



UNIVERSIDAD DE BURGOS  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
Grado en Ingeniería de la Salud



INGENIERÍA  
DE LA SALUD

**TFG del Grado en Ingeniería de la  
Salud**

**Gemelo digital UCI**

Presentado por Pablo Peña María  
en Universidad de Burgos

9 de junio de 2025

Tutor: Telmo Miguel Medina







UNIVERSIDAD DE BURGOS  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
Grado en Ingeniería de la Salud



D. Telmo Miguel Medina, profesor del departamento de Ingeniería Electromecánica, área de Tecnología Electrónica.

Expone:

Que el alumno D. Pablo Peña María, con DNI 71309751E, ha realizado el Trabajo final de Grado en Ingeniería de la Salud titulado Gemelo Digital UCI.

Y que dicho trabajo ha sido realizado por el alumno bajo la dirección del que suscribe, en virtud de lo cual se autoriza su presentación y defensa.

En Burgos, 9 de junio de 2025

Vº. Bº. del Tutor:

D. Telmo Miguel Medina





## Resumen

Las condiciones ambientales en entornos hospitalarios críticos, como las Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs), tienen un impacto directo en la seguridad del paciente y en el correcto funcionamiento de los sistemas de climatización y tratamiento del aire. Parámetros como la temperatura y la humedad deben mantenerse dentro de unos rangos estrictos para garantizar un entorno óptimo tanto para los pacientes como para el personal sanitario.

Actualmente, la monitorización de estas variables se realiza a través de sistemas complejos y no siempre accesibles, y su integración con plataformas visuales sigue siendo limitada. El concepto de gemelo digital, ampliamente extendido en otros sectores, presenta una oportunidad innovadora para representar virtualmente estos espacios, integrando en tiempo real los datos obtenidos desde sensores ambientales.

En este trabajo se propone el diseño conceptual y técnico de un sistema de gemelo digital aplicado a una UCI hospitalaria, en el que se representa virtualmente el entorno arquitectónico y se integran datos ambientales. Como prueba de concepto, se ha incluido la UCI del Hospital Universitario de Burgos en Autodesk Revit, incorporando un sensor simulado de temperatura y humedad cuyos valores se almacenan y actualizan periódicamente en una base de datos MySQL. La integración de estos datos en el modelo se realiza mediante Dynamo, permitiendo su visualización dinámica en un entorno de modelado de información para la construcción (BIM) .

Esta solución pretende ofrecer un ejemplo funcional que demuestra la viabilidad técnica de implementar gemelos digitales en el ámbito hospitalario, aportando una base para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la ingeniería de la salud.

## Descriptores

Gemelo digital, UCI, Revit, BIM, sensor, temperatura, humedad, Dynamo, MySQL, Python, MQTT.

## **Abstract**

Environmental conditions in critical hospital settings, such as Intensive Care Units (ICUs), have a direct impact on patient safety and the proper operation of air treatment and climate control systems. Parameters such as temperature and humidity must be maintained within strict ranges to ensure an optimal environment for both patients and healthcare staff.

Currently, the monitoring of these variables relies on complex and not always accessible systems, and their integration with visual platforms remains limited. The concept of the digital twin, widely adopted in other sectors, presents an innovative opportunity to virtually represent these spaces by integrating real-time data from environmental sensors.

This project proposes the conceptual and technical design of a digital twin system applied to a hospital ICU, where the architectural environment is virtually represented and environmental data are integrated. As a proof of concept, the ICU of the Hospital Universitario de Burgos has been modeled in Autodesk Revit, incorporating a simulated temperature and humidity sensor whose values are periodically stored and updated in a MySQL database. The integration of these data into the model is carried out through Dynamo, enabling dynamic visualization within a Building Information Modeling (BIM) environment.

This solution aims to provide a functional example that demonstrates the technical feasibility of implementing digital twins in hospital settings, offering a foundation for future research and development in the field of healthcare engineering.

## **Keywords**

Digital twin, ICU, Revit, BIM, sensor, temperature, humidity, Dynamo, MySQL, Python, MQTT



---

# Índice general

---

Índice general	iii
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	v
Introducción	1
Objetivos	3
Conceptos teóricos	5
3.1. Conceptos teóricos básicos . . . . .	5
3.2. Estado del arte y trabajos relacionados . . . . .	13
Metodología	17
4.1. Descripción de los datos . . . . .	17
4.2. Técnicas y herramientas . . . . .	18
Resultados	25
5.1. Resumen de resultados . . . . .	25
5.2. Discusión . . . . .	26
Conclusiones	29
6.1. Aspectos relevantes . . . . .	30
Líneas de trabajo futuras	33
Bibliografía	35

---

## Índice de figuras

---

4.1. Esquema de la arquitectura implementada. . . . .	18
5.1. Diseño de la UCI en Revit. . . . .	25

---

# Índice de tablas

---

4.1. Resumen de herramientas empleadas en el proyecto . . . . .	20
4.2. Comparativa de tecnologías de comunicación inalámbrica para hospitales . . . . .	22
4.3. Comparativa de protocolos de comunicación en entornos IoT . .	24



---

# Introducción

---

La digitalización progresiva del entorno sanitario está impulsando nuevas estrategias para la gestión eficiente, segura y sostenible de las infraestructuras hospitalarias. En este contexto, el concepto de gemelo digital ha emergido como una solución clave para monitorizar en tiempo real el estado de espacios físicos mediante su representación virtual dinámica. Esta tecnología, ampliamente aplicada en sectores industriales, tiene un potencial significativo en el ámbito hospitalario, donde puede facilitar la supervisión ambiental, la optimización de los recursos energéticos y la anticipación de fallos en sistemas críticos.

El presente Trabajo de Fin de Grado plantea una propuesta teórica y técnica para el desarrollo de un gemelo digital aplicado a una UCI hospitalaria, tomando como caso de estudio la UCI del Hospital Universitario de Burgos. El objetivo principal es describir, desde una perspectiva integral, cómo podrían integrarse diversas tecnologías para construir un sistema capaz de representar, analizar y actualizar en tiempo real parámetros ambientales clave, como la temperatura y la humedad del aire, controlados por los sistemas de climatización del hospital.

La metodología propuesta combina herramientas BIM, lenguajes de programación, tecnologías de bases de datos y protocolos de comunicación orientados a sistemas IoT. Se describen los componentes arquitectónicos necesarios, los esquemas de comunicación entre sensores y servidores, y las estrategias de almacenamiento y visualización de datos.

Dado que el acceso a datos reales de un entorno hospitalario no es posible por razones de seguridad y confidencialidad, se presenta una implementación funcional basada en datos simulados, utilizando Autodesk Revit para modelar la UCI, una base de datos MySQL para almacenar los valores am-

bientales y Dynamo como herramienta de integración. Esta implementación sirve como prueba de concepto de la arquitectura propuesta, validando su funcionamiento en un entorno controlado.

El trabajo no sólo busca desarrollar una solución técnica concreta, sino también reflexionar sobre la viabilidad, los desafíos y las ventajas de aplicar tecnologías de gemelos digitales en contextos sanitarios reales. A través del análisis detallado de las herramientas empleadas y la justificación de las decisiones metodológicas, se ofrece una guía que podría servir como base para futuros desarrollos en el ámbito de la ingeniería de la salud.

La estructura de la presente memoria sigue una organización lógica orientada a exponer de manera clara tanto los fundamentos teóricos como el desarrollo práctico del Trabajo de Fin de Grado. También se incluyen los anexos, que complementan el contenido de la memoria y ayudan a comprender el proyecto.

---

# Objetivos

---

Dada su naturaleza tecnológica y aplicada, los objetivos se agrupan en tres categorías: funcionales, técnicos y de aprendizaje.

## 1. Objetivos funcionales

- Diseñar una arquitectura de software capaz de simular un sistema de gemelo digital en el contexto de una UCI.
- Representar datos ambientales (temperatura y humedad) en tiempo real dentro de un modelo BIM creado en Autodesk Revit.
- Implementar una base de datos relacional capaz de almacenar los datos generados de forma estructurada y cronológica.
- Automatizar la integración entre los datos externos y el modelo BIM mediante programación visual en Dynamo.
- Analizar las posibles tecnologías y protocolos de comunicación que permitirían llevar a cabo una implementación real en un hospital.

