

MONITORIZACION CONTINUA AUTO-ATENTA DE SALUD ESTRUCTURAL: ESTUDIO DE CASO EN EL 'HOSPITAL REAL' DE GRANADA.

Continuous Self-Attentive system for Structural Health Monitoring: A case study in the "HOSPITAL REAL" in Granada.

Emilio Daroch Salazar^a, Antonio S. López-Cuervo^b, María L. Jalón^c, Enrique García Macías^d, Juan Chiachío Ruano^e

^aIngeniero Naval. MSc en Estructuras, Universidad de Granada. Investigador Predoctoral y PM proyecto Buildchain.

edaroch@ugr.es

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada. Investigador Predoctoral FPU. antonioluis@ugr.es

^cPhD Dinámica de Flujos Biogeoquímicos y sus Aplicaciones. Universidad de Granada, Universidad de Córdoba y Universidad de Málaga. Investigadora Postdoctoral. mljalon@ugr.es

^dPhD ingeniería Civil. Universidad de Granada y Universidad de Perugia. Profesor Titular. enriquegm@ugr.es

^e PhD ingeniería Civil. Universidad de Granada. Profesor Titular, IP Proyecto Buildchain. jchiachio@ugr.es

RESUMEN

Este trabajo presenta la implementación de un sistema avanzado de monitorización de la salud estructural (SHM) aplicado al Hospital Real de Granada, un edificio histórico del siglo XVI. El sistema se basa en una arquitectura flexible y escalable con almacenamiento en bases de datos SQL como buffer y noSQL (MongoDB) para almacenamiento masivo, integración de datos en tiempo real mediante APIs REST y análisis modal operacional automático. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia del sistema para evaluar parámetros modales del edificio y servir como base para un gemelo digital actualizado en tiempo cuasi real. Este enfoque también soluciona problemas asociados al manejo de grandes volúmenes de datos y proporciona una solución robusta para la preservación del patrimonio basada en datos.

ABSTRACT

This study presents the implementation of an advanced Structural Health Monitoring (SHM) system applied to the Hospital Real of Granada, a historical 16th-century building. The system relies on a flexible and scalable architecture with SQL databases as a buffer and noSQL databases (MongoDB) for long-term storage, real-time data integration through REST APIs, and automated operational modal analysis. The results demonstrate the system's effectiveness in evaluating modal parameters of the building and serving as a basis for a semi real-time updated digital twin. This approach also addresses challenges in managing large volumes of data and offers a robust solution for data-driven heritage preservation.

PALABRAS CLAVE: SHM, noSQL, SQL, análisis modal operacional, gemelo digital, edificio histórico.

KEYWORDS: SHM, noSQL, SQL, operational modal analysis, digital twin, historical building.

1. Introducción

El Hospital Real de Granada, es un edificio patrimonial construido en el siglo XVI ubicado en Granada, España, presenta un diseño arquitectónico caracterizado por su planta de cruz griega inscrita en un cuadrado. Este inmueble combina un valor artístico e histórico significativo que hoy en día es la sede del Rectorado de la Universidad de Granada. La importancia de preservar esta estructura emblemática ha motivado la implementación de un sistema avanzado de monitorización que integra tecnologías de captura de datos, análisis modal operacional y visualización en tiempo real de aceleraciones y en cuasi tiempo real de frecuencias modales.

En marzo de 2023, el equipo de la UGR inició un estudio arqueo-estructural basado en el Plan Director del Hospital Real para analizar la materialidad del edificio y extraer planos arquitectónicos detallados. Este análisis permitió documentar con precisión las características constructivas y materiales. Posteriormente, en junio de 2023, se realizó un análisis de elementos finitos utilizando el software comercial Abaqus, que identificó las frecuencias naturales y modos de vibración de la estructura. Estos hallazgos destacaron un movimiento significativo en el cimborrio, lo que dio una aproximación para realizar las campañas de monitorización especializadas.

