

Problemática aeroelástica de la estructura de seguidores solares

Aeroelastic aspects of the structure of solar trackers

Ángel Vidal Vacas^a, Manuel Castillo Carbonero^b, María Macías Infantes^c, Viviane Setti Barroso^d, Álvaro Serrano Corral^e

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería. Jefe de proyectos. angel.vidal@mc2.es

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería. Ingeniero. manuel.castillo@mc2.es

^cDra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería. Ingeniera. mmacias@mc2.es

^dM.Sc. Structural & Civil Engineer. MC2 Estudio de Ingeniería. Ingeniera. vsetti@mc2.es

^eIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería. Director Técnico. alvaro.serrano@mc2.es

RESUMEN

Esta ponencia describe conceptos aeroelásticos que aparecen en el diseño de las estructuras de seguidores solares de un eje. Estos sistemas presentan un impacto económico importante al tratarse de la estructura base de la mayoría de los desarrollos a escala hoy en día de la industria solar fotovoltaica. Sin embargo, su gran envergadura, baja rigidez y reducido peso, los hacen especialmente vulnerables a los efectos aeroelásticos, presentando problemáticas no recogidas hasta ahora en la normativa europea de estructuras frente a viento.

ABSTRACT

This paper describes aeroelastic concepts that appear in the design of single-axis solar tracker structures. These systems have a significant economic impact as they are the base structure of most of the scale developments in the solar photovoltaic industry today. However, their large span, low stiffness and low weight make them particularly vulnerable to aeroelastic effects, presenting problems that have not been addressed so far in the European wind structure regulations.

PALABRAS CLAVE: seguidores solares, inestabilidad aeroelástica, dinámica computacional de fluidos (CFD), túnel de viento.

KEYWORDS: single solar trackers, aeroelastic instability, computational fluid dynamics, wind tunnel

1. Introducción

En los últimos años, el aumento del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos ha experimentado una notable aceleración. Este progreso se ha visto impulsado por la mejora de la eficiencia de las células fotovoltaicas, convirtiendo a los sistemas fotovoltaicos en un sistema de generación de energía competitivo. Su

crecimiento ha sido superior al de otros sistemas de energías renovables.

Tabla 1. Tamaño de instalaciones más importante de producción de energía solar fotovoltaica en España, USA y Australia (2023).

España	USA	Australia
Chiprana 800MW	Solar Star 790 MW (2015)	Limondale 313 MWp
Núñez de Balboa 500 MW	Edwards 875 MW (2023)	

La estructura de los primeros seguidores solares se apoyaba principalmente en mástiles verticales permitiendo doble giro para el seguimiento solar. Esta configuración ha sido prácticamente abandonada en la producción a gran escala, siendo ahora los seguidores de un eje único de giro horizontal la tipología dominante por motivos de optimización de la instalación. De cualquier modo, la acción del viento sigue constituyendo la principal carga de diseño por encima de cualquier otra acción.

2. Descripción estructural de los seguidores solares de un eje horizontal

En esta ponencia consideraremos el esquema base que siguen la mayoría de las estructuras de seguidores solares. Hay que tener en cuenta no obstante que cada fabricante aplica particularidades a su sistema, pudiendo encontrarse ligeras variantes respecto a la solución canónica

El elemento principal de la estructura es el eje horizontal principal, también llamado “mástil”, que apoya sobre varios soportes verticales a través de rótulas que le permiten el giro alrededor de su eje longitudinal. Cada “tracker” (seguidor) lo forman dos mástiles iguales unidos a un soporte fijo central en el que se aloja el motor o actuador del sistema. La configuración es simétrica. El actuador aplica el giro sobre el mástil siguiendo las órdenes del sistema de control, ejerciendo, cuando está en reposo y el seguidor se ve afectado sólo por cargas exteriores, coacción fija al giro. El eje principal, suma de ambos mástiles, puede tener una longitud desde 30.0-40.0 m hasta más de 100.0 m.

