

Análisis de casos, arquitectura de datos y niveles de madurez entre el BIM a Digital Twin en edificios

Case studies, data architecture, and maturity levels between BIM and Digital Twin in buildings

Análise de casos, arquitetura de dados e níveis de maturidade entre BIM e Digital Twin em edifícios

Rivas-Pazmiño, Alex Fernando
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
arivasp2@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0003-0684-9312>



García-Saquicela, Lorena Alexandra
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
lgarcias4@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0000-0173-3204>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/nE2/1137>

Como citar:

Rivas-Pazmiño, A. F., & García-Saquicela, L. A. (2025). Análisis de casos, arquitectura de datos y niveles de madurez entre el BIM a Digital Twin en edificios. *Código Científico Revista De Investigación*, 6(E2), 1817–1834.

Recibido: 20/08/2025

Aceptado: 16/09/2025

Publicado: 30/09/2025

Resumen

Este estudio revisa la transición del Building Information Modeling (BIM) hacia el Digital Twin (DT) en edificios, situando el problema en la brecha conceptual y operativa entre modelos estáticos y gemelos bidireccionales, y proponiendo clarificar arquitecturas de datos y niveles de madurez. Se empleó una revisión bibliográfica exploratoria y sistemática con criterios de inclusión/exclusión, búsquedas bilingües en bases indexadas, extracción estructurada (metadatos, semántica, integración, seguridad) y síntesis cualitativa mediante codificación temática. Los hallazgos muestran patrones convergentes: capa semántica interoperable (p. ej., Brick, BOT) para alinear geometría, espacios y telemetría; arquitecturas edge-cloud con mensajería publish/subscribe (MQTT/OPC UA), data lakes y ETL/ELT para trazabilidad y versionado; y una trayectoria de madurez Modelo Digital → Sombra Digital → Gemelo Digital con capacidades analíticas de lo descriptivo a lo prescriptivo. Se evidencian beneficios en O&M (mantenimiento predictivo, optimización energética) y brechas persistentes en interoperabilidad semántica fina, métricas estandarizadas de valor, y gobernanza (calidad, lineage, seguridad). Se concluye que el éxito del DT depende de la coherencia entre semántica, arquitectura y gobierno del dato, además de roles y procesos organizacionales que habiliten operaciones reproducibles y escalables.

Palabras clave: BIM; Gemelo Digital; arquitectura de datos; interoperabilidad semántica; niveles de madurez.

Abstract

This study reviews the transition from Building Information Modeling (BIM) to Digital Twin (DT) in buildings, identifying the problem in the conceptual and operational gap between static models and bidirectional twins, and proposing to clarify data architectures and maturity levels. An exploratory and systematic literature review was used with inclusion/exclusion criteria, bilingual searches in indexed databases, structured extraction (metadata, semantics, integration, security), and qualitative synthesis through thematic coding. The findings show converging patterns: interoperable semantic layer (e.g., Brick, BOT) to align geometry, spaces, and telemetry; edge-cloud architectures with publish/subscribe messaging (MQTT/OPC UA), data lakes, and ETL/ELT for traceability and versioning; and a maturity trajectory Digital Model → Digital Shadow → Digital Twin with analytical capabilities from descriptive to prescriptive. Benefits are evident in O&M (predictive maintenance, energy optimization) and persistent gaps in fine semantic interoperability, standardized value metrics, and governance (quality, lineage, security). It is concluded that the success of DT depends on consistency between semantics, architecture, and data governance, as well as organizational roles and processes that enable reproducible and scalable operations.

Keywords: BIM; Digital Twin; data architecture; semantic interoperability; maturity levels.

Resumo

Este estudo analisa a transição do Building Information Modeling (BIM) para o Digital Twin (DT) em edifícios, situando o problema na lacuna conceitual e operacional entre modelos estáticos e gêmeos bidirecionais, e propondo esclarecer arquiteturas de dados e níveis de maturidade. Foi utilizada uma revisão bibliográfica exploratória e sistemática com critérios de inclusão/exclusão, pesquisas bilingües em bases indexadas, extração estruturada (metadados, semântica, integração, segurança) e síntese qualitativa por meio de codificação temática. Os resultados mostram padrões convergentes: camada semântica interoperável (por exemplo, Brick, BOT) para alinhar geometria, espaços e telemetria; arquiteturas edge-cloud com mensageria publish/subscribe (MQTT/OPC UA), data lakes e ETL/ELT para rastreabilidade e versionamento; e uma trajetória de maturidade Modelo Digital → Sombra Digital → Gêmeo Digital com capacidades analíticas de lo descriptivo a lo prescriptivo. Se evidenciam benefícios em O&M (manutenção preditiva, otimização energética) e brechas persistentes em interoperabilidade semântica fina, métricas estandarizadas de valor, e governança (qualidade, lineage, segurança). Se conclui que o sucesso do DT depende da coerência entre semântica, arquitetura e governança do dado, além de papéis e processos organizacionais que habilitem operações reproduzíveis e escaláveis.

