).



ESQUEMA 2. DEFINICIONES RELEVANTES DE LA ISO 19650 RELACIONADAS CON EL MODELADO DE INFORMACIÓN DE CONSTRUCCIÓN (BIM)



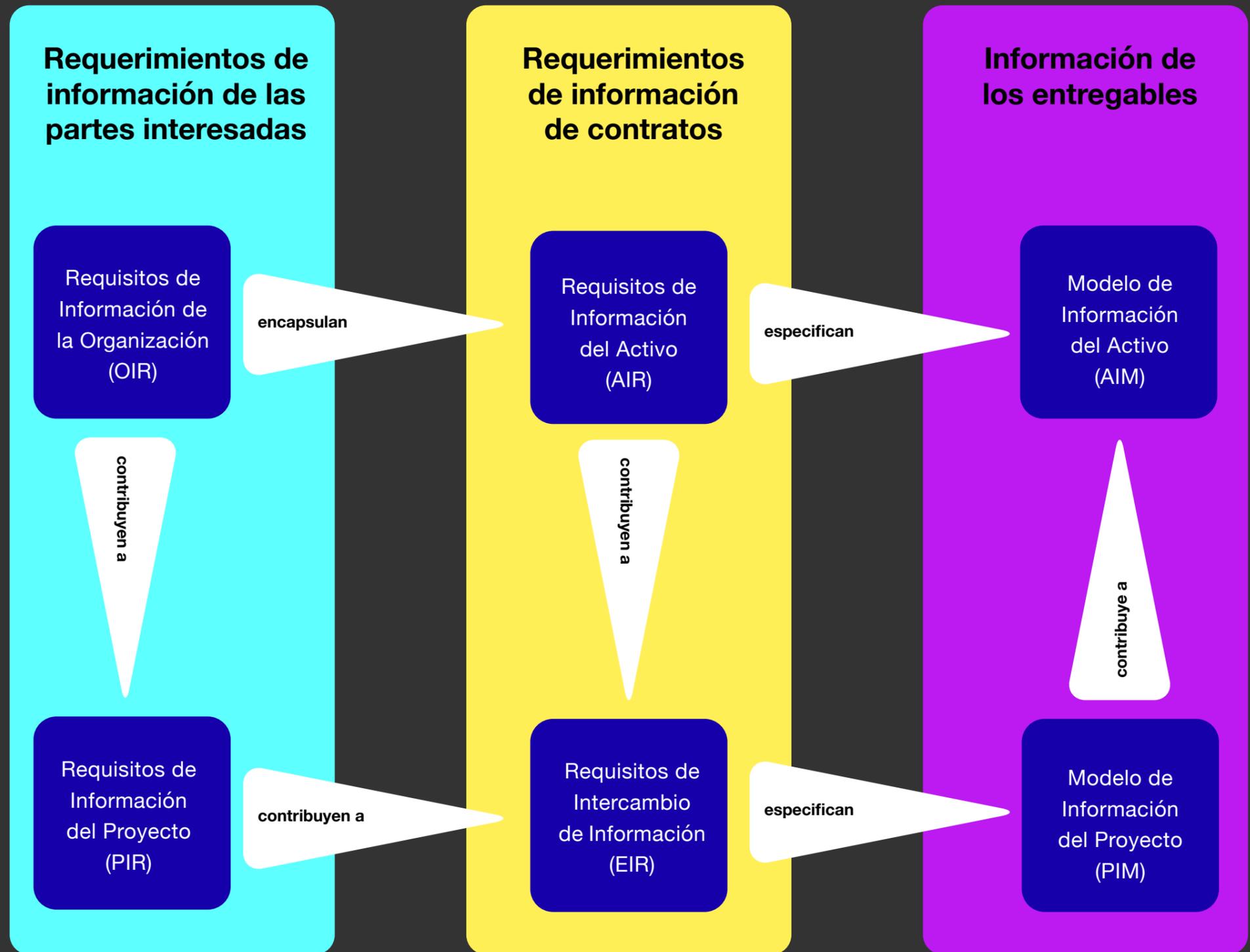
El proceso de implementación de BIM

En cuanto al proceso de implementación de BIM, actualmente se ha desarrollado un entorno consolidado para los proyectos de construcción. La ISO 19650 publicada recientemente ha consolidado todos los procesos necesarios para el desarrollo y operación (ISO 19650-1: 2018). Esta norma parte de la definición de los Requisitos de Información de la Organización (OIR), que definen la información necesaria para dar respuesta o informar de los objetivos estratégicos de alto nivel dentro de la parte designada (que puede estar compuesta por varias partes interesadas).

A partir de estos requisitos, se comprueba si los activos definidos están dentro de los Requisitos de Información de los Activos (AIR), los cuales deben ser aplicados a todo el portafolio de la organización. Este documento especifica el contenido, la estructura y la metodología del Modelo de Información del Activo (AIM). Desde el punto de vista del proceso de entrega (procesos de diseño y construcción), OIR contribuye a crear los Requisitos de Información del Proyecto (PIR) para su gestión.

Estos requisitos, en combinación con AIR, ayudan a la parte contratante a establecer los Requisitos de Intercambio de Información (EIR) que serán implementados en el equipo de entrega (ISO 19650). Esto incluye a los consultores de diseño, los contratistas principales y los subcontratistas. En el EIR se especifica el Modelo de Información del Proyecto (PIM) que se usará durante la fase de entrega, que a su vez deberá cumplir con las especificaciones del AIM porque contribuirá a su creación.

ESQUEMA 3. JERARQUÍA DE LAS NECESIDADES DE INFORMACIÓN ADAPTADA DE LA ISO 19650



En esta imagen "encapsulan" significa "facilitar la entrada a", "contribuyen a" significa "proporcionar una entrada a", "especifican" significa "determinar el contenido, la estructura y la metodología".



Es interesante observar que la norma reconoce que los requisitos que se deben aplicar a un proyecto no sólo deben emanar del propietario, como lo hace la PAS 1192, sino que también deben atender a los requisitos de cualquier otra entidad que esté implicada en la fase de explotación del edificio. Además, describe el AIM como un modelo que debe ser alimentado por el PIM junto con otros inputs a lo largo de todo su ciclo de vida (ISO 19650).

ESQUEMA 4. FORMATOS DE ORGANIZACIÓN DE DATOS PARA PROCESOS BIM



IFC Modelo
de Datos

IFC es un formato de archivo basado en objetos con un modelo de datos desarrollado por BuildingSMART (anteriormente la Alianza Internacional para la Interoperabilidad, IAI), con el fin de facilitar la interoperabilidad en la industria de AECOO. Este formato es usado como estándar en proyectos basados en el Modelado de Información de Construcción (BIM). La especificación del modelo de la IFC está disponible de forma abierta. Está registrada bajo el estándar ISO 16739-1: 2018.



Formato
Colaborativo
BIM

El formato colaborativo BCF se utiliza para que distintas aplicaciones basadas en BIM puedan intercambiar distintas problemáticas, como escenas, etc. Es un formato de archivo abierto que permite añadir anotaciones de texto, capturas de pantalla y otra información sobre la capa del modelo IFC. Esto permite mejorar la comunicación entre las partes coordinadoras. Este formato de Colaboración BIM fue presentado a BuildingSMART como el nuevo "Esquema de Nexo" con el objetivo de convertirse en una especificación oficial de BuildingSMART. Ha sido aceptado por desarrolladores como Solibri Model Checker, MagiCAD, Tekla Structures, Tekla BIMsight, DDS. Otras muchas herramientas BIM también soportan el formato BCF.



OpenBIM®

OpenBIM® es un enfoque colaborativo para el proyecto, la construcción, la explotación y el mantenimiento de edificios, basado en estándares y flujos de trabajo abiertos que permiten a los diferentes interesados en el proyecto compartir sus datos, con cualquier software compatible con BIM. Este enfoque colaborativo, definido por BuildingSMART International, tiene como objetivo mejorar la calidad de los edificios y las infraestructuras, ayudando a minimizar errores durante las fases de replanteo o coordinación multidisciplinar, a la vez que proporciona interesantes oportunidades para que los entes públicos y las empresas privadas puedan comparar las ofertas de los proyectos.



COBie

COBie es la abreviatura de Construction Operations Building information exchange. El estándar COBie es una especificación utilizada en el intercambio de información para la gestión de edificios. El estándar COBie se desarrolló originalmente en los EE. UU. y la norma BS 1192-4 representa la implementación de COBie en el Reino Unido. COBie proporciona una estructura común para el intercambio de información sobre instalaciones nuevas y existentes, incluyendo tanto edificios como infraestructuras.



IDM/MVD

COBie ISO 29481-1 define el Manual de Entrega de Información (IDM) como una documentación que capta el proceso del negocio y ofrece especificaciones detalladas de la información que un usuario que tiene una función concreta necesitaría aportar en un punto particular dentro de un proyecto. Una Definición de Vista Modelo (MVD) es un subconjunto del esquema general de la IFC que describe el intercambio de datos para un uso o flujo de trabajo específico, reduciendo el alcance dependiendo de la necesidad del receptor. MVD define un subconjunto del esquema IFC y es necesario para satisfacer uno o varios Requisitos de Intercambio de la industria AEC. El método utilizado y propagado por el BuildingSMART para definir tales Requisitos de Intercambio es el Manual de Entrega de Información, IDM (también ISO 29481).



Entorno
Internacional
de la Biblioteca
de Diccionarios

Las Bibliotecas de IFD proveen la flexibilidad necesaria para BIM, basándose en IFC, y permiten el enlace entre el modelo y bases de datos con información específicos del proyecto y del producto. La Biblioteca IFD permite alimentar modelos que lleven a cabo: análisis avanzado, simulaciones y comprobaciones de diseño en una fase muy inicial. La norma ISO 12006-3: 2007 especifica un modelo de información independiente del idioma que puede ser utilizado para el desarrollo de diccionarios utilizados para almacenar o proporcionar información sobre obras de construcción.

Los límites de los modelos BIM

Los actuales modelos BIM tienen sus limitaciones, ya que no reproducen exactamente el comportamiento del activo en tiempo real una vez en servicio o en uso (Matarneh et al. 2019). Hay mucha información del edificio y sus subsistemas que amplía la metodología BIM actual, incluyendo la integración con IoT, BMS, ERP o BAS (sistemas de automatización de edificios), así como herramientas para capturar, almacenar y compartir información crítica del edificio (Tang et al. 2019). Por lo tanto, hay mucho margen de mejora de estas herramientas, tanto como base para combinar BIM con otros sistemas de información, como para aplicaciones que proporcionan propuestas alternativas durante la Explotación y Mantenimiento de los activos (Ilter y Ergen 2015; Bradley et al. 2016) e incluso otras aplicaciones que formulan propuestas de predicción para pronosticar el comportamiento y rendimiento futuros de los activos (Gerrish et al. 2017; Saieg et al. 2018).

