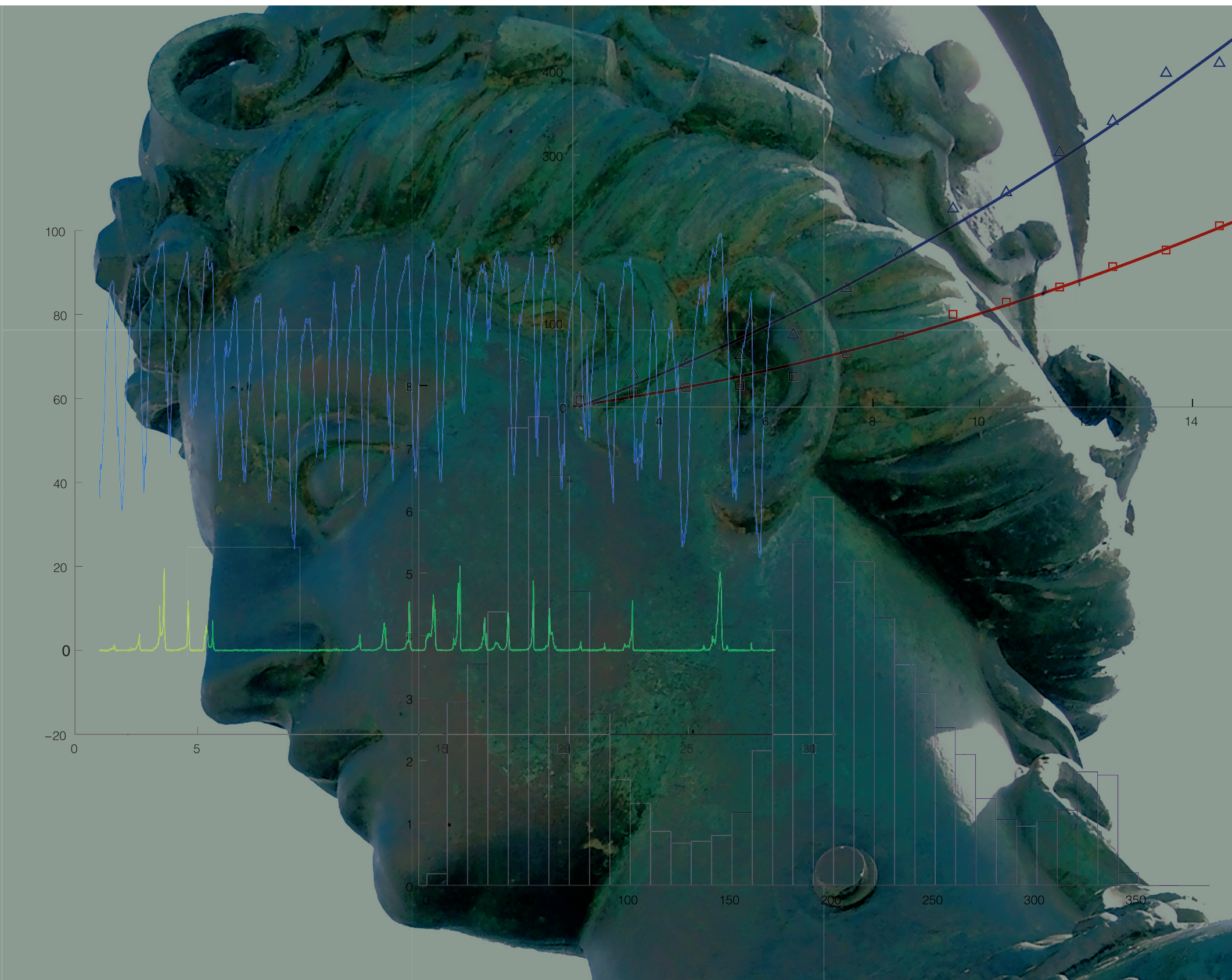


Seguimiento del comportamiento mecánico del Giraldillo



Seguimiento del comportamiento mecánico del Giraldillo

Seguimiento del comportamiento del Giraldillo

Dado el gran valor patrimonial, histórico, artístico, simbólico y técnico del Giraldillo, que le ha hecho merecedor del minucioso proceso de restauración al que se ha visto sometido, y dado que tras su reposición sobre la Giralda resulta inaccesible para su observación, parece lógico pensar en la conveniencia de disponer permanentemente de información acerca de su comportamiento, estado de conservación, etc. Por ello, como parte del Proyecto de Reposición del Giraldillo sobre la Giralda se incluyó el diseño, instalación y puesta en marcha de un sistema de instrumentación que sirviera para monitorizar 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.

Este sistema de instrumentación despierta por un lado el evidente interés que supone el control y estudio de la evolución del comportamiento del Giraldillo, pero también tiene un relevante interés técnico por cuanto supone el carácter singular que le confiere su especial ubicación, objetivos y diversidad de magnitudes a registrar, controlar y analizar.