En noviembre de 2023, se realizó la primera campaña extensiva de monitorización que incluyó la instalación de 14 acelerómetros sísmicos—ocho en la biblioteca y seis colocados estratégicamente en dos niveles de la torre. Esta configuración permitió llevar a cabo un análisis modal operacional (OMA) que confirmó la necesidad de enfocar los esfuerzos de monitorización continua en la torre debido a su comportamiento vibracional y generar la arquitectura de datos sobre cómo capturar y analizar éstos en cuasi tiempo real.

2. Metodología

2.1 Estudio Arqueoestructural y Modelado Estructural

El Hospital Real de Granada es una estructura compleja compuesta por elementos históricos y arquitectónicos significativos, como su planta en cruz griega y una torre en el centro que representa un punto de interés estructural que puede ser vista desde distintos puntos de la ciudad.

En enero de 2023 comienza el proyecto Europeo Buildchain donde la UGR es parte integra del consorcio y a cargo de los paquetes de trabajo técnicos de monitorización de estructuras. El objetivo de este proyecto consiste en generar una bitácora digital de edificios o DBL por sus siglas en inglés (Digital Building Logbook) descentralizada utilizando grafos de conocimiento descentralizados para acceder a la información relevante de edificios. Como Piloto 1 de validación de este proyecto se ha incluido la monitorización en tiempo real del Hospital Real de Granada en la plataforma Buildchain.

En marzo de 2023, se inició un estudio arqueo estructural del Plan Director [1] con el objetivo de analizar la materialidad del edificio y extraer planos arquitectónicos detallados. Este análisis permitió documentar con precisión las características constructivas y materiales, proporcionando información clave para decisiones futuras.

Como parte de este trabajo preliminar, se desarrolló un modelo de elementos finitos en Abaqus del Hospital Real (Figura 1) con el propósito de identificar las áreas de la estructura más propensas a experimentar vibraciones críticas. Este modelo permitió enfocarnos en el cimborrio (Figura 2) como un punto de interés

para la monitorización estructural, debido a su comportamiento frente a las frecuencias naturales detectadas.

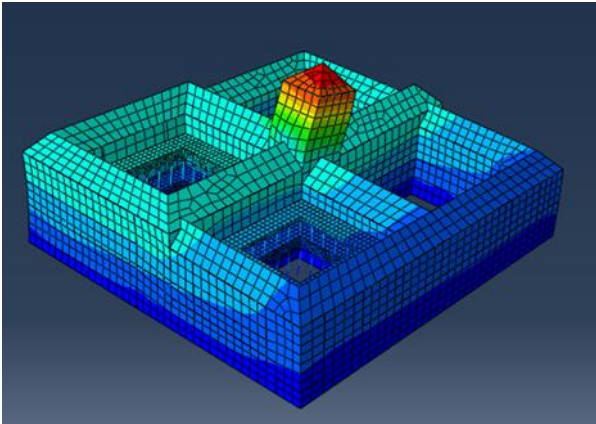


Figura 1. Análisis de elementos finitos: Modo 1.



Figura 2. Címborio del Hospital Real

A continuación, se llevaron a cabo dos campañas de monitorización para respaldar los hallazgos del modelo. La primera campaña extensiva se enfocó en validar los resultados obtenidos mediante la instalación temporal de sensores montados en una plataforma (Figura 3) y la recopilación de datos durante un periodo de prueba. La segunda campaña, establecida como permanente, incluyó la instalación de seis acelerómetros en ubicaciones estratégicas al

exterior del cimborrio, lo que garantiza una monitorización continua y detallada del comportamiento estructural de éste.

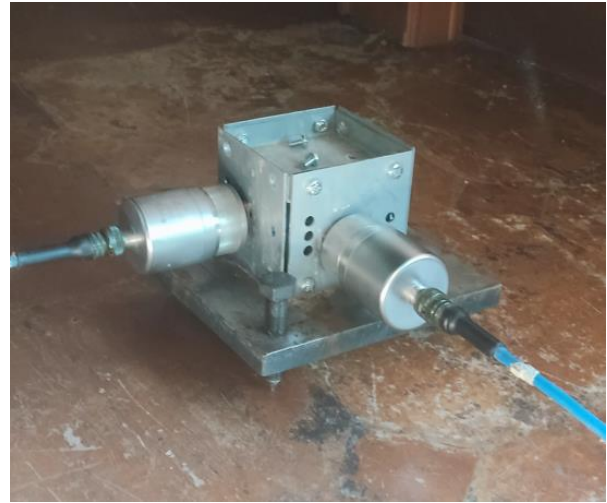


Figura 3 Sensor sísmico temporal instalado.

