

Análisis de integridad estructural de edificios patrimoniales: el caso de estudio del Hospital Real, Granada

Analysis of the structural integrity of cultural heritage the case of the Hospital Real, Granada

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

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

^b Ingeniero Naval. MSc en Estructuras, Universidad de Granada. Investigador Predoctoral y PM proyecto Buildchain.
edaroch@ugr.es

^c PhD Dinámica de Flujos Biogeoquímicos y sus Aplicaciones. Universidad de Granada, Universidad de Córdoba y Universidad de Málaga. Investigadora Postdoctoral. mljalón@ugr.es

^d PhD 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

Se presenta el caso de monitorización en continuo del Hospital Real en Granada, un edificio patrimonial de gran valor histórico, artístico y cultural, sobre el que se ha desplegado un sistema de monitorización que proporciona información estructural en *quasi* tiempo real. Los datos recopilados por los sensores, junto con los parámetros estructurales identificados, se publican en tiempo real y están accesibles a través de una API REST. Este trabajo constituye hito en la monitorización de construcciones históricas en España, ya que son muy pocos los edificios patrimoniales que cuentan con un sistema de OMA continuo en nuestro país.

ABSTRACT

This work presents the case of continuous monitoring at the Hospital Real in Granada, a heritage building of great historical, artistic, and cultural value, where a monitoring system has been deployed to provide structural information in quasi real time. The data collected by the sensors, along with the identified structural parameters, are continuously published and made accessible through a REST API. This work represents a milestone in the monitoring of historical constructions in Spain, as very few heritage buildings in the country are equipped with a continuous OMA system.

PALABRAS CLAVE: gemelo digital, monitorización de edificios patrimoniales, OMA, SHM.

KEYWORDS: digital twin, cultural heritage monitoring, OMA, SHM.

1. Introducción

La monitorización de edificios patrimoniales constituye un desafío en la ingeniería estructural

moderna debido a la necesidad, no sólo de preservar su incalculable valor histórico, cultural

y artístico, sino también de garantizar su integridad estructural frente a los riesgos naturales y antropogénicos. En efecto, estas estructuras llevan enfrentándose a lo largo de los siglos a la degradación de sus materiales, a cambios en las cargas de uso, a los efectos climáticos cambiantes y, en regiones sísmicas como Granada, a las acciones provocadas por los terremotos, entre otros.

Ante este desafío, el Análisis Modal Operacional (OMA, por sus siglas en inglés) se está consolidando como una herramienta clave en la monitorización de edificios para la evaluación del estado de salud estructural a partir de la identificación de parámetros modales – frecuencias naturales, modos de vibración y tasas de amortiguamiento – que son sensibles al daño global.

En este trabajo se presenta el caso de estudio de monitorización del Hospital Real de Granada, un edificio histórico de gran relevancia arquitectónica y cultural. En el contexto del proyecto europeo BUILDCHAIN, se ha desplegado un sistema de monitorización en continuo, constituido por sensores sísmicos de alta sensibilidad que registran datos de vibración de manera permanente.

Las series temporales de aceleraciones se utilizan para obtener, mediante técnicas de OMA, información estructural del edificio de forma *quasi* continua. Adicionalmente, se ha optado por un enfoque descentralizado de la información, almacenando todos los datos en un servidor y facilitando su acceso público y descarga mediante una API REST. Este planteamiento facilita la posibilidad de uso adicional de estos datos por parte de la comunidad científica.

El sistema de monitorización planteado constituye el punto de partida para el desarrollo de un gemelo digital de la estructura continuamente actualizado. Además, este caso de estudio representa un hito en la monitorización de construcciones históricas en España, ya que son muy pocos los edificios

patrimoniales que cuentan con un sistema de OMA continuo en nuestro país.

2. Metodología

2.1 Hospital Real

El Hospital Real es un edificio histórico construido en el siglo XVI, que actualmente funciona como sede del Rectorado de la Universidad de Granada y de la Biblioteca Universitaria.

El edificio presenta una planta de cruz griega inscrita dentro de un cuadrado, de 74 m x 70 m, con cuatro patios simétricos ubicados en los ángulos, y un cimborrio que se eleva en el crucero, con una altura total de 37 m. El edificio está dotado de una gran rigidez en ambas direcciones, conferida por los muros de 1 m de espesor que lo constituyen. La Figura 1 muestra una vista general del edificio.

Su gran valor patrimonial, artístico e histórico, unido a su funcionalidad actual, han motivado la elección del mismo como piloto del proyecto BUILDCHAIN.