En este capítulo se realizará en primer lugar una descripción del sistema de instrumentación instalado en la Giralda. Se enumerarán las distintas magnitudes que se pueden registrar, el tipo de sensores utilizado, su ubicación, y los objetivos que se pretendan conseguir a partir de los datos suministrados por el sistema. Posteriormente se presentarán los resultados y conclusiones más significativas que se han extraído de los primeros informes elaborados dentro del proyecto de seguimiento del comportamiento del Giraldillo, que financia el Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico y que lleva a cabo el Grupo de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

Independientemente de la información obtenida a través del sistema de monitorización del Giraldillo, también parece razonable, por los mismos motivos que justifican la necesidad de disponer de dicho

sistema, que se establezca un programa de mantenimiento para asegurar el buen estado de conservación del Giraldillo. Este plan de mantenimiento se podrá estructurar en dos acciones fundamentales que podrán ser por un lado la inspección periódica por parte de personal especializado en trabajos de altura y, por otro lado, la realización de inspecciones más profundas y labores de mantenimiento con la ayuda de algún medio de acceso estable como pudiera ser un sistema ligero de andamiaje. Estas labores de mantenimiento deberían realizarse cada 2 y 5 años, respectivamente, dado el interés que tiene el estudio profundo de la evolución del Giraldillo y los distintos elementos y materiales empleados en su restauración, tanto desde el punto de vista de conservación del patrimonio histórico y artístico como desde un punto de vista técnico. Este interés es aún mayor durante el transcurso de los primeros años tras la reposición del Giraldillo, dado que el estudio de su evolución inicial servirá para establecer con mayor certeza como será su evolución futura.

Las sucesivas inspecciones y labores de mantenimiento servirán para rediseñar el plan de mantenimiento, estableciendo las pautas a seguir en actuaciones futuras. Para la programación de las tareas de mantenimiento también será de utilidad la información obtenida gracias al sistema de instrumentación y seguimiento, que podrá servir para verificar el correcto funcionamiento de la Veleta o, por el contrario, alertar sobre variaciones en su comportamiento que podrían indicar algún tipo de deterioro.

11.1 Descripción del sistema: sensores, ubicación, objetivos

La mayoría de sensores se encuentran situados sobre el vástago, el cual es el elemento fundamental de cara a mantener la estabilidad del conjunto. Se descartó la colocación de sensores sobre la Veleta por resultar demasiado costoso y complejo, por la inaccesibilidad de la figura y su carácter giratorio. A continuación se resumen las distintas magnitudes que son registradas por el sistema y los distintos tipos de sensores utilizados.

Mario Solís Muñiz
Antonio Romero Ordóñez
Pedro Galvín Barrera
José Domínguez Abascal

Escuela Técnica Superior de Ingenieros

(Foto página anterior: José Luis Gómez)



Figura 11.1. Instalación de veleta y anemómetro sobre la estructura soporte del pararrayos.



Figura 11.2. Pegado de bandas extensométricas en la parte inferior del vástago

Velocidad y dirección del viento: Se dispone de un anemómetro y una veleta para registrar la velocidad y dirección del viento incidente sobre el Giralddillo, que es la principal acción mecánica que soporta. Este registro resulta fundamental para evaluar el correcto funcionamiento de la Veleta, ya que las magnitudes mecánicas que sean objeto de estudio estarán directamente relacionadas con la acción del viento.

Los sensores correspondientes a veleta y anemómetro se colocan sobre un soporte rigidamente unido a uno de los brazos de la estructura soporte del pararrayos. Concretamente se colocaron sobre el brazo que apunta en dirección sureste, por varias razones, entre otras la reducción de su impacto visual. Por el mismo motivo se eligieron sensores de tamaño reducido y se les aplicó una ligera capa de pintura mate en un tono grisáceo para disimular su presencia.

Los registros obtenidos con estos sensores estarán sujetos irremediablemente a cierto error o funcionamiento errático debido al hecho de que el propio Giralddillo provoca a su alrededor una perturbación de la corriente de aire que afectará a las mediciones del anemómetro y la veleta. Este efecto será despreciable cuando estos sensores se encuentren a barlovento y podrá ser apreciable cuando se encuentren a sotavento. La ubicación de estos sensores está también basada en este hecho y la posibilidad de reducir su influencia al mínimo, en función de las direcciones predominantes del viento en Sevilla.

Medida de esfuerzos en el vástago: Una sección del vástago se encuentra instrumentada con bandas extensométricas, conformando tres montajes a puente completo. Dos de ellos permiten obtener los momentos flectores en dos direcciones perpendiculares, pudiéndose conocer así los esfuerzos de flexión sobre el vástago, que son los principales esfuerzos mecánicos que ha de soportar debido a la acción del viento sobre el Giralddillo o a un posible movimiento sísmico.

El tercer puente de extensometría sirve para medir el esfuerzo torsor producido sobre el vástago por la tendencia al giro de la

Veleta. Así se pretende registrar el par necesario para que el viento haga girar la Veleta.

La medición de los esfuerzos de flexión, junto con la velocidad del viento permitirá establecer una correlación entre ambos. La detección de posibles desviaciones permanentes con respecto a esta correlación podría indicar un funcionamiento anómalo de la Veleta. Si se detecta un aumento progresivo en los esfuerzos de flexión provocados por el viento, esto podría ser indicio de que el mecanismo de giro de la Veleta pudiera estar sufriendo cierto deterioro, ya que una reducción en su capacidad para orientarse con la dirección del viento supone una mayor incidencia del viento en sentido frontal a la imagen, en lugar de en sentido lateral como sería en el caso de estar correctamente orientada como Veleta. Evidentemente, una incidencia frontal del viento provoca unos esfuerzos y movimientos del vástago sensiblemente mayores que una incidencia lateral.

Por otro lado, esta correlación, junto con el análisis estadístico de la velocidad y dirección del viento y la orientación de la Veleta, podrá permitir la realización de un estudio que establezca las cargas de fatiga a las que se ven sometidas las uniones entre distintos tramos del vástago, lo cual resulta fundamental de cara a determinar la vida útil de estas uniones y los plazos necesarios para su revisión o sustitución.

