

DE LA CONSERVACIÓN A LA GESTIÓN INTELIGENTE: USO DEL GEMELO DIGITAL MODULAR PARA LA SOSTENIBILIDAD, PRESERVACIÓN Y ACCESIBILIDAD DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO

Nuria Nuñez¹, Gloria Calleja²,
Jorge De la Torre García³, Juan Gallego⁴

¹ CEMOSA, Málaga, España, nuria.nunez@cemosa.es

² CEMOSA, Málaga, España, gloria.calleja@cemosa.es

³ CEMOSA, Málaga, España, jorge.delatorre@cemosa.es

⁴ CEMOSA, Málaga, España, juan.gallego@cemosa.es

Resumen

La gestión de edificios patrimoniales exige enfoques integrados capaces de mejorar la eficiencia energética, la calidad ambiental interior, la conservación y la accesibilidad sin comprometer los valores históricos del bien. En contextos de alta protección, condicionados por marcos normativos estrictos y la necesidad de intervenciones mínimamente invasivas, las soluciones digitales se convierten en una vía clave para avanzar hacia modelos de gestión más eficientes, basados en datos y orientados a la toma de decisiones.

En este trabajo se desarrolla un gemelo digital modular que integra monitorización de la calidad del aire, análisis de eficiencia energética, evaluación de patologías y gestión de accesibilidad. El sistema combina modelos BIM, datos reales e históricos procedentes de sensores, y modelos energéticos calibrados a partir de la sensorización. Sobre esta base se incorporan simulaciones de escenarios, indicadores de eficiencia energética y herramientas para el registro y seguimiento de daños, incluyendo algoritmos de predicción del riesgo de condensación. Asimismo, el gemelo digital contempla el análisis de barreras y recorridos accesibles y la evaluación del nivel de accesibilidad mediante formularios.

La plataforma actúa como motor para una gestión inteligente del patrimonio, apoyando la preservación, mejorando la toma de decisiones y favoreciendo el acceso desde un enfoque sostenible orientado a la conservación y la accesibilidad. La validación se ha realizado en el Monasterio de Nuestra Señora del Prado en España y en un edificio residencial en Polonia, con el objetivo de comprobar su aplicabilidad en contextos patrimoniales y climáticos diferentes.

Palabras Clave: Patrimonio Cultural, Gemelo Digital, Patologías, Accesibilidad.

1 Introducción

La gestión de edificios patrimoniales plantea un reto multidimensional: exige preservar valores históricos y constructivos sin renunciar a objetivos actuales como sostenibilidad, eficiencia energética, calidad ambiental interior y accesibilidad. Esta tensión se acentúa en inmuebles altamente protegidos, donde las restricciones normativas y la necesidad de intervenciones

mínimamente invasivas limitan la aplicación de soluciones convencionales basadas en transformaciones físicas del edificio.

En este contexto, la digitalización se ha convertido en un habilitador clave para evolucionar desde una gestión reactiva, basada en inspecciones puntuales, hacia una gestión preventiva y basada en datos, capaz de integrar información heterogénea y ofrecer una visión dinámica del comportamiento del inmueble. Entre estas herramientas, los gemelos digitales destacan por combinar modelo del edificio, datos monitorizados y procesos analíticos en un entorno único. Sin embargo, en patrimonio cultural su adopción sigue siendo frecuentemente parcial y orientada a objetivos aislados, lo que dificulta una lectura integral y reduce su utilidad como soporte global de gestión.

Para responder a esta necesidad, este trabajo presenta el diseño e implementación de un gemelo digital modular para edificios patrimoniales, que integra monitorización ambiental, análisis energético calibrado, evaluación de patologías y accesibilidad en una misma plataforma. La contribución principal radica en coordinar estas dimensiones dentro de una arquitectura modular para mejorar la toma de decisiones en conservación preventiva, sostenibilidad y uso inclusivo. Finalmente, el artículo se organiza en marco conceptual, metodología e implementación, validación y discusión, y conclusiones.

2 Marco conceptual y trabajos relacionados

En los últimos años, los gemelos digitales se han consolidado en el ámbito AEC como una herramienta de gestión avanzada, al integrar modelo del edificio, datos operativos y capacidades analíticas en un entorno común. Esta evolución ha permitido superar enfoques centrados en la visualización estática y avanzar hacia sistemas que incorporan monitorización continua, simulación de escenarios y apoyo a la toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida del activo.

Un elemento clave de esta madurez es la incorporación de modelos de comportamiento y procedimientos de calibración, que aumentan la correspondencia entre la representación digital y el funcionamiento real del edificio. En particular, la combinación de datos monitorizados con simulación resulta especialmente útil para caracterizar el desempeño energético y ambiental, detectar desviaciones y cuantificar el impacto potencial de medidas de mejora.

Sin embargo, en patrimonio construido la adopción de estas capacidades presenta barreras específicas. Las restricciones derivadas de la protección del bien y la necesidad de intervenciones mínimamente invasivas limitan la sensorización y la disponibilidad de datos, dificultando la calibración y reduciendo con frecuencia los desarrollos a funciones básicas de adquisición y visualización. A ello se suma la fragmentación habitual de soluciones por dominios (energía, ambiente, estructura), mientras que dimensiones críticas para la gestión patrimonial, conservación y accesibilidad, se abordan de forma separada.

