

Diseño y desarrollo de un sistema de control de respuesta dinámica a viento sobre seguidor solar

Design and development of a dynamic wind response control system on a solar tracker

Manuel Benítez Velasco^a, José María Terrés-Nícoli^b, Marina Hinojosa Lucena^c y Orlando Simancas Montoto^d

^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

^d Dr. Ingeniero de Minas. Asturmadi RENEERGY. Director General. osmontoto@asturmadi.com

RESUMEN

Este estudio presenta el diseño y desarrollo de un sistema de mitigación para reducir la respuesta dinámica, para dos tipologías de seguidor solar, frente a la acción turbulenta del viento. Se propone el un sistema de amortiguadores de masa sintonizada (TMDs), para los cuales se determinan sus propiedades óptimas, y el efecto derivado de su instalación, similar a elevar el amortiguamiento inherente de los dos primeros modos de torsión de ambas tipologías de estructura de un 2 % a un 10 %, aproximadamente.

ABSTRACT

The present study deals with the design and development of a mitigation system to reduce the dynamic response, for two types of solar trackers, under turbulent wind action. All this by means of tuned mass dampers (TMDs), for which their optimum properties are determined, and the effect derived from their installation, similar to raising the inherent damping of the first two torsional modes of both types of structure from 2 % to 10 % approximately.

PALABRAS CLAVE: estructuras, amortiguador, TMD, tracker, vibración, viento

KEYWORDS: structures, damper, TMD, tracker, vibration, wind

1. Introducción

El objetivo de este estudio es el desarrollo y diseño de un sistema de control de respuesta dinámica para dos tipologías de seguidor solar (tracker interior y tracker exterior). La geometría de ambas estructuras se puede apreciar en la Figura 1.

El sistema de control de respuesta, a desarrollar y diseñar, tiene como propósito disminuir fundamentalmente la componente

resonante de la respuesta dinámica de estos seguidores solares, frente a la acción turbulenta de un viento de diseño.

Adoptándose, como viento de diseño representativo, aquel caracterizado por una velocidad media diezminutal, a diez metros de altura, igual a 27 m/s y un terreno con una altura de rugosidad igual a 0.05 m.

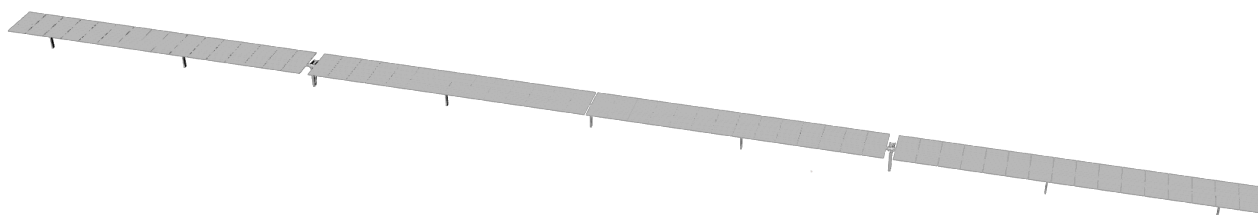


Figura 1. Detalle 3D de los seguidores solares estudiados.

2. Análisis modal

Previo al dimensionamiento y diseño de los dispositivos de control de respuesta, para los seguidores solares (trackers), se ha realizado un análisis modal de las estructuras objeto de este estudio, cuyo propósito principal es la obtención de las propiedades modales fundamentales de estas estructuras (frecuencias naturales de vibración, formas modales y momentos de inercia máscicos modales), que se emplearán como datos principales en las siguientes fases del presente estudio.

Este análisis modal 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 estas estructuras, empleando para ello los datos geométricos y estructurales de los seguidores solares.

En cualquiera de las dos tipologías de seguidor (interior y exterior), los dos primeros modos se corresponden al modo fundamental de torsión de los voladizos de los extremos del tracker, mientras que el tercer modo corresponde al modo fundamental de torsión del vano central del tracker.

Como ejemplo, en la Figura 2 se puede apreciar la forma modal del modo 2 (simétrico al modo 1) del tracker interior. En la Figura 3 se presenta la forma modal del modo 3 del tracker interior.

