

Análisis Modal Experimental (EMA) y Análisis Modal Operacional (OMA) en seguidores fotovoltaicos

Experimental Modal Analysis (EMA) and Operational Modal Analysis (OMA) on photovoltaic trackers

Manuel Benítez Velasco^a, José María Terrés-Nicolí^b y Marina Hinojosa Lucena^c

^a Ingeniero Civil. Oritia & Boreas. Ingeniero de proyecto. benitezvelasco@oritayboreas.com

^b Dr. Ingeniero de Caminos, C y P. Oritia & Boreas / Universidad de Granada. Director Ejecutivo. terresnicoli@oritayboreas.com

^c Ingeniera de Caminos, C y P. Oritia & Boreas. Coordinadora de proyectos. hinojosalucena@oritayboreas.com

RESUMEN

Este estudio presenta el Análisis Modal Experimental (EMA) y el Análisis Modal Operacional (OMA) realizado para un seguidor fotovoltaico, con propósito de caracterizar experimentalmente, la información modal fundamental (frecuencias, ratios de amortiguamiento y formas modales) de esta estructura. Se destaca a partir de los resultados, el comportamiento no lineal apreciable en el seguidor solar estudiado, identificado gracias a la ejecución conjunta de ambas tipologías de análisis (EMA y OMA).

ABSTRACT

This study deals with the Experimental Modal Analysis (EMA) and the Operational Modal Analysis (OMA) performed for a photovoltaic tracker, with the purpose of characterizing, in a real way, the fundamental modal information (frequencies, damping ratios and modal shapes) of this structure. It is worth mentioning the non-linear behaviour of the solar tracker studied, identified thanks to the joint execution of both types of analysis (EMA and OMA).

PALABRAS CLAVE: monitorización, EMA, OMA, modal, seguidor, solar, viento

KEYWORDS: monitoring, EMA, OMA, modal, tracker, solar, wind

1. Introducción

El objetivo del presente estudio es la caracterización modal de un seguidor solar fotovoltaico (tracker), mediante análisis modal teórico, análisis modal operacional (OMA) y análisis modal experimental (EMA).

La estructura objeto de este estudio se corresponde con un seguidor solar fotovoltaico 1Vx60 Interior (véase la Figura 1), con sistema de seguimiento de un solo eje horizontal, de longitud total aproximadamente igual a 70.4 m y ancho aproximado de 2.3 m.

El análisis modal realizado (teórico, operacional y experimental) tiene como propósito caracterizar los dos primeros modos de torsión de la estructura, que se corresponden al modo fundamental de torsión de los voladizos de los extremos del tracker, así como también el tercer modo de torsión, que coincide con el modo fundamental de torsión del vano central del tracker.



Figura 1. Fotografía del seguidor solar (tracker), objeto de este estudio, instalado en el laboratorio (LACIAD) de Oritia & Boreas.

2. Análisis modal teórico

Previo al análisis modal operacional y/o experimental, y para el seguidor solar (tracker) objeto de este estudio, se ha realizado un análisis modal teórico de esta estructura, cuyo propósito

principal es la obtención de las propiedades modales fundamentales de forma teórica (frecuencias naturales de vibración, formas modales y momentos de inercia máscicos modales), que se emplearán como datos principales para el contraste y comprobación de los resultados de las siguientes fases del presente estudio.

Este análisis modal teórico se ha realizado mediante un modelo de elementos finitos, apropiado para la consecución de los resultados modales relativos a los modos fundamentales de torsión de esta estructura.

Los dos primeros modos de torsión se corresponden al modo fundamental de torsión de los voladizos de los extremos del tracker (véase la Figura 2), mientras que el tercer modo de torsión corresponde al modo fundamental de torsión del vano central del tracker (Figura 3).