Este trabajo se sitúa en esta línea, proponiendo un gemelo digital modular e integrador, apoyado en desarrollos previos (AICREDITS) y ampliado en INHERIT, que conecta en una misma plataforma monitorización, eficiencia energética, patologías y accesibilidad para soportar decisiones multidimensionales en edificios patrimoniales.

3 Metodología y arquitectura del sistema

La metodología propuesta tiene como objetivo definir, implementar y validar un gemelo digital modular para la gestión integral de edificios patrimoniales, integrando información geométrica, datos monitorizados y resultados analíticos. El enfoque se orienta especialmente a su aplicación en entornos reales y al desarrollo de módulos vinculados a dos dimensiones habitualmente poco integradas en este tipo de plataformas: la evaluación de patologías y la accesibilidad.

Para ello, la metodología se estructura en cuatro etapas: definición de los casos de estudio y escenarios de uso; identificación de requisitos de datos, interoperabilidad y representación; diseño de una arquitectura modular para la adquisición, procesamiento, análisis y visualización de la información; e implementación de los módulos del gemelo digital, incluyendo tanto funcionalidades de monitorización como desarrollos específicos orientados a la conservación y al uso inclusivo del patrimonio.

La validación se realiza mediante su aplicación en dos pilotos patrimoniales con características diferenciadas, lo que permite analizar la adaptabilidad del sistema a distintos contextos climáticos, tipológicos y de disponibilidad de datos, así como valorar su utilidad como herramienta de apoyo a la conservación, el mantenimiento y la mejora de la accesibilidad.

3.1 Casos de uso

La solución propuesta se implementa y valida en dos casos de estudio con características patrimoniales y contextos climáticos diferenciados: un edificio residencial histórico en Gdynia (Polonia) y el Monasterio de Nuestra Señora del Prado en Valladolid (España).

3.1.1 Edificio Residencial en Gdynia

El primer caso corresponde a un edificio residencial de vivienda social construido en 1928 en Gdynia, representativo de la arquitectura modernista de la ciudad. Se trata de un edificio de ladrillo, con una superficie aproximada de 1168 m², seis plantas y diez viviendas. Dentro de este piloto, la aplicación del gemelo digital se centra en dos viviendas representativas, seleccionadas como base para el análisis del comportamiento ambiental y energético del inmueble en condiciones reales de uso.

El interés principal de este caso reside en la evaluación de la calidad del aire interior, los riesgos de condensación y el análisis de posibles escenarios de rehabilitación, incluyendo mejoras en el aislamiento, sustitución de ventanas e incorporación de sistemas fotovoltaicos. En este contexto, el piloto resulta especialmente relevante para el desarrollo del módulo de patologías, ya que el edificio presenta problemáticas asociadas a condensaciones, lo que permite explorar la capacidad del sistema para identificar riesgos higrotérmicos y apoyar estrategias de intervención preventiva. Asimismo, el caso sirve para valorar la posible incorporación de los módulos de accesibilidad y patologías en entornos residenciales con interés por parte de los agentes locales.

Desde el punto de vista operativo, este piloto presenta además un contexto de instrumentación limitada, condicionado por el uso residencial del edificio. La dificultad para instalar contadores inteligentes y sensores, asociada a cuestiones de privacidad y riesgo de vandalismo, convierte este caso en un escenario adecuado para evaluar la viabilidad del gemelo digital en condiciones de baja disponibilidad de datos.

3.1.2 Monasterio de Nuestra Señora del Prado en Valladolid

El segundo caso de estudio se desarrolla en el Monasterio de Nuestra Señora del Prado, en Valladolid, un conjunto histórico de gran escala y elevado valor patrimonial, cuyo origen se remonta al año 1440. El complejo, con una superficie aproximada de 55 258 m², combina arquitectura clasicista y barroca y se organiza en torno a tres claustros principales. En la actualidad alberga usos administrativos vinculados a la Consejería de Cultura, Turismo y Deporte y a la Consejería de Educación de Castilla y León.

En este piloto, el gemelo digital se aplica a tres espacios representativos, iglesia, sacristía y oficinas, con el objetivo de analizar las condiciones ambientales, el comportamiento energético y los riesgos de condensación en ámbitos con diferentes características de uso, ocupación y valor patrimonial. Este caso resulta especialmente adecuado para el desarrollo de los módulos de patologías y accesibilidad, ya que combina necesidades de conservación, alta afluencia de usuarios y la presencia de espacios de uso diverso dentro de un mismo conjunto monumental.

Desde el punto de vista de implementación, el caso presenta dificultades específicas relacionadas con el carácter protegido del inmueble, como la complejidad de la toma de datos, el esfuerzo requerido para la elaboración del modelo BIM y las limitaciones administrativas para el despliegue de sensores. Estas condiciones permiten evaluar la capacidad del sistema para operar en entornos donde las posibilidades de intervención son especialmente restrictivas.