Una serie continua de correas transversales que sirven de apoyo a los módulos solares, se disponen sobre los mástiles. La unión se realiza por medios mecánicos, con abarcones o sistemas rígidos equivalentes atornillados.

Cada panel tiene una superficie de entre 2.0 y 2.5 m² y un marco de aluminio de entre 30 y 50 mm de espesor que proporciona apoyo al vidrio que alberga las células fotovoltaicas. Las correas pueden tener una longitud entre 0.40 m y 2.0 m según la configuración. Según la posición de los paneles sobre el seguidor, la configuración se denomina 1V, 2V o 3H, que conducen a cuerdas (*chords*) de aproximadamente 2.0 m, 4.0 m y 3.0 m respectivamente.

Los soportes verticales se cimentan por empotramiento directo en el terreno mediante hincado o mediante micropilotes.



Figura 1. Seguidores solares fotovoltaicos de un eje horizontal

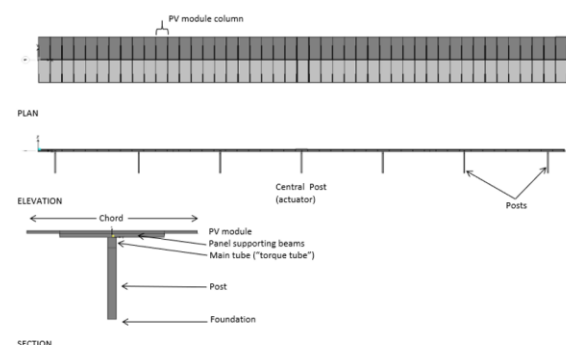


Figura 2. Elementos típicos de la estructura de un seguidor solar fotovoltaico de eje horizontal. Elaboración propia.

Con la configuración descrita es claro que la mayor flexibilidad se da en la torsión del eje principal. Este funciona como dos ménsulas a torsión independientes a cada lado del soporte del actuador, que realiza función de empotramiento. El giro excesivo de torsión del

mástil se controla por medio de la rigidez del tubo que lo constituye, o bien por medio de amortiguadores que reduzcan el giro dinámico junto, con la rigidez del tubo. Los amortiguadores, que se montan apoyados en alguno de los soportes con rótula, proporcionan un par de reacción de amortiguamiento en una sección crítica del seguidor, generalmente la sección extrema o próxima a ella para alcanzar la máxima eficacia.

Un aspecto fundamental en el diseño de la estructura y su respuesta aeroelástica es la definición de la posición de “defensa”. Esta se define de manera que cuando el sistema de control detecta, a través de anemómetros, que la ráfaga de viento en la planta supera un determinado umbral, los motores hacen girar al seguidor hasta colocarse en la denominada “posición de defensa” o “stow”. En esta posición es en la que el seguidor deberá resistir la acción del viento de diseño. La posición de defensa se identifica por medio del ángulo que forman los paneles con el plano horizontal.

La definición de la posición de defensa es el objetivo principal del diseño y tiene una influencia fundamental en la respuesta frente a viento de la estructura.

Estrategia de stow

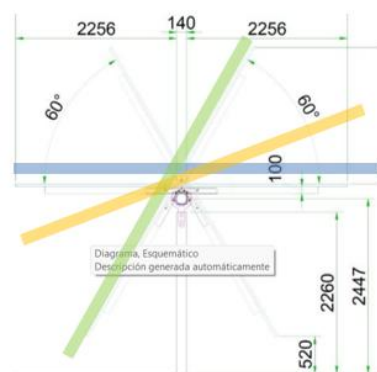


Figura 3. Posiciones típicas de defensa en un seguidor genérico. Azul: de bajo ángulo (0°-5°), verde: de ángulo alto (40°-60°) y amarillo de ángulo intermedio o de transición.