2.2 Descripción del Sistema de Monitorización.

El sistema de monitorización permanente del Hospital Real es capturado por un portátil ligero con procesador Intel i3-7020u, 16Gb de memoria RAM y un SSD M.2 de 2Tb de almacenamiento, incluye seis acelerómetros piezoeléctricos de alta sensibilidad (10 V/g) instalados en posiciones estratégicas del cimborrio y un sensor de temperatura y humedad AM2315 con un ESP8266 para la captura de los datos. El sistema de adquisición de datos (DAQ) está compuesto por un chasis cDAQ-9184 y dos módulos NI9230 (Figura 4).



Figura 4. Sistema de captura de los datos

Los acelerómetros de monitorización permanente están instalados en el cimborrio del edificio, aprovechando las llagas de las uniones de la piedra para evitar daños en su estructura histórica (Figura 5).

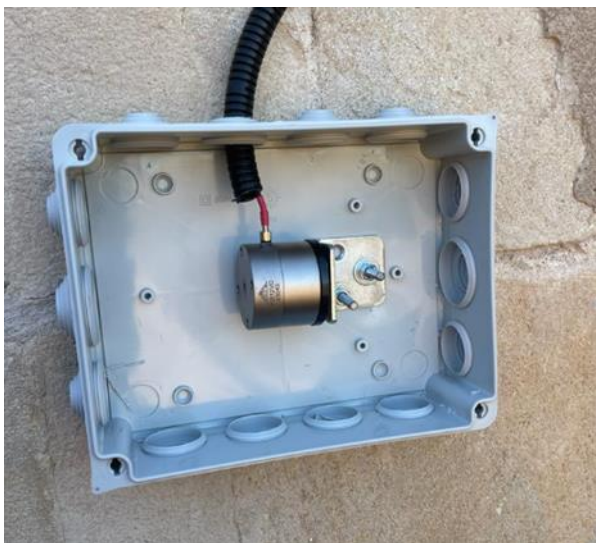


Figura 5 Sensor sísmico permanente instalado.

El sistema de adquisición de datos (DAQ) de National Instruments utiliza el paquete de Python NIDAQMX para capturar los datos con alta precisión. Para evitar el desbordamiento de buffer interno del DAQ, el sistema opera a una frecuencia mínima de 1000 Hz, asegurando una captura continua y estable. Sin embargo, dado que la frecuencia máxima de interés es significativamente menor, y con el objetivo de optimizar los recursos computacionales, las

señales capturadas se deciman a 200 Hz, cumpliendo con la regla de muestreo superior a 2.4 veces la frecuencia máxima, según lo propuesto por *Ventura et al.* [2].

Para gestionar este flujo de datos de manera eficiente, se desarrolló un script en Python que emplea multiprocesamiento con tres procesos paralelos:

- **Captura de datos:** Un proceso dedicado obtiene los datos directamente del DAQ y los almacena en un buffer temporal.
- **Procesamiento de señales:** Un segundo proceso toma los datos del buffer, aplica la decimación utilizando la función “*decimate*” de la biblioteca SciPy, que incorpora filtros FIR y de mediana para mitigar el aliasing y preservar la calidad de las señales capturadas. Además, se asigna un timestamp correspondiente a la frecuencia de los datos ya decimados y se almacenan en una base de datos SQLite3, que actúa como buffer intermedio para operaciones rápidas.
- **Almacenamiento y transferencia:** Un tercer proceso, con un intervalo de tiempo ajustable según la capacidad del servidor, transfiere los datos en paquetes de 20,000 registros desde la base de datos SQLite3 a una base de datos MongoDB para almacenamiento a largo plazo. Una vez transferidos, los datos son eliminados del buffer SQLite3.