mensagens publish/subscribe (MQTT/OPC UA), data lakes e ETL/ELT para rastreabilidade e versionamento; e uma trajetória de maturidade Modelo Digital → Sombra Digital → Gêmeo Digital com capacidades analíticas do descritivo ao prescritivo. São evidentes os benefícios em O&M (manutenção preditiva, otimização energética) e lacunas persistentes em interoperabilidade semântica fina, métricas padronizadas de valor e governança (qualidade, linhagem, segurança). Conclui-se que o sucesso do DT depende da coerência entre semântica, arquitetura e governança de dados, além de funções e processos organizacionais que possibilitem operações reproduzíveis e escaláveis.

Palavras-chave: BIM; Gêmeo Digital; arquitetura de dados; interoperabilidade semântica; níveis de maturidade.

Introducción

La digitalización del entorno construido ha impulsado una transición progresiva desde el uso de Building Information Modeling (BIM) hacia configuraciones de mayor complejidad cognitiva y operacional agrupadas bajo el término *Digital Twin* (DT). El problema que aborda esta revisión radica en la fragmentación conceptual y práctica entre ambos paradigmas: mientras BIM consolida datos geométricos y semánticos mayormente estáticos, el DT exige sincronización bidireccional y casi en tiempo real entre el activo físico y su contraparte digital, orquestando flujos de datos heterogéneos (sensores IoT, BMS, históricos operativos, simulaciones) y capacidades analíticas avanzadas, como la predicción y la prescripción (Boje et al., 2020; Deng et al., 2021). Esta brecha se amplía por la inexistencia de un consenso universal sobre definiciones y niveles de madurez, lo que dificulta comparar implementaciones y medir valor en los edificios (Kritzinger et al., 2018; Omrany et al., 2023). Asimismo, aunque marcos de gestión de la información como ISO 19650 han profesionalizado la gobernanza de datos en BIM, su traslación a arquitecturas DT con datos dinámicos y gobernanza distribuida sigue siendo parcial (ISO, 2018; Alshammari et al., 2025).

Los factores que agravan este problema se observan en tres dimensiones. Primero, la semántica y la interoperabilidad: el ecosistema BIM—centrado en estándares como IFC—no siempre dialoga con esquemas y grafos de conocimiento requeridos por DT, como las ontologías para sensores o BRICK, lo que crea “islas de datos” y mermas en la fidelidad del

gemelo (Pauwels et al., 2017; Boje et al., 2020). Segundo, la arquitectura de datos: la orquestación entre borde/nube, lagos de datos, APIs y buses de eventos (MQTT/AMQP) para ingesta, curación y versionado de datos en tiempo casi real es todavía heterogénea en edificios, con impactos en latencia, trazabilidad y ciberseguridad (Omrany et al., 2023). Tercero, la medición de madurez: coexisten marcos por niveles (por ejemplo, *Digital Model–Digital Shadow–Digital Twin*) que distinguen la unidireccionalidad o bidireccionalidad del acoplamiento ciberfísico, junto con taxonomías específicas del entorno construido que escalan desde BIM estático hasta DT “ideal” con aprendizaje y control (Kritzinger et al., 2018; Deng et al., 2021). Esta pluralidad conceptual genera incertidumbre metodológica al comparar casos y al diseñar hojas de ruta de evolución (Boje et al., 2020).

La justificación de este trabajo se sustenta en el potencial demostrado de los DT para mejorar el desempeño de los activos a lo largo del ciclo de vida de los edificios—desde la construcción hasta la operación—mediante monitoreo continuo, simulación *what-if*, mantenimiento predictivo y optimización energética (Omrany et al., 2023). Evidencias de casos en campus y aeropuertos muestran reducciones relevantes en tiempo de entrega y costes al integrar BIM con plataformas DT, así como mejoras en gestión operacional y *benchmarking* energético (Lu et al., 2020; Omrany et al., 2023). La viabilidad técnica es creciente gracias a la disponibilidad de marcos de información (ISO 19650), grafos semánticos y *pipelines* de datos de baja latencia, pero su explotación requiere diseñar arquitecturas de datos reproducibles que conecten modelos BIM enriquecidos con ontologías y flujos IoT bajo gobernanza clara (Pauwels et al., 2017; Boje et al., 2020; ISO, 2018). Además, existe una oportunidad de sistematizar los niveles de madurez para facilitar la evaluación comparativa y la toma de decisiones en organizaciones que migran de BIM hacia DT.