La medida de esfuerzos flectores en el vástago tiene una utilidad añadida, y es que, además de los esfuerzos de flexión producidos por la acción del viento, también se registra la flexión producida por el desequilibrio del centro de gravedad de la Veleta con respecto a su eje, que ya se analizó en el capítulo 5. Dicho desequilibrio es evidentemente constante, con lo que el esfuerzo de flexión que provoca es de magnitud constante, pero varía su dirección en función de la posición de la Veleta. Esto hace que al cambiar su posición se detecten variaciones apreciables en los valores promedio (prescindiendo de las oscilaciones debidas a la acción del viento) de las componentes del momento flector

registrado con cada uno de los puentes de extensometría. A partir de estas variaciones se puede detectar la posición de la Veleta, y en función de este dato se pueden realizar estudios estadísticos de gran interés acerca de su orientación, desfase de ésta con respecto a la dirección del viento para distintas velocidades, velocidad de viento necesaria para hacer girar la Veleta, etc.

La magnitud del momento flector debido al desequilibrio de la Veleta registrado experimentalmente es de 1750 Nm. Este valor concuerda con el análisis de distribución de masas de la Veleta realizado en los capítulos 5 y 7, lo que supone una muestra adicional de la validez del modelo de numérico de cálculo presentado en dichos capítulos.

La sección del vástago instrumentada con bandas extensométricas se encuentra en el tramo superior del el mismo, entre la peana y los pies de la escultura. Concretamente, dicha sección queda justo por debajo de la abrazadera de la estructura del pararrayos. Se instrumentó una sección correspondiente al tramo de acero inoxidable por ser el único que no llevaba pintura de protección para la corrosión. No se debía practicar el pegado de bandas sobre una capa de pintura (las medidas serían erróneas) y tampoco se debe aplicar la capa de pintura de protección sobre ellas o eliminar la capa de pintura en la zona donde se pegasen las bandas, ya que reduciría su capacidad de protección. El pegado de las bandas se realizó en taller, de forma que solo hubiera que conectar los cables de los circuitos de extensometría una vez instalado el vástago sobre la torre.

Medida de vibraciones: La respuesta mecánica del Giraldllo y el vástago que lo sostiene es esencialmente dinámica, de ahí que resulte necesario el registro de las vibraciones o movimientos a las que se ve sometido el conjunto y su análisis desde un punto de vista dinámico. Para la medida de estas vibraciones se registran las aceleraciones a las que se encuentra sometido el eje en tres secciones distintas. En cada una de estas secciones se colocan dos acelerómetros, que registran los movimientos en dirección

suroeste-noreste y sureste-noroeste, que son las direcciones más probables de movimiento según los vientos predominantes en la ciudad de Sevilla.

El análisis dinámico de las señales suministradas por los acelerómetros permitirá determinar los parámetros que caracterizan la repuesta dinámica de la Veleta (obtención de frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamientos). El estudio de la evolución temporal de estos parámetros y su posible evolución, así como su correlación con la acción del viento, podrá servir para advertir alguna variación en su respuesta que pueda estar relacionada con algún tipo de deterioro en su funcionamiento o estado de conservación. Para ello se han implementado diversas técnicas de análisis dinámico de las señales para la obtención de parámetros dinámicos y detección del daño (Welch, 1967, Pandey et al, 1991 y 1991b, Stubbs et al, 1992, Bendat y Piersol, 1993, Brinker et al, 2001, de Silva, 2006).

Las tres secciones instrumentadas con acelerómetros se corresponden a los distintos tramos del eje, de manera que la forma del modo de vibración que se obtenga pueda contener a las uniones entre dichos tramos, que son las zonas de mayor interés. La sección inferior se encuentra en el interior de la bola, por debajo de la unión embridada que hay en su interior. La siguiente sección se encuentra en el tramo intermedio del vástago, entre las dos uniones embridadas, y para la sección superior los acelerómetros se unieron a la abrazadera de la estructura del pararrayos que rodea al tramo superior del vástago justo por encima de la peana.

Inclinación del vástago: Con objeto de medir la inclinación del vástago se han instalado cuatro sensores (clinómetros) para detectar la inclinación del vástago en dos secciones distintas. En cada sección, un clinómetro detecta la inclinación en dirección SO-NE y el otro en dirección SE-NO, coincidiendo con los movimientos que registran los acelerómetros. De esta forma, el análisis dinámico de sus registros sirve además para complementar

Figura 11.3. Instalación de acelerómetros colocados sobre el carrete





Figura 11.4. Instalación de clinómetros por encima de la cruceta superior del Cuerpo del Penacho.

Figura 11.5. Acelerómetro y clinómetro instalados sobre la estructura soporte del prarrayos

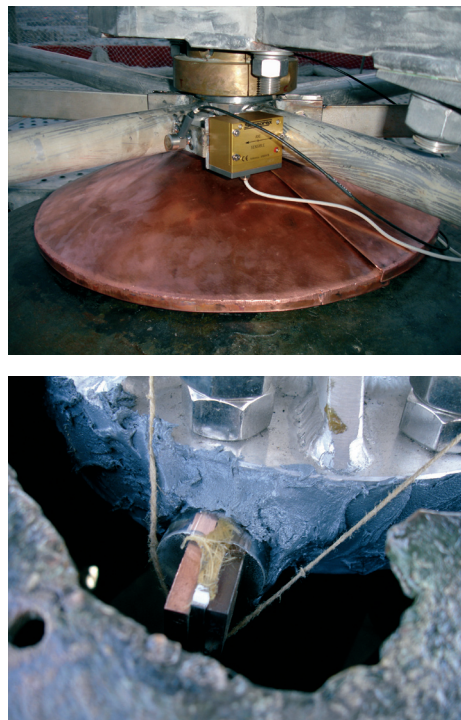


Figura 11.6. Sonda de corrosión instalada sobre las bridas de unión en el interior de la peana

la información suministrada por los acelerómetros de cara a la caracterización dinámica de la estructura, su evolución y aplicación de técnicas de detección de daño.

