

➔ Criterios

Sistema de seguimiento y análisis del comportamiento mecánico del Giralddillo

Mario Solís Muñoz, Antonio Romero Ordóñez, Pedro Galvín Barrera y José Domínguez Abascal
Grupo de Estructuras, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla

Resumen

Entre 1999 y 2005, el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico se encargó de llevar a cabo un intenso proyecto de restauración integral del Giralddillo que culminó con su reposición sobre la torre de la Giralda. Dada la inaccesibilidad tras su reposición y su carácter mecánico como veleta, resulta conveniente disponer permanentemente de información acerca de su comportamiento. Así, en octubre de 2005 se inicia el proyecto “Seguimiento instrumental y análisis del comportamiento mecánico y físico del Giralddillo”, financiado por el IAPH. Este proyecto supone la puesta en marcha de un complejo y singular sistema de monitorización por su especial ubicación, sus características y su finalidad.

En este artículo se realiza una descripción del sistema de instrumentación instalado y del proceso de gestión y análisis de los datos obtenidos. Se presentarán también algunos de los resultados más significativos alcanzados durante los dos primeros años de funcionamiento del sistema.

Palabras clave

Análisis | Detección de daños | El Giralddillo | Escuela Técnica de Ingenieros | Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico | Monitorización de estructuras | Proyectos | Sensores | Sistema de instrumentación | Universidad de Sevilla



🕒 El Giraldillo durante su reposición sobre la Giralda / FOTO: JOSÉ MANUEL SANTOS MADRID, IAPH



Imagen del Giraldo durante el proceso de restauración / FOTO: JOSÉ MANUEL SANTOS MADRID, IAPH

El grueso de la restauración llevada a cabo en el IAPH lo constituyen la sustitución de la estructura interna de 1770, la construcción de un nuevo sistema de refuerzos internos y la adecuación del vástago de apoyo sobre la Giralda

INTRODUCCIÓN

El origen de la torre de la Giralda data de la segunda mitad del siglo XII, cuando se erigió como alminar de la nueva mezquita de Sevilla, construida en los terrenos que actualmente ocupa la Catedral. Del alminar se conserva hoy día el cuerpo principal, constituyendo el primer cuerpo de la torre de la Giralda. Desde la conquista de Sevilla en 1248 por Fernando III de Castilla, la torre sufrió varias remodelaciones en su remate hasta alcanzar su aspecto actual tras las obras de acrecentamiento de la torre diseñadas y dirigidas por el arquitecto Hernán Ruiz en el siglo XVI. Esta intervención supuso la construcción de los cuerpos superiores de la torre, culminándose con la colocación en 1568 del remate constituido por la escultura-veleta conocida como el Giraldillo y originalmente denominada "El Coloso de la Fe Victoriosa".

La fundición del Giraldillo se realizó siguiendo la técnica a la cera perdida, de pie y con una sola colada, constituyendo una de las esculturas en bronce más significativas del Renacimiento por su valor artístico pero también por su valor técnico dadas sus dimensiones y su carácter de ingenio mecánico.

El Giraldillo representa la figura de una mujer que con la mano derecha sostiene una gran bandera o lábaro con su mástil, y con la izquierda una palma. Una estructura interna de barras de hierro le da consistencia y la une al eje sobre el que gira el conjunto. La estructura forma una especie de percha sobre la que cuelga la figura de bronce, compuesta básicamente por tres barras horizontales o crucetas y dos tirantes verticales entre ellas. El vástago de giro de la escultura se une rígidamente a la Cúpula del Penacho de la Giralda, acabando en su extremo superior en una punta de forma ojival que encaja en la pieza central de la cruceta superior de la estructura interna del Giraldillo, a la altura del pecho, de forma que éste es el único punto de apoyo y giro de la escultura.

En 1770 se realizó en el Giraldillo la primera gran obra de mantenimiento desde su instalación. La escultura había quedado dañada tras el terremoto de Lisboa de 1755, por lo que fue desmontada y su estructura interna original fue sustituida por otra nueva.

Posteriormente en los años noventa se inicia un nuevo proceso de restauración integral del Giraldillo, tras algunas intervenciones menores realizadas durante los años ochenta en las que se había advertido que tenía unas orientaciones preferentes de la que era difícil moverlo debido a que el sistema de giro estaba defectuoso (JIMÉNEZ, 1988). En 1997 el Giraldillo es descendido a la Azotea de las Azucenas de la Giralda para evaluar con mayor precisión su estado de conservación. En 1999 se inicia finalmente el proceso de restauración definitivo realizado por el IAPH y que finalizará con la reposición del Giraldillo sobre la torre de la Giralda en el año 2005, desmontando para ello la réplica que lo había sustituido temporalmente, que fue realizada también en bron-

ce y para la que se instaló una nueva estructura de apoyo sobre la torre. El grueso de esta restauración lo constituye la sustitución de la estructura interna de 1770 por una nueva, la construcción de un nuevo sistema de refuerzos internos para la escultura, y la adecuación del vástago de apoyo sobre la Giralda.

Dado el valor de la pieza en cuestión, su inaccesibilidad y su carácter mecánico, resulta conveniente disponer permanentemente de información acerca de su comportamiento y estado de conservación. Por ello, durante el proceso de reposición del Giraldillo sobre la Giralda se llevó a cabo el diseño, instalación y puesta en marcha de un sistema de instrumentación que sirviera para controlar en la medida de lo posible el funcionamiento de la Veleta, registrar las acciones a las que se ve sometida e incluso detectar algún posible deterioro en su estado de conservación. Así, en octubre de 2005 se pone en marcha el proyecto titulado "Seguimiento instrumental y análisis del comportamiento mecánico y físico del Giraldillo", financiado por el IAPH y encargado al Grupo de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, que ya se había responsabilizado anteriormente de los aspectos estructurales de la restauración del Giraldillo.