En este contexto, el objetivo de la revisión es doble. Primero, analizar críticamente casos representativos que ilustran la evolución BIM→DT en edificios, identificando patrones

de éxito y cuellos de botella en integración semántica, arquitectura de datos y capacidades de control. Segundo, articular un marco sintético de niveles de madurez que combine distinciones ampliamente aceptadas (*Digital Model–Shadow–Twin*) con la “escalera” evolutiva específica del entorno construido (de BIM estático a DT ideal con IA y control), habilitando un mapa de ruta tecnológico y organizacional (Kritzinger et al., 2018; Deng et al., 2021). Esta síntesis permitirá a investigadores y profesionales evaluar el estado actual de sus implementaciones y priorizar inversiones en componentes críticos, como la sincronización bidireccional, la gestión de la calidad del dato, la trazabilidad de versiones y la seguridad, alineadas con los principios de gestión de información y colaboración que establecen las normas ISO 19650 (ISO, 2018; Boje et al., 2020). Finalmente, la revisión asume una perspectiva metodológica que privilegia fuentes indexadas y marcos normalizados para asegurar rigor y replicabilidad en la síntesis, coherente con las mejores prácticas de redacción científica y gestión de literatura técnica.

Metodología

La metodología de este estudio se enmarca en un enfoque exploratorio de revisión bibliográfica orientado a mapear, describir y sintetizar la transición desde el Building Information Modeling (BIM) hacia el *Digital Twin* (DT) en edificios, con especial énfasis en casos de aplicación, arquitectura de datos y niveles de madurez. Se adoptó un proceso sistemático, transparente y reproducible que abarca la planificación de la búsqueda, la selección y evaluación de documentos, la extracción estructurada de información y la síntesis cualitativa de hallazgos.

La fase de planificación definió el alcance temático y las preguntas guía: ¿cómo evolucionan las implementaciones desde BIM hacia DT en el entorno construido?, ¿qué patrones arquitectónicos de datos permiten la integración efectiva de información estática y flujos en tiempo (casi) real?, ¿qué marcos de madurez son útiles para caracterizar esa

evolución? Se establecieron criterios de inclusión centrados en: (a) pertinencia explícita al entorno edificado; (b) contribuciones que describen integración BIM–DT, gemelos digitales para operación de edificios y/o marcos de gobernanza y arquitectura de datos; (c) artículos de investigación, revisiones, estudios de caso, comunicaciones técnicas y documentos normativos; (d) disponibilidad de información metodológicamente clara. Se excluyeron textos con foco principal en manufactura o dominios industriales no transferibles al sector de la edificación, trabajos sin aportes metodológicos identificables y materiales que se limitan a divulgación no técnica. Se priorizaron publicaciones recientes para capturar la rápida evolución del tema, sin desatender contribuciones seminales que fundamentan la transición conceptual.

La estrategia de búsqueda combinó términos en español e inglés, articulados mediante operadores booleanos y truncamientos para abarcar variantes terminológicas. Entre las expresiones utilizadas se incluyeron combinaciones de “Building Information Modeling”, “BIM”, “Digital Twin”, “gemelo digital”, “arquitectura de datos”, “gestión de la información”, “interoperabilidad”, “ontologías”, “maturity”, “niveles de madurez”, “IoT”, “edificios” y “entorno construido”. Se realizaron búsquedas en bases de datos científicas indexadas y, de forma complementaria, en repositorios institucionales y organismos de normalización para identificar marcos y especificaciones relevantes. Se aplicaron filtros temporales aproximados a la última década, con apertura para trabajos anteriores cuando su relevancia conceptual lo justificó. Asimismo, se restringió el idioma a español e inglés para asegurar interpretabilidad y control de calidad en la extracción.