Por esta razón, podríamos decir que el BIM es la base para poder implementar un Gemelo Digital, ya que reproduce un amplio conjunto de características de los activos que permiten simular su comportamiento futuro (Shou et al. 2015). Sin embargo, no proporciona vínculos directos físico-digitales para enlazar la información sobre el comportamiento o el estado actual y, por tanto, no sirve como herramienta de operación virtual (Lu et al. 2020).



3. DEFINICIONES DE GEMELO DIGITAL EN LA INDUSTRIA

El Gemelo Digital se introdujo por primera vez como un concepto sin nombre para la Gestión del Ciclo de Vida del Producto (PLM) en 2002¹ y posteriormente se llamó Modelos Espaciales Reflejados (MSM), Modelo de Información Reflejada IMM) e incluso Gemelo Virtual (VT), hasta su denominación final como Gemelo Digital (DT) en 2011². Desde aquella fecha, el término ha sido ampliamente utilizado en diferentes sectores para referirse a las réplicas digitales de entidades físicas.

La primera aplicación detallada de Gemelo Digital fue realizada por la NASA en 2010 y la aplicó en un concepto de tecnología aeroespacial 3D, uniendo el objeto físico con su representación virtual y adicionalmente sus flujos de interconexiones de información (Shafto et al. 2010). Esto impulsó el DT como un hito a lograr en la fabricación 4.0, donde sí que es posible integrar los espacios físicos con sus análogos virtuales. Esto aplicaría a diversos usos como la robótica, los sistemas ciberfísicos, las fábricas inteligentes y los gemelos digitales, con el objetivo de construir la empresa digital. Estas ideas se publicaron en los últimos libros blancos elaborados por Siemens (2016), CSC, ahora tecnología DCX (Overton y Brigham 2016), Deloitte (Parrott y Warsaw 2017) y Oracle (2017).

¹ Grieves, M. (2002). *PLM Initiatives (PowerPoint)*. Ponencia presentada en el Product Lifecycle Management Meeting, University of Michigan Lurie Engineering Center.

² Grieves, M. (2011). *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*. Cocoa Beach, FL: Space Coast Press.

ESQUEMA 5. DEFINICIONES DE GEMELO DIGITAL EN LA INDUSTRIA



Sistema donde los procesos de fabricación física son monitoreados y controlados por sistemas informáticos y de redes digitales (ciber). Estos sistemas de control son habitualmente de lazo cerrado (retroalimentados).



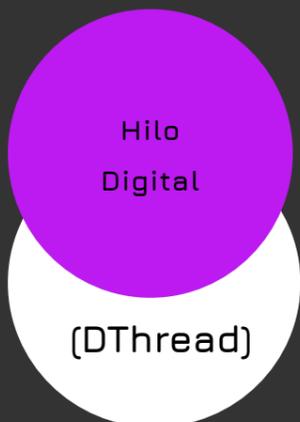
Representación virtual de un sistema de fabricación físico para la exploración y la simulación basada en la actualización automática en una sola dirección de lo físico a lo digital.



Representación virtual de un sistema de fabricación física capaz de ejecutar distintos tipos de simulación. Se caracteriza por la sincronización existente entre el sistema virtual y su equivalente real, mediante el uso bidireccional de datos conectados a sensores y otros dispositivos inteligentes.



Modelo digital de un elemento físico o proceso determinado que se alimenta de datos que permiten aunar los estados físico y virtual, con una cadencia de sincronización aceptable.



Un entorno de gestión de datos digitales que agiliza la recopilación, organización e integración controlada de la información, el conocimiento y los datos a lo largo del ciclo de vida del producto; desde el diseño hasta la entrega. Este entorno proporciona un sistema que es utilizado a nivel empresarial para informar a los responsables de la toma de decisiones durante el ciclo de vida del producto proporcionando así la capacidad de acceder, integrar y transformar datos diversos y conocimiento en información procesable.

El desarrollo de DT en la industria manufacturera está en curso, y en paralelo se alimenta de la tecnología de fabricación digital, muy relacionada con ella, llamada sistemas ciberfísicos (CPS), término acuñado por primera vez en 2006 por Helen Giller de la US National Science Foundation (Lee y Seshia 2017).

El concepto de un sistema ciberfísico es un proceso de fabricación en el que tanto los componentes físicos como sus homólogos digitales o extensiones virtuales se integran utilizando sensores, controladores y algoritmos informáticos, de manera que el espacio físico puede ser monitoreado, coordinado y controlado desde el lado virtual de forma fácil y automatizada (Wang et al. 2015).

Los sistemas ciberfísicos y los Gemelos Digitales son similares en el sentido de que tienen conexión físico-digital, interacción casi en tiempo real, interacción de la gestión organizativa a lo largo del ciclo de vida del activo y proporcionan los medios para mejorar la colaboración, aunque difieren en su nivel de representación del activo. Los sistemas ciberfísicos se centran en la comunicación y el control informáticos (3C) principalmente para la automatización, mientras que los sistemas cibernéticos consisten en algoritmos que no admiten una representación digital.

Los CPS requieren un flujo de datos provenientes de controladores y sensores del activo físico, algoritmos que proporcionen cálculos, y sus salidas comunicadas para controlar el sistema físico, con posibles bucles de retroalimentación. Los algoritmos computacionales pueden ser de cualquier tipo, mientras que los algoritmos no necesitan incluir ninguna representación digital del activo en sí.

Por el contrario, el Gemelo Digital se centra en una representación virtual de un activo físico en formas relevantes que puede proporcionar una simulación utilizando los datos de la vida real y como apoyo a la toma de decisiones de la gestión operativa (Tao et al. 2019). Como tal, un CPS puede ser, aunque no tiene por qué serlo, parte de un Gemelo Digital. Cuando forma parte del mismo, se dice que está instanciado como un hermanamiento de CPS (Damjanovic-Behrendt & Behrendt 2019). Por tanto, los DT y los CPS están emergiendo como dos esfuerzos de I+D de transformación digital separados pero enlazables para la transformación digital.

Definiciones del Gemelo Digital en la Industria

La definición de Gemelo Digital en la Industria 4.0 ha sido revisada por Negri y otros (2017), que examinaron 16 estudios, cada uno con su propuesta de definición. Las distintas propuestas compartían los siguientes puntos en común:

- i) una función de monitoreo del sistema físico a través de sensores y registro de estos datos,
- ii) que un DT refleja la vida del sistema físico o del activo,
- iii) que un DT incorpora simulaciones virtuales del sistema físico, y
- iv) que el DT apoya la toma de decisiones para la optimización del diseño de ingeniería y a lo largo del ciclo de vida.

El análisis fue actualizado por Kritzinger et al. (2018) mediante un análisis de 43 publicaciones diferentes que hicieron una distinción crítica entre Sombra Digital y Gemelo Digital.

Una Sombra Digital se define como una representación virtual con un flujo de datos automático y unidireccional, de modo que un cambio en el objeto físico conduce a una actualización automática del gemelo digital, pero no ocurre lo mismo en sentido inverso (Borth et al. 2019). Los cambios en el sistema físico sólo son el resultado de decisiones humanas. Esta es la gran diferencia respecto a la automatización basada en bucles retroalimentados cerrados, ya que los cambios en este caso son el resultado de simulaciones. Por el contrario, los Gemelos Digitales tienen un flujo de datos

automático y bidireccional, de tal manera que hay ajustes automatizados en el sistema de manufactura causados por el Gemelo Digital y sus simulaciones.

Las definiciones fueron explicadas por Tao y otros (2019) que publicaron el primer libro de texto sobre Gemelos Digitales en la industria, aportando conocimiento en todas las definiciones, su implementación, simulación y gestión. Ellos definen un Gemelo Digital como superior a una Sombra Digital porque el DT permite:

- i) validación de procesos y actividades físicas antes de la ejecución para reducir riesgos y errores;
- ii) el DT funciona sincronizado con el sistema físico y puede cotejar el rendimiento real con el simulado y así capturar la diferencia para la evaluación, optimización y predicción;

iii) los datos contenidos en el DT no pertenecen sólo al mundo físico, sino que también son el resultado de modelos virtuales tales como una fusión de datos tanto virtuales como físicos, obtenidos mediante procesos de síntesis, estadísticas, asociación, agrupación, evolución, regresión y generalización.

El Gemelo Digital es por lo tanto más rico en datos que la Sombra Digital. Se esperan avances en las definiciones con la publicación de ISO CD 23247 en el curso de 2020 que proporcionará un marco estándar para Gemelos Digitales en la Industria.

ESQUEMA 6.

ESTÁNDARES DE GEMELOS DIGITALES EN LA INDUSTRIA SEGÚN ISO/TC 184/SC4 – DATOS INDUSTRIALES

- ISO/CD 23247-1 (under development)** – Digital Twin Manufacturing Framework Standard
- ISO/CD TR 24464 (under development)** – Visualisation elements of Digital Twins
- IEC 62832:2016** – Technical specification of the Digital Factory Framework
- ISO/AWI 16400** – Equipment behaviour catalogues for virtual production systems

Principales datos de fabricación y normas de intercambio establecidas por ISO/TC 184/SC4

- ISO/AWI 8000** – Data Quality Management and assessment standards for exchange
- ISO 10303 STEP** – Standard for the Exchange of 3D Product model data
- ISO 10303-238 STEP-NC** – Standard for the Exchange of 3D Product model data compliant Numerical Control
- ISO 14649-1 to ISO 14649-121** – Standards providing data models for industrial automation systems and integration of physical device control for computerised numerical controllers
- ISO 15531** – Industrial manufacturing management data
- ISO 15926** – Integration of life cycle data for process facilities
- ISO/TS 18876-1 and 18876-2** – Integration of industrial data for exchange, access and sharing
- ISO/DIS 23952 (under dev.)** – Automation systems and integration – quality information framework (QIF)
- IEC 62264** – International standard for enterprise control system integration

La Sombra Digital es similar a un Modelo de Información del Edificio (BIM)

La Sombra Digital en la industria es hasta cierto punto un análogo a un BIM en el sector de AECOO, que tiene algunas simulaciones, pero su salida no está directamente vinculada a ninguna acción automática en el edificio o en las obras de reforma. En esta analogía, un edificio Gemelo Digital sólo se convierte en gemelo si tiene un control de gestión térmica automático o semiautomático, si dispone de un sistema de compra de materiales y equipos de obra con entrega física y detección mediante satélites o recuperación de datos visuales, o mediante la optimización de la planificación y la programación de los procesos de reforma o construcción mediante dispositivos inteligentes conectados in situ. En este sentido, iniciativas como la revisión de 2018 de la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios (EPBD), que promueve las tecnologías de construcción inteligente implantando el Smart Readiness Indicator (SRI) de los edificios, allanan el camino para lograr Gemelos en los futuros Edificios Inteligentes y Conectados.