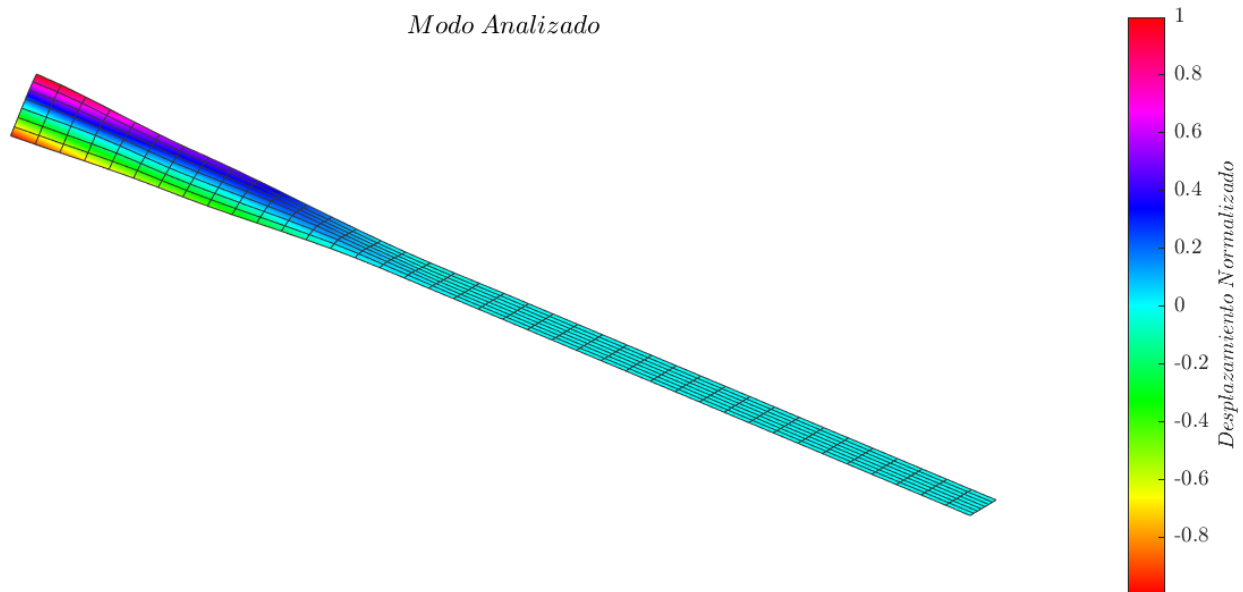


Figura 2. Forma modal normalizada, asociada al modo de torsión del vano extremo (resultados análisis modal teórico).

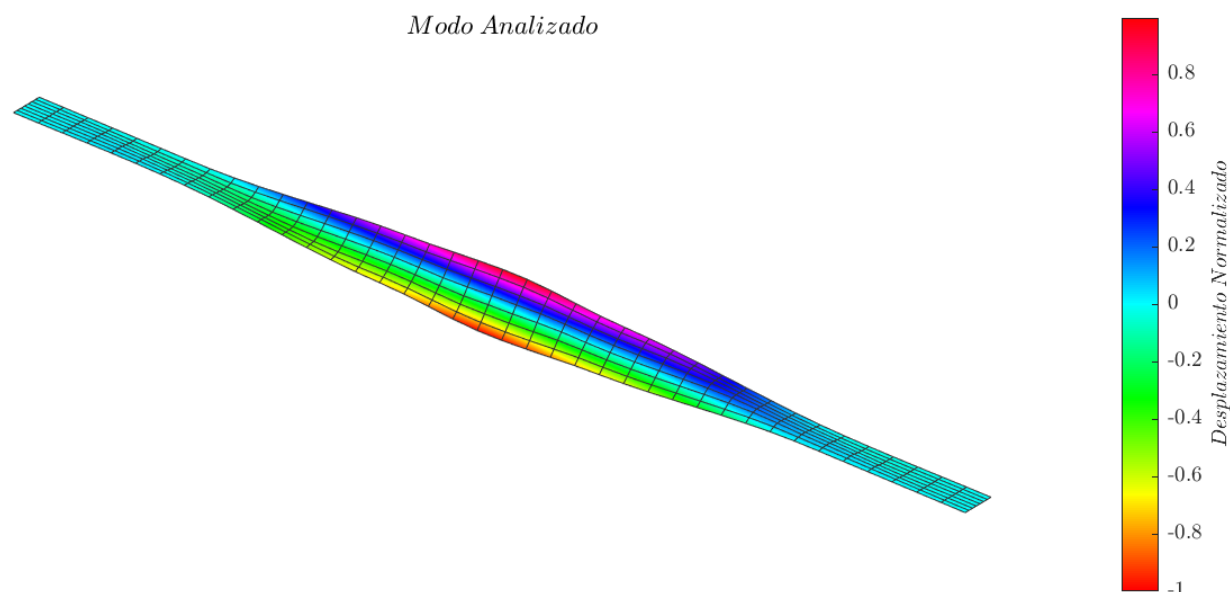


Figura 3. Forma modal normalizada, asociada al modo de torsión del vano central (resultados análisis modal teórico).

3. Análisis Modal Operacional (OMA)

El análisis OMA realizado se fundamenta en la monitorización continua, y su posterior análisis, de la respuesta estructural del seguidor solar inducida por la excitación ambiental debida fundamentalmente a la acción del viento.

Para la medida de la respuesta estructural del seguidor solar se instalaron en el mismo 16 acelerómetros uniaxiales (véase la Figura 4), distribuidos adecuadamente en la estructura para capturar la forma y amplitud de los modos de interés.