## 2. Objetivos técnicos

- Desarrollar una arquitectura modular y escalable que permita la futura conexión con sensores físicos reales.
- Garantizar la sincronización automatizada y sin intervención manual entre la base de datos y el entorno Revit.
- Asegurar la estabilidad, fluidez y rendimiento del sistema en simulaciones prolongadas.

- Validar la viabilidad de emplear tecnologías estándar (Revit, Python, MySQL, Wi-Fi, MQTT(Message Queuing Telemetry Transport)) en el diseño de soluciones para entornos críticos como hospitales.

### 3. Objetivos de aprendizaje

- Comprender el funcionamiento de un sistema de gemelo digital y su aplicación en infraestructuras sanitarias.
- Aprender a integrar entornos BIM con fuentes externas de datos mediante programación visual y scripting.
- Dominar herramientas como Autodesk Revit, Dynamo, MySQL Workbench, Python y control de versiones con GitHub.
- Analizar diferentes protocolos de comunicación y evaluar sus ventajas y limitaciones en redes distribuidas.



---

# Conceptos teóricos

---

## 3.1. Conceptos teóricos básicos

### Gemelo digital

El concepto de *gemelo digital* (*digital twin*) se refiere a una representación virtual y precisa de un objeto, sistema o proceso físico, que está conectada a su equivalente real mediante flujos de datos bidireccionales. Esta conexión permite simular, supervisar, analizar y optimizar el comportamiento del sistema físico en tiempo real o en base a datos históricos [Grieves and Vickers, 2017, Tao et al., 2019]. Los gemelos digitales son fundamentales en el contexto de la industria 4.0 [Corporation, 2025], la ingeniería de sistemas y la gestión inteligente de infraestructuras.

Según la definición clásica propuesta por Grieves y Vickers, un gemelo digital está formado por tres componentes principales [Grieves and Vickers, 2017]:

- **El sistema físico real**, que incluye sensores, dispositivos y todos los elementos tangibles que generan o pueden generar información.
- **El modelo digital**, que es una representación fidedigna del sistema físico, tanto en su geometría como en su comportamiento.
- **La conexión de datos**, que permite sincronizar ambos entornos mediante tecnologías de comunicación, permitiendo flujos de datos continuos y, en algunos casos, retroalimentación activa.

Además de esta estructura básica, los gemelos digitales modernos suelen incorporar capacidades analíticas, de simulación avanzada e inteli-

gencia artificial, lo que permite no solo observar, sino también predecir el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones operativas [Fuller et al., 2020, Gábor et al., 2022]. Estas capacidades convierten al gemelo digital en una herramienta estratégica para la toma de decisiones en tiempo real y el mantenimiento predictivo.

En la práctica, el despliegue de un gemelo digital requiere de la integración de diversas tecnologías:

- Plataformas BIM o CAD (Computer-Aided Design) para la modelización precisa del entorno físico.
- Sensores IoT para la captura continua de datos.
- Protocolos de comunicación como MQTT, OPC-UA o REST APIs para el intercambio de información.
- Bases de datos para el almacenamiento, consulta y trazabilidad de los datos generados.
- Herramientas de visualización o cuadros de mando para el monitoreo del estado del sistema.

En el contexto sanitario, y particularmente en entornos de alta criticidad como una UCI, la aplicación de gemelos digitales puede facilitar la supervisión continua de condiciones ambientales, la localización de equipos, el control de acceso, e incluso la gestión del confort térmico [Vishnoi et al., 2021, IBM, 2021]. La interacción entre el modelo digital y el entorno real proporciona a los profesionales herramientas para mejorar la eficiencia operativa y la seguridad del paciente.

## BIM y modelado en Revit

El Modelado de Información para la Construcción, conocido como BIM, es una metodología que permite la creación y gestión de representaciones digitales de las características físicas y funcionales de un edificio durante todo su ciclo de vida [buildingSMART International, 2025]. A diferencia de los modelos tridimensionales tradicionales, BIM combina geometría, relaciones espaciales, información de materiales, datos estructurales y funcionales, permitiendo un trabajo colaborativo entre disciplinas y una toma de decisiones informada.

En el contexto de este proyecto, BIM proporciona la base para construir el modelo digital de la UCI del Hospital Universitario de Burgos. A través del software Autodesk Revit, se ha generado un modelo tridimensional arquitectónicamente detallado, al que se han incorporado familias personalizadas que simulan sensores ambientales. Estos sensores digitales están representados como objetos con parámetros asociados de *temperatura* y *humedad*, lo que permite reflejar el estado ambiental en el modelo en tiempo real.

Autodesk Revit ha sido seleccionado como entorno de modelado por su integración nativa con herramientas de programación visual como Dynamo, que permiten vincular el modelo con datos externos. El sensor simulado se ha insertado en la vista 3D de la UCI y parametrizado con los valores que se obtienen desde la base de datos. Esta integración permite que el modelo no solo represente la geometría del entorno hospitalario, sino que además funcione como una interfaz visual para monitorizar condiciones ambientales.

Esta combinación de BIM y datos en tiempo real constituye la esencia de un gemelo digital, ya que permite la actualización dinámica del modelo a partir de información del sistema físico (en este caso, simulada). La flexibilidad de Revit para definir y gestionar parámetros hace que sea una herramienta idónea para este tipo de proyectos, tanto en fase de desarrollo como en futuras aplicaciones reales en entornos sanitarios complejos.

## Parámetros ambientales en UCIs hospitalarias

Las UCIs constituyen uno de los entornos más sensibles dentro del ámbito hospitalario. En ellas se atiende a pacientes en estado crítico que requieren un estricto control de las condiciones clínicas y ambientales para prevenir complicaciones, infecciones nosocomiales y garantizar una recuperación adecuada. Entre los factores ambientales más relevantes destacan la **temperatura** y la **humedad relativa** del aire, parámetros directamente relacionados con el confort térmico, la calidad del aire y la proliferación de agentes patógenos [Organization, 2009, ASHRAE, 2021].

La normativa internacional y nacional establece ciertos rangos recomendados para estos parámetros. Por ejemplo, según la norma ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) 170-2017, la temperatura en las UCIs debe mantenerse entre 21 y 24 °C, mientras que la humedad relativa debe oscilar entre el 40 y el 60 % [ASHRAE, 2021]. Estas condiciones no solo están orientadas al confort de los pacientes, sino también a la prevención del crecimiento microbiano y a la conservación de materiales y equipos clínicos sensibles.

El control de estos valores es responsabilidad de las Unidades de Tratamiento del Aire (UTA), sistemas de climatización hospitalaria diseñados para filtrar, enfriar, calentar, humidificar o deshumidificar el aire que se suministra a las diferentes zonas del hospital. Estas unidades suelen integrar sensores físicos que recogen continuamente datos de temperatura y humedad, los cuales pueden registrarse en sistemas centralizados de gestión técnica del edificio.

## Comunicación en red y tecnologías IoT

La comunicación en red es un componente esencial en la arquitectura de cualquier sistema distribuido que implique la recopilación, procesamiento y visualización de datos en tiempo real. En el caso de un gemelo digital aplicado a entornos hospitalarios, los sensores que monitorizan las condiciones ambientales deben enviar información de forma periódica y fiable a un sistema centralizado que la interprete. Para lograr esto, se emplean tecnologías de comunicación específicamente diseñadas para entornos de bajo consumo y alta disponibilidad, propias del ecosistema del *Internet of Things* (IoT).

El **Internet de las Cosas** hace referencia a una red de dispositivos físicos interconectados que recopilan y comparten datos a través de redes cableadas o inalámbricas [Atzori et al., 2010]. Estos dispositivos, equipados con sensores y actuadores, permiten digitalizar procesos físicos, automatizar operaciones y proporcionar información en tiempo real para la toma de decisiones. En el ámbito sanitario, los dispositivos IoT pueden incluir desde sensores ambientales hasta sistemas portátiles de monitorización de pacientes.

Entre los protocolos de comunicación utilizados en sistemas IoT destacan:

- **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)**: protocolo de mensajería ligero basado en el modelo publicador/suscriptor. Es especialmente eficiente en entornos con ancho de banda limitado y bajo consumo de energía. Se emplea habitualmente para transmitir datos de sensores de forma segura y escalable [OASIS, 2014].
- **HTTP/REST**: arquitectura basada en peticiones cliente-servidor. Aunque es menos eficiente en dispositivos con recursos limitados, es ampliamente utilizada para integraciones web y servicios en la nube.
- **CoAP (Constrained Application Protocol)**: protocolo diseñado para dispositivos con restricciones de memoria y procesamiento, que emplea una estructura similar a HTTP pero más ligera [Shelby et al., 2014].