Los dos clinómetros ubicados en la sección inferior registran el posible giro de la sección del vástago ubicada justo por encima de las cartelas de rigidización de la unión con la cruceta superior del cuerpo del Penacho. Ya se argumentó que el vástago se puede considerar empotrado sobre dicha cruceta, con lo que en teoría estos sensores no debieran detectar ningún tipo de giro. Sin embargo, pueden servir para detectar precisamente algún tipo de deterioro en dicha unión. Además, registrarán algún tipo de giro debido a que dicho empotramiento no es perfecto, y a que registran los movimientos de toda la torre de la Giralda en su conjunto, que arrastra al vástago del Giraldillo en su movimiento.

Los otros dos clinómetros se colocaron sobre la abrazadera de la estructura del pararrayos, al igual que los dos acelerómetros superiores, para detectar el movimiento del vástago a la mayor altura posible sobre la que se pudieron colocar sensores.

Corrosión: En el conjunto de la escultura y del sistema estructural se producen uniones entre diferentes metales. En estas uniones se puede producir en mayor o menor medida un deterioro debido a la corrosión galvánica. Para controlar la posible tendencia a la corrosión de estas uniones se dispone de una sonda de corrosión, compuesta por muestras de los distintos materiales en contacto entre sí, y entre los que se mide el potencial galvánico existente en cada momento. La evolución de este potencial puede servir para estimar la tendencia a la corrosión que puede estar teniendo lugar en los distintos materiales.

La sonda de corrosión se colocó en el interior de la peana, ya que en ese lugar se producirán condiciones de temperatura y humedad similares a las que tengan lugar en las zonas donde existan uniones entre estos materiales.

Temperatura y humedad: A fin de conocer el ambiente en que se encuentra la Veleta, se han colocado dos sondas de temperatura y humedad, una en el exterior (sobre el brazo sureste de la estructura del pararrayos) y otra en el interior de la bola, donde se reproduce un ambiente similar al del interior de la escultura. La evolución de estas magnitudes y las diferencias entre las condiciones exteriores e interiores puede servir para evaluar la posibilidad de condensación en el interior de la escultura, gradientes térmicos, severidad de las oscilaciones térmicas, correlación con las señales emitidas por la sonda de corrosión, etc.

En la Figura 11.8 se muestra un esquema con la ubicación de los distintos sensores que forman parte del sistema de instrumentación.

En total, se tienen 21 canales de medida asociados a las distintas magnitudes a registrar. Los cables de los sensores, a excepción

de los acelerómetros, descienden hasta la cúpula del Penacho, donde se conectan a una caja de conexiones que sirve para conectarlos a una manguera de 44 hilos de pares cruzados que se conectan a su vez a distintas fuentes de alimentación y al sistema de adquisición de datos ubicados en un pequeño recinto situado en el cuerpo del Reloj. Para los acelerómetros se dispone de un cable independiente para cada uno de ellos, que se conectan directamente con el sistema de adquisición de datos.

En total, cada cable de recorre una distancia de entre 35 y 40 m hasta llegar al recinto donde se ubica el sistema de adquisición de datos, que es el más alto de la torre al que se puede llegar fácilmente para realizar tareas de programación o mantenimiento sobre dicho equipo.

11.2 Resultados

En este apartado se expondrá un breve resumen de los resultados más significativos obtenidos durante el primer año de funcionamiento del sistema de monitorización, que comprende desde octubre de 2005, cuando se terminó de realizar la puesta en marcha del sistema, hasta octubre de 2006. Los valores obtenidos en los distintos estudios servirán de referencia para periodos posteriores, ya que se trata de un proceso de evaluación a largo plazo y por tanto se ha considerado razonable establecer periodos anuales de estudio para realizar comparaciones con estados anteriores y poder detectar tendencias o variaciones en el comportamiento del Giraldillo.

Por otro lado, el gran número de canales de medida y tipos de análisis a realizar, así como la incertidumbre en cuanto al tipo de resultados a obtener, tanto por la estructura en sí como por el propio sistema de instrumentación, hacen que la gestión de los datos obtenidos, registros, análisis, representación, post-proceso, síntesis, etc., sean operaciones complejas y requieran un largo periodo de desarrollo.



Un parámetro fundamental del sistema es la frecuencia de muestreo, es decir el número de datos por unidad de tiempo que se han de tomar. Una frecuencia excesivamente alta hará que se obtengan una cantidad de datos excesiva que no aporten información relevante sobre el comportamiento del sistema y compliquen el proceso de manipulación y análisis de los datos obtenidos.