El Hilo Digital: una guía para el Gemelo Digital

Un último concepto de fabricación digital que ha surgido en la industria es el Hilo Digital (Dthread), que surgió de los estudios de las fuerzas aéreas de los Estados Unidos sobre los sistemas de armamento de las aeronaves y que inicialmente tenía por objeto describir un proceso para digitalizar las fases que van desde el diseño hasta la fabricación, el ensamblaje y la entrega (Kraft 2016).

El Hilo Digital es un desarrollo técnico previo a la cadena de procesos CAD-CAPP-CAM/CAI-CNC (Bonnard et al. 2018)³ y sirve para combinar datos y agruparlos en un entorno común a lo largo del ciclo de vida de todo el proceso. Lo hace integrando fuentes de datos separadas como dibujos digitalizados, listas de materiales, datos de procesamiento de fabricación, información de la logística del ensamblaje, información de la entrega final, etc. Los resultados del Hilo Digital se obtienen a través de la retroalimentación o de la evaluación del bucle de alimentación.

El propósito del Hilo Digital es encontrar una mejor estrategia para la operación, evaluar cómo gestionar mejor el ciclo de vida del producto, reducir la incertidumbre en el diseño y los costos del proceso, e informar de las opciones en el diseño del producto conectando los datos de las diferentes etapas de su ciclo de vida. Un DT, o más típicamente múltiples DT's en caso de cadenas de suministro de fabricación de productos complejos, pueden ser construidos sobre el Hilo

Digital como un sistema "as built" (Victor y Willcox 2018).

El Hilo Digital se distingue por constituir un sistema consolidado de gestión de datos que puede agrupar múltiples Gemelos Digitales, como si fuera un DT para cada línea de producción o para cada instalación y/o fábrica, desde el lugar de origen de las materias primas hasta las plantas de producción, desde los sitios de ensamblaje hasta las instalaciones de recuperación y reciclaje.

El desarrollo del Hilo Digital está todavía en sus inicios, pero está empezando a despegar gracias a la reciente publicación del estándar ISO 10303-238 STEP-NC (Standard for the Exchange of Product model data compliant Numerical Control) (Bonnard et al. 2018). STEP-NC permite compartir con seguridad la información digital con los equipos de mecanizado y medición a lo largo de las distintas fases del ciclo de vida y entre las máquinas de los distintos puntos de producción, con simulación y verificación integradas. Lo que hace es desglosar cada operación de mecanizado en pasos individuales necesarios para realizarla, y donde existe un lenguaje para su control digital y conexión con otros equipos periféricos, eliminando la necesidad de programar las máquinas herramienta una a una. De tal modo, los archivos CAD de STEP-NC de la fase de diseño pueden enviarse a los puntos de producción y utilizarse inmediatamente para operar las máquinas de fabricación (ISO TC184/SC4/WG15).

4. DEFINICIONES DE GEMELO DIGITAL QUE EMERGEN EN EL SECTOR AECOO

El sector de AECOO no ha sido ajeno a la idea de los Gemelos Digitales y, como parte del proceso de cambio tecnológico que se está produciendo en los últimos años, ha surgido un interés creciente entorno a dicho concepto de Gemelo Digital. De este modo, aunque el sector AECOO está todavía lejos del profundo proceso de digitalización que se produjo en la industria, la brecha entre los avances en estos dos sectores se está reduciendo y, como se ha dicho más arriba, la actual implantación de BIM a lo largo de la cadena de valor de los activos de AECOO es la principal responsable de ello.

Bajo esta tendencia general, los conceptos de Gemelo Digital han surgido recientemente por el uso de modelos BIM en formatos innovadores. Así, se han ampliado las bases de datos de tipo de objeto comúnmente usadas en estos modelos, con datos dinámicos provenientes de series históricas de sensores. Dichos sensores se habrían instalado durante la construcción del edificio o incluso en la fase de explotación del mismo (como podría ser cualquier sistema de gestión de energía). Esta conexión entre la Interconexión Digital de Productos (IoT) con los Modelos de Información de Edificios (BIM) se interpreta normalmente como Gemelos Digitales, pero esta afirmación no es del todo exacta, ya que sin una capa adicional de ingeniería de sistemas no se puede proporcionar la información completa y actualizada a lo largo de toda la vida del edificio a sus usuarios.

³ Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Process Planning (CAPP), Computer Aided Manufacturing (CAM), Computer Aided Inspection (CAI) Computer Numerical Control (CNC).



Una muestra representativa de esto: en 2017, Angelo L.C. Ciribini y otros (2017) utilizaron sensores y actuadores de un sistema IoT para gestionar un edificio desde un ordenador. Además, en este ejemplo, se utilizó la siguiente definición para ampliar las propuestas de Gemelos Digitales al sector de AECOO. Llamaron a este edificio modelado por BIM e integrado con sensores un "Modelo de Edificio Virtual" o un Gemelo Digital. Otras acciones en este sentido se pueden encontrar en Dawkins et al. (2018) que destacaron la importancia del Gemelo Digital como "un medio de visualizar, modelar y trabajar con sistemas urbanos complejos". Se refieren a Gemelo Digital como "la réplica de un sistema físico con su representación digital en un ordenador, de modo que cuando se detecta cualquier cambio relevante de estado en el sistema físico, se inicia un flujo de datos que provoca el correspondiente cambio de estado de su gemelo digital".

Otra definición interesante, que señala la importancia de DT más allá del BIM, fue presentada por Stojanovic, Vladeta y otros (2018), afirmando que un Gemelo Digital es un duplicado digital del entorno físico, junto a sus estados y procesos. Mientras que un modelo BIM contiene datos actuales e históricos, un DT puede utilizarse para evaluar el estado actual y para predecir potencialmente el estado futuro.

Entre todas las actividades relacionadas con el Gemelo Digital en Europa, cabe destacar el Centre for Digital Built Britain (CDBB), que define el Gemelo Digital como "una representación digital realista de activos, procesos o sistemas en el entorno construido o natural" y que ha publicado hace poco los Principios de Gemini.

Esta iniciativa tiene como objetivo guiar el marco de gestión de la información haciendo posible la creación de un ecosistema compuesto de muchos gemelos digitales conectados, formando un Gemelo Digital Nacional, y poniendo estos datos a disposición del uso público.

Con los Principios de Gemini, el CDBB pretende establecer nueve principios clave (clasificados en tres requisitos principales: Propósito, Confianza y Función) para crear un consenso entre los interesados del Reino Unido y elaborar un Gemelo Digital Nacional (NDT) con su entorno asociado.

En los requisitos relativos a los objetivos del NDT, se hace especial hincapié en el bien público, la creación de valor y la mejora del rendimiento, así como en un mayor entendimiento del sector de la construcción.

Como parte de estos requisitos de confianza, los principios incluyen la seguridad, la calidad y el carácter abierto de los datos.

Los principios básicos del NDT radican en la importancia del carácter federado, una dirección con ideas claras y la capacidad de evolucionar junto con la sociedad y la tecnología.



Imagen 3: resumen de los Principios de Gemini (esquema de: M. Elagiry y A. Zerpa)



ESQUEMA 7. LOS PRINCIPIOS DE GEMINI



Los Principios de Gemini (GP) son un documento del Centro para la Construcción Digital de Gran Bretaña (CDBB) que tiene por objeto proporcionar los principios fundamentales y la definición del Gemelo Digital, del Gemelo Digital Nacional y del entorno de gestión que los hace posibles. Los GP se organizan bajo tres apartados generales: propósito, confianza y función, y se componen de nueve valores, como se resume en la Figura 3. Estos principios tienen por objeto fomentar la flexibilidad para la innovación y el desarrollo a lo largo del tiempo.

Propósito

Cada parte del NDT y de su entorno debe tener un propósito claro, ya que el principal objetivo del NDT es ayudar a mejorar el impacto de los resultados a lo largo de todo el ciclo de vida.

Bien Público

El NDT y su entorno son recursos nacionales, por lo tanto deben utilizarse para ofrecer un auténtico bien público a perpetuidad y contribuir al logro de resultados sociales inclusivos.

Creación de Valor

El NDT debe permitir la creación de valor sostenible, la mejora del rendimiento y la gestión eficaz del riesgo a nivel de los activos, los procesos y los sistemas. El NDT debe estructurarse de manera que promueva la innovación y la competencia, y que garantice un amplio acceso a los beneficios, en consonancia con el principio del bien público.

Visión

El NDT debe proporcionar una visión del entorno urbano y facilitar la creación de métricas significativas que permitan la visualización de la eficiencia y la mejora del entorno urbano. Esto debe incluir formas de cuantificar el éxito de la plataforma y del NDT.

Confianza

El NDT debe ser confiable y cumplir con el Marco de Ética de Datos.

Seguridad

El NDT y su entorno de trabajo deben ser seguros. Los principios de seguridad deben estar presentes desde el principio y garantizar que el intercambio de datos sea gestionado de forma eficaz.

Abierto

El NDT debe ser lo más abierto posible para ofrecer el máximo valor a sus usuarios, sin perder los principios de seguridad intrínsecos. Su objetivo es generar confianza, reducir costes y crear el máximo valor. El NDT utiliza estándares abiertos, mejores prácticas de la industria e interfaces de programación de aplicaciones abiertas (API), lo que permite un acceso neutral del proveedor, ofreciendo modelos de arquitectura que ya han sido aceptados por la industria.

Calidad

El NDT debe construirse sobre datos de una calidad apropiada para el propósito al que se destina. Se aplicarán normas y requisitos mínimos de calidad de datos. El éxito del NDT se juzgará en base a la calidad de las decisiones que permita tomar.

Funcionalidad

El NDT, para cumplir sus objetivos, debe funcionar con eficacia y debe hallarse disponible para los usuarios cuando que sea necesario. Asegurar la interoperabilidad de los datos maestros es fundamental para el éxito del NDT; será necesario centrarse en este aspecto para que el NDT funcione.

Federación

El NDT debe basarse en un entorno estándar, cooperativo y conectado. La gestión de la información debe permitir un enfoque común para asegurar la interoperabilidad, incluyendo la gestión de los datos entre sectores.

Custodia

Todas las partes del NDT deben ser gestionadas, reguladas y controladas de forma clara y transparente. "La Propiedad" debe asumir la propiedad de los datos, es decir, ser responsable del mantenimiento de los datos con la calidad adecuada y de desarrollar las aptitudes y competencias necesarias para ello. Puede darse el caso que la información se halle repartida en conjuntos de datos pertenecientes a distintos propietarios.