3.2 Requisitos funcionales, de datos y de interoperabilidad

El funcionamiento del gemelo digital se apoya en la integración de tres tipos principales de datos: información estática del edificio, datos dinámicos de monitorización y modelos de simulación y evaluación del rendimiento. Esta combinación permite construir una representación digital capaz de reflejar no solo la configuración física del inmueble, sino también su comportamiento operativo bajo condiciones reales de uso

En primer lugar, el sistema requiere datos estáticos procedentes del modelo BIM, generalmente en formatos como IFC o RVT. Estos modelos aportan la base geométrica y semántica del sistema, incluyendo la localización del edificio, la distribución espacial, las características constructivas y los sistemas principales. Asimismo, se incorpora otro tipo de información estática, como los niveles de accesibilidad obtenidos a partir de formularios y el inventario de patologías.

En segundo lugar, el sistema integra datos dinámicos procedentes de sensores y sistemas de monitorización en tiempo real, entre los que se incluyen variables interiores como temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂. La captación de estos datos puede realizarse mediante distintos mecanismos de conexión, como MQTT o APIs, con una frecuencia de registro adecuada para representar la evolución temporal de las condiciones del edificio.

El tercer bloque de entrada corresponde a los modelos de rendimiento energético, calidad ambiental interior y patologías, desarrollados mediante herramientas de simulación como EnergyPlus y soportados por scripts en Python. Estos modelos permiten traducir la geometría y la información monitorizada en métricas de comportamiento, comparando el estado real del edificio con escenarios de referencia y habilitando análisis predictivos o estudios what-if. Además, esta capa analítica resulta especialmente relevante en la evaluación de riesgos higrotérmicos, como la formación de condensaciones superficiales, y en la generación de indicadores dinámicos del edificio.

Desde el punto de vista de la interoperabilidad, la solución se concibe para integrar información procedente de diferentes formatos, herramientas y mecanismos de conexión, facilitando la relación entre el modelo BIM, los datos monitorizados y los resultados de evaluación en un entorno unificado. Este requisito resulta especialmente relevante en edificios patrimoniales, donde la información suele estar fragmentada y las restricciones de intervención limitan la captación directa de datos.

3.3 Arquitectura

La arquitectura del sistema se apoya en una base tecnológica previamente desarrollada, orientada originalmente al análisis energético continuo y al desarrollo de gemelos digitales para edificios. A partir de esta experiencia previa, la solución propuesta adapta y amplía dicha base para responder a los requisitos específicos del patrimonio construido, incorporando no solo capacidades de monitorización y análisis energético, sino también nuevas funcionalidades relacionadas con la evaluación de patologías y la accesibilidad.

Desde un punto de vista general, el sistema se organiza mediante una arquitectura modular y distribuida, concebida para integrar de forma coordinada la adquisición, el almacenamiento, el procesamiento y la visualización de la información. Esta estructura permite conectar datos estáticos del edificio, información monitorizada en tiempo real y resultados analíticos en un entorno único, facilitando una lectura integrada del estado y comportamiento del inmueble.

La arquitectura se articula en varias capas funcionales. En la base se sitúan los mecanismos de adquisición de datos, seguidos por procesos de validación y almacenamiento. Sobre esta infraestructura se dispone una capa de servicios encargada del análisis del comportamiento del edificio y de la generación de resultados operativos, mientras que la capa superior corresponde a la visualización e interacción con el usuario mediante una interfaz web conectada al modelo BIM

Este planteamiento permite reutilizar desarrollos previos consolidados en el marco de AICREDITS y, al mismo tiempo, extender el alcance del gemelo digital hacia una gestión más integral del patrimonio, en la que se combinan eficiencia energética, conservación preventiva y uso inclusivo del edificio.

3.4 Implementación

La implementación del gemelo digital se articula atendiendo a su carácter modular, de modo que cada funcionalidad del sistema se organiza como un módulo operativo independiente que integra tanto la lógica de procesamiento en backend como su representación e interacción en frontend. Este enfoque permite una mayor coherencia entre la generación analítica de resultados y su interpretación por parte del usuario, facilitando además la escalabilidad y evolución del sistema.

A nivel tecnológico, todos los módulos comparten una infraestructura backend común, basada en un entorno distribuido orientado a la ingesta, procesamiento y almacenamiento de datos. La adquisición de información en tiempo real se realiza mediante Apache Kafka, que gestiona la recepción de datos de sensores organizándolos en distintos tópicos. Posteriormente, servicios en Python se encargan de su validación, limpieza y transformación. El almacenamiento se resuelve mediante una arquitectura híbrida que combina MongoDB, para datos semiestructurados y registros de monitorización, y PostgreSQL, para información relacional.

Sobre esta base se despliega una arquitectura de microservicios, donde cada servicio encapsula funcionalidades específicas (climático, simulación, calibración, KPIs o patologías),

proporcionando soporte a los distintos módulos del sistema. En paralelo, el frontend se desarrolla como una interfaz web basada en un visor BIM 3D y un panel de control, que permite visualizar datos, interactuar con el modelo y consultar los resultados analíticos generados.