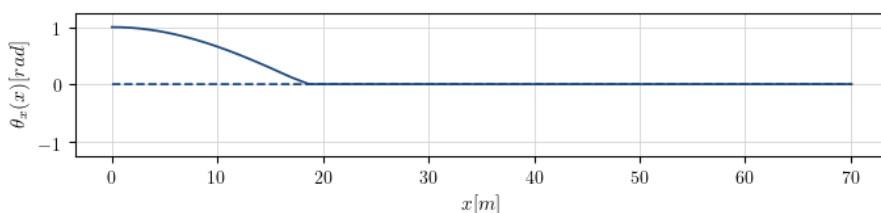


Figura 2. Modo 2, tracker interior.

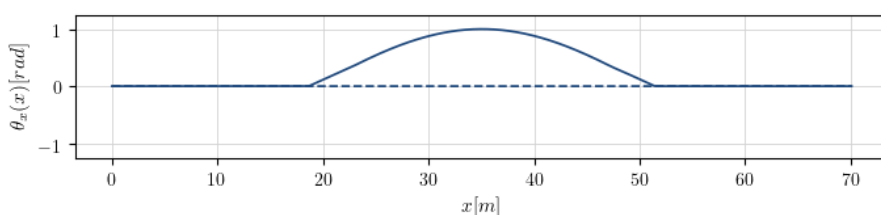


Figura 3. Modo 3, tracker interior.

3. Caracterización de cargas modales

Con propósito de llevar a cabo un diseño óptimo de los dispositivos de control de respuesta, para los seguidores solares (trackers), se hace necesaria la adecuada caracterización de la acción o carga dinámica que se espera excite a estas estructuras, correspondiendo esta última, y para el caso que nos ocupa, a la acción turbulenta del viento.

Como hipótesis de diseño, empleada para la caracterización de los dispositivos de control de respuesta y relativa a la acción del viento, se considera que la densidad espectral de las cargas modales (S_m) es proporcional a la densidad espectral de la componente turbulenta de la velocidad del viento a la altura del seguidor solar (S_u).

Esta hipótesis se fundamenta en la idea de suponer que las cargas modales (S_m) se pueden describir como cargas aerodinámicas dependientes principalmente de un coeficiente de carga constante y de la velocidad, del viento de referencia considerada, al cuadrado.

Pudiéndose demostrar, en tal caso, que la varianza de la componente fluctuante de la carga modal es proporcional a la varianza de la componente turbulenta de la velocidad del viento (hipótesis descrita en [1]).

Para la comprobación y validación de la hipótesis de diseño adoptada se han realizado dos simulaciones numéricas, una para cada tipología de seguidor (interior y exterior), con los resultados (series temporales de presión sobre trackers), adaptados de manera oportuna, de ensayos en túnel de viento realizados por Oritia & Boreas.

En estas simulaciones se determinan las densidades espectrales de las cargas modales (S_m) asociadas a los tres primeros modos de torsión, caracterizados previamente en el análisis modal realizado, y se ajustan (mediante una constante de proporcionalidad) a la componente turbulenta de la velocidad del viento a la altura del seguidor solar (S_u).

En la Figura 4 se muestra el ajuste de densidades espectrales, anteriormente descrito, para el modo 2 del tracker interior. Se puede apreciar una elevada bondad del ajuste por encima de 0.5 – 1 Hz.