Figura 4. Fotografía del detalle de la disposición de acelerómetros en el seguidor solar.

3.1 Metodología del análisis OMA

A continuación, se detalla la metodología empleada para el desarrollo del análisis OMA. Esta metodología se basa en dos consideraciones fundamentales; el sistema estructural analizado se asume lineal y la excitación ambiental corresponde a “ruido blanco”.

Una vez seleccionados los días adecuados para el análisis, aquellos para los cuales se obtiene una mayor excitación sobre el sistema estructural, se representa la serie temporal de velocidad del viento registrada por el anemómetro (frecuencia de muestreo igual a 1 Hz), para a continuación, de estas series temporales seleccionar el intervalo de interés para cada una de las muestras a analizar (periodo, de varias horas de duración, de mayor magnitud de velocidad del viento). En la Figura 5, se representa la velocidad del viento registrada por el anemómetro para una de las muestras (en adelante, muestra de ejemplo), indicando en la figura la velocidad media horaria y la velocidad de ráfaga de 10 minutos, asociadas al periodo representado

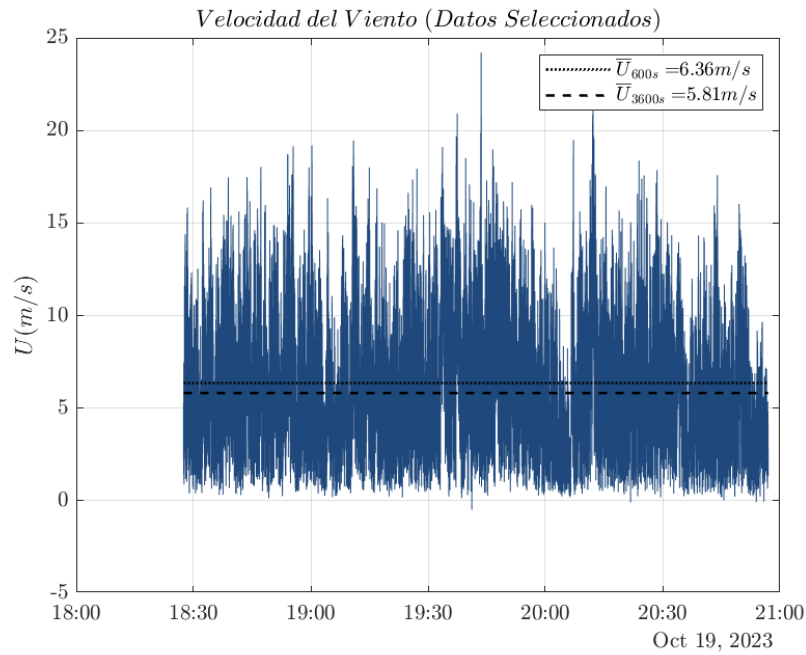


Figura 5. Velocidad del viento asociada a la muestra de ejemplo.

A continuación, empleando los datos de aceleración de las señales medidas por cada uno de los acelerómetros se calcula, para cada muestra, la matriz de densidades espectrales cruzadas (PSD) y su descomposición de valores singulares. En la Figura 6 se representa el primer valor singular de la matriz PSD, para la muestra de ejemplo, cada uno de los picos de estas curvas

se corresponde previsiblemente con un modo de la estructura. Por consiguiente, se identifican algunos de los primeros picos de estas curvas, y se obtiene para cada uno de ellos su forma modal asociada haciendo uso de la matriz de densidades espectrales cruzadas (PSD) y de su descomposición de valores singulares (metodología descrita en [1]).