En una arquitectura distribuida basada en IoT, los sensores se conectan a una red inalámbrica (por ejemplo, WiFi o ZigBee) y transmiten los datos a un *broker* MQTT o servidor HTTP, que los reenvía a un sistema de almacenamiento o visualización. En aplicaciones hospitalarias reales, estos datos podrían almacenarse en una base de datos central (por ejemplo, MySQL o PostgreSQL) y estar disponibles para el gemelo digital.

## Bases de datos relacionales y MySQL

Una base de datos es un sistema que permite almacenar, organizar y recuperar información de forma estructurada. En el ámbito del desarrollo de aplicaciones técnicas y sistemas conectados como los gemelos digitales, las bases de datos desempeñan un papel fundamental en la persistencia, integridad y disponibilidad de los datos generados por sensores, usuarios u otros sistemas.

Entre los distintos modelos de bases de datos existentes, el **modelo relacional** es uno de los más ampliamente utilizados. Este modelo representa la información mediante tablas (relaciones), donde cada fila equivale a un registro y cada columna a un atributo. Las relaciones entre distintas tablas se establecen mediante claves primarias y claves foráneas [Codd, 1970]. Este enfoque permite garantizar la consistencia de los datos, evitar redundancias y facilitar la realización de consultas complejas.

**MySQL** es uno de los sistemas de gestión de bases de datos relacionales (SGBDR) más populares y utilizados tanto en proyectos académicos como industriales. Es de código abierto, multiplataforma y está optimizado para aplicaciones que requieren una alta disponibilidad y un buen rendimiento en la manipulación de datos [Corporation, 2023].

En el presente proyecto se ha utilizado MySQL como herramienta para simular una fuente de datos ambiental en una UCI. La base de datos creada contiene una tabla con los campos `temperatura`, `humedad` y `timestamp`, que representan los valores ambientales registrados (en este caso, generados aleatoriamente mediante un procedimiento almacenado). Esta información se inserta de forma periódica mediante un *evento programado* que simula el comportamiento de un sensor real.

## Plataformas BIM y su aplicación en el modelado digital

Las plataformas BIM son entornos digitales que permiten la creación, gestión y visualización de modelos tridimensionales enriquecidos con información paramétrica sobre los elementos constructivos. A diferencia de los sistemas CAD tradicionales, que se centran en la representación geométrica de los objetos, BIM incorpora atributos físicos, funcionales y temporales que permiten gestionar el ciclo de vida completo de un edificio o infraestructura [Eastman et al., 2011].

Una de las ventajas principales de BIM es su capacidad para integrar información de distintas disciplinas (arquitectura, ingeniería, instalaciones, mantenimiento) en un único modelo centralizado. Esto facilita la colaboración entre profesionales, la detección de interferencias, la planificación de fases constructivas y la simulación del comportamiento del edificio a lo largo del tiempo [Kymmell, 2008].

Existen diversas plataformas BIM en el mercado, como Autodesk Revit, ArchiCAD, Bentley OpenBuildings o Allplan. En este proyecto se ha optado por **Autodesk Revit** debido a su alta penetración en el sector y su capacidad para integrarse con herramientas de programación visual como Dynamo, lo cual resulta fundamental para vincular el modelo con fuentes externas de datos.

El modelo desarrollado en Revit representa la UCI de un entorno hospitalario, incluyendo elementos arquitectónicos y parámetros ambientales simulados. Para ello, se han creado *familias personalizadas* que actúan como sensores virtuales y contienen campos de temperatura y humedad vinculados a valores procedentes de una base de datos. Estos valores se actualizan mediante scripts en Dynamo, ofreciendo una representación visual y dinámica de las condiciones ambientales en tiempo real.

Las plataformas BIM no solo son adecuadas para el diseño arquitectónico, sino también para tareas de mantenimiento, operación y monitorización de infraestructuras. En el caso particular del gemelo digital hospitalario, BIM actúa como interfaz entre el sistema físico y el entorno virtual, permitiendo representar de forma comprensible los datos recogidos por sensores y su impacto sobre el espacio construido.

El uso de una plataforma BIM es, por tanto, imprescindible en proyectos donde se requiere una visión integral, actualizable y explorable de la infraestructura, como es el caso de entornos hospitalarios con requisitos técnicos y normativos exigentes.

## Sensores IoT y su papel en entornos hospitalarios

El *Internet de las Cosas* hace referencia a una red de dispositivos físicos interconectados que tienen la capacidad de recopilar y transmitir datos a través de redes cableadas o inalámbricas [Gubbi et al., 2013, Atzori et al., 2010]. Dentro de esta red, los sensores son componentes clave, ya que permiten digitalizar magnitudes físicas del entorno (como temperatura, humedad, presión o calidad del aire) y transformarlas en información utilizable por sistemas de supervisión, automatización o inteligencia artificial.

En su forma básica, un sensor IoT consta de:

- Un **elemento sensor**, encargado de detectar una magnitud física.
- Un **módulo de procesamiento**, que interpreta la señal obtenida.
- Un **módulo de comunicación**, que transmite los datos al sistema central.

Los sensores IoT pueden comunicarse mediante conexiones cableadas (RS-485, Ethernet) o inalámbricas (WiFi, ZigBee, Bluetooth, LoRa), y emplean protocolos ligeros como MQTT, CoAP o HTTP REST para enviar datos a servidores, bases de datos o plataformas de visualización [Zanella et al., 2014, Farooq et al., 2015].

En entornos hospitalarios, la aplicación de sensores IoT es especialmente valiosa para el control ambiental, la trazabilidad de equipos, la monitorización de condiciones de pacientes o la automatización de procesos de mantenimiento. La integración de estos dispositivos en una arquitectura de gemelo digital permite representar en tiempo real el estado del entorno físico, facilitando la toma de decisiones y la prevención de fallos críticos.

En el presente trabajo no se ha realizado una conexión directa con sensores físicos reales, pero se ha simulado su funcionamiento mediante la generación de datos automáticos. No obstante, conocer la estructura y funcionamiento general de los sensores IoT es esencial para entender cómo se establecería esta comunicación en un entorno hospitalario real, aspecto que se desarrolla con mayor detalle en el capítulo de metodología.

## Arquitectura del sistema y sincronización de componentes

El diseño de un sistema software complejo como un gemelo digital requiere definir una arquitectura clara que establezca las relaciones entre sus

distintos componentes. La arquitectura de software se refiere a la organización estructural de un sistema, sus módulos funcionales, sus interfaces de comunicación y los flujos de datos entre ellos [Bass et al., 2012].

En este proyecto se ha adoptado una arquitectura **cliente-servidor distribuida**, en la que los datos generados por sensores simulados son almacenados en una base de datos (servidor), y el modelo digital (cliente) accede a ellos periódicamente para actualizar su representación visual. Esta arquitectura permite separar responsabilidades, mejorar la escalabilidad del sistema y facilitar su mantenimiento.

### Componentes del sistema

La arquitectura desarrollada incluye los siguientes elementos:

- **Base de datos (MySQL):** actúa como servidor de almacenamiento centralizado. Contiene los valores simulados de temperatura y humedad generados automáticamente mediante un procedimiento almacenado.
- **Modelo BIM (Autodesk Revit):** representa digitalmente la estructura de la UCI. Incluye un sensor virtual parametrizado con campos de temperatura y humedad.
- **Dynamo:** herramienta de programación visual que se ejecuta dentro de Revit y permite conectar el modelo BIM con la base de datos externa mediante scripts en Python.
- **Script Python:** embebido en Dynamo, se encarga de realizar la conexión con la base de datos y recuperar los últimos datos para actualizar los parámetros del modelo.

### Sincronización de datos

Un aspecto clave en el funcionamiento de un gemelo digital es la sincronización temporal entre el sistema físico (o en este caso, su simulación) y el modelo digital. Para ello, se han definido dos mecanismos principales:

1. **Generación periódica de datos:** mediante un evento programado en MySQL que inserta un nuevo registro cada 5 segundos con valores aleatorios de temperatura y humedad dentro de rangos definidos.
2. **Lectura periódica desde Dynamo:** el script en Python se ejecuta cada 5 segundos (modo *Periodic*) para consultar el último registro y asignar los valores al modelo BIM.