A partir de esta arquitectura común, la implementación se organiza en los siguientes módulos:

3.4.1 Módulo de monitorización

El módulo de monitorización proporciona una visión continua del estado del edificio a partir de los datos recogidos por la sensorización.

Desde el punto de vista del backend, su función principal consiste en garantizar la calidad, coherencia y disponibilidad de los datos, transformando las señales registradas en series temporales fiables que describen la evolución de variables clave como la temperatura, la humedad o la calidad del aire. Este proceso constituye la base sobre la que se apoyan el resto de análisis del sistema.

En el frontend, estos datos se traducen en una representación comprensible del comportamiento del edificio. La información se visualiza mediante gráficos temporales y, especialmente, mediante su proyección sobre el modelo BIM del edificio, lo que permite relacionar directamente cada medida con su ubicación física. Esta lectura espacial facilita la identificación de patrones, desequilibrios ambientales o zonas con comportamiento anómalo, aportando una primera capa de diagnóstico operativo.

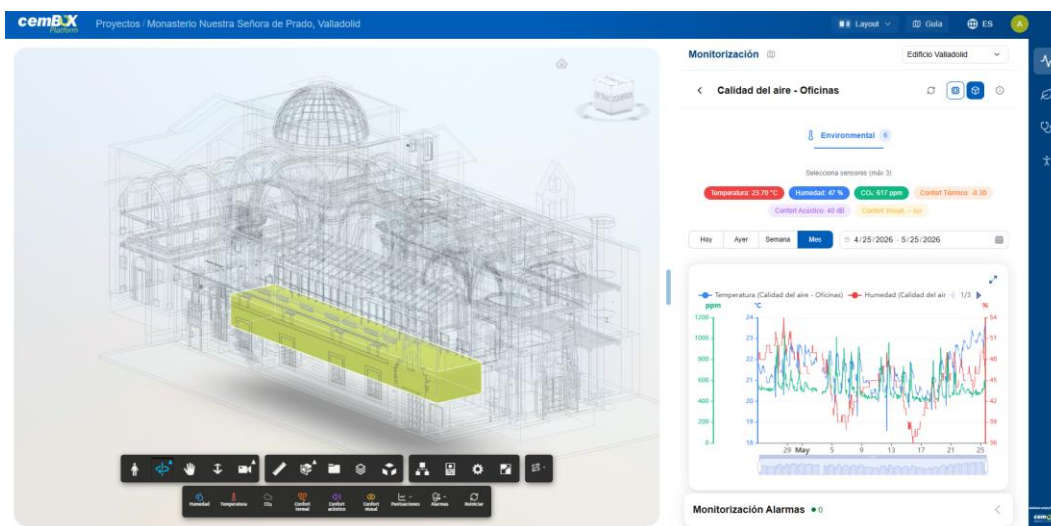


Figura 1. Módulo de monitorización

3.4.2 Módulo de eficiencia energética

El módulo de eficiencia energética integra los procesos de simulación, calibración y evaluación del rendimiento del edificio.

En el backend, este módulo se apoya en varios microservicios especializados. El servicio climático actualiza los datos meteorológicos utilizados por los modelos, generando archivos climáticos representativos de las condiciones reales. El servicio de simulación utiliza EnergyPlus

para ejecutar modelos energéticos tanto de referencia como del edificio real, evaluando diferentes configuraciones. Estos resultados son procesados por el servicio de calibración, que aplica técnicas de Goodness of Fit (GOF) para seleccionar la configuración que mejor reproduce el comportamiento real del edificio. Finalmente, el servicio de KPIs calcula indicadores de rendimiento energético comparando el edificio real con el modelo de referencia.

En el frontend, los resultados se representan mediante gráficos, indicadores y mapas de calor, permitiendo analizar consumos, desviaciones y escenarios de mejora. La integración con el modelo BIM facilita la interpretación espacial de los resultados, mientras que el panel de control permite comparar distintas configuraciones y evaluar el impacto de medidas de intervención.