El flujo de selección se organizó en tres etapas con control de duplicados. Primero, cribado por título y resumen para descartar documentos fuera de alcance o redundantes. Segundo, lectura exploratoria del texto completo para verificar elegibilidad y relevancia respecto de los tres ejes (casos, arquitectura de datos y madurez). Tercero, confirmación de inclusión y clasificación preliminar por tipo de aporte (teórico, técnico, aplicado) y por fase del

ciclo de vida del activo (diseño, construcción, operación, renovación). Todo el proceso se registró en una bitácora de auditoría con fechas, criterios aplicados y razones de exclusión, permitiendo rastreabilidad y replicabilidad. Para minimizar sesgos, se efectuó una verificación cruzada interna de las decisiones de elegibilidad y una revisión por pares internos de la matriz final de estudios incluidos.

La extracción de datos siguió un esquema predefinido y pilotado en un subconjunto de documentos para asegurar consistencia. Se capturaron metadatos (año, tipo de documento, contexto geográfico y tipología de edificio), alcance y objetivos, modelo de datos y estándares invocados, mecanismos de integración (APIs, brokers de mensajería, ETL/ELT, lagos de datos), semánticas empleadas (por ejemplo, ontologías del entorno construido, taxonomías para equipos y sensores), frecuencia y dirección de sincronización (unidireccional, bidireccional), mecanismos de aseguramiento de calidad del dato (validación, versionado, trazabilidad), aspectos de seguridad y privacidad, y métricas de desempeño reportadas (energía, mantenimiento, confort, coste, tiempos). En relación con la madurez, se codificaron los niveles operativos alcanzados (modelo digital, sombra digital, gemelo digital con control), las capacidades analíticas (descriptiva, diagnóstica, predictiva, prescriptiva) y los requisitos organizacionales (roles, gobernanza, acuerdos de intercambio de datos).

La síntesis se abordó mediante análisis temático y narrativa integrativa. Primero se realizó una codificación abierta para identificar conceptos emergentes (p. ej., patrones de integración BIM-IoT, grafos semánticos, gemelos operacionales, orquestación borde-nube). Luego, una codificación axial agrupó las categorías en macrotemas alineados con los ejes del estudio: (1) casos de uso y beneficios verificables; (2) arquitectura de datos y gobernanza; (3) escalas y niveles de madurez. Finalmente, se efectuó una codificación selectiva para construir proposiciones interpretativas que explican la progresión BIM→DT y las condiciones técnicas

y organizacionales asociadas. Este enfoque permitió resaltar convergencias, tensiones y vacíos, así como criterios comparables para evaluar implementaciones en contextos diversos.

La calidad metodológica y la aplicabilidad de las evidencias se valoraron con una lista de chequeo adaptada al dominio del entorno construido. Se consideraron dimensiones como claridad del constructo de DT, transparencia en la descripción de la arquitectura de datos, disponibilidad de artefactos reproducibles (modelos, esquemas, repositorios), robustez de la validación (experimentación, datos reales de operación, comparación con línea base), y transferibilidad a otras tipologías de edificios. Los riesgos de sesgo se mitigaron mediante triangulación de fuentes (investigación académica, normativas, documentos técnicos) y contraste sistemático de resultados cuando se presentaban hallazgos divergentes.

Para la gestión de referencias y documentos se emplearon gestores bibliográficos y herramientas de deduplicación, conservando el registro de versiones y notas analíticas. Las matrices de extracción se implementaron en hojas de cálculo estructuradas, con campos validados para reducir inconsistencias y facilitar el filtrado por variables clave (por ejemplo, tipo de sensor, esquema semántico, protocolo de mensajería, nivel de madurez). Se mantuvo un control de cambios que documenta ajustes a los criterios de inclusión/exclusión y a los códigos analíticos a lo largo del proceso, preservando la trazabilidad de las decisiones.

El resultado metodológico esperado no es un metaanálisis cuantitativo, sino una síntesis cualitativa rigurosa que integra evidencias heterogéneas y formula un marco comparativo útil para investigadores y profesionales. En particular, la revisión produce un mapa de patrones de arquitectura de datos, prácticas de modelado semántico e hitos de madurez que caracterizan el tránsito de BIM a DT en edificios, además de identificar brechas de investigación (por ejemplo, interoperabilidad semántica fina, mecanismos de control en bucle cerrado, métricas estandarizadas de valor) y oportunidades para futuras validaciones empíricas.

Finalmente, se diseñó un protocolo de actualización que permite incorporar nuevas evidencias. Este protocolo define ventanas periódicas de búsqueda, criterios invariables para preservar comparabilidad y un procedimiento abreviado de cribado y extracción. De este modo, la metodología no solo garantiza una revisión exhaustiva y ordenada del estado del arte, sino que también sienta las bases para mantener la vigencia de la síntesis a medida que emergen tecnologías, estándares y casos de uso que continúan impulsando la convergencia entre BIM y *Digital Twin* en el entorno construido.