Este enfoque permite una gestión eficiente del almacenamiento a largo plazo, reduciendo significativamente el espacio requerido. Pasando de un volumen original de 3.6 GB por hora en una base de datos SQL convencional a solo 1 GB por hora en el sistema NoSQL de MongoDB. Esta arquitectura no solo optimiza el uso de recursos, sino que también

mejora la eficiencia en las operaciones de lectura y escritura, facilitando el acceso a los datos para análisis en tiempo real y procesamiento avanzado.

2.2 Arquitectura de la Información

Los datos son transferidos a MongoDB desde el buffer temporal SQLite3 y organizados en dos colecciones principales (Figura 6):

Colección de aceleraciones: Incluye campos como `_id`, `timestamp` y un array `sensor_data` que almacena lecturas individuales identificadas por `sensor_id`.

Colección de sensores: Contiene metadatos de cada sensor, incluyendo su identificador, posición y sensibilidad.

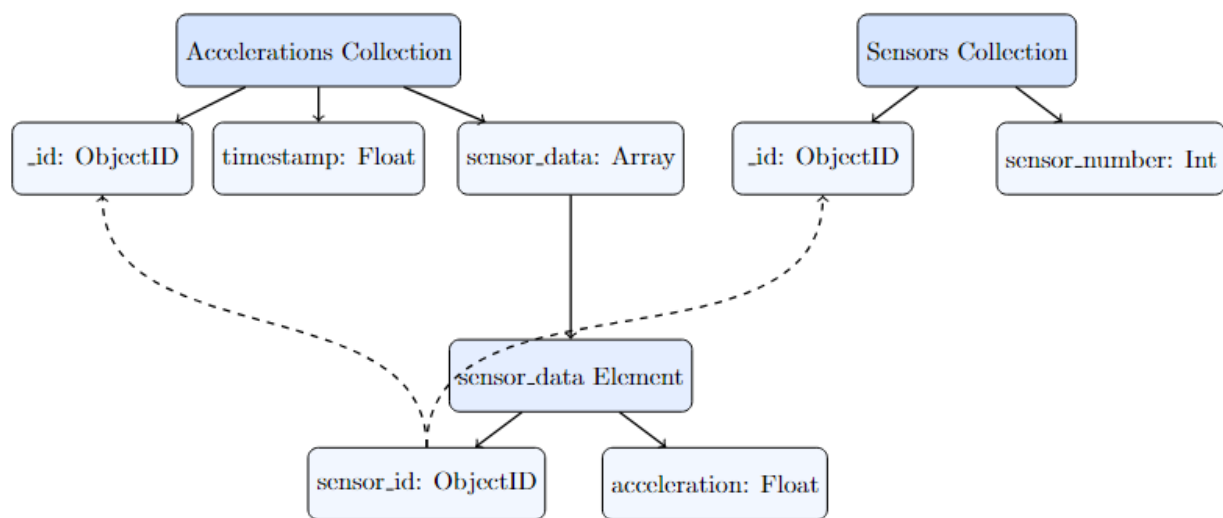


Figura 6. La figura puede disponerse con una anchura equivalente al ancho de página.

La base de datos creada con MongoDB Community Server es una base de datos no relacional (NoSQL) gratuita y código abierto que constituye un elemento central en la arquitectura del sistema de monitorización propuesto y a su vez recomendado por *Brennan et al* [4], diseñada para manejar grandes volúmenes de datos estructurales de manera eficiente y escalable. Gracias a su capacidad de organizar la información de forma jerárquica y flexible, MongoDB permite realizar consultas granulares que simplifican el acceso a datos específicos, esenciales para el análisis en tiempo real y la evaluación histórica de las condiciones estructurales.