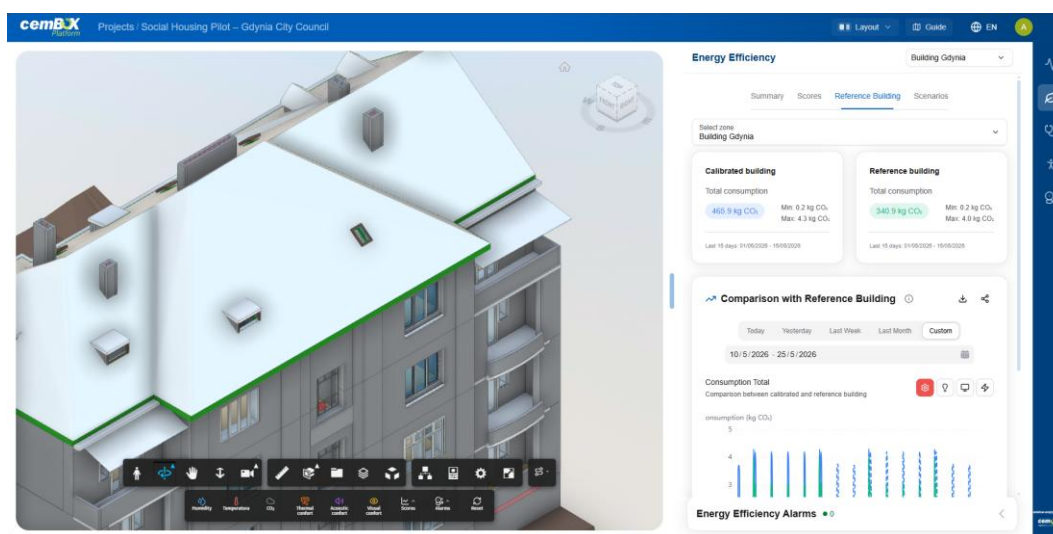


Figura 2. Módulo de eficiencia energética

3.4.3 Módulo de patologías

El módulo de patologías se orienta a la gestión del estado de conservación del edificio, combinando información registrada y análisis predictivos.

En el backend, destaca el servicio de patologías, que implementa un algoritmo de predicción de condensaciones superficiales. Este servicio combina condiciones interiores obtenidas mediante simulación con datos meteorológicos externos (Open-Meteo), evaluando el riesgo mediante dos enfoques: el criterio normativo del CTE DB-HS1 y el método higrotérmico basado en la temperatura de rocío. El sistema adopta un criterio conservador, clasificando como riesgo cualquier caso detectado por alguno de los métodos. Además, el backend gestiona el almacenamiento estructurado de inventarios de daños, incluyendo registros, imágenes y su relación con elementos constructivos del modelo BIM.

En el frontend, este módulo permite registrar, visualizar y gestionar patologías mediante una interfaz integrada en el visor 3D. Los daños se representan como marcadores espaciales asociados a los elementos del edificio, incluyendo información descriptiva, estado, recomendaciones e imágenes. Asimismo, el riesgo de condensación se visualiza mediante códigos de color sobre un diagrama, permitiendo identificar de forma clara en que periodos pueden producirse y su evolución temporal.