Resultados

Patrones de integración BIM–Digital Twin en edificios

La integración efectiva entre BIM y *Digital Twin* (DT) en edificios converge hacia arquitecturas de datos semánticamente ricas, orientadas a eventos y diseñadas para la sincronización bidireccional entre el activo físico y su réplica digital. En esta convergencia, los modelos IFC de origen BIM se orquestan con ontologías de dominio que estructuran equipos, puntos de sensorización, relaciones topológicas y estados operativos, permitiendo consultas federadas y razonamiento automático sobre grafos de conocimiento. En particular, *Brick* y su evolución formal (*Brick+*) proporcionan un vocabulario interoperable para describir sensores, subsistemas y sus relaciones, superando la ambigüedad típica de etiquetados ad hoc y habilitando aplicaciones portables en *smart buildings* (p. ej., inferencia de significados a partir de modelos Haystack) (Balaji et al., 2018; Fierro et al., 2020). Estas propuestas han demostrado representatividad y portabilidad en portafolios reales, creando la base semántica necesaria para un DT operativo centrado en datos de planta y confort ambiental.

En la capa estructural del conocimiento del edificio, la *Building Topology Ontology* (BOT) cumple el papel de vocabulario mínimo para la topología (niveles, espacios, elementos) y se combina con ontologías de productos, observaciones y dispositivos IoT para implementar esquemas de “BIM nivel 3” web-nativo. BOT facilita la alineación entre geometría, espacios y

redes de sensores, favoreciendo la integración con catálogos y datos geoespaciales; su diseño ligero y extensible la hace idónea como “espina dorsal” de datos para DTs que requieren interoperabilidad fina y trazabilidad del *lineage* informacional (Rasmussen et al., 2020).

En la capa de transporte e ingesta, predominan arquitecturas *edge-cloud* con *brokers* de mensajería *publish/subscribe* (MQTT/AMQP) para *streams* en tiempo (casi) real, combinadas con *data lakes* y almacenes relacionales que resguardan *master data* (catálogos, identidades) y el versionado del modelo. MQTT, estandarizado como ISO/IEC 20922:2016, es particularmente adecuado para contextos de red restringida y acoplamientos de baja latencia; su adopción sostenida en IoT edilicio lo posiciona como pilar del plano de datos operacional. Cuando es necesario transportar semántica rica y garantizar seguridad de extremo a extremo en automatización, OPC UA aporta un modelo de información y servicios unificado, independiente de plataforma, con soporte para datos en vivo, alarmas/eventos e históricos (Mahnke et al., 2009; ISO/IEC 20922:2016). Este dúo (MQTT para telemetría liviana, OPC UA para interoperabilidad *rich*) se observa recurrentemente en DTs edificios maduros, donde coexisten buses de eventos y APIs REST/GraphQL para analítica, tableros de mando y simulación *what-if*.

En el plano analítico, los *pipelines* ELT/ETL integran series temporales (energía, HVAC, ocupación) con estados semánticos del gemelo y reglas de negocio; sobre ellos se despliegan capacidades descriptivas, diagnósticas, predictivas y prescriptivas. La literatura especializada en construcción advierte que el éxito del DT no depende de ensamblar herramientas *off-the-shelf*, sino de su acoplamiento semántico, de la gobernanza del dato (calidad, trazabilidad, control de versiones) y de un diseño de seguridad *zero-trust* desde el origen (Boje et al., 2020). En suma: semántica (Brick/BOT), mensajería (MQTT/OPC UA) y gobierno del dato constituyen el trípode arquitectónico sobre el cual se construyen los flujos de información confiables para operación y mantenimiento (O&M).

Arquitectura de datos y flujo de información identificados

Los casos de DT en campus y edificios reportan arquitecturas de múltiples capas: a) *edge* para adquisición, filtrado y normalización; b) *fog* o pasarelas para consolidación, seguridad y *buffering*; y c) nube o *on-prem* escalable para almacenamiento, servicios semánticos y analítica. En esta estratificación, los grafos RDF —con Brick y BOT como ontologías núcleo— actúan como índice semántico y “contrato de datos”, mientras que los *data lakes* sostienen crudos e históricos para *replay* y auditoría. El estudio del West Cambridge campus demuestra cómo una arquitectura dinámica y estratificada permite integrar fuentes heterogéneas (BMS, IoT, GIS, BIM), habilitando consultas complejas y soporte a la decisión durante O&M; el énfasis no recae solo en la captura de datos, sino en su curación y exponenciación en servicios reutilizables (Lu et al., 2020).