Parece evidente que, dado que el viento es la principal acción mecánica sobre la Veleta, la frecuencia de muestreo se establezca en función de la velocidad del viento. Así, cuando el viento permanezca por debajo de cierto umbral, su influencia será muy pequeña y será necesaria una frecuencia de muestreo muy baja, suficiente para capturar la evolución de magnitudes cuasi estacionarias como la temperatura, humedad, potenciales galvánicos, posición de la Veleta y la propia velocidad y dirección del viento, careciendo de interés el registro del resto de magnitudes. En esta situación, puede ser necesario tan sólo la toma de un dato por canal cada 5 minutos aproximadamente.

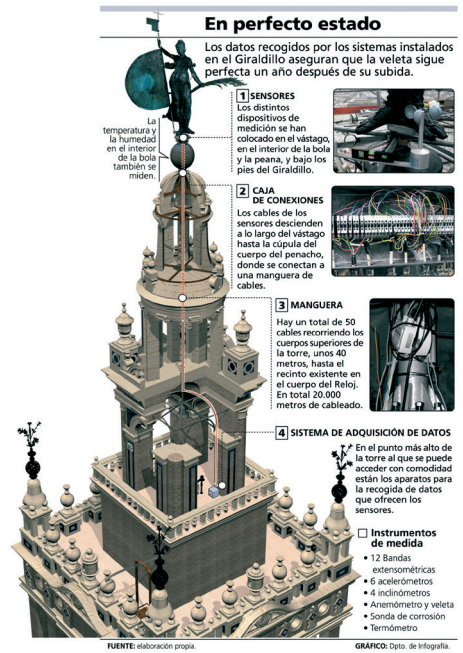
Sin embargo, cuando la velocidad del viento empieza a ser significativa, será necesario establecer una frecuencia de muestreo que permita analizar posteriormente la respuesta dinámica de la Veleta a partir de los registros suministrados por acelerómetros, clinómetros y bandas extensométricas. En este caso, dado que la primera frecuencia natural del sistema es aproximadamente de 1 Hz, basta con tomar hasta 10 datos por segundo y por canal.

LOCALIZACIÓN DE SENSORES				
LOCALIZACIÓN	IDENTIFICACIÓN	Nº SERIE	SENSOR	MOVIMIENTO QUE RECOGE
0	clin1	33	clinómetro	SO-NE
0	clin2	37	clinómetro	SE-NO
1	acel1	4211	acelerómetro	SO-NE
1	acel2	4210	acelerómetro	SE-NO
2	acel3	4212	acelerómetro	SO-NE
2	acel4	4215	acelerómetro	SE-NO
Interior peana	corr BI - corr CI	-	sonda corrosión	-
Interior bola	Tª int	35102647	sonda temperatura	-
Interior bola	HR int	35102647	sonda humedad	-
2	flexión x	-	punto extensometría	SO-NE
2	flexión y	-	punto extensometría	SE-NO
2	torsión	-	punto extensometría	-
3	clin3	31	clinómetro	SE-NO
3	clin4	32	clinómetro	SO-NE
3	acel5	4207	acelerómetro	SO-NE
3	acel6	4208	acelerómetro	SE-NO
Brazo estructura pararrayos	Tª ext	35102644	sonda temperatura	-
Brazo estructura pararrayos	HR ext	35102644	sonda humedad	-
Brazo estructura pararrayos	veleta		veleta	-
Brazo estructura pararrayos	anem	920335090	anemómetro	-

Figura 11.7. Instalación de sonda de temperatura y humedad en el interior de la bola

Figura 11.8. Esquema de localización de sensores

Figura 11.9. Gráfico explicativo del sistema de instrumentación, realizado por el Dpto. de Infografía del Diario de Sevilla para reportaje sobre el primer año de monitorización del Giraldillo (publicado el 17 de julio de 2006)



El umbral de velocidad de viento para el que la repuesta dinámica del Giralddillo empieza a cobrar interés y los sensores capten un nivel de excitación apreciable se sitúa en torno a 5 m/s.

Los registros obtenidos a partir de esta velocidad son los que sirven posteriormente para analizar la respuesta mecánica del Giralddillo.

11.2.1 Dirección y velocidad del viento

En la figura 11.10 se muestra una gráfica con la distribución estadística de la dirección del viento registrada. Se ha podido corroborar que los vientos predominantes en Sevilla corresponden aproximadamente con las direcciones Noreste (45°) y Suroeste (225°). En la Figura 11.11 se presenta la distribución estadística de la velocidad del viento, observándose como la velocidad del viento

típica es del orden de 2 m/s. En esta gráfica se puede observar una densidad de probabilidad anómala en los niveles de 8 y 10 m/s. Esto es debido a que se corresponden con los niveles considerados en distintas fases de proyecto como umbral de aplicación de alta frecuencia de muestreo, lo que lleva a que se registren un mayor número de puntos con esos valores.

11.2.2 Humedad relativa y corrosión

La evolución temporal de la humedad relativa en el exterior e interior de la escultura es similar, detectándose claramente los ciclos diarios que sufren estas variables. El nivel de humedad exterior es superior normalmente al de humedad interior. No obstante, se observó un funcionamiento anómalo de la sonda de humedad exterior a los pocos meses de su instalación, por lo que sus registros no ofrecen un alto grado de fiabilidad.

La representación de la evolución temporal conjunta de la humedad interior junto con los valores de potencial galvánico recogidos por la sonda de corrosión (Figura 11.12), muestran como este potencial (y por tanto la tendencia a la corrosión) aumentan cuando la humedad interior está por encima del 80-90%. En esas situaciones se han llegado a medir potenciales de hasta 20 mV tanto en la unión bronce-acero inoxidable como en la unión acero inoxidable-acero al carbono, si bien típicamente los valores son sensiblemente mayores en esta segunda. Cuando la humedad relativa interior es baja, los potenciales registrados se sitúan en torno a 0,01 mV.