EL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

La mayoría de sensores que forman parte del sistema de instrumentación están instalados sobre el vástago, el cual es el elemento fundamental de cara a mantener la estabilidad del conjunto. Además, debido a la inaccesibilidad de la escultura y a su carácter giratorio, se descartó la instalación de sensores sobre la escultura y su estructura interna debido al alto coste y a la complejidad de operación e instalación.

Las técnicas implementadas para estudiar el comportamiento del Giraldillo se basan en el análisis de la respuesta del conjunto formado por la escultura y su estructura portante ante cargas de servicio, siendo el viento la principal acción que excita dicho sistema. El sistema de instrumentación instalado permite un registro continuo de datos que es gestionado de forma remota desde la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Las magnitudes registradas recogen el comportamiento mecánico del Giraldillo y el ambiente en el que éste se encuentra. Concretamente se registran las siguientes magnitudes:

Esfuerzos mecánicos en el eje de giro en la sección comprendida entre la peana y la estructura del pararrayos, mediante tres montajes a puente completo con bandas extensométricas.

Aceleración en tres secciones del eje de giro y en dos direcciones. Para ello se han instalado seis acelerómetros a lo largo del vástago que permiten medir la aceleración del movimiento del vástago en las direccio-

Dado el valor de la pieza en cuestión, su inaccesibilidad y su carácter mecánico, resulta conveniente disponer permanentemente de información acerca de su comportamiento y estado de conservación

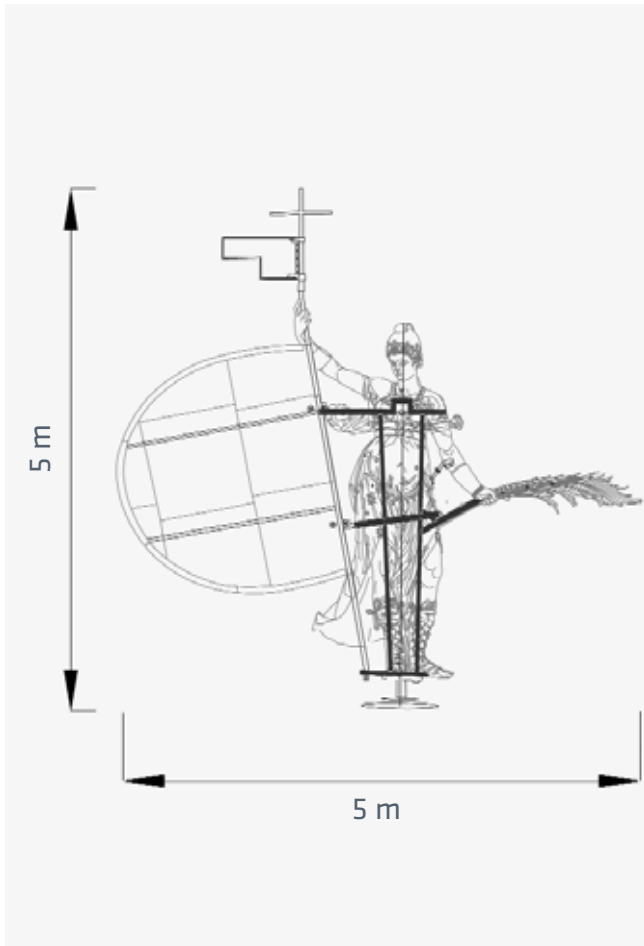


📍 El Giraldillo durante su reposición sobre la Giralda / FOTO: JOSÉ MANUEL SANTOS MADRID, IAPH

nes Suroeste-Noreste (SO-NE) y Sureste-Noroeste (SE-NO), que son las direcciones de movimiento excitadas predominantemente por la acción del viento. Los acelerómetros se encuentran ubicados en el espacio comprendido entre los pies de la escultura y la peana y en el tramo del vástago interior a la tinaja.

La inclinación del Giraldillo se registra mediante cuatro clinómetros en las direcciones SO-NE y SE-NO. Estos sensores están instalados en el espacio libre comprendido entre los pies de la escultura y la peana y en el primer tramo del eje por encima de las cartelas de la unión a la cruce superior en el interior de la cúpula del penacho, que es donde se considera que se produce el empotramiento del eje.

Para la caracterización de la acción del viento se ha instalado un anemómetro y una veleta en la estructura del pararrayos, registrándose así la velocidad y dirección del viento incidente sobre el Giraldillo.