Evolución

El NDT y su entorno deben ser capaces de adaptarse y desarrollarse a medida que todo evoluciona (tecnología, sociedad, requisitos, gestión de la información, ciberseguridad, ciencia de los datos y el propio entorno construido). El NDT debe seguir siendo utilizable durante este periodo.

5. NUEVAS DEFINICIONES DE GEMELO DIGITAL EN EDIFICACIÓN (BDT) PARA AECOO A PARTIR DE SPHERE

Si bien la fase de Proyecto y Ejecución de Obra ha sido normalmente el objetivo final de todos los interesados en el sector de Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC), actualmente se está produciendo un cambio que enlaza las actividades de "diseño, fabricación y construcción" con la explotación futura del edificio, ampliando AEC al sector de Arquitectura, Ingeniería, Construcción, Propiedad y Explotación (AECOO). Esta conectividad entre todas las fases del ciclo de vida del edificio es la misión última de los sistemas y herramientas que se están desarrollando actualmente para la Gestión del Ciclo de Vida del Edificio.

En el marco del proyecto SPHERE (www.sphere-project.eu, Grant Agreement No. 820805) el consorcio ha elaborado un conjunto de definiciones para promover el desarrollo del Gemelo Digital técnico para el sector de AECOO, que constituye el núcleo de este Libro Blanco. Estas definiciones hacen posible que se comparta la comprensión de los conceptos relacionados con el Gemelo Digital en edificación, así como un conocimiento más profundo sobre cómo implementarlo, y así crear una definición única entre todos los actores del sector AECOO.

El desarrollo de estas definiciones se ajusta al objetivo técnico del proyecto SPHERE H2020 EU, que consiste en desarrollar una plataforma TIC capaz de **gestionar y actualizar la información tanto estática como dinámica del edificio en las fases de diseño, construcción o renovación y explotación** a partir de múltiples fuentes, y usar esta información tanto en el control del consumo de energía del edificio, como en obtener información para nuevos proyectos.



Más allá de SPHERE, las definiciones propuestas a continuación están alineadas con el mismo concepto planteado por el CDBB mencionado en la sección anterior, pero amplían su alcance para llenar el vacío existente entre las definiciones y procedimientos actuales de BIM con la finalización de un verdadero Entorno Gemelo Digital en Edificación (BDTE) como ya se conoce en otros Sectores de Fabricación.

Todas las nuevas definiciones y procedimientos desarrollados en SPHERE, tal y como se comparten a continuación formando un conjunto de definiciones iniciales, sirven para proporcionar un activo de definiciones gemelas digitales de edificios implementables que se probarán en cuatro pilotos reales de AECOO en toda la UE (incluyendo nuevos edificios y grandes proyectos de rehabilitación en los ya existentes) en los siguientes tres años.

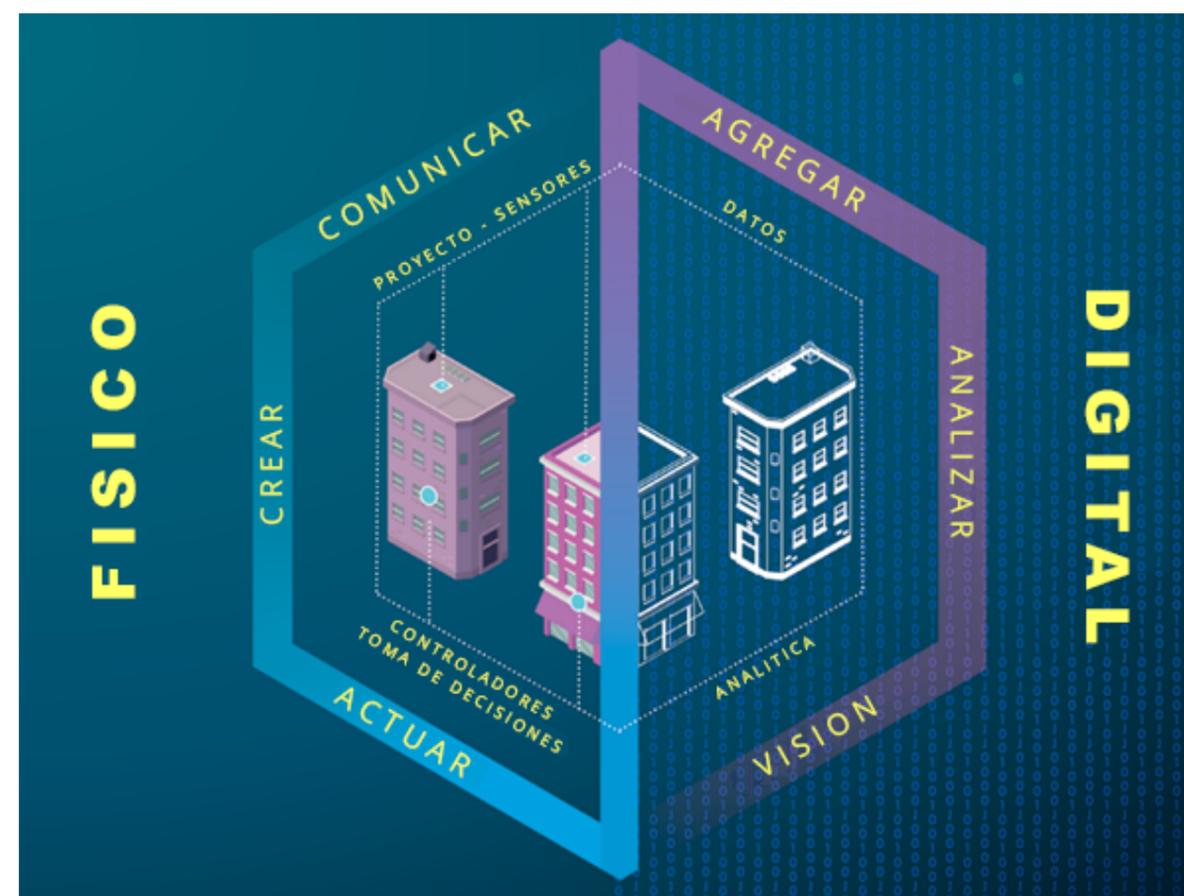


Imagen 4: el concepto de Gemelo Digital: los datos son capturados y transmitidos a una plataforma digital, que a su vez realiza un análisis en tiempo real para optimizar el diseño y el rendimiento (esquema de: M. Elagiry basado en Deloitte University Press).

Definición de Gemelos Digitales para edificios nuevos

En el Resumen 8 se exponen una serie de definiciones para los Gemelos Digitales aplicables a edificios de nueva construcción para crear una base común de definiciones.

ESQUEMA 8. NUEVAS DEFINICIONES PROPUESTAS PARA GEMELOS DIGITALES EN EDIFICACIÓN A PARTIR DE SPHERE



Un Gemelo Digital en Edificación describe el activo de AECOO durante su diseño y construcción. Contiene el conjunto de información necesaria para describir y construir una versión física que duplica o “se hermana” con la versión virtual. Esta información incluye, entre otros:

- Requisitos de la Propiedad incluidos en los contratos, información legal previa y geotécnica del terreno,
- Modelo de Información en forma de una Base de Datos orientada a objetos, que incluye Información Geométrica 3D así como Inventario de Materiales y Equipos,
- Registro histórico completo de actuaciones anteriores y de los agentes que han participado antes en el proceso, basado en las Actas y Comunicaciones emitidas,
- Lista de Servicios y Sistemas funcionales del edificio, a partir de los requisitos iniciales de la Propiedad,
- Otros documentos (p. ej. Documentación de Equipos y Materiales, Técnicas Selectivas de Deconstrucción, Construcción Circular, etc.)

La evolución de DTP es crucial, ya que permite tanto aplicar mejoras a los modelos mediante simulaciones iterativas, como utilizar los valores simulados resultantes como base de referencia de las DTI tras la puesta en marcha del edificio en la construcción real.



Un Gemelo Digital en Edificación está vinculado a lo largo de toda su vida a un elemento físico específico, incluso cuando el edificio entra en la fase de explotación. En el sector de AECOO, este hito corresponde a la documentación As Built legalmente vinculante. Este tipo de Gemelo Digital puede contener "entre otros", los siguientes conjuntos de información:

- Un Modelo de Información completo que incluirá el modelo 3D con Dimensionado y Tolerancias Generales (GD&T) que describe la geometría de la instancia física y sus componentes,
- Lista de materiales que incluye los elementos y equipos existentes y preexistentes (en su mayoría relativos a la arquitectura, la estructura y las instalaciones del edificio),
- Lista de procesos que recoge las intervenciones que se llevaron a cabo en la creación de esta instancia física (basada en los registros y las modificaciones del proyecto generadas después de la auditoría), junto con los resultados de las mediciones y pruebas de la instancia (por ejemplo, estudios de la nube de puntos de los servicios internos, pruebas de carga estructural, georradars, etc.),
- Un Registro de Servicio que describe las actuaciones realizadas y los componentes substituidos (Renovación Mayor/Menor y Mantenimiento Normal),
- Estados de funcionamiento capturados a partir de los sensores de datos actuales, pasados e incluso previstos para el futuro (BMS, sensores SCADA/IoT, Servidores de Gestión de Instalaciones, Simulaciones...)



En el sector AECOO, de forma similar a la industria, este tipo de Gemelo Digital en Edificación es la agregación de múltiples DTIs. En lugar de tener una estructura de datos independiente, los DTAs son una construcción informática que proporciona acceso directo a todos los DTIs, permitiendo así consultas ad hoc o proactivas para hacer benchmarking y comparaciones.

Agregado horizontal de Gemelo Digital en Edificación (hBDTA)

Este tipo de DT sigue el mismo principio que en el caso de la Industria, vinculando DTIs similares. Sin embargo, en general, los elementos del sector de AECOO presentan un número menor de activos y una heterogeneidad mucho mayor que los productos de la industria. Además, las entidades jurídicas que participan en su creación son mucho más numerosas que en las cadenas de suministro de la industria (por ejemplo, los OEMs y los TIER1 y TIER2), por lo que la propiedad de los datos está mucho más distribuida. Estas dos características inherentes a los casos del sector de AECOO pueden dificultar tanto la representatividad de los datos agregados como el potencial de los alcances de las consultas.