11.2.3 Temperatura

Los ciclos de temperatura diarios se han registrado nitidamente con las sondas de temperatura interior y exterior de la escultura. Las diferencias entre una y otra se producen principalmente en los niveles máximos de dichos ciclos, siendo inferiores normalmente a 5°C.

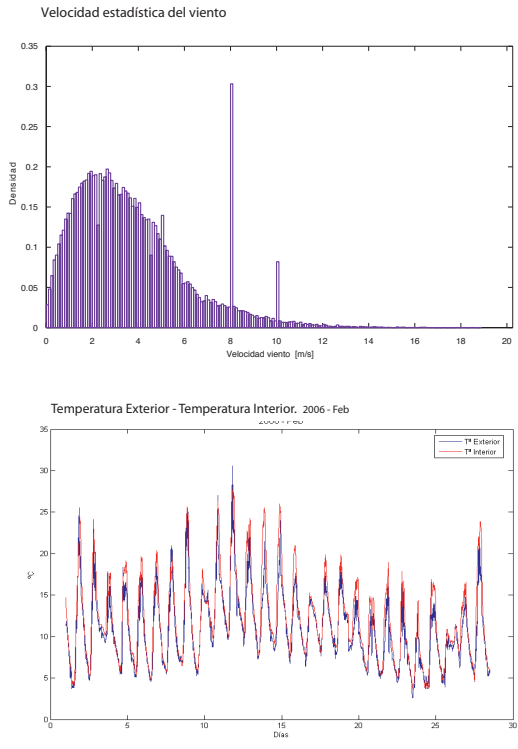
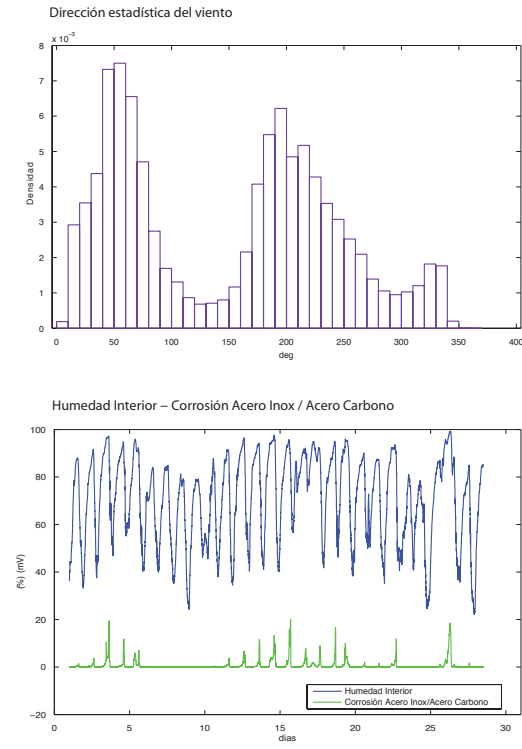
Hay que tener en cuenta sin embargo que la temperatura del bronce de la escultura será mayor que la registrada por el sensor, debido a la mayor radiación que recibe la superficie de la escultura.

Figura 11.10. Distribución estadística de la dirección del viento (0° se corresponden a la dirección Norte)

Figura 11.11. Distribución estadística de la velocidad del viento

Figura 11.12. Ejemplo de gráfico mensual de evolución conjunta de la humedad relativa interior y el potencial galvánico medido en el contacto entre acero al carbono y acero inoxidable

Figura 11.13. Ejemplo de gráfico mensual de evolución de la temperatura interior y exterior



La máxima temperatura interior registrada durante el periodo considerado ha sido de 47,8°C, y una mínima de 2,5°C. La sonda exterior ha registrado un valor máximo de 46,2°C y un valor mínimo de 1,7°C.

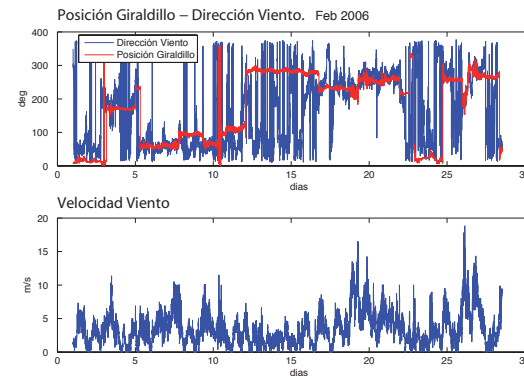
11.2.4 Posición del Giraldillo

Como ya se comentó anteriormente, la orientación del Giraldillo se obtiene a partir del momento flector que produce el desequilibrio de su centro de masas con respecto al eje que lo sostiene. La orientación así estimada presenta cierta incertidumbre debido a la falta de un equilibrado inicial de los puentes de extensometría, por lo que se han tenido que estimar sus niveles de cero a partir de la observación de sus valores promedio para distintas orientaciones de la Velea. No obstante, el método desarrollado permite obtener con suficiente precisión la orientación del Giraldillo y correlacionarla con la dirección y velocidad del viento, de forma que a lo largo del tiempo se pueda ir analizando la evolución de su comportamiento como veleta.

En la Figura 11.14 se puede observar a modo de ejemplo un gráfico en el que se muestra la dirección y velocidad del viento y la orientación estimada del Giraldillo a lo largo de un mes concreto. Como es lógico, el viento tiene una mayor fluctuación que el Giraldillo, ya que éste necesita una cierta intensidad de viento para cambiar su posición.