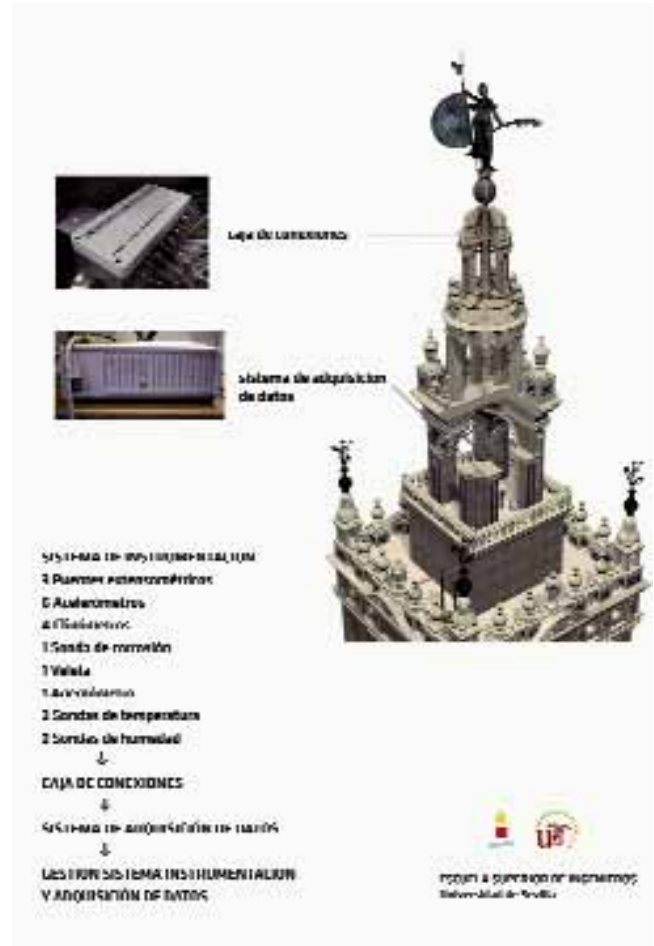


④ Silueta del Giralillo con esquema de su estructura interna y cotas de sus dimensiones / FUENTE: ESCUELA DE ESTUDIOS ÁRABES, GRANADA, GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA

El ambiente externo e interno en que se encuentra la escultura se registra mediante un par de sondas de temperatura y humedad ubicadas en el exterior y en el interior de la tinaja.

En el conjunto formado por el Giralillo existen uniones entre diferentes metales, que puede dar lugar a un proceso de corrosión por la existencia de pares galvánicos entre estos materiales. Por un lado, el bronce de la escultura se une al acero inoxidable de su estructura interna, mientras que el acero al carbono del tramo inferior del vástago se une al acero inoxidable del tramo superior. Para controlar la posible tendencia a la corrosión en estas uniones se dispone de una sonda de corrosión instalada en el interior de la peana, donde las condiciones ambientales de temperatura y humedad son similares a las del interior del Giralillo.

Los cables de todos los sensores, exceptuando los de los acelerómetros, llegan a una caja de conexiones situada en la cúpula del penacho,



⑤ Infografía con esquema del Giralillo y su sistema de instrumentación sobre la Giralda / FUENTE: DPTO. INFOGRAFÍA DEL *DIARIO DE SEVILLA* A PARTIR DEL PROYECTO "SEGUIMIENTO INSTRUMENTAL Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y FÍSICO DEL GIRALDILLO"

donde se conectan a una manguera de 44 hilos de pares cruzados de una longitud de 40 m. La manguera y los seis cables correspondientes a los acelerómetros descienden siguiendo el vástago de los cuerpos superiores de la Giralda hasta el cuerpo del pozo, llegando al cuerpo del reloj a través del pozo que comunica a ambos. Todo el conjunto de cables se conectan al equipo de adquisición de datos instalado en la sala del cuerpo del reloj, que es el punto más alto de la Giralda al que se puede acceder sin dificultad. En este recinto se dispone de una conexión a internet que permite la gestión remota del sistema.

RESULTADO

El objeto del proyecto de monitorización del Giralillo es caracterizar por un lado las acciones a las que se ve sometido y por otro lado realizar un seguimiento de su respuesta, para procesar posteriormente estos

El sistema de instrumentación instalado permite un registro continuo de datos gestionado de forma remota desde la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla

datos mediante técnicas de detección de daño que permitan identificar un posible deterioro estructural en el vástago del Giraldillo.

Los métodos tradicionales de detección de daño se han basado en técnicas de inspección visual donde un técnico cualificado determinaba la existencia de fallos. Esta técnica está limitada a estados de daño que puedan ser detectados mediante medios ópticos, por lo que daños que no sean de carácter superficial no podrían ser cuantificados. Para solventar esta dificultad se han empleado otras técnicas como son el uso de partículas magnéticas, radiografías industriales, gammagrafías y ultrasonidos. Todas estas técnicas requieren una actuación in situ para su realización y que la ubicación de la zona dañada sea conocida a priori y accesible. Dada la inaccesibilidad del Giraldillo no es posible usar estas técnicas y es necesario recurrir a nuevos métodos de detección de daño.

La necesidad de métodos de detección de daño de forma global para su aplicación en estructuras complejas ha sido determinante para el desarrollo de aquéllos que estudian los cambios en las características mecánicas de las estructuras. Todos estos métodos se basan en la idea de que el deterioro de un sistema mecánico produce una variación en su comportamiento y en su funcionamiento (DOEBLING et ál., 1996). La detección y la cuantificación de estas variaciones respecto a un estado de referencia en ausencia de daño son la base de las técnicas que actualmente se aplican en el Giraldillo para la evaluación de su correcto funcionamiento como veleta y para el control de su estado de conservación.

El sistema mecánico constituido por el Giraldillo y su estructura portante poseen dos elementos claves: el mecanismo de giro para asegurar un correcto funcionamiento como veleta y el eje de giro para mantener la estabilidad del sistema. Un deterioro en el mecanismo de giro produciría unas posiciones preferentes del Giraldillo y unos desfases importantes con la dirección del viento, aumentando el nivel de velocidad del viento necesario para hacerlo girar. Por otro lado, un deterioro en el eje de giro, ya sea en las uniones entre los diferentes tramos que lo forman o bien en la unión a la cruceta superior de la cúpula del penacho, produciría una pérdida de rigidez y disminuiría su capacidad portante, lo que en último extremo pondría en peligro la estabilidad del conjunto. Para detectar la presencia de un estado de daño en el eje de giro se evalúa la respuesta dinámica del Giraldillo debida a las diferentes acciones que actúan sobre éste, realizando un análisis espectral de las señales registradas por acelerómetros, clinómetros y puentes de extensometría. Este análisis espectral incluye la aplicación de las técnicas de peak-picking (BENDAT y PIER-SOL, 1993) y descomposición en el dominio de la frecuencia (BRINCKER et ál., 2001), que permiten obtener distintos parámetros modales asociados a la respuesta dinámica de la estructura. Las técnicas de detección de daño estudian la evolución a largo plazo de estos parámetros modales realizándose caracterizaciones estadísticas que permiten evaluar las desviaciones en el comportamiento del Giraldillo.