3. Referencias en la normativa

La norma de acciones de obligado cumplimiento que se está exigiendo en la actualidad para el diseño de estructuras solares es mayoritariamente la general de estructuras de cada estado, o en su defecto Eurocódigo [1] o ASCE [3]. Sin embargo, en este momento, ninguna de las normativas internacionales considera de manera explícita la tipología estructural de seguidores solares. A continuación, se repasan las normas más representativas en ingeniería de viento.

En el caso de ASCE [3], la última versión de 2022 incorporó coeficientes de presión y succión para estructuras solares fijas tanto en suelo como sobre cubierta, pero de momento no contempla los seguidores de un eje horizontal, aunque menciona su problemática (C29.4.5 [3]).

Sobre cargas de viento en estructuras generales y específicas para la producción de energía, es de interés la norma mejicana MDO 2020 [5]. Incluye en su inciso 3.5.16 el caso de estructuras solares frente a cargas estáticas, por lo que no alcanza a los seguidores solares, pero sí a las estructuras fijas tanto en suelo como cubierta. Por otro lado, esta norma hace una clasificación de las estructuras según el tipo de respuesta frente a viento, descripción en la que es fácil identificar a los seguidores solares como estructuras de tipo 4 (tabla 1.2 [5]), y que por lo tanto requieren de la asistencia de especialistas mediante ensayos físicos en túnel de viento.

La normativa australiana y neozelandesa AS/NZS 1170.2:2021 [4] trata el tema de los paneles fijos sobre cubiertas residenciales y el de paneles sobre suelo. El caso de paneles sobre bastidores en cubiertas planas y el de seguidores solares no se contempla, pero explícitamente se menciona que este último caso debe ser tratado por especialistas, dado su eventual comportamiento inestable (B.6.2 [4]).

En el caso europeo no hay mención alguna a estructuras solares, tampoco en el borrador de la nueva generación de Eurocódigo 1-4 [2]. En

el contexto del Eurocódigo los seguidores solares deben tratarse como estructuras flexibles, debiéndose considerar su respuesta aeroelástica mediante ensayos en túnel de viento (3.5 (2) [1]).



Figura 4. Forma de fallo por torsión en un empalme del tubo principal. La inestabilidad permite absorber suficiente energía del viento para provocar la rotura de tornillos estructurales y piezas metálicas de espesor considerable.

4. Respuesta límite estructural frente a viento

4.1 Tipos de respuesta límite y su relación con la configuración del seguidor

Sin experiencia previa y cálculo detallado, no es posible identificar la inestabilidad aeroelástica como causa de los daños observados en un tipo de seguidor. El motivo es que la respuesta inestable consiste en un aumento no acotado de la excitación de la estructura, por encima de la resistencia del elemento más débil de esta. Así las estructuras pueden colapsar por fallo mecánico de los soportes, del tubo principal, de los amarres de los paneles o de la cimentación.

Ante la presencia de estos fallos en campo es necesario efectuar las comprobaciones de inestabilidad, con objeto de confirmar el diagnóstico y distinguir de casos en los que simplemente exista un infradimensionamiento del elemento dañado.

La fenomenología de la respuesta inestable se encuentra estrechamente relacionada con la geometría y propiedades

Por lo tanto, el diseño de seguidores solares pertenece al ámbito de la aeroelasticidad, sin que sea óbice para que haya que tener en cuenta también situaciones estáticas y dinámicas.



Figura 5. Pandeo por torsión en soportes cuando se alcanzan grandes desplazamientos en el giro del eje del seguidor.

mecánicas de la estructura y su posición de defensa. Se comentan estos conceptos en los siguientes puntos.

4.1.1 Geometría

La geometría de la estructura de los seguidores no es aerodinámica, sino de cuerpo romo. La separación del flujo siempre se produce sobre los bordes de los módulos, a barlovento y/o sotavento. Cuando el seguidor presenta una cuerda mayor, como en los modelos 2V, la distancia de los bordes donde sucede el desprendimiento al eje de giro es mayor, y por tanto el momento exterior también mayor.