Figura 1. Vista aérea del Hospital Real.

2.2 Modelo de Elementos Finitos

Como punto de partida para el estudio estructural del edificio, y partiendo de la información contenida en el Plan Director del Hospital Real [1], se ha elaborado un Modelo de

Elementos Finitos de la estructura empleando el software comercial *Abaqus*. La Figura 2 muestra una vista del mismo representando el primer modo de vibración.

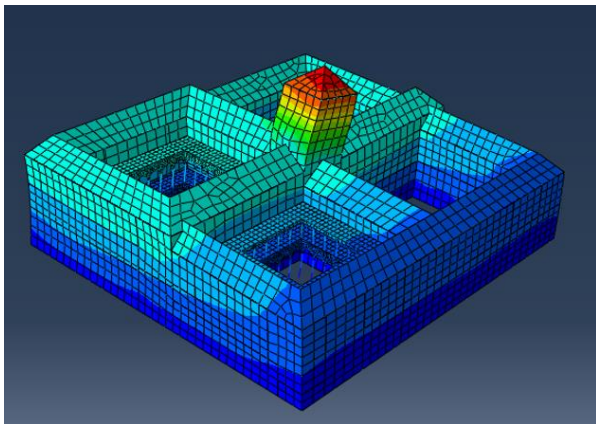


Figura 2. Modelo de Elementos Finitos del Hospital Real.

Este modelo, además de servir de base para la interpretación de los modos de vibración identificados, será posteriormente sometido a una actualización paramétrica basada en las características vibratorias identificadas mediante OMA.

2.3 Sistema de Monitorización

El sistema de monitorización está compuesto por:

- Sensores sísmicos: 6 acelerómetros piezoeléctricos de alta sensibilidad (10 V/g), como el mostrado en la Figura 3, registrando los datos mediante un módulo de adquisición de datos cDAQ-9184 con dos módulos NI9230.
- Sensores climáticos: un sensor de temperatura y humedad AM2315 con una placa ESP8266 para la captura de los datos.
- Ordenador portátil, con procesador Intel i3-7020u, 16Gb de memoria RAM y un SSD M.2 de 2Tb de almacenamiento, almacenando los datos del sistema de adquisición y publicándolos en servidor.

Los acelerómetros se han instalado en el cimborrio del edificio, aprovechando las llagas de las rocas para su fijación, asegurando de este modo que no se produzca ninguna afección

sobre la piedra original del edificio. El sistema de adquisición y el ordenador se han colocado en una caja estanca dentro de la torre.

La adquisición de datos se realiza de forma continua e ininterrumpida.



Figura 3. Detalle de acelerómetro instalado.

2.4 Arquitectura de la Información

La arquitectura de la información es la siguiente: los datos provenientes de los sensores se almacenan en una base de datos (BBDD) temporal de *MySQL*, la cual se va vaciando periódicamente en una BBDD de *MongoDB*, que contiene todos los registros y que queda publicada en el servidor creado por el ordenador local. Para acceder a los datos de dicho servidor, se ha desarrollado una *API REST* que, mediante usuario y contraseña, permite el acceso descentralizado y seguro a la información.

Asimismo, el ordenador local realiza un OMA automático cada 2 horas, registrando los resultados en otra BBDD de *MySQL*, también publicada en servidor. La información de ambas BBDDs (aceleraciones, información climatológica y parámetros modales identificados), queda publicada en una página web en abierto del Hospital Real [2], de modo que sea accesible de forma continua.

2.5 Análisis Modal Operacional

El Análisis Modal Operacional (OMA, por sus siglas en inglés) es una técnica de identificación de parámetros dinámicos (frecuencias naturales, modos de vibración y tasas de amortiguamiento) a partir de los datos de aceleraciones medidos en ciertos puntos de la estructura bajo excitación ambiental. En este trabajo se ha utilizado el algoritmo *Covariance Driven Stochastic Subspace Identification (COV-SSI)*, que permite obtener los parámetros modales mediante un análisis en el dominio del tiempo.