A continuación se presentarán las conclusiones más importantes obtenidas a partir de los registros de las distintas magnitudes medidas y, finalmente, los resultados más importantes obtenidos a partir de las técnicas de detección de daño. Los resultados que se presentan comprenden los dos primeros años de funcionamiento del sistema.

Temperatura, humedad y corrosión

Se han registrado nítidamente los ciclos diarios de temperatura y humedad en el interior y exterior de la escultura, siendo más acusadas las variaciones en el exterior. En el caso de la temperatura, la diferencia típica entre el interior y el exterior es de 5 °C. En el caso de la sonda de corrosión, se ha observado cierta correlación entre la humedad interior y los potenciales galvánicos registrados, lo cual indica que el ambiente húmedo acelera el proceso de corrosión.

Dirección y velocidad del viento

El registro de la dirección y velocidad del viento es necesario para caracterizar la acción principal a la que se ve sometido el Giraldillo y que provoca sus movimientos como veleta y las oscilaciones y esfuerzos mecánicos más relevantes sobre su estructura soporte.

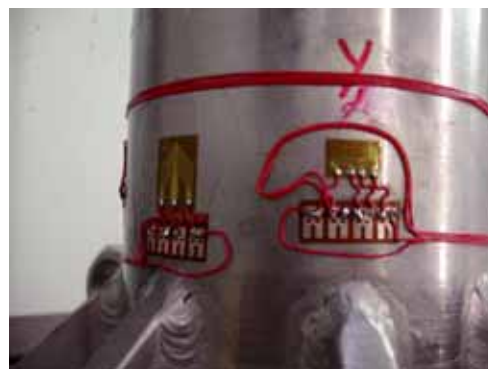
La distribución estadística de estas variables ha permitido comprobar que los vientos predominantes en Sevilla corresponden aproximadamente con las direcciones Noreste (45°) y Suroeste (225°), mientras que la velocidad del viento típica es del orden de 2 m/s.

Estudio de la orientación del Giraldillo

El Giraldillo no se encuentra siempre correctamente alineado con la dirección del viento, debido a su elevada masa y al rozamiento que es necesario vencer en su sistema de giro. Cuando no está orientado con la dirección de viento, los esfuerzos producidos en el vástago del Giraldillo debidos a la acción del viento son mayores ya que existe una mayor superficie de la escultura que se opone a éste. Por otra parte, una reiterada desalineación de la Veleta con la dirección del viento sería indicativa de un desgaste en el mecanismo de giro. Por todas estas razones, resulta de gran interés el estudio de la orientación del Giraldillo. El peso total de la escultura y su eje es de 1 705 kg, de los cuales unos 190 kg corresponden al lábaro y a los estandartes superiores, unos 96 kg a la palma y 215 kg al brazo izquierdo relleno de plomo. Estos elementos se pueden considerar como un sistema de cargas excéntricas que soportan la escultura y su estructura de barras internas. La escultura soporta más peso del lado izquierdo que del lado derecho, pero en este lado la carga está menos separada del eje, por lo que tan sólo existe un pequeño desequilibrio del lado del lábaro. El centro de masas de la escultura no está contenido por tanto en el eje del vástago del Giraldillo, existiendo una excentricidad de unos 120 mm. Este desequilibrio produ-

↓ Pegado de bandas extensométricas sobre el eje /

FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA



↓ Acelerómetro y clinómetro en la estructura del pararrayos /

FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA





④ Anemómetro y veleta sobre la estructura del pararrayos / FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA



④ Cableado e instalación de sonda de temperatura y humedad en el interior de la Tinaja / FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ce un esfuerzo de flexión constante en el eje de giro que es registrado mediante los dos puentes de extensometría. A este esfuerzo de valor constante se suma el provocado por la acción del viento sobre la escultura. La componente producida por el viento provoca pequeñas oscilaciones en torno a un nivel cuasi estacionario relacionado con la excentricidad del centro de masas del Giraldillo y la orientación que tenga en cada momento, de forma que la detección de las variaciones de estos niveles permiten conocer en todo momento la orientación del Giraldillo.

Para poder evaluar el funcionamiento del Giraldillo como veleta es importante estudiar su posición, comparándola con la dirección del viento y estableciendo una correlación entre la velocidad de éste y el desfase que existe entre ambos. Para ello son de gran interés los datos registrados desde octubre de 2005, que han permitido disponer de resultados estadísticos de la posición del Giraldillo, de la dirección del viento y del desfase que existe entre ambos, permitiendo evaluar la probabilidad de que el Giraldillo esté correctamente orientado ante una determinada velocidad del viento. El análisis de todos estos resultados ha permitido realizar un seguimiento del funcionamiento del nuevo mecanismo de giro desde la reposición del Giraldillo, no advirtiéndose ningún deterioro de éste. La posición del Giraldillo y la dirección del viento presentan distribuciones estadísticas muy similares, resultado que se puede corroborar con la distribución del desfase estadístico entre ambos, pudiéndose afirmar que el 45% del tiempo el Giraldillo se encuentra correctamente orientado con el viento. La distribución de probabilidad de una correcta orientación para distintos valores de la velocidad del viento indica que para asegurar que el Giraldillo se orienta según la dirección del viento es necesaria una velocidad de 40 km/h (11 m/s), si bien con vientos de 20 km/h existe una probabilidad del 50% de que su orientación sea la correcta.