Este mecanismo de sincronización asegura que el modelo digital refleja en todo momento el último estado disponible del sistema físico (simulado). En implementaciones reales, esta arquitectura podría mantenerse sustituyendo el generador de datos por sensores IoT conectados mediante MQTT o HTTP, sin necesidad de modificar el resto del sistema.

La arquitectura adoptada demuestra que es posible mantener actualizado un entorno BIM a partir de datos externos en tiempo real, cumpliendo con los principios de modularidad, escalabilidad y desacoplamiento funcional necesarios en sistemas distribuidos modernos [Richards, 2022].

## 3.2. Estado del arte y trabajos relacionados

### Gemelos digitales en entornos hospitalarios

La implementación de gemelos digitales en hospitales es una tendencia emergente que busca optimizar la gestión de recursos, mejorar el control ambiental y anticipar situaciones de riesgo [Laamarti et al., 2020]. Aunque su aplicación aún es limitada en la práctica clínica, existen experiencias que demuestran su potencial.

Por ejemplo, el proyecto europeo Digital Twin for Healthcare Facilities, impulsado por el consorcio SPHERE, propone integrar datos BIM con sensores IoT y plataformas de análisis para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico en hospitales mediante el uso de gemelos digitales [Project, 2020]. En estos proyectos, Revit se emplea como plataforma BIM base y se vincula con flujos de datos reales provenientes de sensores ambientales, lo que guarda una estrecha relación con el enfoque planteado en el presente TFG.

A nivel industrial, iniciativas como Siemens Healthineers o GE Healthcare han comenzado a integrar gemelos digitales en el seguimiento de equipos médicos, pero su aplicación a infraestructuras hospitalarias completas aún se encuentra en fase piloto.

### Comunicación inalámbrica y almacenamiento de datos en hospitales

En entornos hospitalarios, las redes inalámbricas juegan un papel crucial en la transmisión de datos entre sensores, sistemas de gestión y plataformas de análisis. Las tecnologías más empleadas incluyen redes Wi-Fi empresariales segmentadas mediante VLANs, y protocolos como MQTT para la mensajería

ligera. Se priorizan soluciones con cifrado TLS, autenticación por certificados y control de acceso granular, cumpliendo con normativas como el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) y la ISO/IEC 27001.

Publicaciones como las de Farooq et al. (2015) o Zanella et al. (2014) analizan los riesgos y desafíos de implementar arquitecturas IoT seguras en entornos sanitarios, concluyendo que la segmentación de redes y el uso de brokers MQTT en servidores locales o privados son soluciones viables para preservar la integridad de los datos clínicos.

## Trabajos relacionados

- **Smart ICU Monitoring using IoT and Digital Twins:** Este trabajo propone un sistema de monitorización inteligente en UCIs basado en la combinación de sensores IoT y una plataforma de gemelo digital. El sistema recoge datos en tiempo real sobre variables ambientales críticas como la temperatura, la humedad relativa y la presión diferencial, los cuales son enviados a una base de datos y visualizados a través de una interfaz conectada al modelo arquitectónico del hospital. El objetivo principal es mejorar la eficiencia operativa y reducir los riesgos clínicos asociados a condiciones ambientales inadecuadas. La arquitectura está diseñada para ser escalable y segura, integrando protocolos de comunicación ligera como MQTT. La propuesta demuestra que la integración BIM-IoT es viable en entornos hospitalarios si se cumplen los requisitos técnicos y normativos.[[Vishnoi et al., 2021](#)]
- **BIM4Hospitals:** El proyecto BIM4Hospitals, financiado por la Unión Europea, explora la utilización de BIM en combinación con otras tecnologías digitales (sistemas de gestión hospitalaria, mantenimiento predictivo, etc.) para la gestión integral de infraestructuras sanitarias. El objetivo es crear un repositorio único de información actualizado en tiempo real que incluya tanto elementos arquitectónicos como técnicos y clínicos. Aunque el foco del proyecto está más orientado a la gestión global del hospital, también se abordan aspectos como la integración de sensores en modelos BIM y la representación dinámica de datos operativos. La experiencia del proyecto demuestra que el uso de gemelos digitales puede tener una aplicación transversal en hospitales si se diseñan arquitecturas interoperables.[[Commission, 2021](#)]
- **Gemelo digital del hospital infantil de Burgas:** Uno de los ejemplos recientes más representativos de la aplicación de gemelos digitales en el ámbito hospitalario es el proyecto desarrollado por la

empresa IDOM en el Hospital Infantil de Burgas, en Bulgaria. En este caso, se implementó un gemelo digital que integra el modelo BIM del edificio con sistemas de monitorización en tiempo real de variables ambientales y de funcionamiento técnico. El objetivo principal del proyecto fue optimizar la gestión de las instalaciones hospitalarias mediante la supervisión continua de parámetros como temperatura, ventilación o consumo energético, facilitando la toma de decisiones basada en datos. Esta solución permitió no solo una visualización más intuitiva del estado del hospital, sino también la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, contribuyendo a una gestión más eficiente, segura y sostenible del entorno sanitario.[IDOM, 2024]



---

# Metodología

---

## 4.1. Descripción de los datos

En el marco del presente Trabajo de Fin de Grado, se plantea la monitorización ambiental de una UCI como componente fundamental de un sistema de gemelo digital orientado a entornos hospitalarios. En particular, se han seleccionado dos variables clave para representar las condiciones ambientales del espacio: **la temperatura del aire y la humedad relativa**. Estos dos parámetros son esenciales tanto para la seguridad y el bienestar de los pacientes como para el correcto funcionamiento de los sistemas de climatización y ventilación del hospital.

Según organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la ASHRAE, la temperatura ambiental recomendada en UCIs debe mantenerse entre los 21 y 24 °C, mientras que la humedad relativa debe oscilar entre el 40 % y el 60 % [Organization, 2009, ASHRAE, 2021]. Valores fuera de estos rangos pueden comprometer la salud del paciente, aumentar el riesgo de infecciones nosocomiales o interferir con el funcionamiento del equipamiento médico.

En un sistema real, estos datos serían proporcionados por sensores físicos instalados en la UTA o distribuidos en puntos estratégicos de la UCI. Estos sensores IoT transmitirían los datos a una base de datos centralizada a través de protocolos seguros como MQTT, desde donde podrían ser consultados por el sistema BIM para su representación y análisis.

Sin embargo, dado que este trabajo se ha desarrollado en un entorno académico y no ha sido posible acceder a sensores reales conectados a la infraestructura de un hospital, se ha optado por una aproximación simulada. Para ello, se ha diseñado una base de datos relacional en MySQL que genera

automáticamente valores aleatorios de temperatura y humedad dentro de los rangos fisiológicamente aceptables para una UCI. La generación se realiza mediante un procedimiento almacenado que se ejecuta periódicamente cada cinco segundos, insertando nuevos registros con una marca temporal que representa la lectura simulada del sensor.

Esta estrategia permite replicar el comportamiento de un sistema real en cuanto a frecuencia de actualización, variabilidad de datos y almacenamiento cronológico. A su vez, permite validar la arquitectura de comunicación y visualización en el modelo BIM, garantizando que el prototipo desarrollado puede ser escalado o adaptado a una infraestructura hospitalaria real en el futuro.

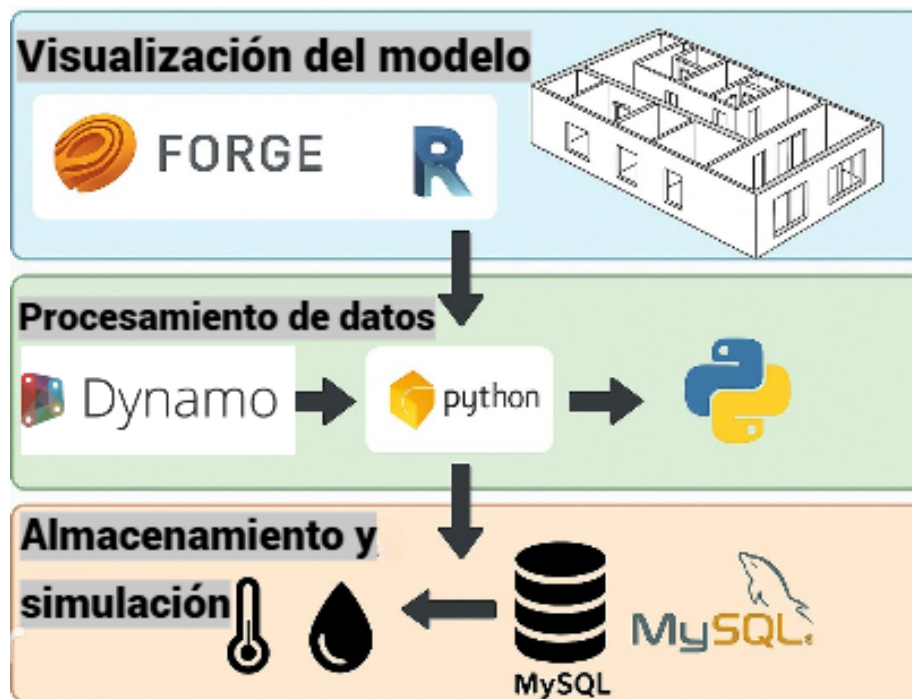


Figura 4.1: Esquema de la arquitectura implementada.