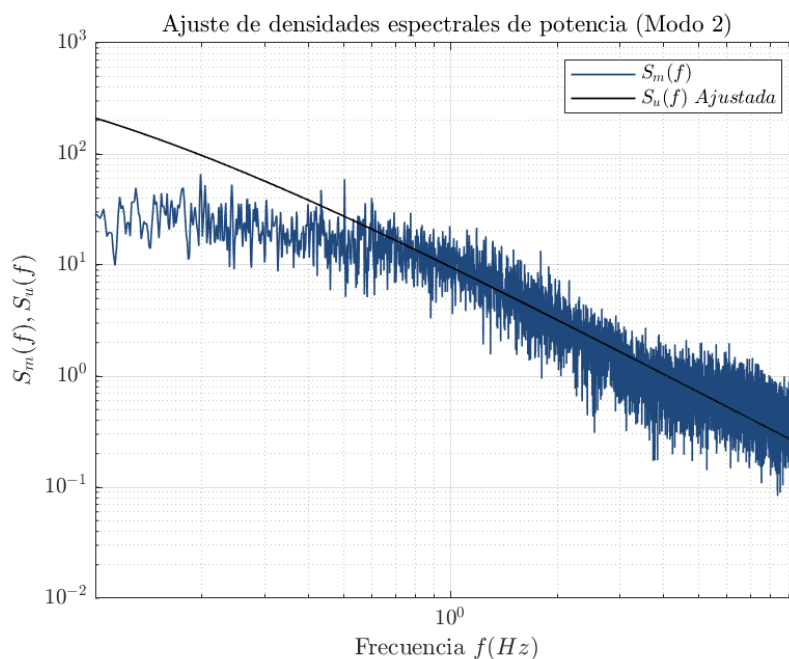


Figura 4. Ajuste de densidades espectrales de potencia para el modo 2, tracker interior.

4. Selección de dispositivos de control de respuesta estructural

Para este trabajo se han seleccionado los amortiguadores de masa sintonizada (TMDs) como dispositivos de control de respuesta, debido a las ventajas manifiestas por esta clase de amortiguador frente al resto de tipologías (consultar [2] para mayor detalle de tipologías) y a su adecuación a las particularidades del presente problema estructural.

Los amortiguadores de masa sintonizada (TMDs) son dispositivos mecánicos empleados habitualmente en instalaciones y/o estructuras modernas, que se constituyen por una inercia (masa o inercia rotacional), un elemento elástico y un amortiguador, empleados para reducir o eliminar la vibración no deseada.

Generalmente son conectados al sistema principal en aquellos puntos de la estructura donde las amplitudes de los modos, cuya vibración se pretende reducir, son máximas, consiguiendo así un funcionamiento de éstos más efectivo.

Comúnmente los amortiguadores de masa sintonizada (TMDs), utilizados en estructuras, presentan ratios de inercia (cociente de la masa o inercia rotacional del TMD y la masa o inercia rotacional del modo) entre el 1 % y el 20 %, encontrándose los valores más típicos de este ratio comprendidos entre el 2 % y el 5 %.

5. Dimensionamiento de TMDs óptimos

En esta fase se determinan las propiedades de los TMDs óptimos (momento de inercia másico “MMI”, rigidez y amortiguamiento) asociados a cada uno de los tres primeros modos de torsión de las dos estructuras (tracker interior y tracker

exterior), excitadas por la acción del viento, y para múltiples valores de ratio de MMI (cociente del momento de inercia másico del TMD y del momento de inercia másico del modo), mediante el uso de un modelo analítico.

Mediante el modelo analítico desarrollado se evalúa la amplitud de la respuesta modal, para cada uno de los tres primeros modos de torsión de cada tipología de seguidor solar, en el dominio de la frecuencia, frente a una excitación de viento que satisface la hipótesis descrita anteriormente.

Dicha excitación (carga modal) presenta una densidad espectral de potencia proporcional a la densidad espectral de potencia de la componente turbulenta de la velocidad del viento de diseño a la altura del seguidor solar.

Una vez caracterizada la excitación modal y las propiedades modales fundamentales de las estructuras, se obtienen, haciendo uso del modelo analítico desarrollado, las propiedades del TMD único óptimo (ubicado en punto de máxima amplitud modal) asociado a cada uno de los tres modos de torsión de las dos tipologías de seguidor solar (revisar [3] para descripción analítica de TMD óptimo).

A modo de ejemplo, en la Figura 5 se aprecia la amplitud de los modos 1 y 2 para el tracker interior, sin y con un TMD único óptimo (ubicado en punto de máxima amplitud modal) de ratio de MMI igual al 10 %. Se define como TMD óptimo, a efectos de este dimensionamiento, aquel que minimiza la suma de amplitudes de las componentes de la respuesta modal (área encerrada bajo la curva de amplitud modal).