Dado un sistema lineal invariante en el tiempo de múltiples grados de libertad:

$$M \ddot{y}(t) + C \dot{y}(t) + K y(t) = x(t) \quad (1)$$

Donde M , C y K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, y los vectores $x(t)$, $y(t)$ representan las fuerzas y los desplazamientos del sistema, el modelo estado de espacio estocástico discreto puede expresarse como:

$$\begin{aligned} s_{k+1} &= A s_k + w_k; y_{k,l} \\ &= C s_k + v_k \end{aligned} \quad (2)$$

Donde s_{k+1} , s_k son los vectores de estado en los instantes de tiempo $k\Delta t$ y $(k+1)\Delta t$, A y C son las matrices de estado y observabilidad, $y_{k,l}$ son las mediciones de l acelerómetros en el instante de tiempo k , y los vectores w_k y v_k representan la excitación y el ruido (ambos procesos asumidos como gaussianos).

El COV-SSI estima las matrices de estado y observabilidad (A y C) a partir de las matrices de correlación de las mediciones (ver [3] para más detalles). A partir de la matriz C y de la diagonalización de la matriz A :

$$A = \Psi M \Psi^{-1} \quad (3)$$

Los modos de vibración del sistema se obtienen como:

$$\Phi_k = C \Psi_k \quad (4)$$

Las frecuencias y ratios de amortiguamiento se calculan a partir de las expresiones:

$$f_k = \frac{\sqrt{\lambda_k \lambda_k^*}}{2\pi} \quad (5)$$

$$\xi_k = -\frac{Re(\lambda_k)}{2\pi f_k} \quad (6)$$

Donde λ_k^* denota el complejo conjugado de λ_k , siendo éste el k -ésimo polo del sistema, estimado mediante la expresión:

$$\lambda_k = \ln(\mu_k) / \Delta t \quad (7)$$

Donde μ_k es el elemento diagonal k -ésimo de la matriz M (definida en la ecuación 3).

3. Resultados

3.1 OMA en Continuo

En primer lugar, se llevó a cabo una campaña de monitorización de la vibración ambiental para caracterizar dinámicamente la estructura. Fruto de ésta se confirmó que, debido a la gran rigidez en planta del edificio otorgada por los muros, la dinámica vibratoria identificable del edificio se reduce al cimborrio. Asimismo, esta campaña también sirvió para realizar una primera calibración de los parámetros del pretratamiento de las señales y del algoritmo COV-SSI.

Los modos de vibración identificados con interpretabilidad física en esta primera campaña son los tres primeros obtenidos por el modelo de elementos finitos, cuyas frecuencias se resumen en la Tabla 1. Las formas modales se muestran en la Figura 4, Figura 5 y Figura 6, representadas con el software MOVA [4]. Tal y como puede observarse, hay un pequeño acoplamiento de rigidez flexo-torsional, ya que

los modos de flexión identificados tienen cierta componente torsional.

Tabla 1. Modos de vibración identificados.

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

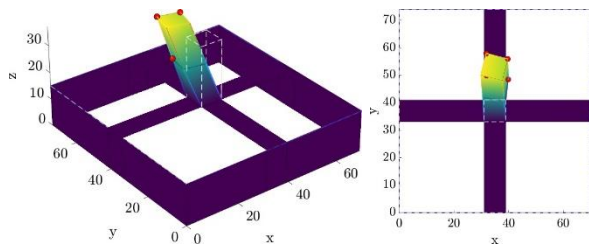


Figura 4. Primer modo de vibración ($f=3.880\text{Hz}$).

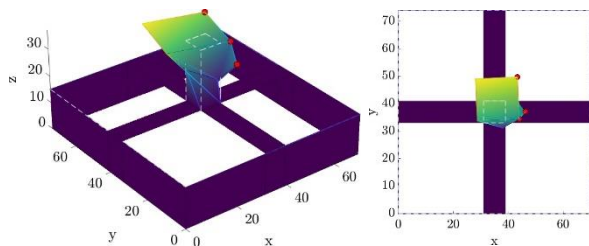


Figura 5. Segundo modo de vibración ($f=4.992\text{Hz}$).

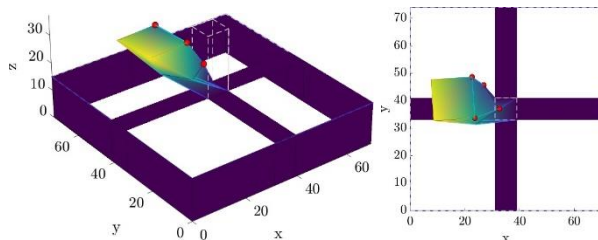


Figura 6. Tercer modo de vibración ($f=5.575\text{Hz}$).