## 4.2. Técnicas y herramientas

### Entornos de programación y programas utilizados

El desarrollo del sistema propuesto ha requerido la utilización de distintos programas y entornos de desarrollo, cada uno con un propósito específico

dentro de la arquitectura funcional del gemelo digital. A continuación, se describen los más relevantes:

- **Autodesk Revit 2025:** Revit ha sido empleado como plataforma principal para el modelado BIM de la UCI [Autodesk, 2025a]. Gracias a sus capacidades paramétricas y a su compatibilidad con herramientas de automatización como Dynamo, Revit permite no sólo representar la geometría arquitectónica, sino también incorporar elementos virtuales (como sensores) enriquecidos con datos dinámicos.
- **Dynamo para Revit:** Dynamo es una herramienta de programación visual que se integra directamente con Revit [Autodesk, 2025b]. Permite automatizar tareas, manipular datos y conectar el modelo BIM con fuentes externas de información. En este proyecto, ha sido utilizada para consultar una base de datos externa (MySQL) e insertar los valores obtenidos directamente en los parámetros del modelo BIM.
- **MySQL Workbench:** Este entorno gráfico ha sido utilizado para diseñar, gestionar y visualizar la base de datos que almacena los datos ambientales simulados (temperatura y humedad) [Corporation, 2024]. La base de datos ha sido configurada para generar automáticamente nuevos registros de forma periódica mediante un procedimiento almacenado.
- **Visual Studio Code:** Aunque el desarrollo principal se ha realizado dentro de Dynamo, Visual Studio Code ha sido empleado como editor externo para validar scripts en Python y gestionar versiones previas del código [Microsoft, 2025].
- **GitHub y GitHub Desktop:** GitHub [GitHub, 2025a] ha sido empleado como plataforma de control de versiones para gestionar el código fuente y documentación del proyecto. GitHub Desktop [GitHub, 2025b] ha facilitado una interfaz gráfica intuitiva para realizar *commits*, *push* y *pull requests*, contribuyendo a mantener un historial ordenado del desarrollo.
- **ChatGPT (OpenAI):** A lo largo del proyecto se ha utilizado la herramienta ChatGPT de OpenAI [OpenAI, 2025] como asistente de programación para la generación y depuración de scripts en Python y para resolver dudas técnicas relacionadas con el funcionamiento de Dynamo, Revit y la integración de bases de datos. Esta herramienta basada en inteligencia artificial ha permitido agilizar el proceso de

desarrollo y aprendizaje, actuando como apoyo técnico en la toma de decisiones.

Herramienta	Función principal
Autodesk Revit	Modelado BIM de la UCI y visualización de sensores
Dynamo	Automatización de procesos y conexión con datos externos
Python	Programación de scripts para lectura de datos desde MySQL
MySQL Workbench	Diseño y gestión de la base de datos de simulación
GitHub	Control de versiones y gestión del código fuente
ChatGPT	Asistencia en generación y depuración de scripts

Tabla 4.1: Resumen de herramientas empleadas en el proyecto

Lenguajes de programación y bibliotecas utilizadas

Durante el desarrollo del proyecto se han empleado diversos lenguajes de programación y bibliotecas que han permitido implementar la lógica de conexión entre los distintos componentes del sistema, gestionar los datos generados y automatizar la integración con el modelo BIM. A continuación, se detallan los principales:

- **Python:** Ha sido el lenguaje principal utilizado para la programación del script embebido en Dynamo. Su sintaxis sencilla y su versatilidad lo convierten en una opción ideal para tareas de integración de datos, consultas a bases de datos y manipulación de cadenas de texto [Foundation, 2025].
- **SQL:** Se ha empleado el lenguaje SQL para la definición de la estructura de la base de datos (tablas, tipos de datos, claves primarias), así como para la programación de procedimientos almacenados y eventos que permiten la generación automática de datos simulados en MySQL [Corporation, 2024].
- **Visual Programming Language (Dynamo):** Aunque no es un lenguaje textual tradicional, Dynamo representa la lógica de programación mediante nodos interconectados, lo que permite ejecutar funciones y estructuras condicionales de forma visual. Esta herramienta ha sido clave para integrar los datos externos en el modelo Revit sin necesidad de programación avanzada [Autodesk, 2025b].



- **mysql.connector (Python)**: Se trata de la biblioteca oficial desarrollada por Oracle que permite conectar Python con bases de datos MySQL. Ha sido utilizada para establecer la conexión entre el script de Dynamo y el servidor de datos, realizar consultas SQL y recuperar los últimos registros [Corporation, 2024].
- **clr (Common Language Runtime)**: Es una biblioteca específica de .NET utilizada en Dynamo para permitir la interoperabilidad entre el entorno de Revit y los scripts en Python. Permite acceder a funciones del entorno BIM y manipular directamente parámetros del modelo desde el código [Autodesk, 2025b].

La combinación de estos lenguajes y bibliotecas ha permitido construir un flujo de trabajo automatizado, fiable y modular, capaz de simular el comportamiento de un sistema hospitalario real dentro de un entorno digital controlado.

## Tecnologías de comunicación

Una parte fundamental en el diseño de un sistema de gemelo digital es la elección de las tecnologías que permiten transmitir los datos desde los sensores físicos hasta el servidor central. Esta decisión depende de diversos factores, como el entorno físico, la infraestructura existente, el volumen de datos, la frecuencia de actualización y los requisitos de seguridad.

A continuación, se realiza un análisis comparativo de las principales tecnologías de comunicación inalámbrica y cableada que podrían emplearse en un entorno hospitalario para conectar sensores IoT con el sistema central de almacenamiento y visualización:

- **Wi-Fi (IEEE 802.11)**: Se trata de la tecnología inalámbrica más extendida en entornos hospitalarios. Ofrece alta velocidad de transmisión, amplia cobertura y estándar ampliamente soportado. Sin embargo, puede verse afectada por interferencias si hay saturación de la red, y su consumo energético es elevado en sensores alimentados por batería. Resulta adecuada para hospitales con infraestructura Wi-Fi empresarial bien segmentada por VLANs [Gubbi et al., 2013, Zanella et al., 2014].
- **Bluetooth Low Energy (BLE)**: Diseñado para dispositivos de bajo consumo energético. Tiene un alcance limitado (menor a 10 metros en condiciones reales) y una velocidad de transmisión moderada. Es

útil en sensores portátiles o wearables, pero no recomendable para infraestructura fija distribuida en grandes instalaciones.[\[NIST, 2018\]](#)

- **ZigBee:** Protocolo de comunicación inalámbrica de baja potencia y topología mallada. Ofrece buena tolerancia a fallos y es ideal para conectar múltiples sensores en un entorno distribuido como una UCI. Requiere el despliegue de nodos intermedios (routers) y un coordinador central. Su ancho de banda es bajo, pero suficiente para datos ambientales.[\[Digi International, 2025, Reolink, 2024\]](#)
- **Ethernet (cableado):** Transmisión física mediante cable. Proporciona estabilidad, velocidad y seguridad, pero requiere obra física y no es viable para sensores que deben ser portátiles o instalados en ubicaciones de difícil acceso.[\[VergeSense, 2022, Taoglas, 2024\]](#)
- **LoRa/LoRaWAN:** Tecnología de largo alcance y muy bajo consumo. Su principal ventaja es la cobertura, pero tiene una tasa de transferencia muy baja. No resulta adecuada para uso hospitalario interior debido a la compartimentación del edificio y la necesidad de repetidores.[\[Obiri and Laerhoven, 2025\]](#)

Tecnología	Consumo	Alcance	Velocidad	Uso hospitalario
Wi-Fi (802.11ac)	Alto	Alta	Alta	Sí
BLE	Muy bajo	Corta	Baja	No
ZigBee	Bajo	Media	Baja	Sí
Ethernet	N/A	Alta (cableada)	Alta	Depende
LoRa	Muy bajo	Muy alta	Muy baja	No

Tabla 4.2: Comparativa de tecnologías de comunicación inalámbrica para hospitales

Entre las tecnologías analizadas, Wi-Fi destaca como la opción más adecuada para entornos hospitalarios por varias razones. En primer lugar, la mayoría de hospitales ya cuentan con una infraestructura Wi-Fi empresarial desplegada y segmentada mediante VLANs, lo que facilita la integración de nuevos dispositivos sin necesidad de realizar instalaciones físicas adicionales. A diferencia de tecnologías como ZigBee o LoRa, Wi-Fi proporciona un mayor ancho de banda y velocidad de transmisión, permitiendo el envío frecuente de datos sin comprometer la estabilidad del sistema, algo esencial cuando se pretende trabajar en tiempo real con múltiples sensores distribuidos.