4.1.2 Propiedades mecánicas

Tradicionalmente las primeras generaciones de seguidores se dimensionaron con una frecuencia mínima objetivo a torsión de entorno a 1Hz, para optimizar acero. La frecuencia a torsión es la menor con diferencia en estos elementos. La elección de este valor se argumentaba equivocadamente por ser el límite que el Eurocódigo [1] establecía para poder obviar los efectos dinámicos del viento sobre estructuras en general. Esa interpretación era errónea pues obviaba los fenómenos de inestabilidad y sus consecuencias, como además se ha demostrado

en campo y hemos podido comprobar. Pero el hecho consumado ha sido que tal base de partida generalizada ha contribuido a que se establezca una ratio estándar de cuantía de acero muy bajo en el diseño de seguidores. La resistencia necesaria se ha tratado de alcanzar adicionando amortiguamiento externo o adaptando la posición de defensa. De este modo las pruebas en túnel de viento y las simulaciones CFD proporcionan rotaciones superiores a $\pm 15-20^\circ$. Esta gran amplitud implica que los seguidores solares trabajan en el rango no lineal con respecto al comportamiento del flujo de aire (aerodinámica no-lineal) en fases avanzadas de carga.

4.1.3 Altura sobre el suelo

El que se monten sobre el suelo los seguidores implica que están inmersos en la capa de máxima turbulencia del viento atmosférico y que la rugosidad del suelo influye en su respuesta. Esto unido a la baja rigidez torsional, hace que los seguidores sean muy sensibles a ráfagas de viento.

4.1.4 Disposición en la planta

Los seguidores se agrupan en grandes campos, dentro de los que se reparten regularmente, lo que hace que el viento al moverse genere estelas con frecuencias que pueden dominar los efectos dinámicos en el interior de la planta.

4.1.5 Posición de defensa

La posición de defensa es fundamental para identificar la respuesta del seguidor. Cuando la posición es sensiblemente horizontal el viento sobre los paneles ejerce una fuerza de arrastre mínima, pero el momento torsor aeroelástico es muy sensible a cambios en la posición. Una vez que se inicia el giro, la acción aeroelástica se incrementa drásticamente sin encontrar oposición. Un acercamiento útil y preciso a este caso es el estudio del equilibrio en rango cuasi-estático justo en el momento de iniciarse el movimiento. Las fórmulas de divergencia torsional de las normas permiten este análisis,

pero debiéndose adoptar la velocidad de ráfaga en lugar de la velocidad media que consideran ellas, asumiendo el caso de tableros de puentes con masas por metro muy superiores con relación a la frecuencia.

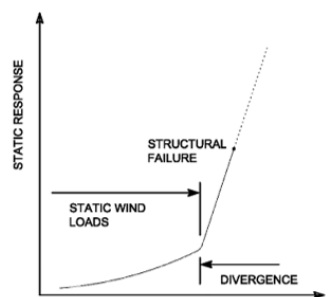


Figura 6. Respuesta aeroelástica en rango cuasi-estático. Elaborado por MC2 a partir de [7].

Cuando la posición de defensa es alta (por ejemplo, por encima de $35^\circ-40^\circ$), aunque se inicie el movimiento del seguidor por bataneo o desprendimiento de vórtices en los bordes del panel, no se produce un incremento progresivo del momento torsor exterior aeroelástico, alejándose de la situación de inestabilidad. En este caso no obstante el área frente a viento es máxima y por lo tanto las fuerzas estáticas y dinámicas de arrastre también.

Cuando la posición de defensa es intermedia entre los casos anteriores, el desprendimiento de vórtices en los bordes y el bataneo producen vibraciones que, si son suficientes para elevar el borde de barlovento hasta cerca de la horizontal, puede producirse la inestabilidad. En este caso la situación de análisis es dinámica, con participación importante de fuerzas de inercia y de amortiguamiento. En este caso puede hablarse de flameo de torsión, y requiere un tratamiento experimental o de simulación.