En la Figura 11.15 se muestra la distribución estadística de la orientación del Giraldillo. Se observan dos orientaciones preferentes (Noreste y Suroeste) que coinciden con las direcciones del viento dominantes en Sevilla (Figura 11.10). No obstante, se observa una mayor tendencia a una orientación Suroeste en la orientación del Giraldillo, lo cual se debe a una mayor velocidad estadística de los vientos provenientes de dicha dirección.

En la Figura 11.16 se muestra el desfase estadístico entre la dirección del viento y la orientación del Giraldillo, donde se muestra



que la mayor parte del tiempo el Giraldillo indica correctamente la dirección del viento, siempre y cuando la velocidad de éste sea significativa. Es apreciable también en esta gráfica la probabilidad de que el desfase esté en torno a 180°, que es la situación en la que el viento incide lateralmente a la escultura pero sin alcanzar una velocidad suficiente para invertir la orientación de ésta. La correlación de este desfase con la velocidad del viento lleva a la conclusión de que el Giraldillo funciona normalmente bien como veleta para vientos superiores a 6m/s, mientras que para valores superiores a 10 m/s existe una probabilidad cercana al 100% de que se oriente correctamente con la dirección del viento. Estos valores son similares a los que se obtuvieron partir del seguimiento instrumental del comportamiento de la Réplica del Giraldillo.

11.2.5 Esfuerzos mecánicos producidos por el viento

Resulta interesante correlacionar de algún modo la amplitud de los ciclos de carga que sufre el vástago debido a las oscilaciones de la Velea producidas por la acción del viento. Esta correlación, junto con la distribución estadística de velocidades del viento, permite disponer de una buena estimación del número e intensidad de los ciclos de carga a los que se ve sometida la estructura soporte del Giraldillo, y por tanto realizar comprobaciones acerca de la vida útil de dicha estructura debido al fenómeno de fatiga. También se pueden realizar estas comprobaciones directamente a partir

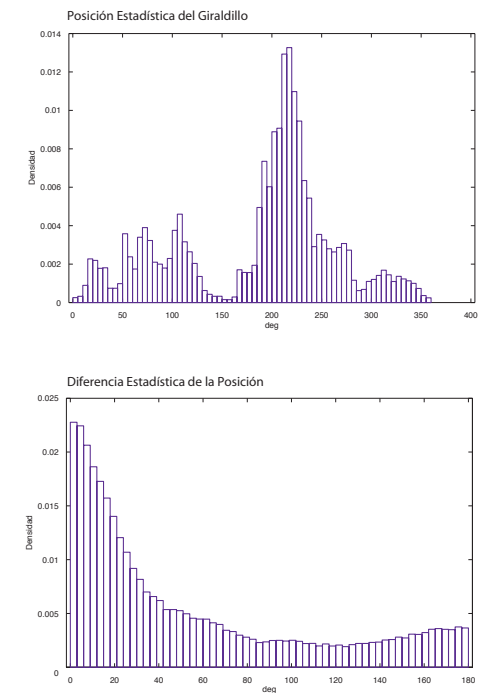


Figura 11.14. Ejemplo de gráfico de registro de la dirección del viento y orientación del Giraldillo

Figura 11.15. Distribución estadística de la orientación del Giraldillo

Figura 11.16. Distribución estadística del desfase entre la dirección del viento marcada por el sensor de la veleta y la orientación del Giraldillo

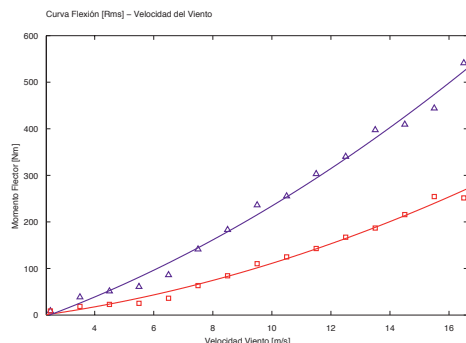


Figura 11.17. Correlación entre la amplitud de ciclos de carga en el vástago (valor RMS) y la velocidad del viento

de los registros temporales de los esfuerzos flectores, aplicando algoritmos de conteo de ciclos del tipo de *gota de lluvia*.

En la Figura 11.17 se muestra la correlación encontrada entre la velocidad del viento promedio de cada registro y la amplitud RMS del esfuerzo flector resultante obtenida a partir de los autoespectros de los registros temporales de los esfuerzos flectores en cada dirección medidos a la altura de la peana.

La dispersión en los resultados obtenidos es relativamente alta, debido a que en cada registro considerado la velocidad del viento puede fluctuar, y la posición relativa entre la dirección del viento y el Giralddillo puede ser distinta. En la Figura 11.17 se muestra, además de la curva de ajuste parabólica construida a partir de los valores registrados, una curva superior que dista de la anterior un valor de 3 veces la desviación típica obtenida para cada valor de la velocidad del viento. Con ambos conjuntos de valores se obtiene una buena aproximación mediante una ley parabólica. Las curvas representadas dan una idea de la dispersión de los resultados y los valores probables que se deben considerar a efectos de cálculos o estimaciones posteriores. Un aumento de los esfuerzos representados en estas curvas sería un indicativo de que el Giralddillo redujera su capacidad de orientarse correctamente con el viento.