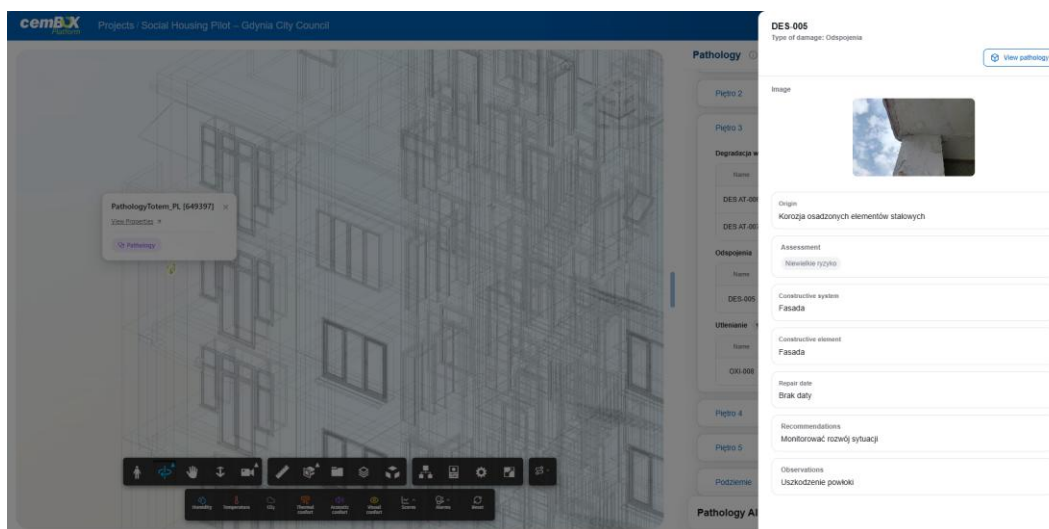


Figura 3. Módulo de patologías - Inventario de daños

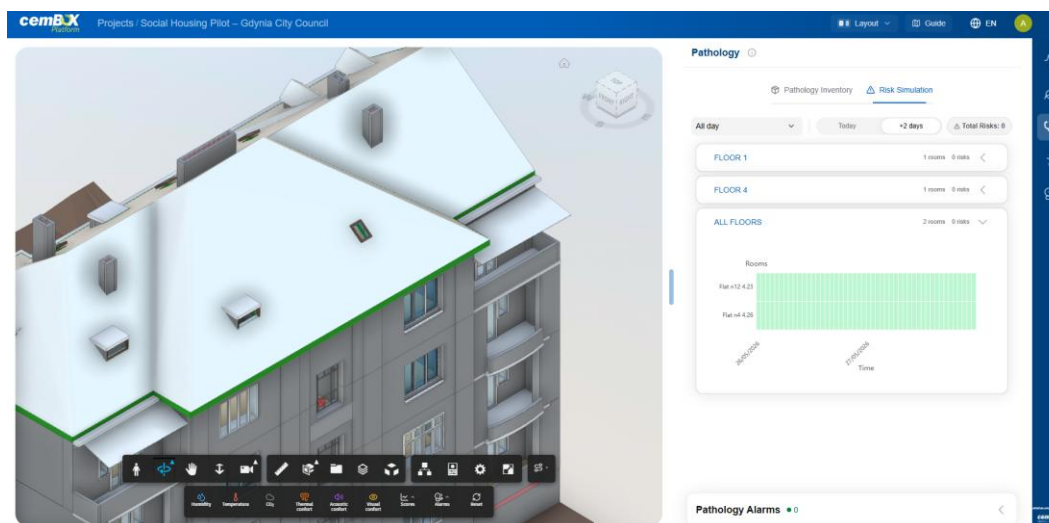


Figura 4. Módulo de patologías – Riesgo de simulación

3.4.4 Módulo de accesibilidad

El módulo de accesibilidad permite evaluar y representar el nivel de accesibilidad del edificio desde una perspectiva tanto analítica como espacial.

En el backend, se gestionan dos tipos principales de información: los cuestionarios de evaluación, que recogen el grado de cumplimiento de criterios de accesibilidad, y los recorridos accesibles, definidos mediante referencias espaciales vinculadas al modelo BIM. Los servicios backend se encargan de validar, almacenar y estructurar estos datos, permitiendo su consulta y explotación posterior.

En el frontend, la información se presenta mediante indicadores de accesibilidad expresados como porcentajes, calculados a partir de los cuestionarios. Además, se visualizan recorridos accesibles dentro del modelo BIM, que pueden explorarse mediante navegación en primera

persona o resaltado de rutas. Esta funcionalidad facilita la comprensión de los itinerarios accesibles y mejora la interpretación del edificio desde una perspectiva inclusiva.