La revisión sistemática BIM→DT en AEC confirma que el salto desde representaciones estáticas hacia gemelos operativos exige, además de conectividad, un entrelazamiento semántico explícito que convierta los modelos en plataformas de integración de dominio: sensores, equipos y relaciones topológicas deben expresar computabilidad y alineamiento ontológico para que la analítica sea portable entre activos (Deng et al., 2021). Una meta-caracterización transversal de la literatura DT subraya, asimismo, la necesidad de consolidar terminología, capas funcionales y criterios de evaluación, de modo que la arquitectura de datos no se limite a un repositorio, sino que materialice un *stack* ciberfísico auditable (Jones et al., 2020).

Escalamiento de madurez y resultados operativos

En la práctica comparada se observa una trayectoria de madurez en tres peldaños: modelo digital (DM), sombra digital (DS) y gemelo digital (DT). El DM agrega información estática y actualizaciones esporádicas; la DS introduce telemetría continua y sincronización unidireccional; el DT cierra el bucle con capacidad de control y aprendizaje. Esta taxonomía

—originada en manufactura— es hoy el marco de facto para auditar el grado de acoplamiento ciberfísico y anticipar los beneficios esperables en cada nivel (Kritzinger et al., 2018; Jones et al., 2020). En edificios, la transición DM→DS habilita diagnósticos y *benchmarking* operativo (energía, confort, fallas), mientras que el salto DS→DT agrega mantenimiento predictivo, optimización multiobjetivo y, eventualmente, control prescriptivo bajo salvaguardas de seguridad y gobernanza.

El posicionamiento conceptual del DT como acoplamiento informacional capaz de mitigar comportamientos emergentes indeseados, y de integrar el ciclo de vida del activo, aporta un criterio de diseño organizacional: un gemelo maduro requiere no solo *tooling*, sino políticas de intercambio, roles de *stewardship* del dato y métricas de valor que anclen las inversiones (Grieves & Vickers, 2016). En el dominio construido, síntesis recientes de *Automation in Construction* y *Sustainability/Buildings* indican beneficios robustos —reducciones de costo y tiempo, mejora energética y soporte a la decisión— cuando existen: (i) semántica interoperable (Brick/BOT); (ii) flujos *streaming* con calidad y *lineage*; y (iii) capacidades analíticas escalonadas (descriptiva → prescriptiva) (Boje et al., 2020; Deng et al., 2021). No obstante, persisten brechas en interoperabilidad semántica fina, estandarización de métricas de valor y evidencia a gran escala en operación prolongada.

Discusión

La discusión de los hallazgos permite interpretar críticamente los resultados obtenidos en torno a la integración BIM–Digital Twin (DT) en edificios, situándolos dentro del marco epistemológico y técnico que rige la digitalización del entorno construido. En este análisis se reconoce que la transición desde modelos estáticos hacia gemelos digitales operativos no constituye una simple evolución tecnológica, sino una reconfiguración paradigmática en la gestión del dato, la semántica y la gobernanza de los sistemas de información. La literatura

coincide en que esta transición redefine la noción de “modelo de edificio” como un ente vivo, alimentado por flujos continuos de información, capaz de aprender y actuar sobre su entorno físico (Boje et al., 2020; Grieves & Vickers, 2016).

Los resultados analizados evidencian una progresiva madurez de los sistemas que integran BIM y DT, sustentada en la convergencia de tres pilares: interoperabilidad semántica, gobernanza del dato y capacidad analítica. La interoperabilidad semántica se erige como el eje articulador de esta evolución, pues determina la habilidad del gemelo digital para integrar fuentes heterogéneas —geométricas, topológicas, sensoriales y operacionales— bajo un marco de referencia común. En este sentido, ontologías como *Brick* y *BOT* no solo permiten estructurar relaciones y significados compartidos, sino que transforman la gestión de datos en un proceso cognitivo donde el edificio adquiere capacidad de interpretación y razonamiento contextual (Balaji et al., 2018; Rasmussen et al., 2020). Esta semántica formal constituye el prerequisite para que el DT trascienda la mera visualización y se convierta en un sistema informacional capaz de soportar decisiones complejas en tiempo real.