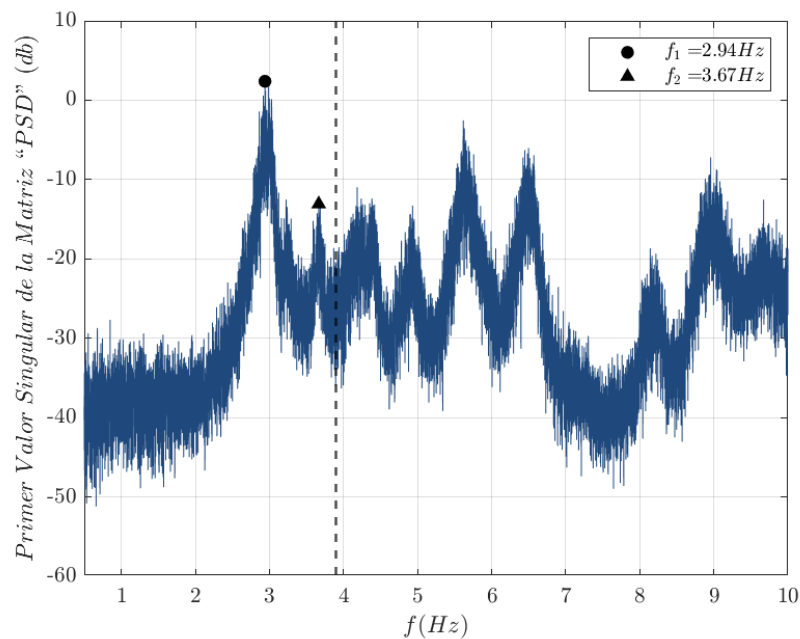


Figura 6. Primer valor singular de la matriz PSD, muestra de ejemplo.

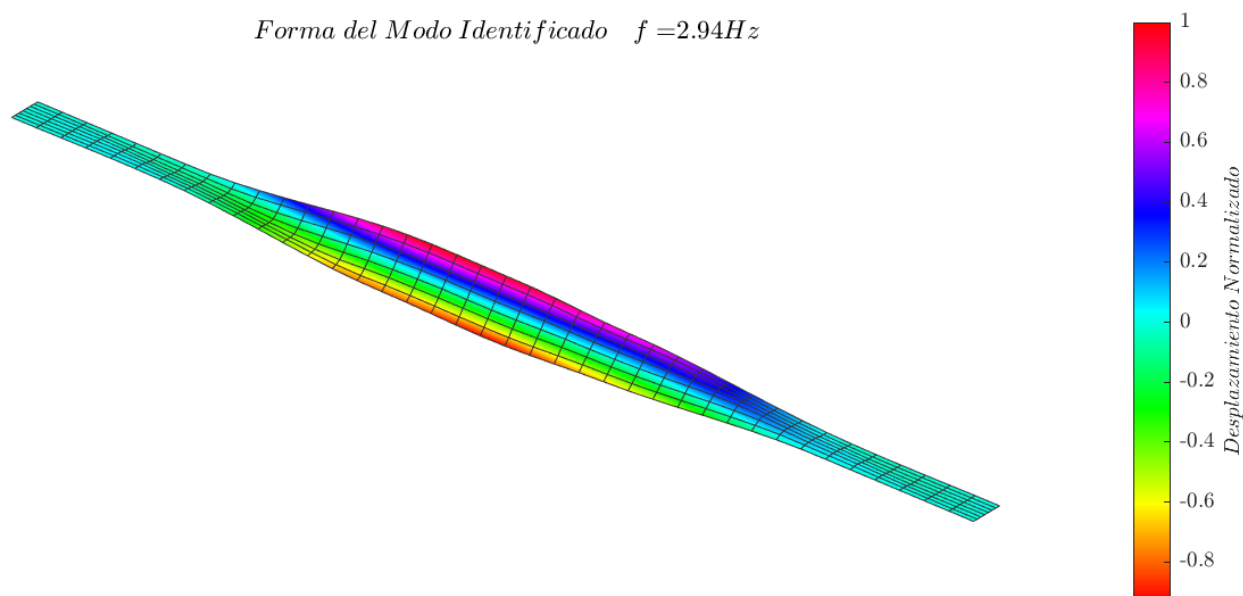


Figura 7. Forma modal normalizada, asociada al modo 1 identificado, muestra de ejemplo.

Adicionalmente, se realiza una evaluación (análisis MAC) de la variación de la forma modal en un entorno próximo al pico identificado. El valor MAC ilustra la consistencia de la forma modal del pico identificado con las formas modales asociadas a las frecuencias del entorno.

De los picos identificados (modos identificados) se selecciona aquel que mejor se corresponde con el modo fundamental de

torsión del vano analizado. Para ello, a partir del análisis realizado para los picos identificados, se evalúan los resultados de los análisis MAC, las formas modales, la componente imaginaria de estas formas modales y su ortogonalidad.

En la Figura 7 se representa la forma modal del primer pico (modo) identificado, para la muestra de ejemplo.