Agregado vertical de Gemelo Digital en Edificación (vBDTA)

Desde el punto de vista de muchos actores relacionados con el sector de AECOO (propietarios, inquilinos, administraciones públicas, aseguradoras...) un inmueble (contenedor) debe ser considerado conjuntamente como un continente para los elementos que se encuentran en su interior contenidos como electrodomésticos, muebles y bienes personales. Estos contenidos, al igual que componentes importantes de las instalaciones del edificio y de sus sistemas auxiliares (p. ej. automatización de edificios), pueden tener sus propias Instancias Gemelas Digitales (DTIs). La conexión entre estas Instancias Gemelas Digitales a gran escala ampliará en gran medida los límites del acceso a la información relevante. Por otro lado, hoy en día se generan DTIs a partir de Infraestructuras Críticas e incluso se plantean barrios enteros, llegando así a la escala de ciudades. Este escalado en la construcción es la bisagra entre las ciudades y su contenido, y la sincronización de los Gemelos Digitales en Edificación a través de las escalas del Gemelo Digital permitirá una agregación vertical que irá desde los equipos más simples hasta llegar a los barrios. El vBDTA servirá para que los agentes implicados en el sector de AECOO puedan realizar consultas y obtener información relevante.

Entorno de Gemelo Digital en Edificación (BDTE)

Más allá de esto, con la creación de cualquier DTE, se buscan dos propósitos principales: Predictivo (íntimamente ligado a las herramientas de simulación de DTP y DTI) e Interrogativo (aplicado tanto a las DTI como a los análisis en profundidad de las DTA). Como sucede en cualquier DTE, estos dos impulsores básicos pueden incluir peticiones completamente diferentes dependiendo de cuál es el papel de los agentes implicados que interactúan y la tipología del Gemelo Digital.

Aspectos adicionales de las definiciones de Gemelos Digitales para edificios existentes

Los nuevos edificios representan sólo una pequeña fracción de los activos de AECOO, ya que la gran mayoría han sido construidos en el pasado, lo que dificulta enormemente el potencial de los Gemelos Digitales en edificación si no se desarrollan y comercializan para el parque edificado existente.

Una oportunidad propicia para la implementación de los Gemelos Digitales en Edificación surge durante cualquier remodelación importante, facilitando la introducción de nuevos métodos y tecnologías para permitir su progresiva Digitalización.

La tipología de los grandes proyectos de rehabilitación en AECOO presenta flujos de trabajo y herramientas digitales similares a los de los proyectos de nueva construcción. Por lo tanto, su digitalización se desarrolla de la misma forma que en los edificios nuevos bajo Entorno de Gemelo Digital. En estos casos, sin embargo, el alcance del Prototipo de Gemelo Digital en Edificación durante las fases de Proyecto y Obra, y del Gemelo Digital en Edificación durante las fases de Explotación y Mantenimiento, tendrá un alcance limitado únicamente a los cambios debidos a las reformas. Por ejemplo, si a un edificio de 40 años de antigüedad en una zona urbana se le renueva la fachada, esto representa una gran oportunidad para iniciar la digitalización de todo el edificio. Es cierto que la información digital de las instalaciones del edificio, los sótanos o sus cimentaciones no estarían cubiertos por este proyecto, pero si se utilizan los Principios del Gemelo Digital, ello podría

representar un primer hito importante para el proceso de digitalización progresiva del edificio.

El seguimiento de estos Gemelos Digitales, en los casos de rehabilitación de edificios, mantendrá actualizada su información y permitirá descartar los datos que ya no son fiables. Esto es de crucial importancia para cualquier agente del proceso de construcción y, más allá de esto, estos Gemelos Digitales parciales pueden ser aprovechados como punto de partida para crear Instancias de Gemelos Digitales completas, preparando así el camino para la futura digitalización de los activos de AECOO. Por otro lado, tener una frontera clara de qué información se actualiza y cuál no da mayor seguridad ante cualquier futura toma de decisiones. Esto por lo menos evitaría los errores provocados por el uso de información procedente de hipótesis incorrectas, cualquiera que sea el papel de quien esté trabajando con el Gemelo Digital en Edificación.

Por último, está a punto de darse un paso crucial en la rehabilitación de AECOO, con respecto al escaneado para la adquisición automatizada de datos tridimensional. Ello se debe al rápido desarrollo de dos tecnologías que permitirán una progresiva digitalización de las ciudades e infraestructuras actuales hasta llegar a la escala del edificio: en primer lugar, la evolución de las tecnologías PaRS a lo largo de las últimas décadas, al reducir el coste y el tamaño al mismo ritmo que mejoran la precisión y la facilidad de uso.

En segundo lugar, el uso de nuevos sistemas de captura de información y sensores (por ejemplo, fotovideogrametría, LiDAR, escaneo láser, etc.) cuya velocidad y precisión en la interpretación de los datos recibidos han alcanzado unos valores sin precedentes.

Además, estas dos tecnologías están hoy en día plenamente respaldadas por el avance de la robótica y de los vehículos autónomos, ya que disponen de sensores para la localización espacial con el fin de permitir incluso la navegación semiautónoma.

Por ello, la adopción de Gemelos Digitales en los proyectos de rehabilitación de AECOO será clave para la correcta integración de estas tecnologías, que van desde los equipos de detección hasta el reconocimiento de imágenes, proporcionando el marco adecuado para gestionar el esperado impulso de los datos de geometría que estarán disponibles en el futuro.

6. VINCULACIÓN DE LOS ESTÁNDARES BIM CON EL PROYECTO DE GEMELO DIGITAL EN EDIFICACIÓN

Sólo adaptando y ampliando los actuales procedimientos tecnológicos y metodológicos en la industria de AECOO, el sector conseguirá introducir el Gemelo Digital en Edificación tal como se ha definido anteriormente. Por consiguiente, estas definiciones propuestas por BDT incluyen una fusión con las prácticas y normas actuales de SoA (Arquitectura Orientada a Servicios).

Esto también incluye la creación de nuevas figuras con funciones bien definidas. Estos nuevos actores estarán vinculados a nuevos procesos y serán responsables, entre otras cosas, de la adecuada gestión de la información de la que se dispone, así como de la configuración de todos los sistemas híbridos de realidad digital y de gestionar la coordinación entre los actores o de garantizar que las predicciones sean correctas mediante una supervisión alineada con los modelos de simulación y con los algoritmos elegidos.

Tal y como se desprende de las definiciones de la ISO 19650-1: 2018 mencionadas en el primer apartado de este documento, la metodología y la tecnología basadas en BIM son hoy en día la clave del futuro de la digitalización en AECOO. Por ello, nuestra propuesta de adaptación y ampliación se basa en las definiciones existentes.

ESQUEMA 9.

PROPUESTA DE NUEVAS DEFINICIONES

VINCULANDO BIM CON GEMELO DIGITAL

DESDE SPHERE

Prototipo de
Gemelo Digital
en Edificación
basado en
BIM

El uso de contenedores de información existentes relacionados con los proyectos de AECO bajo la norma ISO 19650-1: 2018 aportará la mayoría de las características necesarias para crear un BDTP durante las fases de Proyecto y Obra. El Modelo de Información del Proyecto consiste básicamente en el Modelo BIM desarrollado dentro del CDE. Será la principal fuente del BDTP, aunque no la única, ya que los BDTPs incluirán al menos, aunque no exclusivamente, un documento legal de BEP acordado entre los principales actores involucrados en esta fase, desarrollando el marco legal, las normas, los procedimientos técnicos, el personal, la propiedad de los datos, el alcance, todos los requisitos internos y externos (PIR+AIR, así como los OIR de las organizaciones clave), los archivos previos relacionados con el entorno incluyendo la información legal del terreno (ej. Catastro, Histórico, etc.) y, por último, información geométrica (levantamientos topográficos, campañas geotécnicas, etc.). También incluye otros datos no estructurales, conformando un Modelo de Información. Además, un PIM adaptado a un BDTP debe incluir vínculos dinámicos a otras bases de datos relacionadas con el modelo que se gestiona. El BDTP debe abordar el desafío que representa establecer una relación entre los datos del PIM y los propios modelos BIM.

Instancia de
Gemelo Digital
en Edificación
basada en
BIM

Los BDTPs deben incorporar toda la información relevante almacenada por el BDTP y, por lo tanto, utilizarán secuencialmente los Modelos de Información anteriores para estructurar este tipo de Gemelo Digital. Considerando nuevamente los proyectos de AECO desarrollados bajo la norma ISO 19650-1: 2018, un edificio de nueva construcción, cuando entre en su fase de explotación y mantenimiento puede incluir la información de la evolución del AIM a partir del anterior Modelo de Información As Built. Este AIM inicial y sus posteriores grabaciones proporcionarán la información necesaria de la Instancia actual, incluyendo el Dimensionado General y Tolerancias (GD&T), la Lista de Materiales y la Lista de Procesos Representativos (incluyendo los avances en las comunicaciones BEP y BCF), junto con los resultados de las mediciones y pruebas de la instancia (p.ej. Nube de puntos, pruebas de carga estructural, GeoRadares...), un registro histórico de servicios prestados en el pasado, los componentes substituidos (Renovación Mayor/Menor y Mantenimiento Normal), y Estado de Funcionamiento obtenido a partir de los datos de los sensores reales, actuales, históricos y futuros pronosticados (BMS, sensores de SCADA/IoT, Sistemas de Gestión de las Instalaciones, Simulaciones, etc.). Toda esta información debe vincularse dinámicamente a los modelos BIM que componen el AIM.

Agregado de
Gemelo Digital
en Edificación
basado en
BIM

El campo menos desarrollado del Gemelo Digital en Edificación es cómo debe realizarse la sincronización de un conjunto heterogéneo de Gemelos Digitales. Sin embargo, hay algunos desarrollos en el actual SoA de BIM que van en esa línea, como el uso de bibliotecas estandarizadas para homogeneizar la integración de toda la información. Además, según la ISO 19650, AIR podría ser la forma de desarrollar especificaciones que permitan gestionar futuros BDTP, ya que implica un conjunto de definiciones estandarizadas de los objetos modelo utilizados en los AIM.

Actualmente, el proyecto SPHERE propone una BDTP horizontal mediante el uso de una PaaS que incluirá al menos los siguientes servicios:

- Ontología semántica de datos vinculados.
- Plataforma de IoT integrada.
- Lector de formatos IFC.
- Blockchain (Transacciones seguras).
- Bibliotecas de objetos para Gemelos Digitales.

Los supuestos basados en la experiencia de la industria permiten pronosticar que esto será lo más acertado mediante una evaluación PLM multidisciplinar completa de las agregaciones horizontales y verticales centradas en el edificio.

Entorno de
Gemelo Digital
en Edificación
basado en
BIM

El BDTP podrá ampliar las funcionalidades del CDE actual para gestionar de forma dinámica toda la información de PIM y AIM, además de la conexión con los instrumentos de registro y actuadores del edificio, especialmente en la fase de explotación del edificio.