Tras esta primera campaña, y habiendo dejados instalados los sensores de forma permanente en el cimborrio de la estructura, se ha realizado una captura en continuo de las aceleraciones, con una frecuencia de adquisición de 200 Hz, almacenándose estos registros en bruto de aceleraciones en una base de datos.

De forma paralela, cada 2 horas, se lleva a cabo un OMA sobre los datos de aceleraciones, los cuales se someten previamente a un pretratamiento de la señal. El algoritmo empleado es el COV-SSI, con parámetros

calibrados de acuerdo a la primera campaña de monitorización. Cuando el volumen de datos modales identificados ha sido suficiente, se ha llevado a cabo un tratamiento estadístico de los mismos, para eliminar el efecto de las variables ambientales (conocidas gracias al sensor de temperatura y humedad instalado).

3.2 Visualización de Datos en Tiempo Real

Los resultados de la identificación dinámica se muestran en abierto en la página [2]. En ella puede observarse el registro en tiempo real de los datos en bruto de los sensores (Figura 7 y Figura 8), así como las frecuencias de vibración de los modos identificados. Además, mediante API REST, los datos mostrados en esta plataforma pueden descargarse de forma fácilmente accesible. De este modo, queda en abierto para la comunidad científica todo el registro temporal de aceleraciones, permitiendo, por ejemplo, llevar a cabo análisis a posteriori de eventos sísmicos (relativamente frecuentes en la ciudad de Granada).

La plataforma está igualmente preparada para albergar los datos de la inferencia paramétrica de variables del modelo de elementos finitos del edificio relacionadas con la integridad estructural del mismo.

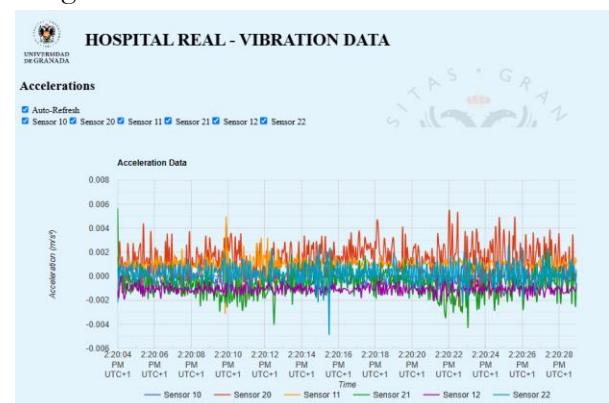


Figura 7. Aceleraciones en tiempo real [2].

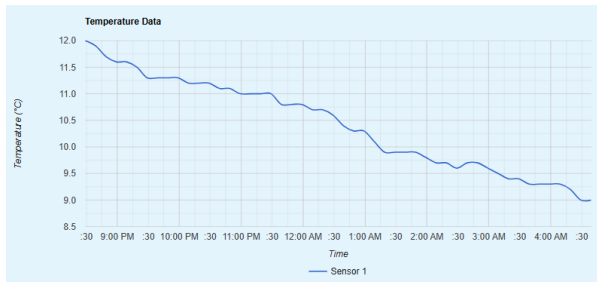


Figura 8. Temperatura en tiempo real [2].

4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado la aplicación práctica de un marco metodológico para la obtención de parámetros modales a partir del registro de vibraciones ambientales en edificios patrimoniales.

El énfasis se ha puesto en la accesibilidad y descentralización de los datos, ya que tanto los registros en bruto de los sensores como los parámetros modales identificados están publicados en un servidor, al que se puede acceder para consulta y del que se pueden descargar los datos mediante la utilización de una API REST.

El trabajo presentado es el punto de partida para la actualización secuencial del modelo computacional del edificio, permitiendo disponer de un gemelo digital estructural del mismo actualizado en *quasi* tiempo real según los datos de vibración ambiental medidos.

5. Referencias

Agradecimientos

Este trabajo de investigación forma parte del proyecto BUILDCHAIN Horizon Europe. BUILDCHAIN ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte Europa de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 101092052. Adicionalmente, el primer autor querría 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] Hospital Real, Vibration Data. <https://upward-prime-turkey.ngrok-free.app/APIRest/plot/>, 2025 (consultada el 20.01.25).
- [3] Juang, J.-N. (1994) Time-Domain Models, en: *Applied System Identification*, Prentice-Hall, Inc., USA.
- [4] García-Macías, E., Ubertini, F. (2020) MOVA/MOSS: Two integrated software solutions for comprehensive Structural Health Monitoring of structures, *Mechanical Systems and Signal Processing* 143: 106830. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106830>.