La segunda dimensión, la gobernanza del dato, emerge como el núcleo de sostenibilidad del ecosistema digital. Sin políticas claras de control, trazabilidad y calidad del dato, los flujos que alimentan al DT pierden integridad y consistencia, afectando su fiabilidad operativa. Boje et al. (2020) sostienen que el éxito del gemelo no reside en la sofisticación de las herramientas empleadas, sino en la gestión integral del dato y en la capacidad de las organizaciones para sostener arquitecturas semánticamente coherentes. En esta línea, la ISO 19650 proporciona el andamiaje normativo para la gestión colaborativa de información, pero la incorporación de flujos dinámicos —propios del DT— exige extender su aplicación hacia mecanismos de control de versiones, *lineage* de datos y seguridad en tiempo real. Así, la madurez digital de una organización se mide no tanto por el grado de digitalización de sus modelos, sino por la solidez de su infraestructura de datos y sus procesos de gobierno.

El tercer pilar corresponde a la capacidad analítica y su escalamiento en los distintos niveles de madurez. La literatura revisada distingue cuatro niveles de analítica dentro del DT: descriptiva, diagnóstica, predictiva y prescriptiva (Jones et al., 2020). Cada nivel supone una mayor autonomía del sistema en la toma de decisiones, pasando de la observación pasiva a la acción adaptativa. En los casos estudiados, los gemelos con mayor madurez —particularmente aquellos que integran sensores IoT, historiales operativos y modelos de simulación— reportan beneficios medibles en mantenimiento predictivo, optimización energética y confort térmico, confirmando el potencial del DT como herramienta de sostenibilidad operativa (Lu et al., 2020; Omrany et al., 2023). No obstante, este escalamiento requiere superar importantes desafíos en materia de interoperabilidad temporal y contextualización semántica, pues el valor analítico del DT depende de la capacidad de correlacionar eventos dispersos en el tiempo y el espacio físico del edificio.

El análisis comparativo de las arquitecturas de datos sugiere que la madurez tecnológica no puede dissociarse de la madurez organizacional. El DT implica la convergencia de dominios tradicionalmente dispares —diseño, operación, mantenimiento y análisis de datos—, lo que exige nuevas competencias profesionales y modelos de colaboración interdisciplinaria. La creación de un *data-driven built environment* requiere roles definidos de *data stewardship*, flujos de responsabilidad y marcos contractuales que contemplen la propiedad, privacidad y persistencia de los datos generados durante el ciclo de vida del activo (Kritzinger et al., 2018; Grieves & Vickers, 2016). La literatura en gestión de la construcción enfatiza que la falta de gobernanza institucional y la fragmentación de responsabilidades son barreras más críticas que las limitaciones tecnológicas per se (Boje et al., 2020; Deng et al., 2021).

De forma convergente, los estudios de caso y las revisiones sistemáticas indican que el éxito de la transición BIM→DT depende de la capacidad de las organizaciones para gestionar la interoperabilidad semántica en paralelo con la interoperabilidad humana y procedimental.

En otras palabras, el DT no solo requiere modelos bien estructurados y datos limpios, sino también culturas de colaboración digital que aseguren la continuidad semántica entre disciplinas y actores. La alineación entre estándares técnicos (como IFC, BOT, BRICK) y normas de gestión (ISO 19650, ISO 20922) es una condición necesaria pero no suficiente: se precisa una infraestructura cognitiva institucional que garantice la inteligibilidad compartida del dato a lo largo del ciclo de vida del edificio.

En consecuencia, esta revisión revela que el verdadero valor del *Digital Twin* no radica únicamente en la capacidad de representar digitalmente un activo, sino en el potencial para transformar su gestión a través del conocimiento derivado de los datos. Los niveles de madurez alcanzados por las implementaciones analizadas evidencian que la digitalización arquitectónica se encuentra en un punto de inflexión: el paso de modelos informativos (BIM) a sistemas inteligentes (DT) implica el tránsito desde la documentación hacia la cognición digital. A medida que las organizaciones avancen en su gobernanza y analítica, el DT se consolidará como núcleo operativo del edificio inteligente, capaz de anticipar, simular y optimizar su comportamiento en un ciclo de mejora continua.

En síntesis, la integración BIM–DT redefine la práctica arquitectónica y la gestión del entorno construido bajo una lógica informacional. Los patrones de arquitectura de datos, las ontologías y los marcos de madurez descritos en la literatura constituyen no solo una cartografía tecnológica, sino también un nuevo marco epistemológico para concebir el edificio como una entidad cognitiva. La discusión pone de manifiesto que el desafío actual no es tecnológico, sino sistémico: alcanzar la madurez digital requiere que las organizaciones comprendan el dato no como un producto, sino como un activo vivo que articula conocimiento, decisiones y sostenibilidad.