Cada entrada en la colección de aceleraciones está estructurada para incluir un identificador único, una marca temporal precisa y un array que almacena datos específicos de los sensores, en este caso las mediciones de aceleración (Figura 7). Esta disposición permite que los datos sean procesados rápidamente para su análisis, asegurando que la eficiencia operativa no se vea comprometida incluso bajo condiciones de alta carga de datos.

```

_id: ObjectId('6762adb359f1797b61816110')
timestamp: 1734519711.2323012
▼ sensor_data: Array (6)
  ▼ 0: Object
    sensor_id: "1"
    acceleration: 0.002566794286183084
  ▼ 1: Object
    sensor_id: "2"
    acceleration: 0.004088239294367515
  ▼ 2: Object
    sensor_id: "3"
    acceleration: 0.00312768573198025
  ▼ 3: Object
    sensor_id: "4"
    acceleration: -0.0007910633250051706
  ▼ 4: Object
    sensor_id: "5"
    acceleration: 0.0015140444344719055
  ▼ 5: Object
    sensor_id: "6"
    acceleration: 0.00245164148631038

```

Figura 7. Ejemplo de un timestamp de datos en la colección Accelerations.

El sistema permite el acceso remoto a los datos mediante una API REST desarrollada con PHP, alojada en un servidor XAMPP en el portátil de monitorización, proporcionando tres tipos de consulta:

- Los últimos minutos definidos por la consulta desde el último registro.
- Un rango de tiempo definido de datos antes y después de un timestamp en particular.
- Una ventana de tiempo entre dos timestamps.

La API facilita el acceso remoto a la información y la descarga en el formato estándar JSON. Esta funcionalidad amplía el alcance del sistema, permitiendo a los usuarios interactuar con los datos desde múltiples ubicaciones y plataformas. Además utiliza un token de cifrado simétrico SHA256 para garantizar la seguridad de las consultas.

Posteriormente, se desarrolló un sitio web dedicado para la supervisión remota del estado estructural (Figura 8 y 9). Este sistema

permite no solo la visualización en tiempo real de los datos de aceleración, sino también la detección y etiquetado automático de anomalías, las cuales se registran en la base de datos para un análisis posterior. Los usuarios pueden descargar la información procesada en formato JSON para su integración en otras herramientas de gestión.

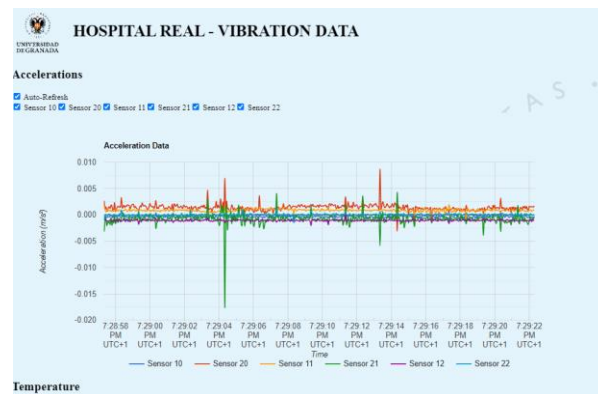


Figura 8. Sistema de captura de los datos Aceleraciones

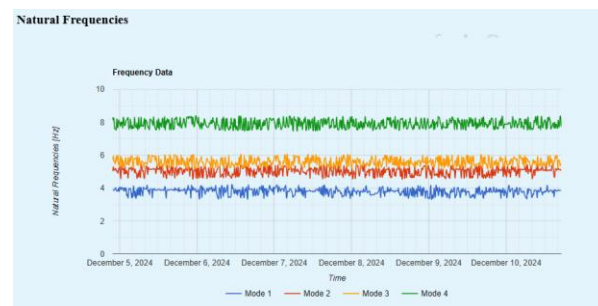


Figura 9. Sistema de captura de los datos Frecuencias Naturales

La capacidad de MongoDB para manejar datos no estructurados es particularmente útil en escenarios donde la naturaleza de las mediciones puede variar considerablemente. Por ejemplo, la base de datos se adapta dinámicamente a diferentes configuraciones de sensores, ampliaciones del sistema y nuevas métricas introducidas en campañas de monitoreo futuras. Este nivel de adaptabilidad asegura su escalabilidad y que el sistema esté preparado para evolucionar con las necesidades del proyecto, consolidándose como una solución robusta y

sostenible para la gestión de la salud estructural del Hospital Real.