Además, el uso de Wi-Fi permite una cobertura amplia dentro de las instalaciones hospitalarias, especialmente en zonas críticas como UCIs, quirófanos o laboratorios. Esto simplifica la gestión y supervisión centralizada de los sensores, sin necesidad de redes malladas ni coordinadores adicionales como en ZigBee. Por otro lado, al tratarse de una tecnología ampliamente soportada, existen numerosos dispositivos y sensores IoT compatibles con conectividad Wi-Fi, lo que aumenta la flexibilidad del sistema y facilita futuras ampliaciones.

Por último, su integración con protocolos ligeros como MQTT permite establecer un canal de comunicación eficiente, seguro y escalable para el envío periódico de datos desde sensores a servidores o plataformas de visualización como el gemelo digital propuesto [Zanella et al., 2014, Systems, 2023].

En cuanto a los **protocolos de comunicación**, que definen el formato y mecanismo de envío de los datos, las opciones más habituales son:

- **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)**: Protocolo ligero basado en el modelo publicador-suscriptor. Requiere un broker central (como Mosquitto) y es ideal para IoT. Su bajo overhead y capacidad para manejar miles de dispositivos lo hace muy adecuado para hospitales [OASIS, 2014].
- **HTTP/REST**: Arquitectura cliente-servidor ampliamente utilizada en aplicaciones web. Fácil de implementar, pero menos eficiente que MQTT en entornos con alta frecuencia de actualización.
- **CoAP (Constrained Application Protocol)**: Diseñado para dispositivos con recursos limitados. Usa UDP y es extremadamente ligero. Su aplicación en hospitales es reducida, ya que requiere integración específica en el backend.
- **OPC-UA**: Protocolo orientado a la industria para integración de datos entre sistemas heterogéneos. Proporciona alta seguridad y estándares de interoperabilidad, pero su complejidad lo hace menos habitual en entornos pequeños.

Protocolo	Seguridad	Eficiencia	Escalabilidad	Útil
MQTT	Media	Alta	Alta	Sí
HTTP/REST	Alta	Media	Baja	Depende
CoAP	Media	Muy alta	Media	No
OPC-UA	Alta	Alta	Alta	Depende

Tabla 4.3: Comparativa de protocolos de comunicación en entornos IoT

A pesar de que tanto MQTT como OPC-UA son protocolos válidos para entornos críticos como hospitales, vamos a analizar las ventajas que convierten al protocolo MQTT en la opción más adecuada.

En primer lugar, su arquitectura basada en el modelo publicador-suscriptor permite una comunicación desacoplada entre sensores, servidores y plataformas de visualización [OASIS, 2014]. Esta característica resulta especialmente útil en hospitales, donde existen múltiples áreas distribuidas que requieren supervisión ambiental y donde los distintos sistemas (climatización, mantenimiento, historia clínica) deben poder operar de forma independiente.

Además, MQTT se caracteriza por ser un protocolo extremadamente ligero, optimizado para redes con limitaciones de ancho de banda, como puede ocurrir en instalaciones Wi-Fi segmentadas por VLANs dentro de los centros sanitarios [Aydin et al., 2021]. Esta eficiencia en la transmisión de datos se traduce en un mejor rendimiento global del sistema.

Por último, aunque OPC-UA ofrece una capa de seguridad más compleja [Mahnke et al., 2009], MQTT puede configurarse sobre TLS (Transport Layer Security) [Farhadi et al., 2020] y con control de usuarios, garantizando así un nivel de protección adecuado para entornos sanitarios, cumpliendo con los requisitos de confidencialidad e integridad en la transmisión de datos.

En resumen, la elección de MQTT se justifica por su sencillez, escalabilidad, bajo consumo de recursos y perfecta adaptación a la realidad operativa y tecnológica de un hospital actual.

Tras el análisis de las distintas opciones, se concluye que para un entorno hospitalario de mediana o gran escala, la combinación de sensores inalámbricos conectados por **Wi-Fi empresarial** y la utilización del protocolo **MQTT** constituye la opción más equilibrada en cuanto a fiabilidad, escalabilidad y facilidad de integración con sistemas BIM y bases de datos.

---

# Resultados

---

## 5.1. Resumen de resultados

La arquitectura desarrollada ha demostrado ser funcional, modular y escalable, permitiendo representar condiciones ambientales en tiempo real (simulado) dentro del entorno tridimensional. El sistema es capaz de generar nuevos valores cada cinco segundos, almacenarlos en una tabla estructurada y reflejarlos automáticamente en el modelo BIM, validando así el flujo de información entre sensor, servidor y entorno gráfico. En la siguiente imagen se muestra la vista 3D de la UCI y a la izquierda las propiedades del sensor con los parámetros Temperatura y Humedad, y sus respectivos valores.

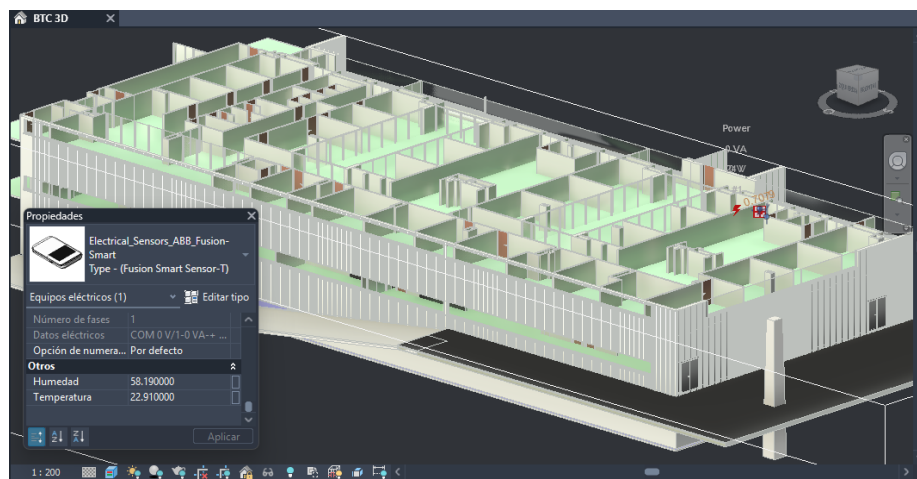


Figura 5.1: Diseño de la UCI en Revit.

Además de esta implementación práctica, el proyecto incluye un análisis teórico exhaustivo sobre cómo podría desarrollarse una solución equivalente en un hospital real. Para ello, se ha realizado una comparativa entre diferentes tecnologías de comunicación —como Wi-Fi, ZigBee o Bluetooth— y protocolos de transmisión de datos —como MQTT, HTTP/REST y OPC-UA—, valorando sus ventajas y limitaciones en función de los requisitos de fiabilidad, escalabilidad y seguridad propios de un entorno hospitalario [Gubbi et al., 2013, OASIS, 2014, Zanella et al., 2014]. Como resultado de este análisis, se propone un modelo basado en sensores distribuidos conectados mediante Wi-Fi empresarial y protocolo MQTT, con transmisión a un servidor local seguro configurado para integrarse con sistemas BIM.

Este doble enfoque —práctico y teórico— aporta valor añadido al trabajo, al demostrar tanto la viabilidad técnica de la solución como su adaptabilidad futura a entornos reales con sensores físicos y condiciones operativas más exigentes.