11.2.6 Parámetros modales. Detección de daño.

A partir de las medidas registradas con los acelerómetros e inclinómetros instalados sobre el vástago del Giralddillo, se ha realizado una caracterización dinámica de la estructura, incluyendo la identificación de modos y frecuencias naturales. Estos parámetros se pueden utilizar para la implementación de diversas técnicas de detección de daño en la estructura. El estudio de su evolución, a partir de un estado inicial de referencia, puede ser un indicador de la presencia de algún tipo de deterioro en la estructura, e incluso se puede conseguir en algunos casos la identificación de la zona de la estructura donde se ha producido dicho deterioro.

Se ha obtenido que la primera frecuencia natural de vibración del Giralddillo sobre su vástago es de 1,025 Hz. Estos resultados están de acuerdo con las predicciones realizadas a partir del modelo numérico presentado y analizado en los capítulos 5, 7 y 9, que predecía una primera frecuencia natural de 1,09 Hz. También concuerdan con los resultados experimentales obtenidos sobre la Réplica del Giralddillo antes de su instalación (ensayo dinámico realizado por la empresa Kinesia en 1999), si bien en este caso se trataba de un eje de menor longitud y de una sola pieza, lo que supone una mayor rigidez, menor masa y menor capacidad de disipación de energía, con lo que se obtuvo una primera frecuencia natural mayor (1,37 Hz).

Una curiosidad sobre los espectros obtenidos a partir de las señales de los acelerómetros es que se han registrado nitidamente los movimientos del vástago asociados al movimiento de toda la torre de la Giralda, que vibra con una primera frecuencia natural de 0,68 Hz. Esto se ha corroborado con la medida experimental de la respuesta dinámica de la torre en otros puntos, observándose la coincidencia en las frecuencias de vibración obtenidas. Este dato concuerda además con el valor considerado para la Giralda en el modelo de cálculo (capítulos 5, 7 y 9) para analizar la influencia de un movimiento sísmico.

En cuanto a la forma de los modos de vibración obtenidos, éstos concuerdan con los de una viga en ménsula, como corresponde al vástago del Giralddillo que se empotra en la torre.

A partir de las frecuencias naturales y modos de vibración se pueden obtener diversos parámetros que pueden servir para estudiar la evolución del estado de conservación de la estructura soporte del Giralddillo. Esto se realiza mediante la implementación de diversas técnicas cuya formulación aparece en la bibliografía (Welch, 1967, Pandey et al, 1991 y 1991b, Stubbs et al, 1992, Bendat y Piersol, 1993, Brinker et al, 2001, de Silva, 2006). Concretamente, se estudia la variación de frecuencias naturales, variación de la forma de los modos de vibración, va-

riación de la curvatura de los modos y variación de las matrices de rigidez y flexibilidad.

A lo largo del periodo considerado, no se han observado tendencias en los distintos parámetros de control considerados que alerten sobre algún cambio en el comportamiento de la estructura del vástago. Esto permite afirmar que éste se encuentra en un estado de conservación similar al del momento de su instalación, como es lógico ya que el periodo considerado es extremadamente corto comparado con la vida útil esperable de una estructura de estas características. Este tipo de análisis irá cobrando más valor a medida que vaya pasando el tiempo y se puedan percibir ciertas tendencias o cambios en la estructura que permitan avisar de la necesidad de realizar algún tipo de intervención.

11.2.7 Conclusiones

A pesar de la celeridad con que se desarrollaron los acontecimientos durante el proceso de reposición del Giraldillo sobre la Giralda, lo que incluye las tareas de instalación del sistema de

instrumentación descrito en este capítulo, se puede decir que su diseño, instalación y rendimiento hasta la fecha resultan plenamente satisfactorios.

El sistema ha permitido obtener información relevante y de gran interés para el estudio del comportamiento del Giraldillo y su estado de conservación. Además, las técnicas implementadas permitirán disponer a largo plazo de una herramienta que permita diagnosticar algún tipo de deterioro en la estructura del Giraldillo y advertir de la necesidad de realizar algún tipo de intervención.

No obstante, y dado el lógico deterioro que sufre cualquier tipo de sensor a lo largo del tiempo y más si se encuentra expuesto a condiciones climatológicas severas, es lógico recomendar que se realice una revisión de la instalación al menos cada 5 años, coincidiendo con las operaciones de revisión y mantenimiento del estado de conservación del Giraldillo que se tienen programadas, y que se han de llevar a cabo independientemente de que en el proceso de monitorización se haya detectado algún funcionamiento anómalo.

Bibliografía

WELCH, P. (1967). *The use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: a Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms*. IEEE transaction on audio and electroacoustics, Vol AU-15, No 2, June 1967.

J.S. BENDAT y A. G. PIERSOL (1993). *Engineering Applications of correlation and Spectral Analysis*, John Wiley & Sons.

BRINCKER, R., ZHANG, L. y ANDERSEN, P. (2001). *Modal Identification of Output-Only System using Frequency Domain Decomposition*. Smart Materials and Structures 10 No 3 441-445.

DE SILVA, C. (2006). *Vibration. Fundamentals and Practice*. Editorial Taylor & Francis.

PANDEY et al. (1991). *Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes*. Journal of Sound and Vibration, 145 (2), 321-332.

STUBBS, N., KIM, J. T., y TOPLE, K (1992). *An Efficient And Robust Algorithm For Damage Localization In Offshore Plataforms*. Proc. ASCE Tenth Structures Congress, 543-546.

PANDEY, A.K. y BISWAS, M. (1991). *Damage Detection In Structures Using Changes In Flexibility*. Journal of Sound and Vibration, 169 (1), 3-17.