

# Monitorización del comportamiento mecánico del giraldillo: aplicación de técnicas de detección de daño

A. Romero, M. Solís, P. Galvín, J. Domínguez

*Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Escuela  
Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.  
Camino de los Descubrimientos sin, Teléfono: +34954487293,  
e-mail: msolis@us.es, pedrogalvin@us.es*

## Resumen

En este artículo se presenta una aplicación de técnicas de monitorización y detección de daño estructural sobre un monumento histórico. El Giraldillo es una escultura de bronce de gran tamaño, que corona la torre de la Giralda de la Catedral de Sevilla desde el año 1568. Esta escultura dispone de una estructura interna de barras que le permite acoplarse a un eje sobre el que gira bajo la acción del viento.

Entre 1999 y 2005 fue sometido a un proceso de restauración, incluyendo actuaciones desde el punto de vista mecánico y estructural. Durante su reposición sobre la Giralda se instaló un sistema de instrumentación para realizar un seguimiento de su respuesta mecánica, su funcionamiento como veleta y de su estado de conservación. Para dicha monitorización se han implementado diversas técnicas de detección de daño que permitan advertir un posible deterioro en la estructura soporte del Giraldillo.

**Palabras Clave:** Monumento histórico, monitorización, detección de daño.

## Abstract

This paper outlines an application of damage identification and health monitoring techniques on an historical work of art. The Giraldillo is a big bronze sculpture located on top of the Giralda tower at Seville Cathedral since 1568. This sculpture has an internal beam structure and it rest on an axis fixed to the tower. The wind makes the sculpture rotate over this axis, so it works as a vane.

The Giraldilla was restored from 1999 to 2005, including mechanical and structural restoration. An instrumentation system has been installed during its replacement on top of Giralda tower for monitoring its mechanic response, its operation as vane and its conservation state. Several damage detection techniques have been applied for this.

**Keywords:** Historical buildings, bronze Sculpture, health monitoring, damage detection.

## 1. Introducción

El Giraldillo es una escultura de bronce de grandes dimensiones construida en el año 1568, de gran valor artístico, histórico y simbólico. Está ubicada a 96 m de altura sobre la torre de la Giralda de la Catedral de Sevilla, haciendo la función de veleta.

El conjunto del Giraldillo resulta inaccesible tras su reposición sobre lo más alto de la Giralda, una vez finalizado el proceso de restauración al que se vio sometido entre 1999 y 2005. Por este motivo, y dado el gran valor, singularidad y carácter mecánico de esta obra de arte, se instaló un sistema de instrumentación para la monitorización de su comportamiento mecánico y estado de conservación.

## 2. Descripción del Giraldillo

El conjunto del Giraldillo está compuesto por una lámina de bronce fundido que se une en varios puntos a una estructura interna de barras, la cual se apoya sobre un eje empotrado en la torre, alrededor del cual gira el conjunto. La escultura representa la figura de una mujer que sostiene con la mano derecha un lábaro y con la izquierda una palma (Figura 1). Mide unos 4 m de altura y tiene una envergadura frontal del mismo orden, pesa unos 1500 kg sin contar el eje que la sustenta, de 5.4 m de longitud y 500 kg de peso aproximadamente. Su configuración geométrica hace que gire bajo la acción del viento, indicando con la palma la dirección proveniente de éste.



Figura J. Gira/di/lo sobre la Giralda y su estructura interna.

## 3. Descripción del sistema: sensores, ubicación, objetivos

La mayoría de sensores utilizados se encuentran situados sobre el vástago, el elemento clave para asegurar la estabilidad de la Veleta, analizándose el funcionamiento del Giraldillo a partir de su respuesta mecánica. Las distintas magnitudes registradas por el sistema y los distintos tipos de sensores utilizados son las siguientes.

Velocidad y dirección del viento, medida de esfuerzos en una sección del vástago mediante tres montajes a puente completo, medida de aceleraciones en tres secciones del eje, registrándose movimientos en las direcciones SO-NE y SE-NO y la medida de la inclinación del vástago en dos secciones del eje, detectándose la inclinación en las direcciones anteriores. Para los conservadores y restauradores resulta de interés la medida de la tendencia a la corrosión por pares galvánicos producidos en las uniones entre los distintos metales que se dan en el conjunto de la escultura-estructura y el registro de la evolución de la temperatura y la humedad en el exterior e interior de la

escultura, quedando estos resultados fuera del alcance de este artículo. Se tienen en total 21 canales de medida asociados a las distintas magnitudes a registrar.

Los cables de los sensores descienden hasta la cúpula de la torre, donde se conectan en una caja de conexiones a una manguera de 44 hilos de pares cruzados que se conecta al sistema de adquisición de datos. Para cada acelerómetro se dispone de un cable independiente.