## 5.2. Discusión

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten reflexionar sobre varios aspectos clave del desarrollo de gemelos digitales en infraestructuras hospitalarias:

En primer lugar, la integración de Revit y Dynamo con una base de datos relacional externa demuestra que es técnicamente viable crear un modelo paramétrico dinámico que represente datos en tiempo real [Eastman et al., 2011]. Esta integración, si bien se ha realizado en este caso con datos simulados, reproduce fielmente el flujo de información que se daría con sensores reales.

En segundo lugar, se ha validado el uso de una arquitectura basada en Python y MySQL para la automatización del flujo de datos. Esta elección ha demostrado ser adecuada tanto en términos de rendimiento como de simplicidad de implementación, y permite una futura migración a entornos productivos [Corporation, 2024, Foundation, 2025].

Además, el enfoque modular y orientado a tecnologías estándar (BIM, SQL, Python) aporta gran flexibilidad y facilita la interoperabilidad con otras herramientas y protocolos de comunicación. En un contexto hospitalario real, donde los sistemas de gestión de infraestructuras (BMS), dispositivos médicos y plataformas de supervisión ambiental pueden coexistir, esta flexibilidad es fundamental [Bass et al., 2012].

Sin embargo, también se han identificado limitaciones. El sistema actual no trabaja con datos reales, por lo que no se han considerado variables como el ruido, la calibración de sensores o las condiciones de red. Tampoco se ha profundizado en cuestiones críticas como la ciberseguridad o la redundancia de datos, aspectos esenciales en un entorno sanitario real. Estos temas quedan abiertos para trabajos futuros.





---

## Conclusiones

---

Se ha logrado desarrollar un prototipo completamente funcional que, aunque basado en datos simulados, reproduce fielmente el comportamiento que tendría un sistema operativo con sensores reales. El modelo construido no solo valida la conexión entre entorno físico y digital, sino que funciona con fluidez, estabilidad y precisión. Se trata, por tanto, de una aproximación pionera que anticipa una transformación profunda en la forma de gestionar entornos clínicos como hospitales, pero también otros espacios críticos como laboratorios, centros de salud o residencias. La integración de tecnologías BIM, bases de datos y sensórica en un sistema unificado de representación abre nuevas posibilidades para la optimización operativa, el mantenimiento predictivo y la toma de decisiones basada en datos, marcando un camino prometedor hacia una gestión hospitalaria más inteligente, segura y eficiente.

Además, a continuación se va a indicar cómo se desplegaría en un entorno hospitalario real el sistema que se ha ideado en este proyecto.

La adquisición de datos se realizaría mediante sensores físicos instalados en las UTAs distribuidas por todo el edificio. Estos sensores medirían variables como temperatura y humedad en tiempo real, con una frecuencia de muestreo adecuada.

Para garantizar la interoperabilidad con distintos tipos de sensores y sistemas existentes en la infraestructura hospitalaria, se propone la utilización de un JACE (Java Application Control Engine) Controller de Tridium.[[Tridium Inc., 2025](#)] Este dispositivo forma parte del Niagara Framework, una plataforma ampliamente adoptada en la automatización de edificios, que permite integrar múltiples protocolos como BACnet/IP, Modbus, OPC, KNX o MQTT, facilitando la recogida y normalización de datos provenientes de sensores heterogéneos.

En el contexto de este proyecto, el JACE actuaría como pasarela de automatización, recogiendo en tiempo real los valores de temperatura y humedad desde sensores instalados en las diferentes salas de la UCI, aplicando lógica local si es necesario (por ejemplo, validación o filtrado), y reenviando dichos datos al servidor interno del hospital, donde se encuentra alojada la base de datos MySQL.

Los datos recogidos por los sensores se envían mediante la red interna del hospital hacia un servidor local. Este enfoque modular permite mantener la lógica de adquisición separada de la lógica de almacenamiento, lo que facilita el mantenimiento y la escalabilidad del sistema.

La base de datos MySQL que contiene los registros ambientales puede alojarse en un servidor físico dentro del hospital, garantizando el cumplimiento de la normativa vigente en materia de protección de datos (LOPDGDD, RGPD). En hospitales con infraestructuras de nube privada, se podría considerar una solución híbrida, siempre que se garantice el acceso seguro y auditado desde las estaciones de trabajo.

La visualización de los datos ambientales se realizaría desde estaciones de trabajo equipadas con Autodesk Revit y Dynamo, ubicadas en departamentos técnicos como mantenimiento, seguridad o gestión hospitalaria. Estas estaciones se conectarían a la base de datos mediante la red interna.

## 6.1. Aspectos relevantes

Durante el desarrollo del proyecto se han presentado diversos obstáculos técnicos y metodológicos que han condicionado la evolución del sistema hasta alcanzar la solución final implementada. Uno de los primeros enfoques considerados fue la utilización de Unity como entorno de visualización interactiva. Inicialmente se intentó exportar el modelo de Revit en formato .fbx para integrarlo en Unity y vincular allí los datos en tiempo real. Sin embargo, el proceso de exportación generaba una pérdida importante de calidad gráfica y de organización del modelo: las texturas se desconfiguraban, los elementos perdían su jerarquía y la navegación se volvía ineficiente. Esta situación, unida a la complejidad de integrar datos externos en tiempo real dentro de Unity sin desarrollar una aplicación personalizada desde cero, motivó la decisión de prescindir de este entorno y centrar el desarrollo directamente sobre Revit, donde ya existía una representación arquitectónica detallada y compatible con herramientas de automatización como Dynamo.

Otro reto significativo fue la generación automatizada de datos ambientales simulados. En un primer momento se planteó el uso de Excel con macros en VBA, que permitiría generar valores aleatorios dentro de un rango determinado. Aunque funcional en teoría, este enfoque presentaba varios inconvenientes: las macros no eran compatibles con el entorno de lectura de Dynamo si el archivo estaba abierto, la actualización de los valores requería intervención manual o programación adicional externa, y no existía una forma sencilla de almacenar el histórico de datos con marca temporal. Estos problemas llevaron a sustituir Excel por una solución más robusta y escalable basada en MySQL, que además permitió introducir lógica de programación directa en el servidor a través de procedimientos almacenados y eventos periódicos.

También se exploró el uso de archivos .csv como método intermedio de comunicación entre sistemas, pero se descartó debido a su fragilidad y falta de sincronización: los datos no se actualizaban correctamente en Dynamo a menos que se forzara la lectura manualmente, lo cual contradecía el objetivo de automatización total.

Por último, hubo dificultades con la actualización en tiempo real dentro de Dynamo, especialmente en la sincronización entre la ejecución periódica y la lectura de archivos. Esto se resolvió mediante la conexión directa con base de datos y la ejecución controlada de scripts en modo periódico, asegurando una lectura eficiente y continua.

Aun habiendo tenido que lidiar con estos desafíos en el devenir del proyecto, finalmente se han podido solucionar haciendo que se cumplan los objetivos iniciales.



---

## Líneas de trabajo futuras

---

Existen diversas oportunidades de mejora y extensión que permitirían dotar al sistema de una mayor robustez, aplicabilidad y valor en un entorno real. A continuación se detallan algunas de las líneas de trabajo futuras más relevantes:

- **Integración con sensores físicos reales:** La simulación de datos ha sido una solución adecuada en fase de prototipo, pero el siguiente paso lógico consiste en conectar sensores IoT reales (como sensores de temperatura y humedad DHT22 o BME280) mediante microcontroladores (ESP32, Raspberry Pi) y protocolos como MQTT o HTTP para enviar los datos a la base de datos.
- **Monitorización de nuevas variables ambientales:** El sistema puede ampliarse para supervisar otros parámetros críticos en entornos hospitalarios como presión diferencial, concentración de CO<sub>2</sub>, niveles de partículas PM o calidad del aire, siguiendo las recomendaciones de organismos como ASHRAE u OMS[ASHRAE, 2021, Organization, 2009].
- **Escalado del sistema a otras estancias o edificios:** El sistema puede adaptarse para representar el comportamiento ambiental de otras zonas del hospital (quirófanos, salas de espera, laboratorios), e incluso aplicarse a otros tipos de edificios con necesidades similares, como centros de salud, residencias o edificios docentes.
- **Implementación de mecanismos de seguridad y auditoría:** En un entorno real, sería necesario incluir mecanismos de autenticación, cifrado de datos, control de accesos y registro de actividad conforme a normativas como RGPD o ISO 27001[for Standardization, 2022, y Consejo de la Unión Europea, 2016].