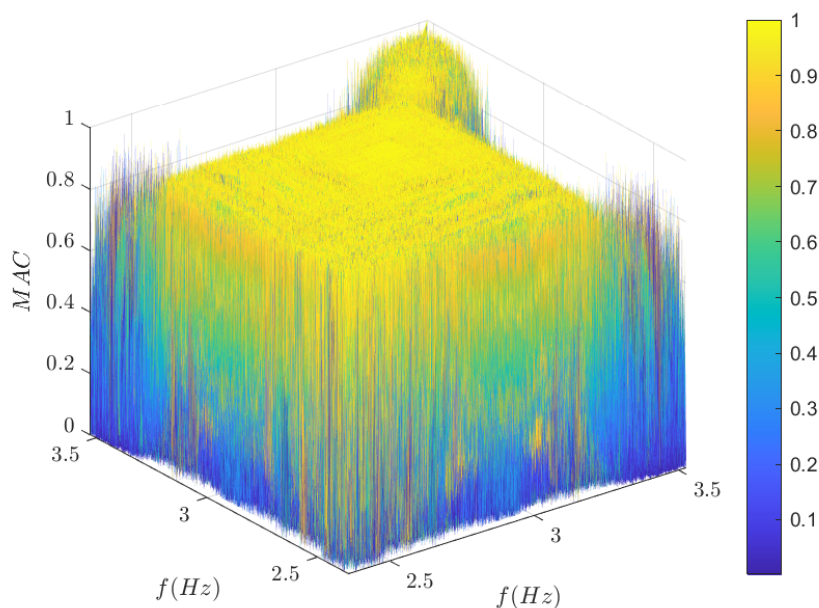


Figura 8. Análisis MAC para forma modal normalizada, asociada al modo 1 identificado, muestra de ejemplo.

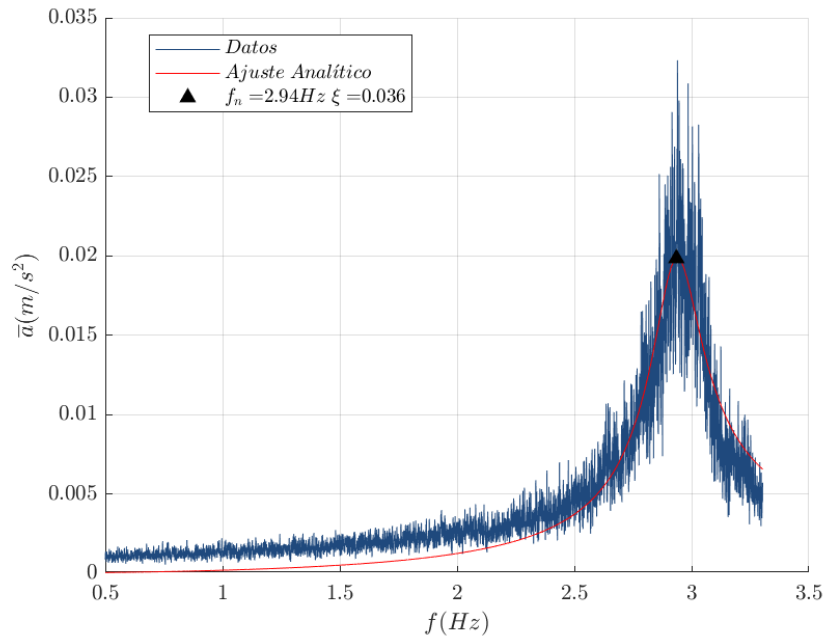


Figura 9. Ajuste analítico, asociada al modo 1 identificado, muestra de ejemplo.

Por su parte, en la Figura 8 se representa el análisis MAC del primer pico (modo) identificado, para la muestra de ejemplo, que se corresponde con el modo fundamental de torsión del vano central.

Para el modo identificado que mejor se corresponde con el modo fundamental de torsión del vano analizado, y para cada una de las muestras, se determina su serie temporal de aceleración modal, así como la amplitud de esta última señal en el dominio de la frecuencia (curva azul de la Figura 9).

Finalmente, mediante el ajuste de un modelo analítico (detalle del modelo en [2]) en el dominio de la frecuencia (curva roja de la Figura 9), se determina la frecuencia natural y el ratio de amortiguamiento asociados al modo identificado que mejor se corresponde con el modo fundamental de torsión del vano analizado, y para cada una de las muestras.

4. Análisis Modal Experimental (EMA)

El análisis EMA realizado se basa en ensayos de vibración libre, en los cuales se analiza la

respuesta estructural del seguidor solar durante las fases de aplicación y cese de una excitación de los modos de interés.

Para la medida de la respuesta estructural del seguidor solar se han empleado un total de 16 acelerómetros uniaxiales distribuidos adecuadamente en la estructura para capturar la forma y amplitud de los modos de interés.

En cada uno de estos ensayos se excita de forma manual el modo de interés, de forma progresiva y controlada, sin llegar a exceder la amplitud modal máxima prevista para cada ensayo. La vibración inducida excita de manera predominante el modo de interés, comprobando que la frecuencia y forma modal son coherentes con los resultados del análisis modal teórico.

4.1 Metodología del análisis EMA

Una vez realizados los ensayos de vibración libre, se obtienen las señales de aceleración, medidas por cada uno de los acelerómetros.