7. NUEVOS ROLES Y PROCESOS PARA IMPLANTAR EL GEMELO DIGITAL EN EDIFICACIÓN

Hay que tener presente que un modelo BIM es distinto de un DT. Un modelo BIM debe adaptarse para que pueda ser utilizado como DT, por ejemplo, adaptando el LOD (Nivel de Definición) de los Modelos de Información. Para garantizar la correcta creación de cualquier BDT, se propone una nueva figura, el Gestor de Gemelo Digital (DTM).



GESTOR DEL GEMELO DIGITAL EN EDIFICACIÓN (BDTM)

El BDTM será responsable de desarrollar y adaptar los procedimientos correctos para crear y gestionar el DT del edificio a lo largo de su ciclo de vida. El Gestor del Gemelo Digital debe asegurar el buen funcionamiento del modelo y de la base de datos externa, y que todos los usuarios tienen acceso a la plataforma DT. Todos los cambios (ej. nuevos usuarios, sustitución de un equipo, etc.) que experimente el DT deben ser controlados por el Gestor del Gemelo Digital. Esta nueva figura será la encargada de certificar, auditar y registrar la evolución de cualquier tipo de Gemelo Digital en Edificación a lo largo de su vida útil, incluyendo dos aspectos principales: la Gestión de la Configuración, enfocada a la gestión y control de los elementos del sistema DT y su configuración, y el Gestor de la Simulación.

En resumen, el DTM llevará a cabo las siguientes acciones:

- *Configuración de los requisitos del Gemelo Digital y diseño del entorno TIC:*
 1. *Definición de los Roles y Permisos de los usuarios de Gemelos Digitales.*
 2. *Definición de la complejidad de la estructura de la información: Nivel de Definición (LoD) y Niveles de Información (Lols), servidores, aplicaciones de sistemas de nodos y maestros, escalabilidad y seguridad.*
 3. *Selección de servicios y herramientas de Gemelo Digital como una extensión de BEP.*
 4. *Ampliación del Entorno Colaborativo basado en CDE para cumplir con los requisitos de DT.*
- *Estrategia de Monitorización:*
 1. *Definición y actualización de los requisitos de monitorización a lo largo de la vida del edificio, cotejando los resultados con el software de control.*
 2. *Selección de la frecuencia de monitorización para generar la Base de Datos.*
 3. *Integración con la Plataforma IoT seleccionada y los sensores (por ejemplo, BEMS).*
- *Estrategia de registro:*
 1. *Definición de procedimientos de carga y de registro.*
 2. *Uso de la automatización para minimizar y optimizar la escritura en la base de datos y la ejecución de scripts.*
 3. *Datos del Sistema para hacer que los scripts y las plantillas de programación sean adaptables a múltiples sistemas.*
- *Estrategia de integridad:*
 1. *Procedimientos de control de calidad y herramientas de auditoría antes de registrar.*
- *Análisis de los datos:*
 1. *Estrategia del análisis de datos.*
 2. *Retroalimentación y actualización del análisis de datos.*
- *Gestión de la Seguridad de la Información (ISO/IEC 27000).*
- *Gestión de la Configuración del Gemelo Digital (ISO/IEC 12207) (ver más abajo).*
- *Gestión de la Simulación del Gemelo Digital (ver más abajo).*

Es importante subrayar que el Gestor del Gemelo Digital puede referirse tanto a una persona como a un equipo de varias personas. Como ejemplo, los grandes proyectos de construcción pueden requerir un Responsable de la Información que coordinará la información por medio de un equipo de especialistas (por ejemplo, coordinadores BIM para cada etapa y de cada disciplina, responsables de calidad, etc.). En base a ello, y dependiendo del tamaño del activo y/o de las competencias necesarias para cumplir con los requisitos, puede asumirlo una sola persona que se encargue de todos los temas o un equipo multidisciplinario. En este último caso, el BDTM liderará el equipo y será el último recurso responsable.

Entre las funciones definidas que corresponden al Gestor de Gemelo Digital en Edificación, dos de ellas destacan por su importancia y complejidad. Ambas funciones pueden ser asumidas por un único equipo especializado dedicado. La figura correspondiente a la primera función es la siguiente:

1 – GESTOR DE CONFIGURACIÓN DEL GEMELO DIGITAL EN EDIFICACIÓN (BDTCM)

Como concepto amplio y transversal, la gestión de la configuración (CM) se refiere al proceso de gestionar sistemáticamente los cambios de un sistema, de forma que mantenga la integridad a lo largo del tiempo, definido aquí como ciclo de vida. Los distintos orígenes y formatos de datos, así como el almacenamiento de la información y el acceso a la misma, requieren la interacción de varios servidores, por lo que la gestión de la configuración es una tarea compleja, que justifica la figura del Gestor de Configuración. Es necesario que el entorno creado bajo el concepto DT esté al cargo de una persona que controle y sincronice las diferentes funciones, desde las consultas de los usuarios hasta los procesos de datos internos a lo largo del tiempo. Como ejemplo, la arquitectura propuesta en la plataforma SPHERE es una PaaS que actúa como un sistema de sistemas. Por lo tanto, comprende un ecosistema multicapa capaz de comunicarse con entornos externos.

El BDTcM debe cubrir los siguientes aspectos, considerados como una extensión de la definición ofrecida por la ISO/IEC 12207-2017, que también incluye la gestión de la Interfaz:

- *Identificación y gestión de roles y permisos a través de los Elementos de Configuración (Cis).*
- *Establecimiento de las Referencias de la Configuración y disponibilidad del estado de la Configuración.*
- *Establecimiento de Auditorías de Configuración y su aceptación.*
- *Definición del Sistema de Plantillas que se utilizará para facilitar la configuración de los archivos y los servicios de configuración.*
- *Establecimiento de la extensibilidad para compartir extensiones personalizadas de los diferentes agentes involucrados.*
- *Identificación de posibles desviaciones en los Costes de Actualización más allá de las automatizaciones que incluyen tiempo, experiencia y formación.*
- *Control y aprobación de las entregas y versiones de la información del sistema DT.*

Después de todo esto, el Gestor de Configuración actúa como director de orquesta, pudiendo dar instrucciones a los compañeros de trabajo con diferentes configuraciones de hardware y software, incluyendo sistemas operativos, versiones de software y sus configuraciones.

El Gestor de Configuración de DT se encarga de la gestión global diaria de los procesos relevantes de cualquier Gemelo Digital. Este rol asegura que todas las actividades del proceso se lleven a cabo y que cuenten con el personal adecuado. Desde un punto de vista práctico y con el fin de facilitar las tareas al DTcM, el Gestor de Configuración debe disponer de una herramienta de Gestión de la Configuración incluida como un servicio de la Plataforma del Gemelo Digital.

Más allá de este aspecto más operativo de la gestión de BDT, la segunda figura propuesta se dedicará a añadir valor a los actores a lo largo del Ciclo de Vida de los activos a través de la siguiente dedicación:

2 – GESTOR DE SIMULACIÓN DEL GEMELO DIGITAL EN EDIFICACIÓN (BDTSM)

El Gestor de DTs actúa como coordinador general para la definición de los servicios basados en la simulación de cualquier Entorno de Gemelo Digital (DTE), por ejemplo, las capacidades y funciones principales de SPHERE PaaS. Entre sus principales atribuciones se encuentran:

- *Identificar la estrategia de simulación de acuerdo con el proyecto recibido y los actores involucrados a lo largo de la vida del activo, desde las fases de Proyecto y Obra hasta la de explotación.*
- *Participar con el Gestor de BDT y con los actores del proceso de construcción (Contratista, Gestor de BIM, etc.) en la definición de la arquitectura del Entorno DT:*
 1. *Coordinando la definición de las interfaces y las entradas/salidas de las distintas aplicaciones, con las herramientas de simulación.*
 2. *Estudiando con el resto de los actores implicados, la problemática actual para incorporar la información en las herramientas de simulación y su actualización a lo largo de la vida del activo, teniendo en cuenta las distintas herramientas utilizadas desde la fase de proyecto hasta la fase de explotación.*
- *Identificar y mejorar las sinergias derivadas de la colaboración entre las distintas aplicaciones y promover la colaboración entre ellas.*
- *Fijar objetivos de simulación en base al EIR:*
 1. *Definir los alcances de la simulación y los niveles de detalle.*
 2. *Mapear las entidades/proyecto de consistencia-modelo/método de verificación o transferencia de propiedades.*
 3. *Elegir las herramientas y los modelos de simulación.*
 4. *Definir los requisitos mínimos de nivel de información.*
 5. *Definir la precisión mínima del modelo de simulación.*
 6. *Validar y verificar la simulación.*
 7. *Establecer el método para justificar el logro de los objetivos requeridos.*



En base a todo ello, el Gestor de Simulación DT debe ser responsable de todos los aspectos relacionados con el desarrollo y mantenimiento de un modelo de simulación evolutivo que esté correlacionado con el conjunto de edificios físicos inteligentes y conectados. Para garantizar la coherencia entre el proyecto y el modelo, el DTsM asignará la correlación entre los elementos y entidades del proyecto y las entidades matemáticas. Como ejemplo, el Proyecto SPHERE utiliza Ecosimpro entre otras herramientas de simulación. Ecosimpro es una herramienta de simulación basada en componentes para modelar procesos físicos simples y complejos que puedan expresarse en términos de ecuaciones algebraicas diferenciales o ecuaciones diferenciales ordinarias y simulación de eventos discretos. Tomando el IM evolutivo proporcionado por el DTE como base en su correspondiente fase de vida del activo, el DTsM tomará decisiones sobre qué componentes de simulación utilizar y qué métodos asegurarán la fidelidad y consistencia del modelo de simulación a lo largo del tiempo.

Más allá del modelo de simulación en sí, el DTsM también aporta las interfaces con otros sistemas a lo largo de todo el Ciclo de Vida del Edificio, que serán especificados y documentados por el DTcM. En el caso del proyecto SPHERE, se ha propuesto el formato IFC como candidato principal. Sin embargo, esto no se limitará solo a estándares abiertos, ya que algunos socios del Proyecto SPHERE pueden requerir otra estrategia para los sistemas heredados o ciertos requisitos específicos de EIR.

Estas interfaces son de gran importancia, especialmente en el caso de la integración de los datos procedentes de los sistemas de simulación establecidos con respecto a las mediciones manuales o de sistemas de control.

Basándose en la correlación entre los datos procedentes de las fuentes digitales y físicas, el DTsM establecerá los métodos de validación e incluso de certificación (dependiendo del grado de implementación del Gemelo Digital) permitiendo no sólo una mejora iterativa de la simulación, sino que también abrirá una amplia ventana a la optimización de la operación de control de cualquier activo.