- **Uso de algoritmos de análisis o inteligencia artificial:** La integración de modelos predictivos o algoritmos de aprendizaje automático permitiría anticipar fallos en la climatización, detectar desviaciones o generar recomendaciones de mantenimiento preventivo basadas en patrones detectados.
- **Optimización del rendimiento y la sincronización:** A nivel técnico, es posible mejorar la eficiencia de lectura y escritura de datos, reducir la latencia de actualización en Dynamo o explorar alternativas como APIs REST para desacoplar el cliente Revit del servidor de datos.
- **Validación en un entorno hospitalario real:** Finalmente, el mayor reto y objetivo de continuidad es lograr validar el sistema en un entorno real, colaborando con personal técnico y clínico del hospital para adaptar el sistema a sus necesidades operativas y normativas específicas.

Estas líneas de trabajo futuras permitirían evolucionar el prototipo desarrollado hacia una herramienta completa, funcional y aplicable en el contexto real para el que ha sido ideado: la mejora continua y la gestión inteligente de entornos críticos en el sector salud.

---

## Bibliografía

---

- [ASHRAE, 2021] ASHRAE (2021). Ansi/ashrae/ashrae standard 170-2021: Ventilation of health care facilities. Disponible en: [https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-170-2021?product\\_id=2204905](https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-170-2021?product_id=2204905) [Último acceso: mayo de 2025].
- [Atzori et al., 2010] Atzori, L., Iera, A., and Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15):2787–2805.
- [Autodesk, 2025a] Autodesk (2025a). Autodesk revit 2025 - bim design software. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Autodesk, 2025b] Autodesk (2025b). Dynamo for revit - visual programming for bim. Disponible en: <https://dynamobim.org> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Aydin et al., 2021] Aydin, M., Veit, A., and Schröder, T. (2021). Performance evaluation of mqtt and opc ua in smart manufacturing environments. *Procedia CIRP*, 99:25–30.
- [Bass et al., 2012] Bass, L., Clements, P., and Kazman, R. (2012). *Software Architecture in Practice*. Addison-Wesley, 3rd edition.
- [buildingSMART International, 2025] buildingSMART International (2025). What is openbim? Disponible en: <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Codd, 1970] Codd, E. F. (1970). A relational model of data for large shared data banks. *Communications of the ACM*, 13(6):377–387.

- [Commission, 2021] Commission, E. (2021). Bim4hospitals project – towards smart hospital management through bim. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/101015686> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Corporation, 2025] Corporation, I. (2025). ¿qué es la industria 4.0? Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/industry-4-0> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Corporation, 2023] Corporation, O. (2023). Mysql 8.0 reference manual. Disponible en: <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Corporation, 2024] Corporation, O. (2024). Mysql workbench - database design tool. Disponible en: <https://dev.mysql.com/downloads/workbench/> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Digi International, 2025] Digi International (2025). What is zigbee? learn about zigbee wireless mesh technology. Sitio web de Digi International. Protocolo de baja potencia, redes malladas y adecuado para IoT.
- [Eastman et al., 2011] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., and Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. Wiley, 2 edition.
- [Farhadi et al., 2020] Farhadi, M., Bafghi, A. G., Mahdavi, M., and Khonsari, A. (2020). Security challenges in iot: A comprehensive study of threats and defense mechanisms. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(10):10283–10304.
- [Farooq et al., 2015] Farooq, M. U., Waseem, M., Khairi, A., and Mazhar, S. (2015). A critical analysis on the security concerns of internet of things (iot). *International Journal of Computer Applications*, 111(7):1–6.
- [for Standardization, 2022] for Standardization, I. O. (2022). Iso/iec 27001:2022 – information security, cybersecurity and privacy protection. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/27001> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Foundation, 2025] Foundation, P. S. (2025). Python 3 documentation. Disponible en: <https://www.python.org/doc/> [Último acceso: mayo de 2025].



- [Fuller et al., 2020] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., and Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8:108952–108971.
- [GitHub, 2025a] GitHub (2025a). Github - collaborative code development platform. Disponible en: <https://github.com> [Último acceso: mayo de 2025].
- [GitHub, 2025b] GitHub (2025b). Github desktop. Disponible en: <https://desktop.github.com> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Grieves and Vickers, 2017] Grieves, M. and Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, pages 85–113.
- [Gubbi et al., 2013] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., and Palaniswami, M. (2013). Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7):1645–1660.
- [Gábor et al., 2022] Gábor, T., Szabó, M., and Abonyi, J. (2022). Digital twin-based scheduling and anomaly detection in flexible manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 62:746–759.
- [IBM, 2021] IBM (2021). What is a digital twin? Disponible en: <https://www.ibm.com/think/topics/what-is-a-digital-twin> [Último acceso: mayo de 2025].
- [IDOM, 2024] IDOM (2024). Digital twin of a children’s hospital in burgas. Sitio web de IDOM. Disponible en: <https://www.idom.com/en/project/digital-twin-of-a-childrens-hospital-in-burgas/> [Último acceso: junio de 2025].
- [Kymmell, 2008] Kymmell, W. (2008). *Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations*. McGraw-Hill Professional.
- [Laamarti et al., 2020] Laamarti, F., Cheikh, M. A., Amine, M., et al. (2020). A review of digital twin in healthcare. *Biomedical Engineering Advances*, 1:100005.
- [Mahnke et al., 2009] Mahnke, W., Leitner, S.-H., and Damm, M. (2009). Opc unified architecture. *Springer*. DOI: 10.1007/978-3-540-68899-0.

- [Microsoft, 2025] Microsoft (2025). Visual studio code - code editing redefined. Disponible en: <https://code.visualstudio.com> [Último acceso: mayo de 2025].
- [NIST, 2018] NIST (2018). Development and evaluation of bluetooth low-energy device for short-range communication. *NIST Journal of Research*, 126.
- [OASIS, 2014] OASIS (2014). Mqtt version 3.1.1. Disponible en: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Obiri and Laerhoven, 2025] Obiri, N. M. and Laerhoven, K. V. (2025). A comprehensive data description for lorawan path loss measurements in an indoor office setting: Effects of environmental factors. *arXiv preprint*, abs/2505.06375.
- [OpenAI, 2025] OpenAI (2025). Chatgpt – ai language model for coding and learning. Disponible en: <https://chat.openai.com> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Organization, 2009] Organization, W. H. (2009). Natural ventilation for infection control in health-care settings. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547857> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Project, 2020] Project, S. (2020). Digital twin for healthcare facilities. <https://sphere-project.eu>. Consultado el 2 de mayo de 2025.
- [Reolink, 2024] Reolink (2024). Zigbee range: You must know the truth. *Blog de Reolink*.
- [Richards, 2022] Richards, C. (2022). Bim execution planning guide for facility owners. Disponible en: <https://bim.psu.edu/> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Shelby et al., 2014] Shelby, Z., Hartke, K., and Bormann, C. (2014). The constrained application protocol (coap). RFC 7252, IETF. Disponible en: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Systems, 2023] Systems, C. (2023). Wi-fi 6/6e solutions. Disponible en: [https://www.cisco.com/c/en\\_in/solutions/enterprise-networks/802-11ax-solution/index.html](https://www.cisco.com/c/en_in/solutions/enterprise-networks/802-11ax-solution/index.html) [Último acceso: mayo de 2025].

- [Tao et al., 2019] Tao, F., Qi, Q., Liu, A., and Nee, A. (2019). Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4):653–661.
- [Taoglas, 2024] Taoglas (2024). The role of ethernet in iot: Connecting devices for a smarter world. *Taoglas Blog*.
- [Tridium Inc., 2025] Tridium Inc. (2025). *JACE 9000 Controller*. Tridium Inc., Richmond, VA, USA. Embedded IoT controller optimized for Niagara 4; proporciona control, supervisión, registro de datos, alarmas, planificación y servidor web.
- [VergeSense, 2022] VergeSense (2022). Wired vs. wireless sensor systems: Advantages and disadvantages. *VergeSense Insights Blog*.
- [Vishnoi et al., 2021] Vishnoi, P., Yadav, A., and Sharma, D. (2021). Smart icu monitoring using iot and digital twins. In *2021 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)*, pages 459–463. IEEE.
- [y Consejo de la Unión Europea, 2016] y Consejo de la Unión Europea, P. E. (2016). Reglamento general de protección de datos (rgpd) - reglamento (ue) 2016/679. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj> [Último acceso: mayo de 2025].
- [Zanella et al., 2014] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., and Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1):22–32.