A partir de estas señales y haciendo uso de las formas modales (normalizadas) obtenidas del análisis modal teórico, para los modos de interés, se determina la señal de aceleración modal para el modo analizado en cada uno de los ensayos.

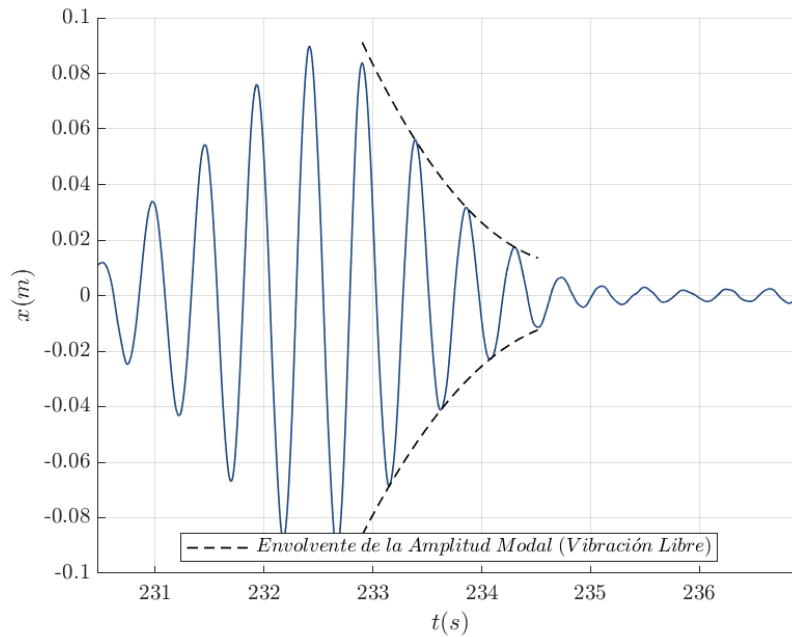


Figura 10. Señal de desplazamiento modal (modo normalizado) y envolvente de la respuesta, ensayo de ejemplo.

4.1.1. Resultados brutos de los ensayos

A continuación, se describen los principales resultados brutos de cada uno de los ensayos.

El primer resultado se corresponde a la señal de desplazamiento modal (amplitud de la forma modal normalizada), obtenida mediante la adecuada integración de la señal de aceleración modal, junto a envolvente ajustada a esta

respuesta durante el rango de vibración libre (véase la Figura 10).

El segundo resultado es la serie temporal de la aceleración modal para el modo analizado, durante la fase de vibración libre, y la amplitud de esta aceleración modal en el dominio de la frecuencia, identificando a la frecuencia predominante como la frecuencia modal del modo analizado (véase la Figura 11).

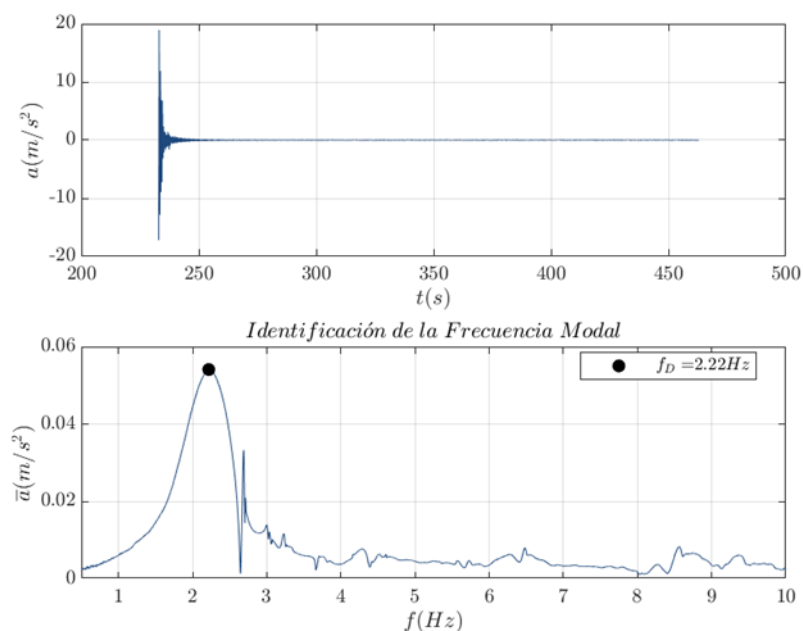


Figura 11. Identificación de frecuencia modal (fase de vibración libre), ensayo de ejemplo.