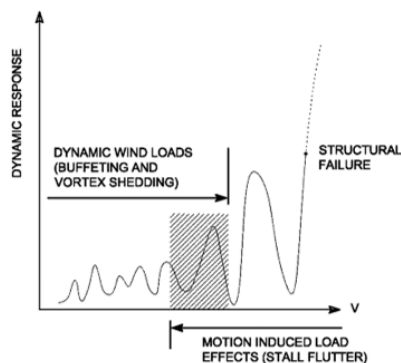


Figura 7. Respuesta aeroelástica en rango dinámico (flameo torsional). Elaborado por MC2 a partir de [7].

4.2 Aproximación cuasi-estática. Divergencia torsional.

El modelo teórico de divergencia torsional predice matemáticamente una torsión creciente no acotada, lo que en la práctica supone el fallo mecánico debido a torsión. En EC1-1-4 [1] Anexo E4 *Divergencia y Flameo*, se recoge la siguiente formulación cuando el ángulo de ataque es horizontal:

$$v_{div} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\theta}}{\rho \cdot d^2 \cdot \frac{dC_M}{d\theta}}} \quad (1)$$

donde k_{θ} es la rigidez torsional, ρ la densidad del aire, C_M el coeficiente de momento y d la cuerda (*chord*) del seguidor.

El margen de seguridad de la normativa se define en función de la velocidad media del viento incidente (típicamente considerada diez-minutal) y adopta un coeficiente de seguridad de 2:

$$v_{div} > 2 \cdot v_m \quad (2)$$

Sin embargo, las observaciones realizadas por MC2 en instalaciones dañadas demuestran que en muchos casos el fallo irreversible del seguidor se produce tras un número reducido de oscilaciones fuertes, en el orden de tres o cuatro, en intervalos cortos de tiempo.

Desde nuestro punto de vista, y teniendo en cuenta que la frecuencia natural típica de

torsión del seguidor se sitúa ligeramente sobre 1,0 Hz, el intervalo de tiempo de viento que debería utilizarse para controlar la divergencia (y también el resto de las inestabilidades aeroelásticas), es la ráfaga de viento. En los casos verificados por MC2 la ráfaga de 3s ha proporcionado resultados fiables. El control de diseño mediante el factor de seguridad aplicado a la velocidad media del viento promediada en 10 minutos ha demostrado no ser seguro.

4.3 Respuesta en rango dinámico. Flameo

El control de la estabilidad del seguidor a través del control de la divergencia torsional es apropiado sólo cuando la posición inicial de defensa del seguidor es horizontal o sensiblemente próxima (0° - 5°). En este caso, es una comprobación necesaria para garantizar la estabilidad.

Si la posición de defensa no es horizontal, se producen en primer lugar vibraciones por desprendimiento de vórtices en los bordes de los paneles y por la turbulencia del viento (bataneo o *buffeting*). Esto puede desencadenar la divergencia si se alcanza el ángulo de giro necesario durante la vibración. En este caso, la respuesta debe analizarse en el rango dinámico.

El análisis en el rango dinámico incluye las cargas inerciales, los efectos transitorios debidos a la turbulencia del aire, el desprendimiento de vórtices y las cargas de viento inducidas por el movimiento de la propia estructura. Cuando la velocidad del viento incidente sobre el seguidor supera un cierto valor crítico, el comportamiento del flujo se vuelve claramente no lineal, debido a las grandes rotaciones. Los modelos analíticos, numéricos y experimentales en este rango muestran que se puede alcanzar un modo de inestabilidad no lineal de flameo torsional, que se identifica por algunos autores [6] como “*stall flutter*”.