Esta integración de datos simulados con señales externas es bien conocida en los sectores de la Energía o Aeroespacial y puede ser utilizada para: calibración de modelos, diagnóstico de puesta en marcha y detección de fallos, diagnóstico de monitorización, o incluso el seguimiento de los diagnósticos mediante el uso de un Software-in-the-Loop (SIL). Del mismo modo, los BTDs pueden perseguir los mismos objetivos. Por ejemplo, simulación de la respuesta de un edificio y su sistema de HVAC a comandos BEMS.

En consecuencia, estos métodos son cruciales para reducir la brecha entre los datos simulados y los monitorizados durante la puesta en marcha del edificio. Esta validación entre las simulaciones del proyecto y la fase de explotación podría reforzar futuras funciones predictivas de cualquier BDTI y tiene una importancia relevante en el caso de Contratos Basados en los Resultados. Dado que estos contratos basados en los resultados se rigen por mediciones reales, incluidas las tolerancias, la diferencia entre los modelos de simulación y las medidas deben reducirse significativamente. La certificación y validación de que el modelo "responde a la realidad" en la medida acordada debe ser responsabilidad del Gestor de la Simulación.

8. NUEVOS USUARIOS FINALES DEL GEMELO DIGITAL EN EDIFICACIÓN EN EL SECTOR AECOO DEL PROYECTO SPHERE

La implementación del Gemelo Digital en el sector de AECOO no sólo significa que se necesitan nuevos roles en la implementación de los DT, sino también que están surgiendo nuevos usuarios finales más allá de los arquitectos, ingenieros y empresas constructoras que pueden beneficiarse de la digitalización y de los DT. Estos usuarios del Gemelo Digital cubren la fase de explotación del edificio, así como las empresas que participan en las obras de renovación, incluyendo:

- Gestores de Explotación del Edificio (Facility Managers), responsables de mantener el edificio en buen estado de funcionamiento durante su fase de uso, así como de emprender las obras de renovación que sean necesarias.
- Subcontratistas de Obras de Rehabilitación, que llevan a cabo la ejecución de obras de menor o de mayor envergadura en el edificio.
- Propietarios de Edificios Públicos, que gestionan edificios específicos para segmentos particulares de la sociedad como la vivienda social, los ciudadanos de edad avanzada y los grupos con necesidades especiales.
- Propietarios de Edificios Privados, desde pequeños a grandes, que normalmente poseen, compran/venden y gestionan edificios plurifamiliares.
- Inquilinos, que requieren mejores servicios para la explotación de los edificios.

Se ha llevado a cabo un análisis detallado de los beneficios que estos actores perciben de la aplicación del Gemelo Digital en Edificación, como se muestra en la Tabla 1. Estos actores aportan al sector de AECOO roles bien definidos a escala global y la mayoría de ellos están cubiertos por entidades legales. Sus definiciones legales y responsabilidades pueden variar de un país a otro y de una región a otra, pero hay suficientes similitudes para encajar con una definición genérica.



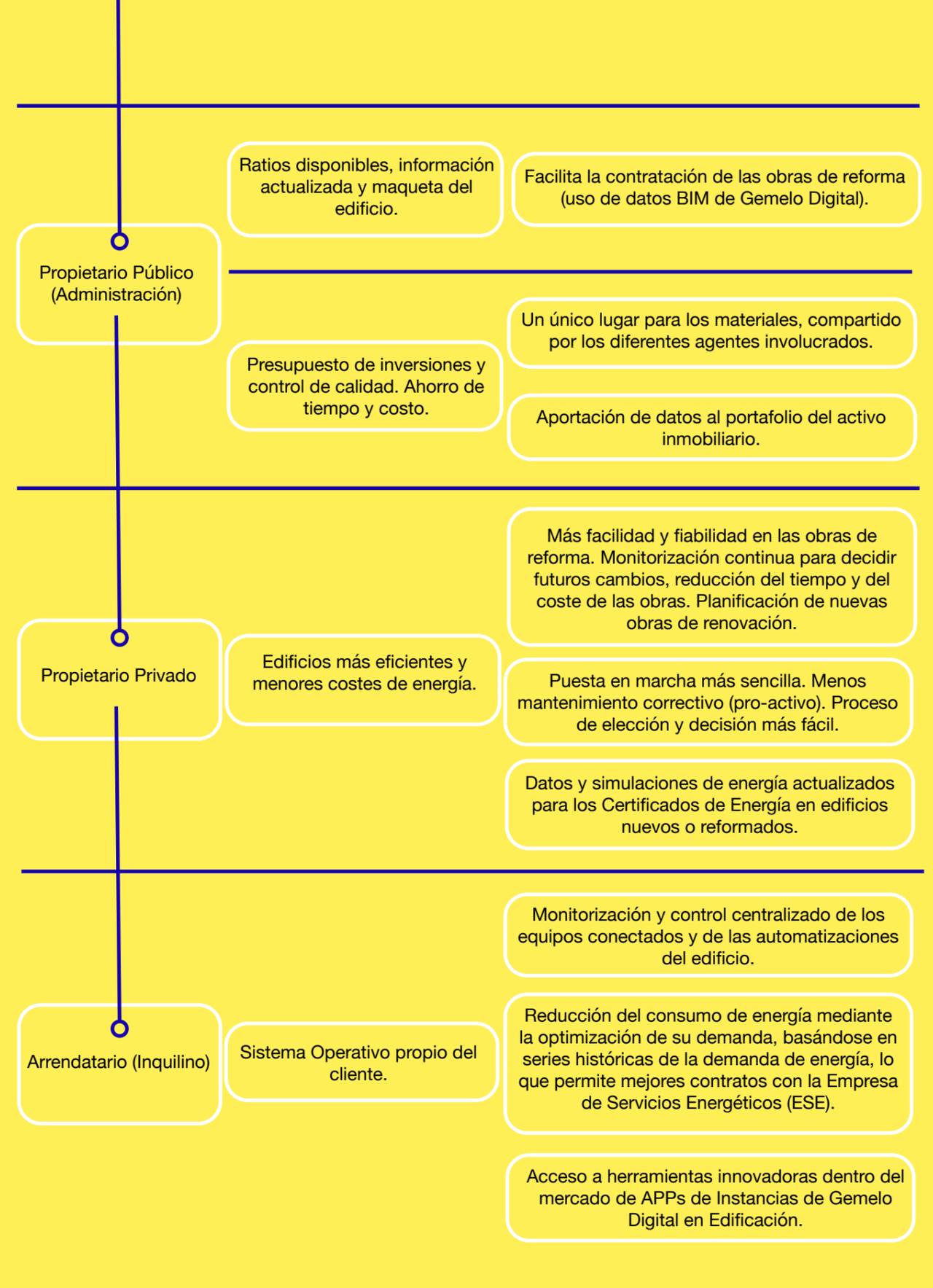
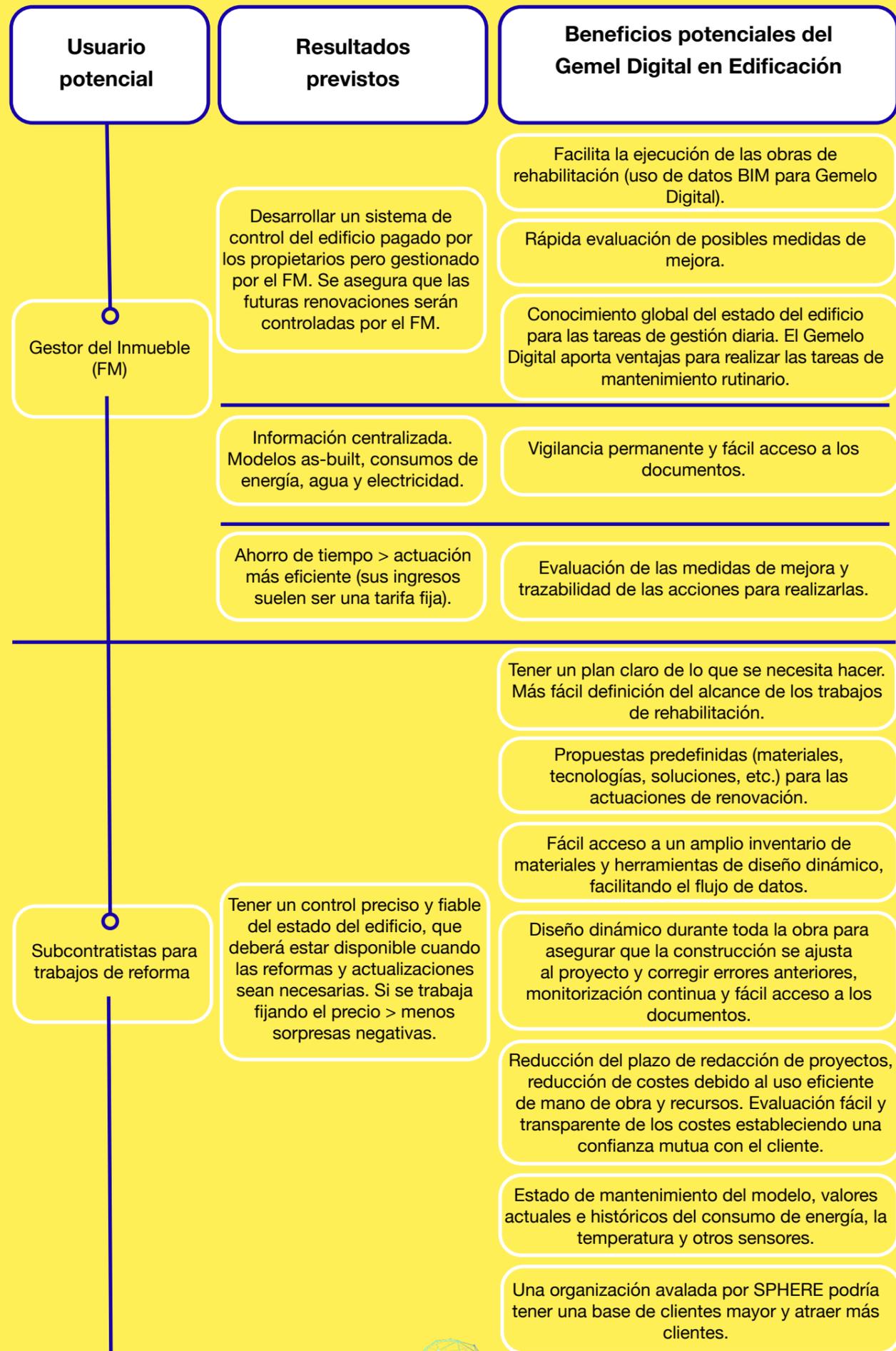


Tabla 1: nuevos usuarios del Gemelo Digital en la fase de Explotación que están surgiendo en AECO.