## 4. Resultados

Para que los registros de datos no sean innecesariamente extensos la frecuencia de muestreo se establece en función de la velocidad del viento, la principal acción sobre la Veleta. El umbral de la velocidad del viento para el que la repuesta dinámica del Giraldillo empieza a cobrar interés se sitúa entorno a 8 *mis*, estableciéndose una frecuencia de muestreo de 20 Hz. Para velocidades inferiores a ésta se registra la evolución de las magnitudes no asociadas al carácter dinámico a 0.005 Hz.

### 4.1. Posición del Giraldillo

El conjunto del Giraldillo no se encuentra perfectamente centrado sobre su eje de giro, produciéndose un momento flector de desequilibrio registrado por los puentes de extensometría. Se ha desarrollado un método que pennite obtener la orientación del Giraldillo con suficiente precisión a partir de dicho flector [1] (Figura 2).

El Giraldillo presenta dos orientaciones preferentes, NE y SO (Figura 3), coincidentes con las direcciones del viento predominante en Sevilla (Figura 4). Se observa una tendencia predominante SO en la orientación del Giraldillo debida a una mayor intensidad de dichos vientos. El 42 % del tiempo está correctamente orientado con la dirección del viento siempre y cuando la velocidad de éste sea significativa, pudiéndose concluir que el Giraldillo está correctamente orientado a partir de los 8 *mis* (Figura 5).

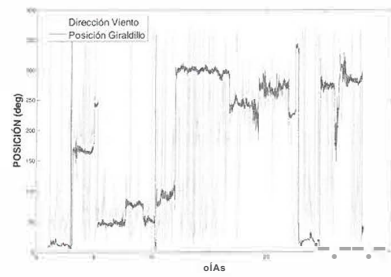


Figura 2 Posición del Giraldilla - Dirección del Viento (febrero 2006)

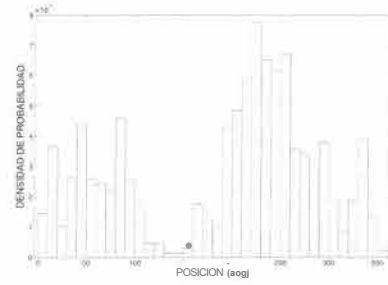


Figura 3. Posición estadística del Giraldilla (octubre 2005 -octubre 2006)

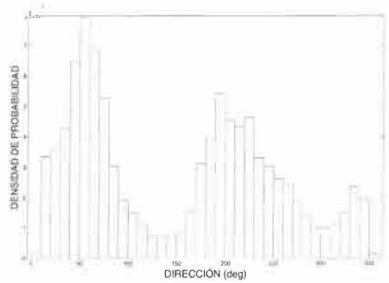


Figura 4 Dirección estadística del viento (octubre 2005 - octubre 2006)

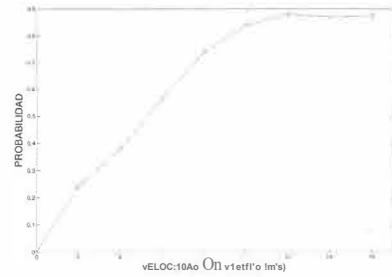


Figura 5 Curva probabilidad correcta orientación - velocidad del viento (octubre 2005 - octubre 2006)

#### 4.2. Esfuerzos mecánicos producidos por el viento

El registro de los esfuerzos de flexión junto con la velocidad del viento permite establecer una correlación parabólica entre ambos (1) (Figura 6).

$$M(v) = 0.789 v^2 - 7.030 v + 38.16 \quad (1)$$

Donde  $M$  es el momento flector (Nm) en valor RMS y  $v$  la velocidad del viento (m/s). Esta expresión se ha obtenido a partir de los autoespectros [2] de los momentos flectores medidos en cada dirección. Una variación con el tiempo de esta correlación sería indicativa de un deterioro en el sistema de giro de la Veleta debido al aumento de los esfuerzos producidos por una reiterada desalineación con el viento.

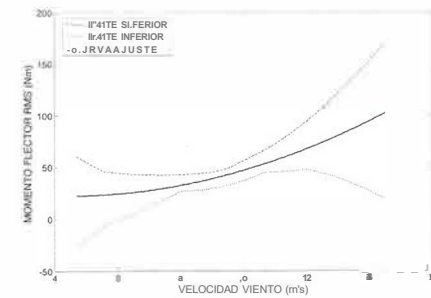


Figura 6 Correlación Momento Flector - Velocidad viento (octubre 2005 -octubre 2006).

#### 4.3. Caracterización dinámica de la estructura. Detección de daño.

A partir de las medidas registradas con los acelerómetros y clinómetros se ha llevado a cabo una identificación de los parámetros modales de la estructura usando las técnicas de Peak-Picking [3] y Descomposición en el Dominio de la Frecuencia [4]. El Giraldillo y la Giralda vibran como una viga en ménsula cuya primera frecuencia natural es de 1.025 Hz y 0.68 Hz, respectivamente. Estos resultados son acordes con los obtenidos a partir de modelos de elementos finitos y con los resultados de la identificación de los parámetros modales obtenidos de la medida de la respuesta dinámica de la torre [5].