La metodología anteriormente expuesta se ha empleado para determinar las propiedades de los TMDs únicos óptimos (ubicados en puntos de máxima amplitud modal) asociados a cada uno de los tres primeros modos de torsión de las dos estructuras (tracker interior y tracker exterior) y para seis valores distintos de ratio de MMI, que abarcan desde el 2 % al 20 %.

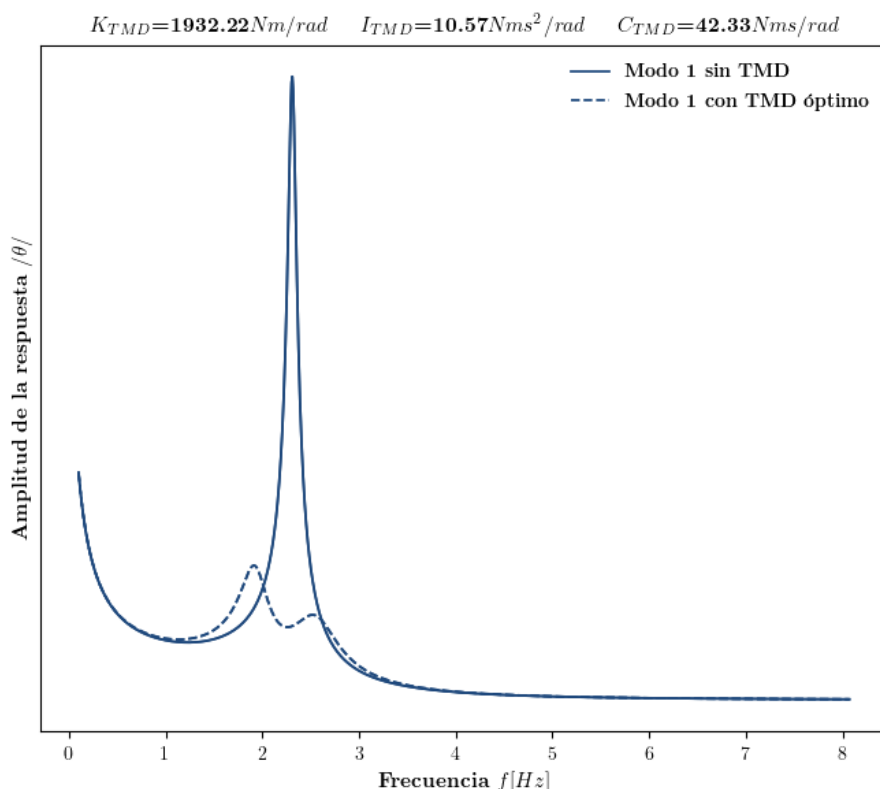


Figura 5. Amplitud (giro) del modo 1 y 2, en el dominio de la frecuencia, sin y con TMD único óptimo (ubicado en punto de máxima amplitud modal), tracker interior ($MMI_{TMD}/MMI_n = 10\%$).

6. Evaluación analítica de la respuesta estructural con TMDs óptimos

Llegados a este punto, y habiendo dimensionado los TMDs únicos óptimos (ubicados en puntos de máxima amplitud modal), para los tres modos de torsión de las dos tipologías estructurales (tracker interior y tracker exterior), y para distintos valores de ratio de MMI (cociente del momento de inercia másico del TMD y del momento de inercia másico del modo), es necesario concretar la “potencia” del TMD (“potencia” objetivo), en términos de ratio de MMI, que de lugar a la atenuación de la vibración exigida a los dispositivos de control de respuesta.

En relación con esta última cuestión, se espera que la instalación de los dispositivos de control de respuesta produzca un efecto, en términos de reducción de respuesta, similar a

eleva el amortiguamiento inherente de los dos primeros modos de torsión de ambas estructuras de un 2 % a un 8 - 10 %.

Para poder concretar la “potencia” objetivo de los TMDs, se han ejecutado una serie de simulaciones numéricas, en el dominio del tiempo, donde se evalúa la respuesta total de cada uno de los tres modos de las dos tipologías estructurales, sin y con los TMDs únicos óptimos previamente dimensionados (ubicados en puntos de máxima amplitud modal), frente a cargas modales sintéticas que garantizan las propiedades de la excitación por acción del viento descrita anteriormente.