2.3 Análisis Modal Operacional Continuo

El algoritmo Covariance Driven Stochastic Subspace Identification (COV-SSI) se emplea para identificar parámetros modales del edificio a partir de registros de vibraciones ambientales. Este sistema, además, incorpora un componente autoatento. Un análisis modal operacional (OMA) se realiza automáticamente cada 2 horas con un dataset de aproximadamente 9 minutos o 2000 veces el último periodo fundamental obtenido [3] para mantener un monitoreo continuo de las condiciones estructurales. Sin embargo, en caso de que el Instituto Geográfico Nacional (IGN) registre un sismo de magnitud superior a un valor definido cerca del Hospital Real, el sistema activa un OMA específico centrado en el timestamp del evento sísmico registrado.

Los resultados de estos análisis se clasifican en la base de datos de OMA con un etiquetado binario: un valor de 0 para análisis programados y un valor de 1 para aquellos correspondiente a eventos sísmicos. Esta información se refleja en tiempo real en la plataforma web, proporcionando a los usuarios una visión clara y diferenciada de los datos analizados y su contexto.

Asimismo, alineado con metodologías avanzadas de monitorización estructural, se está avanzando en la construcción de una ontología específica para estructurar y conectar los datos recogidos [4]. Esta ontología no solo permite la interoperabilidad de los datos, sino que también habilita su integración en un grafo de conocimiento que puede ser empleado para consultas más avanzadas y para entrenar modelos de lenguaje generativos. Estas herramientas, como se destaca en trabajos recientes sobre SHM basados en grafos y

ontologías, permiten un análisis más profundo y contextual de los datos estructurales.

3. Resultados

Los análisis realizados han permitido identificar tres modos principales de vibración en el cimborio del Hospital Real (Figuras 10, 11 y 12), con frecuencias naturales determinadas en 3.880 Hz, 4.992 Hz y 5.575 Hz (Tabla 1) de la campaña extensa. Estos corresponden a modos asociados con movimientos de flexión y torsión que afectan de manera crítica a la estabilidad estructural de la torre. La detección precisa de estas frecuencias ha sido posible gracias al uso de un sistema de adquisición de datos y al procesamiento optimizado de las señales para optimizar los recursos de captura de datos mediante herramientas avanzadas como los filtros FIR integrados en el proceso de decimación, lo que asegura la calidad de las señales y la eliminación de aliasing.

Modo	Frecuencia (Hz)	Naturaleza
1	3.880	Flexión Y
2	4.992	Torsión
3	5.575	Flexión X

Tabla 1. Modos de vibración identificados.

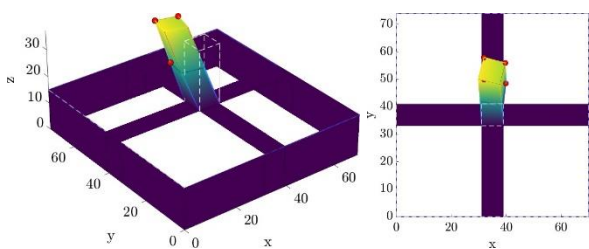


Figura 10. Primer modo de vibración ($f=3.880\text{Hz}$).

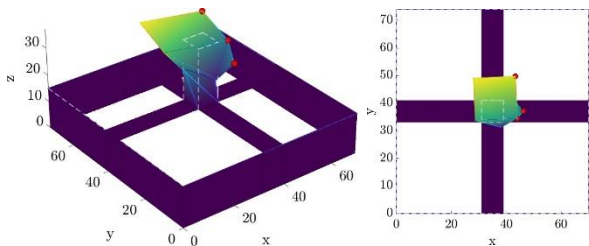


Figura 11. Segundo modo de vibración ($f=4.992\text{Hz}$).

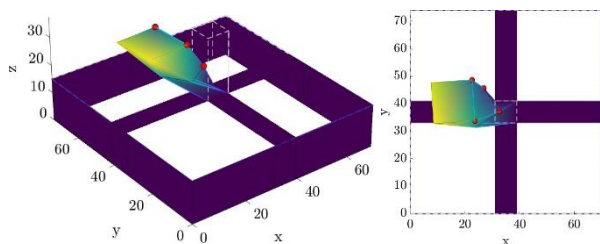


Figura 12. Tercer modo de vibración ($f=5.575\text{Hz}$).