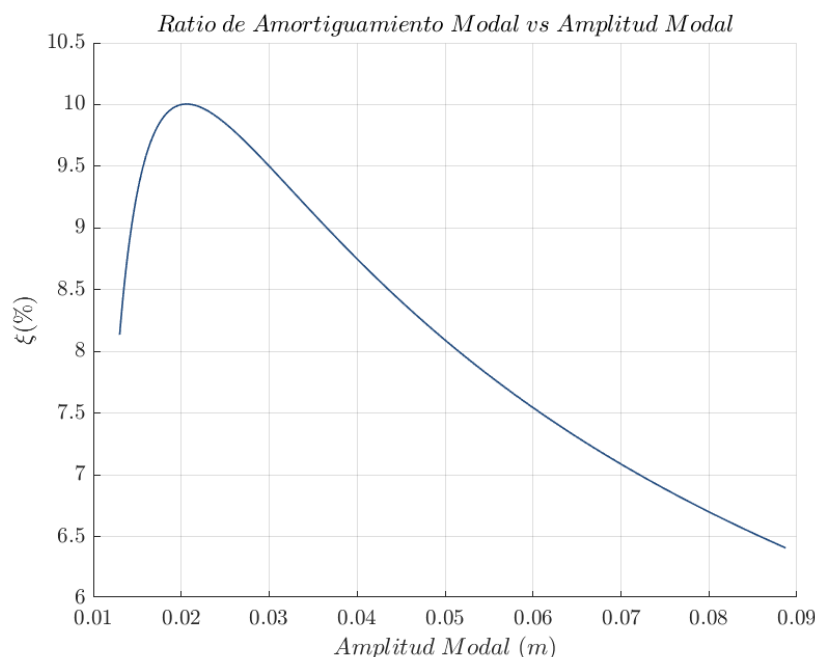


Figura 12. Relación entre el ratio de amortiguamiento modal y la amplitud modal (modo normalizado), ensayo de ejemplo.

El tercer resultado, haciendo uso de la envolvente ajustada a la respuesta, representa la relación entre el ratio de amortiguamiento modal, determinado para el modo analizado, y la amplitud modal del modo normalizado (véase la Figura 12).

4.1.2. Análisis de resultados de amortiguamiento modal

Como se puede apreciar en los resultados brutos de los ensayos, los modos analizados muestran un ratio de amortiguamiento modal dependiente de la amplitud modal, concretamente y obviando el comportamiento para bajas amplitudes modales, se aprecia una disminución del ratio de amortiguamiento modal con el aumento de la amplitud modal.

Este comportamiento, es propio de sistemas no lineales que cuentan con un amortiguamiento viscoso (inherente) y un amortiguamiento de Coulomb (amortiguamiento debido a fuerzas de fricción). La contribución del amortiguamiento de Coulomb al amortiguamiento total o equivalente disminuye con la amplitud, por lo que, con

propósito de obtener el amortiguamiento viscoso inherente asociado a los modos analizados, se ajustan los resultados (relación entre el ratio de amortiguamiento modal y la amplitud modal) a un modelo analítico con amortiguamiento viscoso y de Coulomb (modelo descrito en [3]).

Se prevé que las fuerzas de fricción manifiestas en las rótulas de seguidor solar (véase la Figura 13) pueden suponer una contribución importante al amortiguamiento de Coulomb observado.



Figura 13. Fotografía de una de las rótulas del seguidor solar.

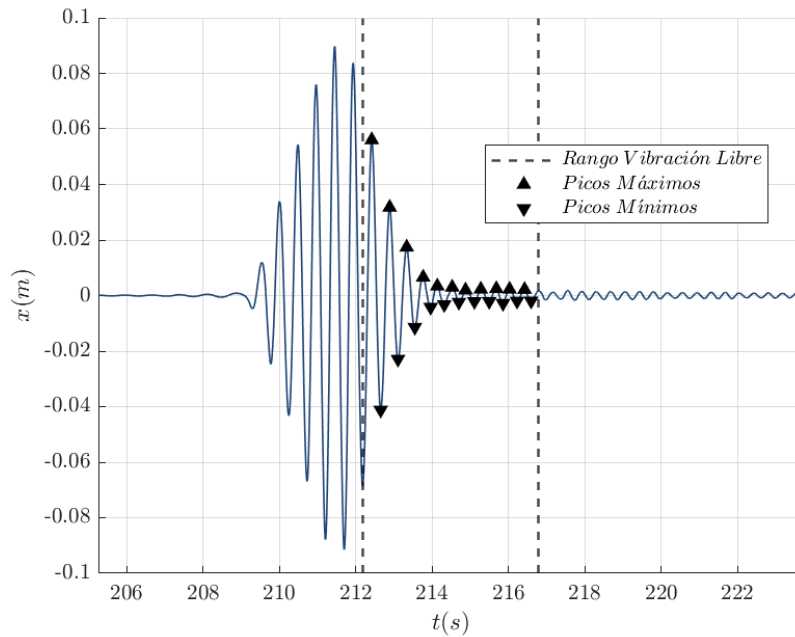


Figura 14. Señal de desplazamiento modal (modo normalizado), e identificación de picos empleados en la determinación de la frecuencia modal, ensayo de ejemplo.