Esfuerzos e inclinación del eje de giro

Una de las sollicitaciones más importantes a las que se ve sometida la estructura portante del Giraldillo es la acción del viento. Su aleatoriedad y su variabilidad hacen que sea de especial importancia el estudio de la respuesta del eje de giro. Durante el proyecto de reposición del Giraldillo se tuvo la oportunidad de observar in situ su comportamiento ante la acción del viento, comprobándose que la oscilación predominante se da en sentido frontal a la figura, independientemente de la acción del viento. Estas observaciones se vieron corroboradas posteriormente cuando se analizaron los registros dinámicos del movimiento del Giraldillo que registran los acelerómetros y los clinómetros.

A partir del análisis espectral de las señales de los acelerómetros y los clinómetros se ha comprobado que 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. Dada la predominancia de este movimiento como respuesta a la acción del viento es importante obtener una caracterización dinámica de los esfuerzos que se producen en el eje de giro y de la inclina-

ción del Giraldirlo en torno a la frecuencia de 1.025 Hz. Se ha obtenido una correlación tanto del esfuerzo flector en el eje de giro como de su inclinación con la velocidad del viento. La evolución de estas magnitudes se ajusta con un grado de exactitud suficientemente bueno mediante una curva parabólica, lo cual es lógico teniendo en cuenta que la presión dinámica ejercida por el viento es proporcional al cuadrado de su velocidad.

En la figura correspondiente (ver p. 106, abajo izquierda) se presentan las curvas de ajuste de los esfuerzos flectores obtenidas para los periodos octubre 2004-octubre 2006 y octubre 2006-diciembre 2007. Además de las curvas de ajuste se representan en color azul el límite de dispersión de los valores asociado a un valor de 3 veces la desviación típica de los valores obtenidos para cada velocidad de viento. Se puede apreciar cómo los valores obtenidos para ambos periodos son bastante similares, existiendo muy poca diferencia en los intervalos más habituales de velocidad de viento, para los que existe un mayor número de medidas.

A lo largo de los próximos años, un crecimiento en los valores de los esfuerzos provocados podría ser un indicio de deterioro en el mecanismo de giro de la veleta.

La inclinación del Giraldirlo producida por la acción del viento se registra mediante cuatro clinómetros colocados en dos secciones del vástago y en dos direcciones perpendiculares. Los clinómetros que están instalados en la sección que se encuentra por encima de las cartelas de la unión a la cruceta superior de la cúpula del penacho no registran la inclinación del Giraldirlo en su movimiento debido al viento, midiéndose sólo la inclinación de la Giralda cuando el viento incide sobre ésta. Esto corrobora la hipótesis de que en esta sección se produce un empotramiento del eje de giro en la torre.

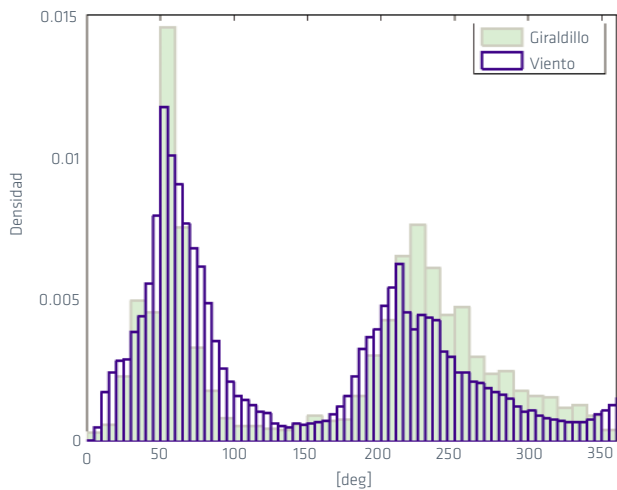
Los valores medios de la amplitud del movimiento de inclinación registrados para vientos de 60 km/h son de 0.001° para el Giraldirlo y de 0.015° para la Giralda. Para vientos inferiores a 30 km/h, la inclinación del Giraldirlo y de la Giralda son menores a 0.0004° y 0.005°, respectivamente.

Un crecimiento en la amplitud del movimiento registrado por los clinómetros en función del viento podría ser un indicio de deterioro en el sistema de giro del Giraldirlo o un debilitamiento de su estructura soporte.

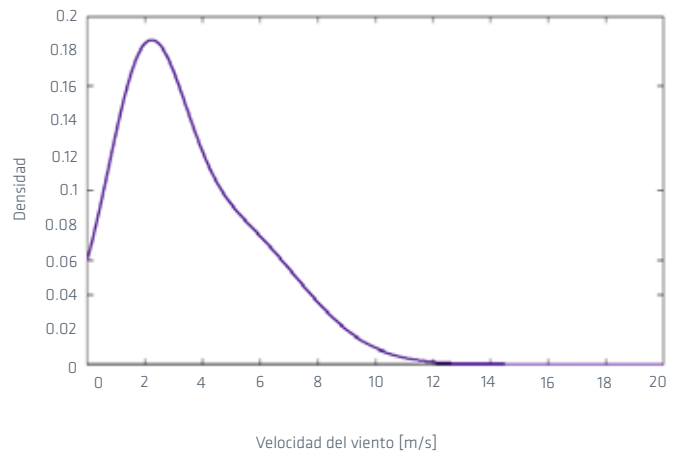
Parámetros modales: técnicas de detección de daño