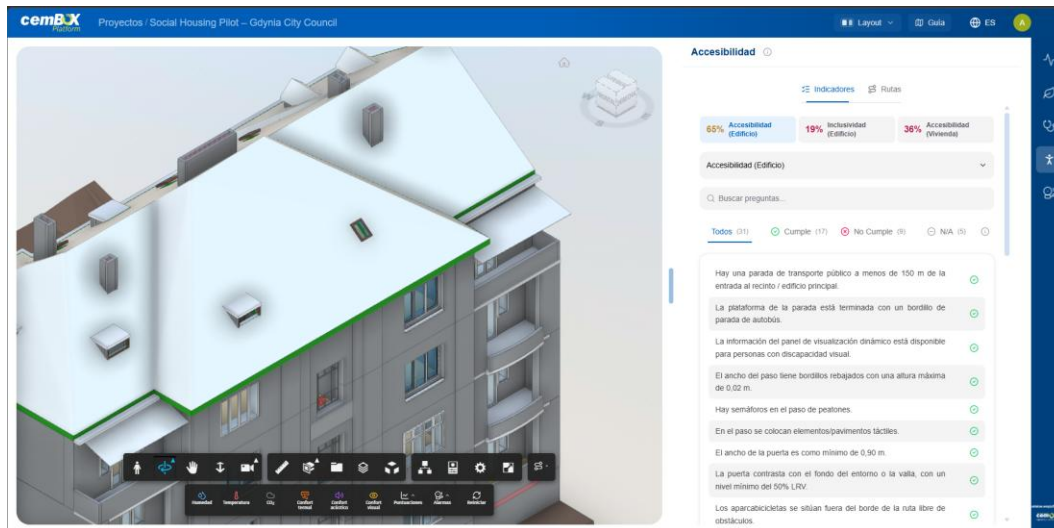


Figura 5. Módulo de Accesibilidad - Indicadores

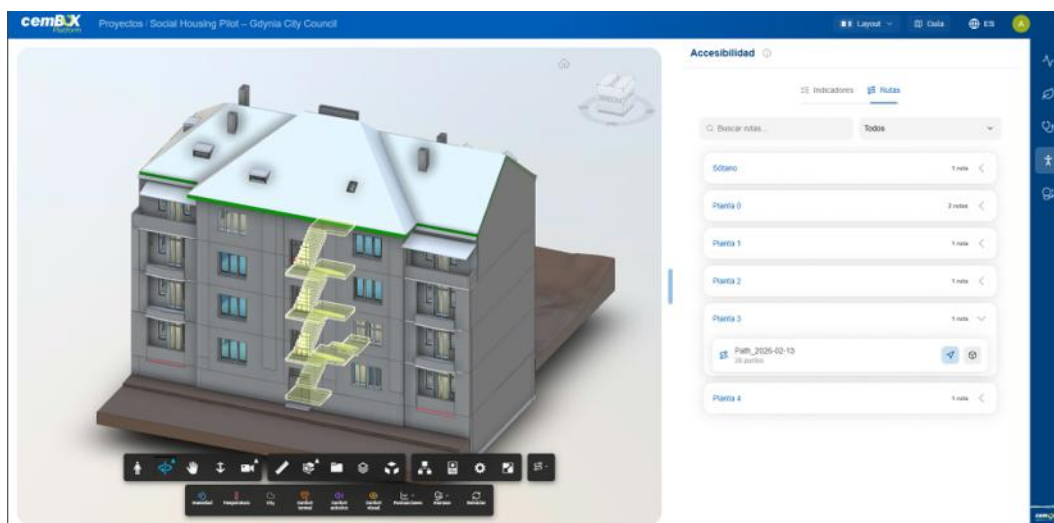


Figura 6. Módulo de accesibilidad - Rutas

4 Estrategia de validación y discusión

La validación del gemelo digital propuesto se basa en su aplicación en los dos casos de estudio descritos, combinando análisis cualitativos y cuantitativos. Para ello, se ha definido un conjunto de indicadores clave de rendimiento (KPIs) orientados a evaluar distintas dimensiones del comportamiento del edificio, incluyendo la eficiencia energética, la calidad ambiental interior, los riesgos de condensación, el estado de conservación y la accesibilidad.

En el ámbito energético, los resultados obtenidos se han calculado a partir de modelos energéticos calibrados mediante datos monitorizados en condiciones reales de uso durante el

periodo de estudio. Los escenarios de mejora se han definido considerando medidas de intervención específicas, el indicador *Energy Saving Potential* (ESP) estima el porcentaje de reducción del consumo que podría alcanzarse mediante la aplicación de medidas de eficiencia:

$$ESP(\%) = \frac{\text{Consumo actual} - \text{Consumo tras medidas}}{\text{Consumo actual}} \times 100 \quad (1)$$

Los resultados muestran reducciones del 9–12% en Gdynia, asociadas a mejoras en la envolvente y sistemas fotovoltaicos, y del 12% y 19% en Valladolid mediante recuperación de calor y sistemas fotovoltaicos, respectivamente.

Estos valores evidencian la capacidad del modelo para evaluar escenarios de mejora en edificios patrimoniales, si bien deben interpretarse considerando limitaciones asociadas a la disponibilidad de datos y a las hipótesis de simulación.

En relación con la calidad ambiental interior, el indicador *Indoor Quality Improvement Potential* (IQIP) evalúa el margen de mejora a partir del tiempo en el que las condiciones interiores se encuentran fuera de los rangos óptimos y pueden corregirse mediante acciones de control:

$$IQIP(\%) = \frac{\text{Tiempo fuera de rango accionable}}{\text{Tiempo total}} \quad (2)$$

Los valores obtenidos son del 30% en Gdynia y del 31% en Valladolid, lo que pone de manifiesto la existencia de oportunidades de mejora operativa en la gestión ambiental de ambos edificios.

En cuanto al análisis higrotérmico, el indicador *Potential Condensation Risk Reduction* (PCRR) cuantifica el porcentaje de tiempo en el que se dan condiciones favorables a la condensación superficial:

$$PCRR(\%) = \frac{\text{Tiempo en condiciones de riesgo}}{\text{Tiempo total}} \quad (3)$$

Los resultados muestran valores del 25–27% en Gdynia y del 21% en Valladolid, lo que confirma la relevancia de integrar herramientas predictivas para la detección de riesgos de humedad en el patrimonio construido.

En relación con la accesibilidad, el indicador *Accessibility Autonomy Index* (AAI) mide la capacidad de desplazamiento autónomo dentro del edificio:

$$AAI(\%) = \frac{\text{Nº de espacios accesibles}}{\text{Nº total de espacios}} \quad (4)$$

En este caso, los resultados reflejan una fuerte diferencia entre ambos edificios, con un 15% en Gdynia, debido a la presencia generalizada de escaleras, frente a un 85% en Valladolid, donde existen recorridos accesibles más desarrollados.

En conjunto, estos indicadores permiten evaluar de forma integrada el comportamiento del edificio y evidencian el potencial del gemelo digital para apoyar la toma de decisiones en ámbitos diversos. No obstante, los resultados también ponen de manifiesto limitaciones asociadas a la

disponibilidad y calidad de los datos, así como al distinto grado de desarrollo de los módulos implementados.

5 Conclusiones

Este trabajo ha presentado el desarrollo y validación de un gemelo digital modular orientado a la gestión integral de edificios patrimoniales, construido a partir de la integración de modelo BIM, datos monitorizados y modelos de simulación calibrados. La principal aportación reside en que el sistema no se limita a representar el edificio, sino que lo convierte en un activo gestionable mediante información operativa y capacidades analíticas, articuladas en módulos que responden a necesidades reales de explotación y conservación.

Desde una perspectiva de ingeniería, el enfoque propuesto aporta valor en cuatro dimensiones complementarias. En primer lugar, el módulo de monitorización ambiental permite pasar de una lectura puntual del edificio a una comprensión continua de su comportamiento, ofreciendo trazabilidad temporal y espacial de las condiciones interiores. Esto habilita una gestión más proactiva: identificar desviaciones, diagnosticar causas (ocupación, ventilación, consignas) y establecer medidas correctivas basadas en evidencias, especialmente relevante en contextos patrimoniales donde la intervención física está limitada.