A modo de ejemplo, en la Figura 6 se muestra la respuesta modal “total” en el dominio del tiempo, sin y con TMD único óptimo (ubicado en punto de máxima amplitud modal) de ratio de MMI igual al 10 %, para el modo 1 y 2 del tracker interior.

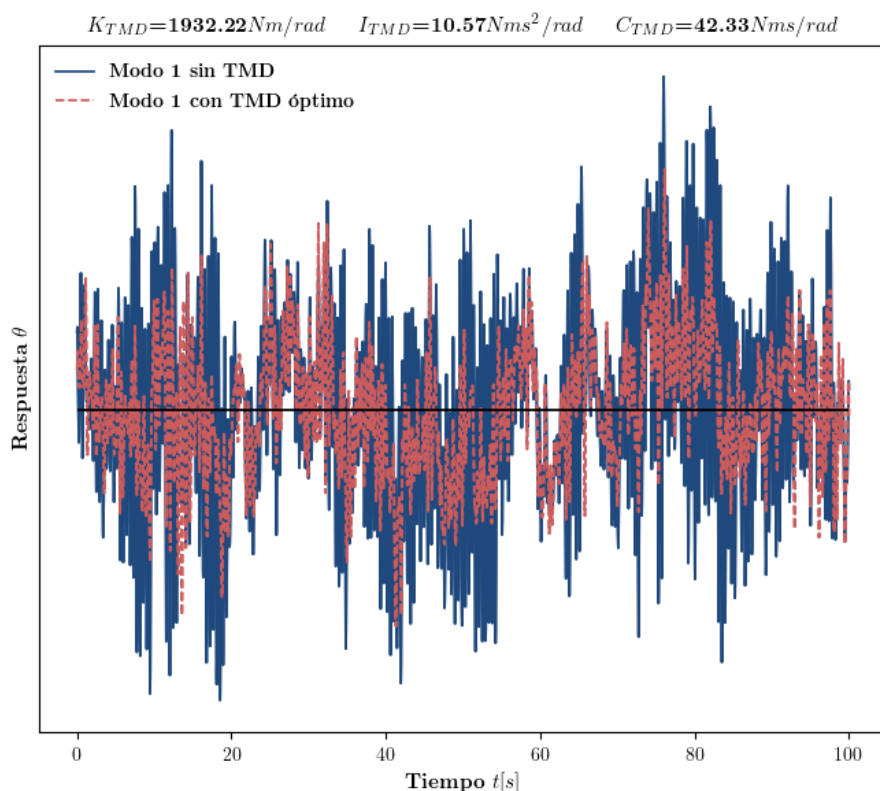


Figura 6. Serie temporal de la amplitud (giro) del modo 1 y 2, sin y con TMD único óptimo (ubicado en punto de máxima amplitud modal), tracker interior ($\text{MMI}_{TMD}/\text{MMI}_n = 10\%$).

De cada una de las simulaciones se obtiene el parámetro γ , que se define como el cociente de la respuesta modal máxima absoluta con TMD y la respuesta modal máxima absoluta sin TMD.

Por otra parte, se han realizado simulaciones numéricas similares, donde se evalúa la respuesta total de cada uno de los tres modos de las dos tipologías estructurales, sin TMDs, pero con un mayor ratio de amortiguamiento modal inherente, frente a cargas modales sintéticas que garantizan las propiedades de la excitación por acción del viento descrita anteriormente.

Para cada configuración, es decir, para cada ratio de MMI, de cada modo y de cada tipo de tracker, se obtiene el valor promedio para el parámetro γ . Estos resultados se representan en función del ratio de MMI, donde además se incluye un ajuste de tipo potencial a los mismos.

Finalmente, y en base a estos resultados, se puede concluir que adoptando TMDs únicos óptimos (ubicados en puntos de máxima amplitud modal) de ratio de MMI igual al 10 % se alcanza en todos los casos (cada uno de los tres modos de torsión de las dos tipologías estructurales) la atenuación de la vibración exigida a los dispositivos de control de respuesta, pues el ratio de amortiguamiento modal inherente para los dos primeros modos aproximadamente equivalente alcanzado con este ratio de MMI se encuentra en torno al 8 - 10 %.