Ante la necesidad de tener información detallada del estado de conservación del eje de giro del Giraldirlo es necesario poder determinar la posible existencia de un estado de daño y la localización geométrica de éste. Con esta finalidad se emplean métodos específicos de detección de daño que se basan en la idea de que los parámetros modales (frecuencias naturales y modos de vibración) son función de las propiedades físicas de la estructura (masa, amortiguamiento y rigidez). Por tanto, los

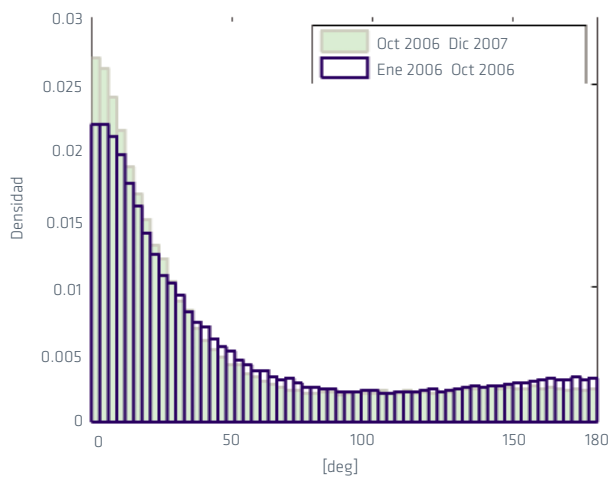
El Giraldirlo no se encuentra siempre correctamente alineado con la dirección del viento, debido a su elevada masa y rozamiento



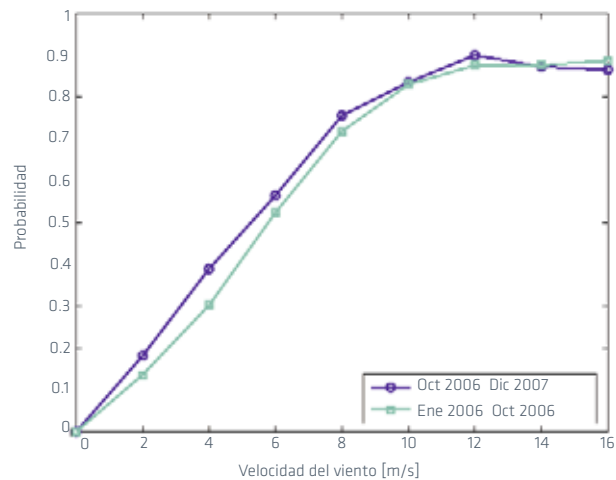
➊ Distribución estadística de la dirección del viento y de la orientación del Giralddillo / FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA



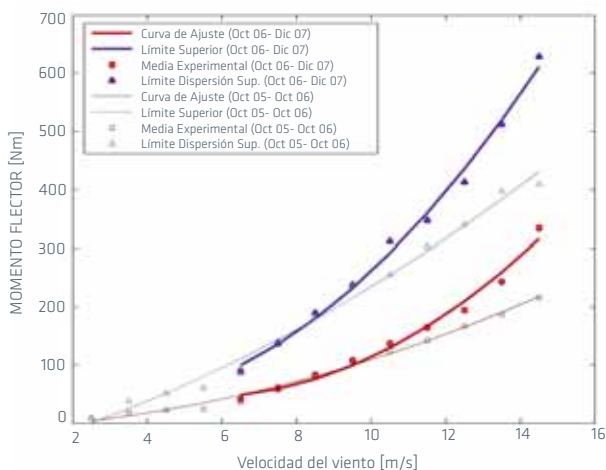
➋ Distribución estadística de la velocidad del viento / FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA



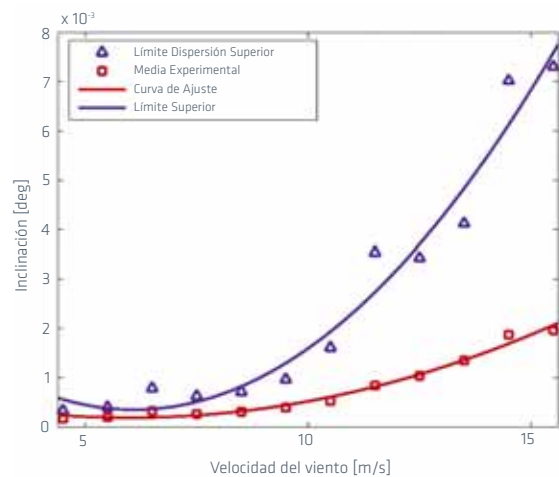
➌ Distribución estadística del desfase entre la posición del Giralddillo y la dirección del viento / FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA



➍ Probabilidad de correcta orientación del Giralddillo con el viento en función de la velocidad de éste / FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA



➎ Correlación entre esfuerzo flector en el eje de giro y velocidad del viento / FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA



➏ Correlación entre la inclinación del Giralddillo y la velocidad del viento / FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA

cambios en las propiedades físicas, como puede ser una pérdida de masa o rigidez producida por la corrosión de la estructura o por el deterioro de algún elemento estructural, causarán también cambios en los parámetros modales de la estructura. Para la determinación de la existencia de daño basta con observar la variación de las frecuencias naturales y de la forma de los modos de vibración, siendo necesario un análisis más profundo y exhaustivo para la localización y la cuantificación del daño. Estos métodos de detección de daño se han empleado para monitorizar la integridad estructural de plantas nucleares, grandes estructuras, plataformas petrolíferas y gran variedad de máquinas rotativas.