El “*stall flutter*” está relacionado con grandes ángulos de incidencia en el modelo teórico simplificado de «ala de avión». En el caso

de los seguidores, pueden alcanzarse dinámicamente grandes ángulos debido a la gran flexibilidad torsional. El elevado ángulo de incidencia induce la separación del flujo en la cara de succión. Esta separación es el mecanismo físico que da lugar a la relación no lineal entre el momento torsor en las secciones más flexibles del seguidor y el ángulo de incidencia.

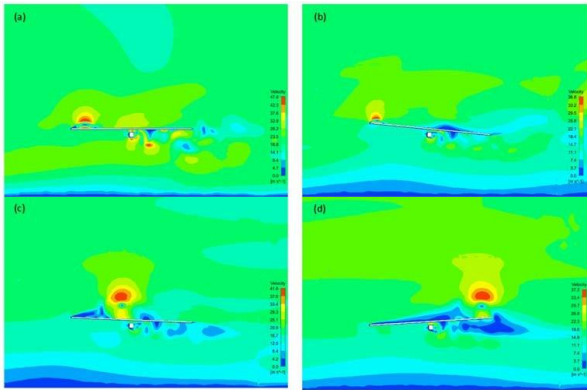


Figura 8. Momentos de formación de la inestabilidad. El remolino se forma adherido a la superficie de los paneles para desprenderse sólo cuando el movimiento es suficientemente grande. Se reactiva entonces el proceso. Simulación CFD de interacción realizada por MC2.

Las técnicas de análisis mediante derivadas aerodinámicas clásicas no son directamente aplicables en seguidores debido a la hipótesis de linealidad que asumen [6].

El caso de los seguidores implica un aumento brusco de la amplitud a partir de un determinado ángulo de incidencia. Este inicio repentino de la oscilación con amplitudes elevadas se ha observado en campo, en ensayos en túnel de viento y puede simularse mediante CFD. En la siguiente sección presentamos la técnica desarrollada por MC2 para este análisis.

5. Método seccional de análisis aeroelástico mediante simulaciones CFD

Como se ha comentado, los seguidores solares forman parte del grupo especial de estructuras ligeras y/o flexibles para las que se requieren

estudios aeroelásticos en túnel de viento y técnicas especiales, según las indicaciones que la mayoría de los códigos hacen.

Con objeto de disponer de una herramienta eficaz para auditar la estabilidad de seguidores, en MC2 se ha desarrollado una técnica que compagina la simulación numérica CFD y los ensayos en túnel de viento. El método consiste en condensar en una sección 2D la sección crítica del seguidor, generalmente la más flexible, y aplicar sobre ella el viento simulado. La condensación a sección 2D requiere adoptar las siguientes hipótesis:

- Se asume deformada a torsión homotética a la forma modal. Simplificadamente se adopta la forma de seno, si bien podría aproximarse con otras funciones similares con error admisible.
- Se toma la frecuencia a torsión obtenida en la estructura.
- Para determinar la rigidez a torsión de la sección condensada 2D se considera que toda la longitud del seguidor se encuentra sometida a un momento torsor repartido por metro. La ley de reparto del torsor puede adaptarse, siguiendo por ejemplo la misma ley seno de la deformada.

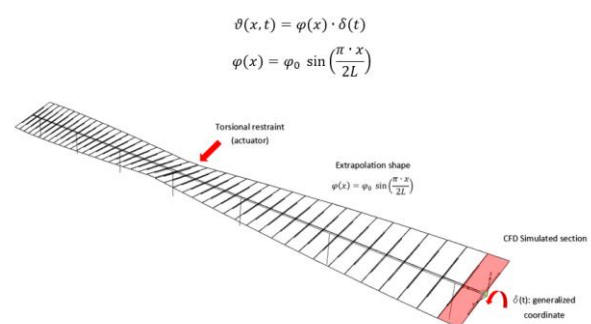


Figura 9. Modelo matemático considerado para la reducción del problema 3D a 2D. Condensación de la respuesta una sección crítica para aplicar entonces el análisis aeroelástico mediante CFD a la sección representativa.