7. Validación del dimensionamiento

En esta sección se describen las simulaciones dinámicas ejecutadas, para la evaluación de la respuesta estructural (sin y con TMDs únicos óptimos dimensionados), empleando los

resultados (series temporales de presión sobre trackers), adaptados de manera oportuna, de ensayos en túnel de viento realizados por Oritia & Boreas. Utilizando un modelo de cálculo diferente al empleado en el dimensionamiento de los TMDs.

Estas simulaciones permiten validar los resultados obtenidos hasta el momento, desde un enfoque analítico, así como obtener las sollicitaciones de diseño para los TMDs únicos óptimos (giros máximos, etc.), que serán utilizadas en el diseño final de TMDs.

Se han realizado cuatro simulaciones numéricas, dos para cada tipología de seguidor solar (interior y exterior). Las dos simulaciones ejecutadas por tipología estructural se corresponden a los escenarios “tracker sin TMDs” y “tracker con TMDs únicos óptimos dimensionados”. Se considera que cada TMD único óptimo se sitúa en un punto (de la viga longitudinal del seguidor) de aproximadamente máxima amplitud modal, del modo de torsión del tracker asociado al TMD. Además, estos puntos se hallan junto a soportes verticales del seguidor solar, para evitar la excitación de movimientos de traslación en los TMDs (inducidos por modos de flexión del tracker).

Como primer resultado de estas simulaciones, se obtienen las amplitudes de los

modos de torsión del seguidor, en el dominio de la frecuencia, para los dos escenarios simulados “tracker sin TMDs” y “tracker con TMDs únicos óptimos dimensionados” y para las dos tipologías de seguidor (interior y exterior). En la Figura 7 se representa dicha amplitud, para el modo 2 del tracker interior, y para el escenario “tracker con TMDs únicos óptimos dimensionados”, respectivamente. Pudiéndose comprobar la coherencia de estos resultados con los obtenidos en la fase de dimensionamiento, pues la forma y escala de la curva representada en esta figura es prácticamente coincidente a la de la curva ilustrada en la Figura 5. Esta comprobación se ha realizado para los 3 modos de torsión de ambas tipologías estructurales.

Adicionalmente, se ha evaluado el comportamiento dinámico de los TMDs únicos óptimos durante la ejecución de las simulaciones correspondientes al escenario “tracker con TMDs únicos óptimos dimensionados” y para las dos tipologías de seguidor (interior y exterior). Obteniéndose la serie temporal del giro relativo experimentado por cada TMD.

De ésta última evaluación se obtienen las sollicitaciones de diseño para los TMDs únicos óptimos, que serán utilizadas en el diseño final de TMDs.

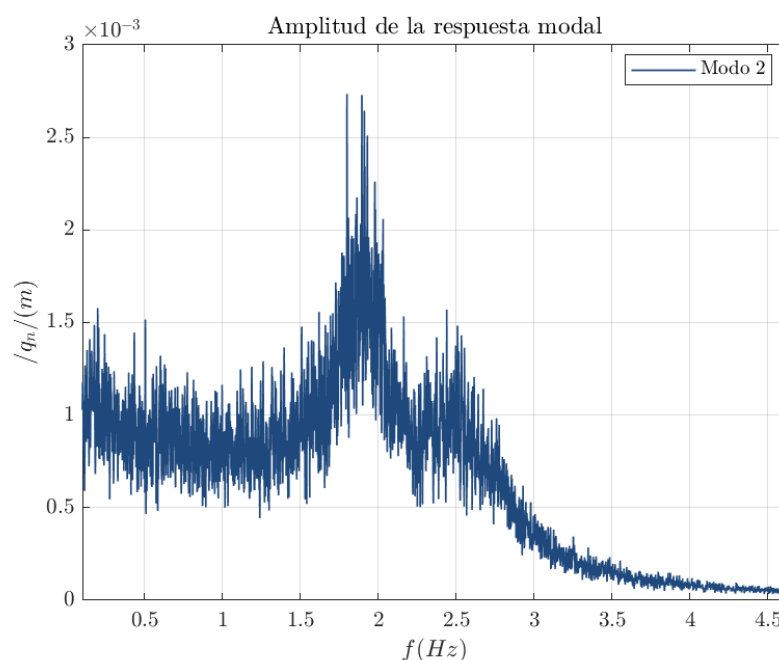


Figura 7. Amplitud del modo 1 y 2, en el dominio de la frecuencia, tracker con TMDs únicos óptimos dimensionados, tracker interior ($MMI_{TMD}/MMI_n = 10\%$).