Las técnicas de detección de daño empleadas en este trabajo están basadas en el estudio de la evolución y de la variación de las frecuencias naturales, en la variación de la forma y de la curvatura de los modos y en la variación de la matriz de flexibilidad y de rigidez. Los parámetros se comparan con los obtenidos en el estado de referencia correspondiente a los registros durante los primeros meses de funcionamiento del sistema. La aleatoriedad permitida en los resultados se establece a partir de la observada durante este periodo de referencia, estableciéndose unos límites de control de amplitud igual a tres veces la desviación típica de los valores obtenidos durante este periodo. No obstante, la obtención de valores fuera de estos límites de control no debe ser considerada como valores indicadores de daño, ya que esto sólo se podría concluir tras una tendencia clara en la evolución del parámetro en cuestión y los límites de control deben entenderse como una referencia para evaluar el carácter aleatorio de los resultados obtenidos.

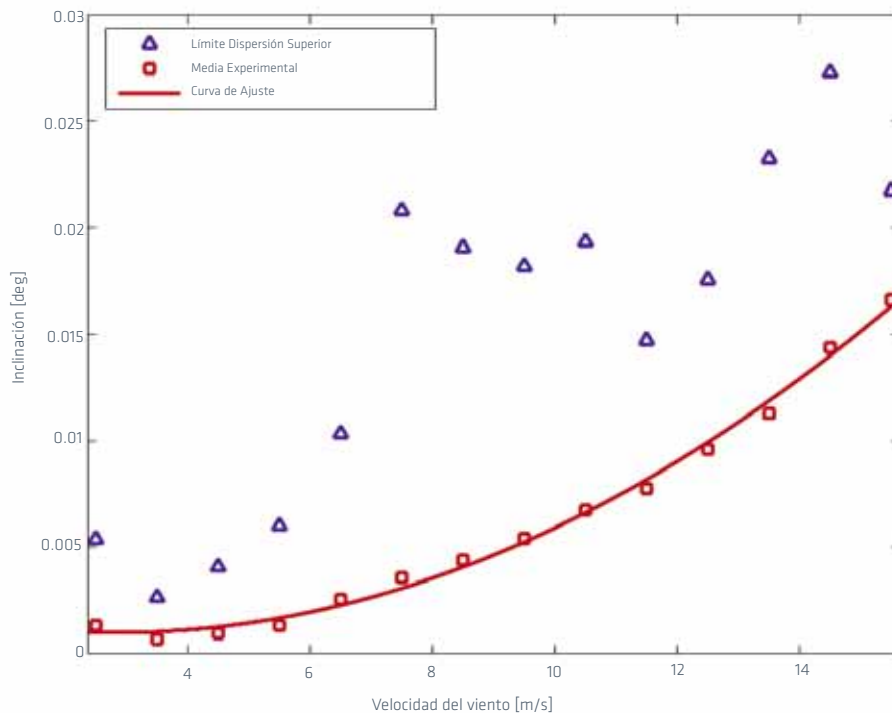
Variación de las frecuencias naturales

Esta técnica está basada en la disminución de las frecuencias de resonancia de una estructura producida por la pérdida de rigidez ocasionada por la presencia de daño. Se usa como fase previa del estudio de salud estructural, comparando los valores de las frecuencias naturales del vástago con los de un estado de referencia.

Hay que hacer notar que los cambios en las frecuencias naturales tienen grandes limitaciones prácticas para la detección de daño, debido a la baja sensibilidad de la variación de las frecuencia como resultado de una presencia de daño, que requiere de medidas muy precisas o de grandes niveles de daño.

También, debido a que las frecuencias naturales es una propiedad global de la estructura, no está claro que la variación de este parámetro pueda ser usado más que para indicar la posible existencia de daño, es decir, las frecuencias generalmente no pueden dar información espacial acerca de los cambios estructurales. Una excepción a esta limitación se da para las frecuencias de los modos asociados con respuestas locales de la estructura. Sin embargo, existen limitaciones prácticas debidas a la excitación y extracción de esos modos.

Desde que comenzó el proyecto de monitorización, el Giraldillo se encuentra en el mismo estado de conservación que tras su reposición



En el caso de Giralddillo, no se observan cambios en la evolución del valor de su frecuencia natural que puedan indicar algún tipo de deterioro en su estructura.

Variación de los modos de vibración

La presencia de daño en una estructura puede provocar un cambio en la forma de los modos de vibración, además de una posible aparición de nuevos modos de vibración que aparecerán en la función de densidad espectral como nuevos picos, además de un considerable aumento del nivel de ruido. Para la evaluación de la variación en la forma de un modo se usa el *Modal Assurance Criterion* (MAC), que permite cuantificar la desviación existente entre ellos.

El MAC varía entre 0 y 1, considerándose que en la práctica un MAC <0.9 obtenido de la comparación de los modos de un estado dado con uno de referencia puede indicar una presencia de daño. Se han estudiado un total de 10 000 registros desde octubre de 2005 encontrándose sólo un 0.15% de éstos por debajo del valor de 0.9 del MAC, estando además estos valores aleatoriamente distribuidos a lo largo del tiempo.