9. PRÓXIMOS PASOS DEL GEMELO DIGITAL EN EL SECTOR DE AECOO EN EL SENO DEL PROYECTO SPHERE

Al considerar las definiciones propuestas en los Capítulos 5 y 6, se ha establecido la premisa de que sólo un equipo con las responsabilidades definidas que se muestran en el Capítulo 7 podrá desarrollar BDT completos y actualizados. Por lo tanto, estos nuevos perfiles y sus habilidades relacionadas, proporcionarán esta nueva capa de ingeniería de sistemas sobre las normas y procedimientos BIM actuales para mantener la información en evolución a lo largo de la vida útil de cada edificio.

Con el objetivo de dar un giro radical a este proceso, el proyecto SPHERE se compromete a implementar unos demostradores para aplicar y validar, lo más cercano posible a la realidad, todo el operativo de BDT (incluyendo los desarrollos tecnológicos más relevantes). Nuestra estrategia de demostración se basa, por tanto, en los siguientes cuatro casos prácticos:

1. En el marco del proyecto SPHERE se pretende crear cuatro Gemelos Digitales en Edificación, en 4 pilotos residenciales de la UE (Finlandia, Países Bajos, Austria e Italia). Estos cuatro pilotos mostrarán la aplicación del Entorno de Gemelo Digital y sus tecnologías y herramientas, que serán ofrecidas como un conjunto de los PaaS de SPHERE y sus SaaS Apps (Herramientas) asociadas las cuales se pondrán a disposición de las empresas involucradas en los cuatro pilotos: dos de nueva construcción y dos de rehabilitación, en tres zonas climáticas diferentes.
2. En todos los casos, la operación de demostración se llevará a cabo como parte de un proyecto más amplio de remodelación en curso o de un proyecto de nueva construcción (con un presupuesto ya asignado).

3. En cada lugar de demostración (Finlandia, Austria, Italia y los Países Bajos) asociaremos un equipo de implementación de BDT concebido bajo las definiciones del Capítulo 7, preparado para interactuar con las empresas locales, que se integrarán activamente en el diseño y la elección de la solución óptima basada en sus roles (incluyendo los nuevos roles definidos en el Capítulo 8). Es importante mencionar que tres de los cuatro propietarios de los pilotos son socios del Proyecto SPHERE. De esta forma, la plataforma SPHERE asociará en una fase temprana al equipo de Proyecto y Ejecución de Obra (arquitectos, ingenieros y contratistas) que los responsables de los pilotos hayan elegido para decidir y definir las reformas a ejecutar en el edificio, con los usuarios del mismo. Los participantes en los proyectos de los pilotos de demostración, tendrán así nuevas responsabilidades de trabajo y utilizarán nuevos procedimientos.

De esta manera, el proyecto SPHERE no sólo permitirá probar las herramientas técnicas propuestas, sino que también ofrecerá una prueba real sobre el terreno de cómo estas definiciones y perfiles de BDT propuestos no sólo soportarán la compleja realidad del sector de AECOO, sino que también proporcionarán el valor suficiente para compensar el coste adicional asociado a las nuevas herramientas informáticas y al personal involucrado.

Así, aprovechando el conocimiento acumulado de los socios expertos y las herramientas propuestas, el proyecto SPHERE valorará la efectividad del equipo de BDT para alcanzar los objetivos de BDT previamente establecidos, y guiará el desarrollo de la plataforma técnica basada en PaaS BIM que se utilizará para compartir información, verificando el seguimiento de los pedidos y los controles de calidad, y gestionando la construcción ajustada en el lugar de trabajo con menos residuos, más coordinación, menos molestias entre los contratistas y más compromiso por parte de todos los interesados, incluidos los inquilinos. Se llevará a cabo una evaluación de los resultados alcanzados, que incluirá aspectos técnicos, de ergonomía, aceptación, costos, mejoras en el diseño y pautas de explotación y repetibilidad.



REFERENCIAS

- [1] Alonso, R. et al. SPHERE: BIM Digital Twin Platform. *Proceedings 20*, 1 (2019).
- [2] Baldwin, M. *The BIM-Manager: A Practical Guide for BIM Project Management*. (Beuth, 2019).
- [3] Borth, M., Verriet, J. & Muller, G. Digital Twin Strategies for SoS 4 Challenges and 4 Architecture Setups for Digital Twins of SoS. (2019). doi:10.1109/sysose.2019.8753860
- [4] Bradley, A., Li, H., Lark, R. & Dunn, S. BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Autom. Constr.* 71, (2016).
- [5] Caruso, P. W., Dumbacher, D. L. & Grieves, M. W. Product Lifecycle Management and the quest for sustainable space exploration. *AIAA Sp. Conf. Expo. 2010* (2010). doi:10.2514/6.2010-8628
- [6] Cerrone, A., Hochhalter, J., Heber, G. & Ingraffea, A. On the effects of modeling as-manufactured geometry: Toward digital twin. *Int. J. Aerosp. Eng.* 2014, (2014).
- [7] Ciribini, A. L. C. et al. Tracking Users' Behaviours through Real-time Information in BIMs: Workflow for Interconnection in the Brescia Smart Campus Demonstrator. in *Procedia Engineering* 180, (2017).
- [8] Damjanovic-Behrendt, V. & Behrendt, W. An open source approach to the design and implementation of Digital Twins for Smart Manufacturing. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 32, 4–5 (2019).
- [9] Dawkins, O., Hudson-Smith, A. & Dennett, A. Living with a Digital Twin: Operational management and engagement using IoT and Mixed Realities at UCL's Here East Campus on the Queen Elizabeth Olympic Park. *BIM-DigiCons* April (2018).
- [10] Eastman, C., Teicholz, P. & Sacks, R. *BIM handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. 640 pages pages (John Wiley & Sons, 2011).
- [11] Fischer, M., Reed, D., Khanzode, A. & Ashcraft, H. A simple framework for integrated project delivery. *22nd Annu. Conf. Int. Gr. Lean Constr. Underst. Improv. Proj. Based Prod. IGLC 2014* (2014).
- [12] Gerrish, T., Ruikar, K., Cook, M., Johnson, M. & Phillip, M. Using BIM capabilities to improve existing building energy modelling practices. *Eng. Constr. Archit. Manag.* 24, 2 (2017).
- [13] Glaessgen, E. H. & Stargel, D. S. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air force vehicles. *Collect. Tech. Pap. - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf.* (2012). doi:10.2514/6.2012-1818
- [14] Grieves, M. & Vickers, J. Origins of the Digital Twin Concept. 23, August 8 pages (2016).
- [15] Halmetoja, E. The conditions data model supporting building information models in facility management. *Facilities* 37, 7–8 (2019).
- [16] Hu, Z. Z., Tian, P. L., Li, S. W. & Zhang, J. P. BIM-based integrated delivery technologies for intelligent MEP management in the operation and maintenance phase. *Adv. Eng. Softw.* 115, (2018).
- [17] Ilter, D. & Ergen, E. BIM for building refurbishment and maintenance: current status and research directions. *Struct. Surv.* 33, 3 (2015).
- [18] ISO. ISO 19650-1 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and Principles. (2018).
- [19] Jing, Y., Chen, C., Tang, L., Xiong, H. & Wang, Y. X. Development of BIM-Sensor Integrated Platform for MEP Piping Maintenance. in *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC): Driving* (ICE Publishing, 2019). doi:10.1680/icsic.64669.055
- [20] Joblot, L., Paviot, T., Deneux, D. & Lamouri, S. Literature review of Building Information Modeling (BIM) intended for the purpose of renovation projects. *IFAC-PapersOnLine* 50, 1 (2017).
- [21] Jones, B. Integrated project delivery (IPD) for maximizing design and construction considerations regarding sustainability. *Procedia Eng.* 95, Scescm (2014).
- [22] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. & Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* 51, 11 (2018).
- [23] Lee, E. A. & Seshia, S. A. *Introduction to Embedded Systems -- A Cyber-Physical Systems Approach*. 589 pages (MIT Press, 2017).
- [24] Lu, Q., Xie, X., Heaton, J., Parlikad, A. K. & Schooling, J. From BIM Towards Digital Twin: Strategy and Future Development for Smart Asset Management. in *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future (SOHOMA 2019)* (eds. Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitao, P., Boggino, A. G. & Botti, V.) (Springer, 2020). doi:10.1007/978-3-030-27477-1_30
- [25] Matarneh, S. T., Danso-Amoako, M., Al-Bizri, S., Gaterell, M. & Matarneh, R. Building information modeling for facilities management: A literature review and future research directions. *J. Build. Eng.* 24, March (2019).
- [26] Piascik, B. et al. Materials, Structures, Mechanical systems, and Manufacturing Roadmap: Technology Area 12. *NASA Space Technology Roadmaps* 40 pages (2012). doi:11/13/2013
- [27] Poljanšek, M. *Building Information Modelling (BIM) standardization*. *JRC Technical Reports* 90 (2017). doi:10.2760/36471
- [28] Saieg, P., Sotelino, E. D., Nascimento, D. & Caiado, R. G. G. Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A systematic review. *J. Clean. Prod.* 174, (2018).
- [29] Shafto, M. et al. *DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap: Technology Area 11*. 32 pages (2010).
- [30] Shou, W., Wang, J., Wang, X. & Chong, H. Y. A Comparative Review of Building Information Modelling Implementation in Building and Infrastructure Industries. *Arch. Comput. Methods Eng.* 22, 2 (2015).
- [31] Stojanovic, V., Trapp, M., Richter, R., Hagedorn, B. & Döllner, J. Towards the generation of digital twins for facility management based on 3D point clouds. in *Proceeding of the 34th Annual ARCOM Conference, ARCOM 2018* (2018).
- [32] Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P. & Gao, X. A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Autom. Constr.* 101, June 2018 (2019).
- [33] Tao, F., Zhang, M. & Nee, A. Y. C. *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. *Digital Twin Driven Smart Manufacturing* 263 pages (Elsevier, 2019). doi:10.1016/c2018-0-02206-9
- [34] Tuegel, E. J., Ingraffea, A. R., Eason, T. G. & Spottswood, S. M. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *Int. J. Aerosp. Eng.* 2011, (2011).
- [35] Volk, R., Stengel, J. & Schultmann, F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Autom. Constr.* 38, (2014).
- [36] Wang, H., Pan, Y. & Luo, X. Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. *Autom. Constr.* 103, September 2018 (2019).
- [37] Wong, J. K. W. & Zhou, J. Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Autom. Constr.* 57, (2015).
- [38] Zheng, Y., Yang, S. & Cheng, H. An application framework of digital twin and its case study. *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.* 10, 3 (2019).



LIBRO
BLANCO