8. Tecnología y diseño de TMDs

Una vez determinadas las propiedades de los TMDs únicos óptimos dimensionados, para las estructuras objeto de este estudio, y para la consecución de la reducción de la vibración exigida a estos dispositivos de control de respuesta, se requiere seleccionar y desarrollar una tecnología y diseño para estos amortiguadores (TMDs) que cumpla con las propiedades dimensionadas, y que se ajuste a las particularidades del problema estructural, atendiendo a un criterio de diseño óptimo.

La solución finalmente adoptada se presenta en la Figura 8, donde se puede apreciar el diseño considerado para los amortiguadores de masa sintonizada (TMDs).

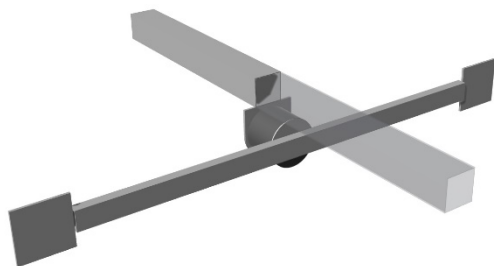


Figura 8. Detalle 3D de la tecnología y diseño adoptados para los amortiguadores de masa sintonizada (TMDs).

Esta solución se constituye principalmente por un disco (eje cilíndrico) de material elastomérico (neopreno), que cumple la función de elemento viscoelástico del sistema, fijado al eje (tubo longitudinal) del seguidor solar, a través de una placa de acero, y conectado a un brazo rígido móvil.

Un diseño que, como se puede apreciar, cuenta con la adecuada simetría para evitar la transmisión de esfuerzos cortantes, inducidos por el TMD, sobre la estructura del seguidor solar.

El brazo rígido móvil, compuesto por un tubo de acero de sección rectangular y placas de acero soldadas al tubo en sus extremos, aporta fundamentalmente la inercia rotacional (MMI) del TMD, de forma eficiente.

El giro relativo entre el brazo rígido móvil y el tubo longitudinal del seguidor se corresponde con el giro relativo experimentado por el TMD, y supone una torsión del disco de material elastomérico, comprendido entre la placa de acero conectada al tubo longitudinal del seguidor y un disco de acero soldado al brazo rígido móvil. La conexión de ambas caras del disco de material elastomérico con los elementos de acero se materializa mediante una unión adhesiva.

Como material elastomérico se ha seleccionado el neopreno, un caucho de uso de amplio espectro, elegido por sus propiedades mecánicas, su excelente comportamiento frente a la fatiga, y su amplia resistencia ante el envejecimiento y a los agentes atmosféricos.

9. Ensayos de prototipos de TMDs

Para evaluar la tecnología y diseño adoptados, para los amortiguadores de masa sintonizada (TMDs), se han ejecutado una serie de ensayos estáticos y dinámicos, necesarios para comprobar el funcionamiento del sistema, así como para obtener los resultados que permitan dimensionar, de manera óptima y precisa, el disco de material elastomérico (neopreno), que forma parte del sistema del amortiguador y que constituye el elemento viscoelástico del TMD, para cualquiera de los diferentes TMDs óptimos dimensionados.

En estos ensayos se han ejecutado 2 pruebas estáticas y 4 pruebas dinámicas sobre el prototipo de TMD fabricado (de propiedades representativas para el propósito de los ensayos), y a partir de los cuales se han obtenido los parámetros fundamentales del material

elastomérico que permiten dimensionar, de forma precisa, el disco de neopreno de cualquiera de los TMDs óptimos dimensionados.