Variación en la curvatura de los modos

Los cambios en la curvatura de los modos son un buen indicador de la presencia de daño en estructuras (PANDEY et ál., 1991). Los valores de

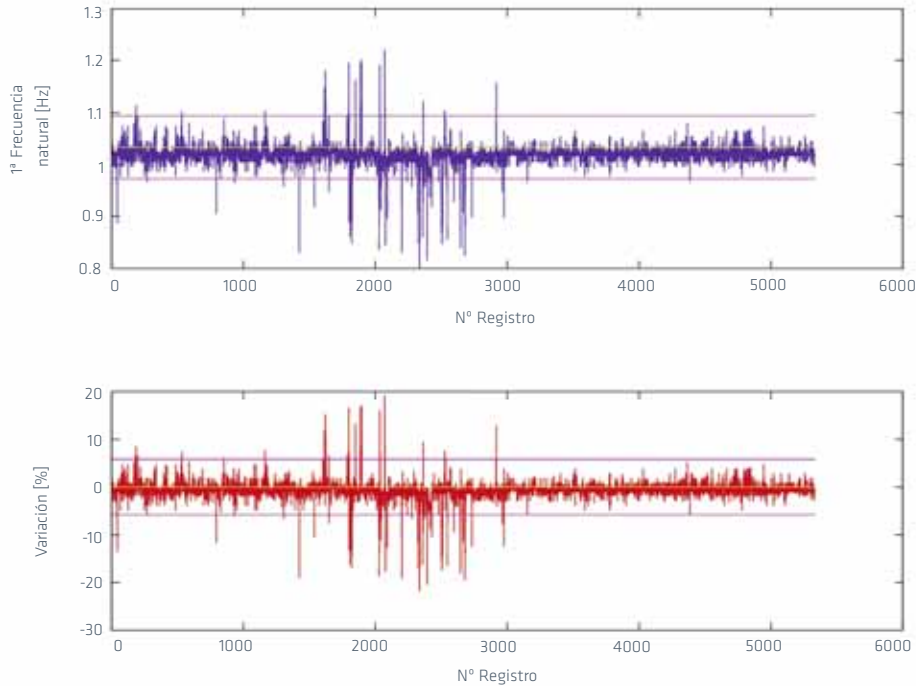
la curvatura pueden ser calculados a partir de la forma del modo usando la expresión de las diferencias centradas.

Un método derivado de éste está basado en la disminución de la energía modal de deformación (STUBBS et ál., 1992). Se define un índice de daño β , donde valores superiores a la unidad corresponden a partes de la estructura donde puede haber presencia de daño. Los valores más altos de β se corresponden a los elementos donde probablemente esté localizado un posible daño. Desde la puesta en marcha del proyecto de monitorización del Giralddillo, las desviaciones máxima de este parámetro respecto a la unidad han sido menores al 4.5%.

Variación en las matrices de flexibilidad y rigidez

Una aproximación a las variaciones en las matrices de flexibilidad y rigidez de la estructura se puede calcular experimentalmente teniendo en cuenta los modos de vibración y las frecuencias a las que se encuentran asociados (PANDEY y BISWAS, 1994), siendo necesario un menor número de modos para estimar la matriz de flexibilidad y obteniéndose unos resultados de mayor exactitud si la frecuencia de vibración del primer modo es mucho menor que la de los modos posteriores, como es el caso del Giralddillo. La localización geométrica de un estado daño se obtiene a partir de la máxima diferencia en las matrices asociada a un determinado grado de libertad del sistema. Debido a que las variables indicadoras de daño de esta técnica tiene una alta sensibilidad a la variabilidad asociada a las técnicas experi-

● Evolución de los valores obtenidos para la primera frecuencia natural / FUENTE: GRUPO DE ESTRUCTURAS, UNIVERSIDAD DE SEVILLA



mentales para la extracción de los parámetros modales, existe una variación de hasta un 30% respecto al estado de referencia en las matrices de rigidez y de flexibilidad, pero éstas se encuentran presumiblemente asociadas a la aleatoriedad de los resultados experimentales y sobre todo a problemas de funcionamiento observados en el comportamiento del sistema de medida.

CONCLUSIONES

El sistema de instrumentación ha permitido obtener información relevante y de gran interés acerca del comportamiento del Giralddillo y de su estado de conservación tras su restauración. Además, las técnicas implementadas permitirán disponer a largo plazo de una herramienta útil para advertir un posible deterioro de la estructura del Giralddillo.

Desde que comenzó el proyecto de monitorización del Giralddillo no se han observado tendencias en los distintos parámetros de control que alerten sobre algún cambio en el comportamiento de la estructura del vástago, pudiéndose afirmar que el Giralddillo se encuentra en el mismo estado de conservación tras su reposición una vez finalizada su restauración. 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. Esto no evita la conveniencia de programar periódicamente operaciones de supervisión y mantenimien-

to in situ sobre el Giralddillo que garanticen su correcta conservación independientemente de los resultados que se obtengan a partir de su monitorización.

Bibliografía

- AA. VV. (2003) *El Giralddillo: Proceso de una Restauración*. Sevilla: Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía, 2003
- BENDAT, J.; PIERSOL, A. (1993) *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. Nueva York: John Wiley & Sons, New York, 1993
- BRINCKER, R.; ZHANG, L.; ANDERSEN, P. (2001) Modal Identification of Output-Only System using Frequency Domain Decomposition. *Smart Mater. Struct.*, v. 10, 2001, pp. 441-445
- DOEBLING, S. W.; FARRAR, C. R.; PRIME, M. B.; SHEVITZ, D. W. (1996) *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
- JIMÉNEZ, A.; CABEZA, J. M. (1998) *Turris Fortísima*. Sevilla: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla, 1998
- PANDEY, A. K.; BISWAS, M.; SAMMAN, M. M. (1991) Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes. *Journal of Sound and Vibration*, v. 145, nº 2, 1991, pp. 321-332
- PANDEY, A. K.; BISWAS, M. (1994) Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of Sound and Vibration*, v. 169, nº 1, 1994, pp. 3-17
- STUBBS, N.; KIM, J. T.; TOPOLE, K. (1992) An efficient and robust algorithm for damage location in offshore platforms. En MORGAN, J. (ed.) *Proceedings of the ASCE Tenth Structures Congress*. New York: ASCE, 1992, pp. 543-546