En segundo lugar, el módulo de eficiencia energética, apoyado en simulación y calibración, transforma datos en capacidad de decisión al permitir comparar el estado real con un escenario de referencia y evaluar alternativas de mejora. Esta funcionalidad es especialmente útil para edificios protegidos, donde las actuaciones deben priorizarse cuidadosamente: el gemelo digital permite analizar *what if* se aplica una medida u otra, estimar su efecto sobre consumos y condiciones interiores, y así jerarquizar intervenciones con criterios técnicos (impacto, viabilidad, compatibilidad patrimonial). Además, aporta una base objetiva para justificar inversiones, planificar estrategias de rehabilitación y orientar la operación hacia metas de sostenibilidad sin comprometer el valor histórico del bien.

En tercer lugar, el módulo de patologías refuerza la conservación preventiva, incorporando no solo un inventario de daños, sino también capacidades predictivas para anticipar riesgos higrotérmicos como la condensación superficial. Esta posibilidad tiene una implicación directa: conocer el riesgo y su localización permite actuar antes de que aparezcan degradaciones asociadas a humedad (manchas, biodeterioro, pérdida de material o daños en acabados), reduciendo la probabilidad de pérdida patrimonial y favoreciendo planes de mantenimiento más eficaces. En edificios históricos, donde las reparaciones suelen ser más costosas y complejas, esta anticipación resulta crítica porque desplaza la gestión desde la reparación reactiva hacia decisiones preventivas basadas en umbrales, tendencias y condiciones previsibles.

En cuarto lugar, el módulo de accesibilidad incorpora una dimensión a menudo tratada de forma separada en entornos patrimoniales, permitiendo evaluar el nivel de accesibilidad mediante indicadores y representar recorridos accesibles en relación con la geometría real del edificio. Esto refuerza la idea de gestión integral: no solo conservar y optimizar, sino también habilitar el uso inclusivo del patrimonio, apoyando decisiones que equilibran conservación, funcionalidad y experiencia de usuario.

No obstante, el trabajo presenta limitaciones relacionadas con la disponibilidad y calidad de los datos de partida, las restricciones habituales para desplegar instrumentación en edificios protegidos y el distinto grado de madurez de algunos módulos. Como líneas futuras, se plantea ampliar el conjunto de indicadores, mejorar los procedimientos de calibración, evolucionar las

herramientas de patología y reforzar la integración entre resultados analíticos y protocolos de mantenimiento.

En definitiva, el gemelo digital modular propuesto constituye una base sólida para avanzar hacia modelos de gestión inteligente del patrimonio: más preventivos, más sostenibles y más orientados a decisiones justificables, donde conocer el comportamiento interior, anticipar riesgos como la condensación y evaluar escenarios de mejora permite proteger el valor patrimonial al tiempo que se mejora el desempeño y el uso del edificio.

6 Referencias

- [1] CEMOSA, Sistema de calificación energética: gemelo digital, entregable 4.1, AICREDITS: Artificial Intelligence for Extended Energy Audits, proyecto I702C2000031, abril de 2023.
- [2] CEMOSA, Análisis y evaluación de soluciones, entregable 5.3, AICREDITS: Artificial Intelligence for Extended Energy Audits, proyecto I702C2000031, Septiembre de 2023.
- [3] Consorcio INHERIT, First wave of INHERIT Decision support services, Entregable 4.1, INHERIT: Next Generation Solutions for Sustainable, Inclusive, Resource-efficient and Resilient Cultural Heritage, Horizon Europe, GA No. 101123326, [2024]
- [4] Consorcio INHERIT, Second wave of INHERIT Decision support services, Entregable 4.2, INHERIT: Next Generation Solutions for Sustainable, Inclusive, Resource-efficient and Resilient Cultural Heritage, Horizon Europe, GA No. 101123326, [2025]
- [5] Consorcio INHERIT, First INHERIT Assessment & Monitoring Framework, Entregable 3.1, INHERIT: Next Generation Solutions for Sustainable, Inclusive, Resource-efficient and Resilient Cultural Heritage, Horizon Europe, GA No. 101123326, [2024]
- [6] Consorcio INHERIT, Second INHERIT Assessment & Monitoring Framework, Entregable 3.2, INHERIT: Next Generation Solutions for Sustainable, Inclusive, Resource-efficient and Resilient Cultural Heritage, Horizon Europe, GA No. 101123326, [2024]
- [7] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2019). *Código Técnico de la Edificación: Documento Básico DB-HE Ahorro de energía*. Gobierno de España.
- [8] Urząd Miasta Krakowa. (2023). Standardy dostępności dla Gminy Miejskiej Kraków. Biuletyn Informacji Publicznej Miasta Krakowa. BIP Kraków
- [9] Asociación Española de Normalización. (2021). UNE-EN 17210:2021. Accesibilidad del entorno construido. Requisitos funcionales. UNE. UNE-EN 17210:2021 PDF
- [10] Ministerstwo Rozwoju i Technologii. (s.f.). Standardy dostępności budynków dla osób z niepełnosprawnościami. Gobierno de Polonia. Gov.pl Accesibilidad de edificios