Figura 9. Fotografía del prototipo de TMD tomada durante la ejecución de los ensayos.

De las pruebas descritas, hay que destacar los ensayos dinámicos (véase la Figura 9) durante los cuales el prototipo de TMD se rota inicialmente, para seguidamente liberarse (monitorizando su giro) y así poder analizar su respuesta de vibración libre. Cada uno de estos ensayos cuenta con una inercia rotacional diferente, a fin de excitar distintas frecuencias de vibración para el TMD, y poder evaluar el comportamiento del disco de neopreno en función de la frecuencia de vibración.

A estos resultados se han ajustado modelos analíticos, de vibración libre de un sistema amortiguado de un grado de libertad, que permiten estimar el resto de los parámetros del TMD, así como el módulo de elasticidad transversal del neopreno (G) y el parámetro ζ , que se define como el módulo de amortiguamiento transversal del neopreno, una constante definida de forma teórica que permite cuantificar la distribución homogénea del amortiguamiento viscoso en el material elastomérico.

Los resultados anteriores se representan en función de la frecuencia de la vibración libre del prototipo, manifiesta durante los ensayos, para analizar la dependencia de los parámetros G y ζ con la frecuencia de vibración.

10. Diseño final de TMDs

Con el propósito de conseguir unas dimensiones similares para todos los TMDs diseñados, se considera la disposición de 1 unidad de TMD (por modo) para la consecución de las propiedades del TMD único óptimo dimensionado para el modo 1 y 2 de los seguidores solares, y de 2 unidades de TMD (por modo) para la consecución de las propiedades del TMD único óptimo dimensionado para el modo 3 de los seguidores solares. La ubicación espacial de estas unidades de TMD coincide con la ubicación espacial de los TMDs únicos óptimos dimensionados.

En la Figura 10 se muestra una fotografía de un prototipo de TMD, de tecnología y diseño desarrollados en este estudio, montado sobre un seguidor solar.



Figura 10. Fotografía de prototipo de TMD montado sobre seguidor solar, vista frontal de detalle.

11. Conclusiones

Se espera que la instalación de los amortiguadores de masa sintonizada diseñados (TMDs), para las estructuras objeto de este estudio (tracker interior y tracker exterior), produzca un efecto, en términos de reducción de respuesta, similar a elevar el amortiguamiento inherente de los dos primeros modos de torsión de ambas estructuras de un 2 % a un 8 - 10 %. Habiéndose adoptado para este

dimensionamiento un viento de diseño representativo, caracterizado por una velocidad media diezminutal, a diez metros de altura, igual a 27 m/s y un terreno con una altura de rugosidad igual a 0.05 m.

La disposición de estos amortiguadores en los seguidores solares requiere de huecos, de ancho suficiente, en la parrilla superior (paneles solares), que permitan la rotación libre de los TMDs. Este hecho implica modificaciones estructurales en el tracker y/o reducir el número de paneles solares en el mismo.

Durante el desarrollo de este estudio se ha podido comprobar que, para los seguidores solares estudiados, utilizar TMDs únicos óptimos de MMI considerablemente superior al 10 % de la MMI del modo asociado (es decir, de potencia superior a la considerada en el diseño final de TMDs), da lugar a TMDs poco eficientes, debido a que el incremento en la reducción de respuesta, conseguido con un cierto incremento de la MMI de los TMDs, disminuye a medida que se aumenta la MMI de los TMDs.

Agradecimientos

Se agradecen las contribuciones de varios miembros del personal técnico y de ingeniería de Oritia & Boreas, en particular las de D. Iñaki Ochoa Calle que participó en el diseño de los prototipos de amortiguadores y en la preparación de ensayos, y a D. Alejandro Palma Torres, que construyó los prototipos de amortiguadores ensayados, ambos involucrados en la fase experimental del estudio.

Referencias

- [1] Blevins, R. D. (2001) *Flow-Induced Vibration*, Florida, Krieger Publishing Company.
- [2] Tamura, Y. & Kareem A. (Eds.). (2013) *Advanced structural wind engineering*, Japan, Springer.
- [3] Connor, J. & Laflamme, S. (2014) *Structural motion engineering*, Switzerland, Springer.