Las técnicas de detección de daño empleadas están basadas en el estudio de la variación de las frecuencias naturales [6] (Figura 7), en la variación de la forma y de la curvatura de los modos [7,8] (Figura 8, Figura 9) y en la variación de la matriz de flexibilidad [9, 10] (Figura 10). Se ha comparado la respuesta dinámica de la estructura con un estado de referencia, aplicándose estas técnicas independientemente sobre cada una de las secciones instrumentadas. Para ilustrar el trabajo realizado se muestran sólo los resultados los referentes a la dirección NO-SE.

Durante el periodo considerado no se han observado tendencias en los distintos parámetros de control que alerten sobre algún cambio en el comportamiento de la estructura del vástago. Este tipo de análisis está indicado para un seguimiento a largo plazo donde se puedan percibir ciertas tendencias o cambios en las propiedades dinámicas de la estructura que indiquen la necesidad de realizar algún tipo de intervención.

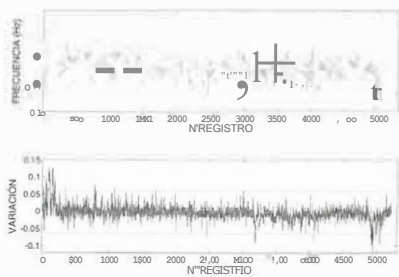


Figura 7. Evolución de la 1ª frecuencia natural (octubre 2005 -octubre 2006)

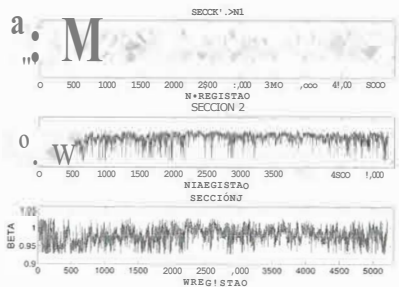


Figura 9. Evolución del parámetro  $J_p$  (Método Stubs) (octubre 2005 -octubre 2006)

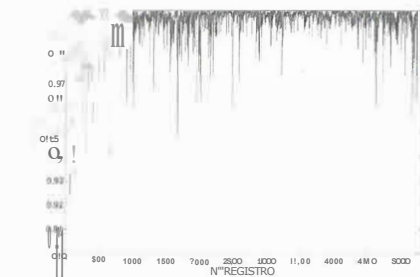


Figura 8. Evolución del MAC (octubre 2005 -octubre 2006)

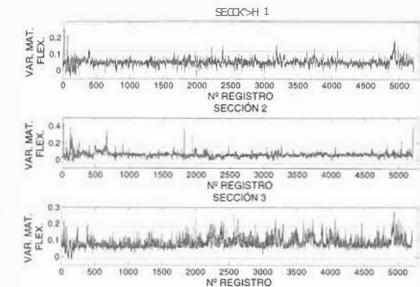


Figura 10. Evolución de la variación de la matriz de flexibilidad (octubre 2005 - octubre 2006)

## 5. Conclusiones

El sistema de instrumentación ha permitido obtener información relevante y de gran interés del comportamiento del Giraldillo y de su estado de conservación. Además, las técnicas implementadas permitirán disponer a largo plazo de una herramienta útil para diagnosticar un posible deterioro de la estructura del Giraldillo y advertir de la necesidad de realizar una posible intervención de restauración en el futuro.

## 6. Referencias

1. A. Romero, *Sistema de seguimiento y análisis del comportamiento mecánico del Giraldillo*, Proyecto Fin de Carrera, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, (2007).
2. P. Welch, *IEEE transaction on audio and electroacoustics*, Vol. (15) (1967), Issue 2 70-73.
3. J. Bendat, A. Piersol, *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. John Wiley & Sons, New York, (1993)
4. R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, *Smart Mater. Struct.* Vol. (10) (2001), 441-445.
5. Grupo de Estructuras, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, *Aspectos estructurales de la restauración del giraldillo*, Informes para la Comisión Técnica del Giraldillo, (2004).
6. S. W. Doebling, C. R. Farrar, M.B. Prime, D. W. Shevitz, *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical system from changes in their vibration characteristics. A literature review*, Group CIC-1, New Mexico, (1996).
7. A.K. Pandey, M. Biswas, M.M. Samman, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. (145) (1991) Issue 2, p. 321-332.
8. N. Stubbs, J. -T. Kim, K. Topole, *Proc. of ASCE 10th structures congress*, p. 543, (1992).
9. A.K. Pandey, M. Biswas, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. (169) (1994), Issue 1 3-17.
10. R. Rojas, *Detección de fallos en estructuras mediante la medida de la variación de sus propiedades dinámica*, Proyecto Fin de Carrera, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, (2006).

## 7. Agradecimientos

Este artículo forma parte del proyecto "Seguimiento instrumental y análisis del comportamiento mecánico y físico del Giraldillo" financiado por el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.