Conclusión

La revisión evidencia que la transición de BIM a *Digital Twin* en edificios no es lineal ni meramente tecnológica; implica una reconfiguración profunda de la gestión de datos, la semántica y la gobernanza organizacional. El núcleo del valor reside en articular un almacén semántico consistente con flujos de datos confiables y trazables, capaz de sostener sincronización bidireccional y analítica de creciente sofisticación. Así, el edificio deja de ser un repositorio de información para convertirse en un sistema cognitivo que aprende, anticipa y actúa.

Los patrones arquitectónicos observados convergen en tres pilares: una capa semántica interoperable que integra geometría, topología y telemetría; una infraestructura de ingesta y orquestación *edge-cloud* que habilita procesamiento en tiempo (casi) real; y un gobierno del dato que asegure calidad, *lineage* y control de versiones. Cuando estos componentes se alinean, emergen mejoras operativas tangibles: mantenimiento predictivo, optimización energética y decisiones informadas durante la operación y el mantenimiento.

El análisis de madurez muestra una progresión pragmática desde el modelo digital, pasando por la sombra digital, hasta el gemelo digital con control y aprendizaje. Este escalamiento no depende únicamente de tecnología, sino de capacidades organizacionales: roles de *data stewardship*, acuerdos de intercambio, procesos de seguridad y métricas de valor que guíen la inversión. La mayoría de las iniciativas se sitúan aún en transiciones intermedias, lo que subraya la necesidad de consolidar prácticas de interoperabilidad y estandarización de indicadores de desempeño.

Se concluye que el éxito del gemelo digital radica en la coherencia entre semántica, arquitectura y gobernanza. Las organizaciones que prioricen estos ejes podrán capitalizar de forma sostenida los beneficios del entorno construido inteligente. Persiste, sin embargo, una agenda abierta: generar evidencia longitudinal a escala de portafolio, afinar la interoperabilidad

semántica fina, estandarizar métricas comparables y formalizar marcos de control en bucle cerrado. Avanzar en estos frentes permitirá pasar de pilotos prometedores a operaciones plenamente maduras y replicables.

Referencias bibliográficas

- Balaji, B., Bhattacharya, A., Fierro, G., Gao, J., Gluck, J., Hong, D., ... Whitehouse, K. (2018). Brick: Metadata schema for portable smart building applications. *Applied Energy*, 226, 1273–1292. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.091>
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- Deng, M., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2021). From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 58–83. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005>
- Fierro, G., Koh, J., Nagare, S., Zang, X., Agarwal, Y., Gupta, R. K., & Culler, D. E. (2020). Formalizing tag-based metadata with the Brick ontology. *Frontiers in Built Environment*, 6, 558034. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.558034>
- Grieves, M., & Vickers, J. (2016). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. En F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- ISO. (2018). *ISO 19650-1:2018 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*. International Organization for Standardization. (Estándar).
- ISO/IEC 20922:2016. (2016). *Information technology — Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1*. ISO/IEC.
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Lu, Q., Parlikad, A. K., Woodall, P., Ranasinghe, G. D., Xie, X., Liang, Z., Konstantinou, E., Heaton, J., & Schooling, J. (2020). Developing a dynamic digital twin at building and city levels: A case study of the West Cambridge campus. *Journal of Management in Engineering*, 36(3), 05020004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000763](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763)

- Mahnke, W., Leitner, S.-H., & Damm, M. (2009). *OPC Unified Architecture*. Springer.
- Omrany, H., Al-Obaidi, K. M., Husain, A., & Ghaffarianhoseini, A. (2023). Digital twins in the construction industry: A comprehensive review of current implementations, enabling technologies, and future directions. *Sustainability*, 15(14), 10908. <https://doi.org/10.3390/su151410908>
- Pauwels, P., Zhang, S., & Lee, Y.-C. (2017). Semantic web technologies in AEC industry: A literature review. *Automation in Construction*, 73, 145–165. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.10.003>
- Rasmussen, M. H., Lefrançois, M., Schneider, G. F., & Pauwels, P. (2020). BOT: The Building Topology Ontology of the W3C Linked Building Data Group. *Semantic Web*, 12(1), 143–161. <https://doi.org/10.3233/SW-200385>