4.1.3. Análisis de resultados de frecuencia modal

Se ha realizado un análisis, en el dominio del tiempo, de la variación de la frecuencia modal con la amplitud modal (véase la Figura 14 y la Figura 15).

Para amplitudes modales reducidas, se observa que, la frecuencia modal llega a

presentar valores por encima de la frecuencia natural teórica, lo cual puede deberse a bloqueo de rótulas. Por su parte, a partir de cierta amplitud, se aprecia que la frecuencia modal disminuye a medida que crece la amplitud modal, este hecho puede deberse, previsiblemente, a un comportamiento plástico.

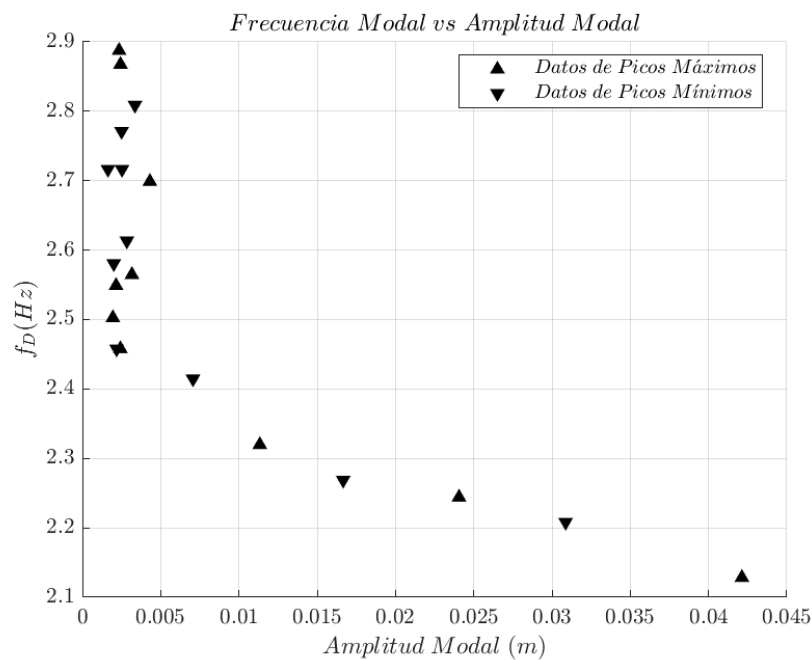


Figura 15. Variación de la frecuencia modal con la amplitud modal, ensayo de ejemplo.

5. Conclusiones

Para el tracker estudiado, se aprecia una no linealidad manifiesta por la estructura, tanto en los resultados del análisis EMA como en los resultados del análisis OMA, pues en estos resultados se aprecia una variación significativa de los valores de frecuencia modal natural y ratio de amortiguamiento modal, en función de la amplitud modal.

Respecto a los resultados del análisis OMA, si bien se consideran determinados de forma oportuna, las amplitudes modales a las que se asocian distan mucho de los valores de amplitud modal previsibles para situaciones de diseño, y por tanto, atendiendo a la no linealidad manifiesta por la estructura no se pueden emplear los valores obtenidos de esta tipología de análisis (OMA) para cualquier amplitud modal, si no exclusivamente para las amplitudes asociadas a estos resultados.

Se considera especialmente importante realizar un análisis conjunto mediante ambas técnicas (EMA y OMA) para una adecuada y realista caracterización modal de este tipo de estructuras, de marcado comportamiento no lineal.

Agradecimientos

Se agradece la contribución de varios miembros del equipo técnico y de ingeniería de Oritia & Boreas, en especial de D. José Antonio Tapia Reyes y D. Alejandro Palma Torres, quienes ayudaron en el diseño y fabricación del sistema de monitorización, de los elementos para la excitación del tracker y en la ejecución de los propios ensayos y análisis de resultados.

Referencias

- [1] Rainieri, C. & Fabbrocino, G. (2014) *Operational modal analysis of civil engineering structures*, New York, Springer.
- [2] Paz, M. & Kim, Y. H. (2019) *Structural dynamics: Theory and computation*, Switzerland, Springer.

- [3] Den Hartog, J. P. (1947) *Mechanical vibrations*, New York, McGraw-Hill.