La implementación de una arquitectura de datos que combina bases SQL para almacenamiento temporal y MongoDB para almacenamiento a largo plazo ha sido fundamental para el éxito del sistema. Previamente, el uso exclusivo de una base de datos relacional SQL para almacenar datos resultaba en saturación del almacenamiento al alcanzar los 50GB en un periodo de 15 días, dificultando tanto la escritura como la lectura de nuevos datos. Con la arquitectura actual, el tamaño de los datos almacenados por hora se ha reducido de 3.6GB a 1GB, mejorando a la vez tanto la eficiencia como la accesibilidad de los datos.

Además, la campaña de monitorización permanente en la torre del edificio, donde se han instalado los seis acelerómetros en posiciones estratégicas, garantiza una supervisión continua y detallada del comportamiento dinámico. Este enfoque permite evaluar de forma constante los cambios en las frecuencias naturales y detectar posibles desviaciones que puedan indicar riesgos estructurales. Los datos recopilados se analizan y visualizan en tiempo real a través de una plataforma web diseñada para facilitar el acceso remoto, mejorando la capacidad de respuesta ante eventos críticos.

Finalmente, los resultados obtenidos destacan la importancia de combinar tecnologías avanzadas de captura de datos, almacenamiento y análisis modal operacional para desarrollar un sistema integral de monitorización estructural que no solo preserve la integridad del Hospital

Real, sino que también sirva como modelo para aplicación en otros contextos patrimoniales.

4. Conclusiones

Este trabajo demuestra la viabilidad y el impacto significativo de un sistema avanzado de monitorización de la salud estructural (SHM) aplicado a un edificio histórico como el Hospital Real de Granada. El desarrollo de este sistema ha involucrado la integración de tecnologías de vanguardia en captura y gestión de datos, destacándose por la implementación de una arquitectura flexible y escalable basada en bases de datos SQL y noSQL. Este enfoque ha permitido manejar eficientemente grandes volúmenes de datos estructurales, resolviendo problemas críticos relacionados con el almacenamiento y la accesibilidad de información en tiempo real.

El uso de un sistema de adquisición de datos de alta frecuencia combinado con procesos avanzados de decimación para optimizar la calidad de las señales ha sido esencial en esta etapa del proyecto. La integración de herramientas como SQLite para almacenamiento temporal y MongoDB para gestión a largo plazo ha mostrado ser una solución robusta para superar limitaciones de infraestructura y garantizar la continuidad de las operaciones. Además, el diseño de una API REST y una plataforma web ha facilitado la visualización y el análisis de datos tanto en tiempo real como históricos, mejorando la toma de decisiones basada en datos para la gestión del patrimonio estructural.

El análisis modal operacional (OMA) ha permitido identificar con precisión los modos principales de vibración de la estructura, con un enfoque especial en la torre del Hospital Real, que presenta un comportamiento vibracional único. Esta información ha sido fundamental para diseñar estrategias de monitoreo continuo,

incluyendo la instalación permanente de sensores sísmicos en ubicaciones clave.

En conclusión, este trabajo valida la efectividad de una arquitectura avanzada de SHM para la preservación y gestión de edificios históricos. La combinación de tecnologías modernas, desde sistemas de adquisición hasta herramientas de visualización remota, constituye una base sólida para futuras aplicaciones en otros contextos patrimoniales y estructurales.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto BUILDCHAIN (101092052), financiado por Horizon Europe de la Unión Europea. Adicionalmente, el segundo autor quería expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, por la beca FPU22/03667.

Referencias

- [1] Javier Gallego Roca (2010), Plan Director Hospital Real de Granada.
- [2] Brincker R, Ventura CE (2015) Introduction to operational modal analysis, Wiley Blackwell.
- [3] Tarozzi, M., Pignagnoli, G. & Benedetti, A. Evaluation of the residual carrying capacity of a large-scale model bridge through frequency shifts. J Civil Struct Health Monit 12, 931–941 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s13349-022-00586-0>
- [4] Brennan, D., Gosliga, J., Cross, E., Worden, K. (2025). Foundations of population-based SHM, Part V: Network, framework and database. Mechanical Systems and Signal Processing, 223, 111602.