- La inercia de masas al giro se determina para verificar frecuencia y rigidez.

La simulación se plantea de tipo transitorio, con interacción fluido estructura “two way”, para lo que es preciso usar técnicas

LES (“Large Eddy Simulation”) o técnicas híbridas. Estas últimas (por ejemplo, Detached Eddy Simulation, DES) permiten un ahorro de recursos importante.

El modelo es introducido en la simulación con su geometría y posición respecto del suelo. Para visualizar el efecto de las estelas de unas filas sobre otras se pueden modelizar varias de ellas (generalmente 6-8) manteniendo un coste computacional asumible.

El dominio se discretiza en una malla con tres zonas. La adyacente a los seguidores es rígida y móvil, lo que la permite seguir el movimiento de seguidor. El tamaño de malla

debe ser ajustado para poder modelizar pequeños torbellinos (como orden de tamaño máximo 1 cm).

La zona más alejada de los seguidores puede tener un mallado de mayor tamaño, con volúmenes fijos. Tanto en la zona móvil interior como en la zona exterior los elementos se recomiendan cuadrangulares o poliédricos. La zona intermedia de la malla es deformable y permite el remallado en cada paso de tiempo. Para esta zona los volúmenes triangulares ofrecen mayor capacidad de adaptación a grandes desplazamientos, prefiriéndose esto sobre la pérdida de precisión local.

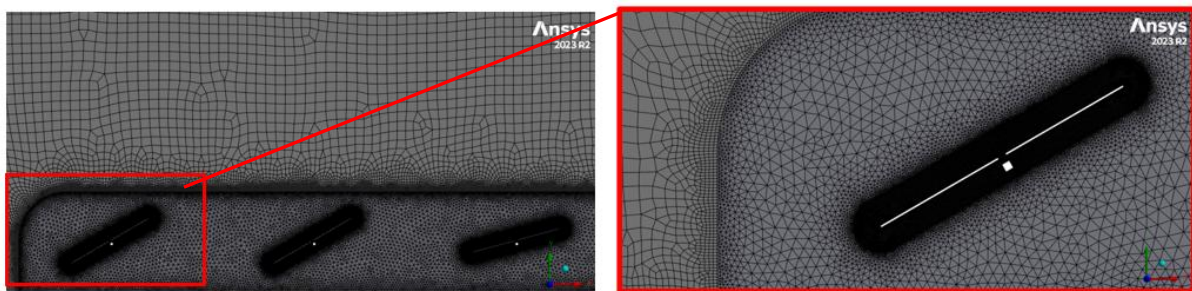


Figura 10. Mallado de dominio para simulación con interacción fluido-estructura “two way”.

El perfil de velocidad media de viento se introduce en la simulación tal y como la normativa la define para la zona en estudio. Además, es preciso añadir la velocidad variable debida a la turbulencia. Esta capacidad no suele estar disponible en los programas de simulación de manera directa, no siendo difícil su implementación mediante macros. La velocidad se introduce de manera progresiva, de manera que pueda observarse el momento en el que se presenta el giro máximo admisible.

La simulación de fluidos es resuelta en cada instante de tiempos, obteniendo como salida la resultante de momentos torsores sobre el modelo, que se transfieren a un módulo de cálculo estructural. Algunos programas incorporan “solvers” de estructuras, o bien puede incorporarse este cálculo por medio de macros exteriores, pues se trata de un sencillo sistema de un grado de libertad.

En cada paso de tiempo se resuelve el campo de velocidades del fluido y se evalúan las

reacciones, para a continuación transferirlas al “solver” estructural. En esta parte se resuelve el problema obteniendo un incremento de rotación del seguidor que debe ser transferido al programa de simulación de fluidos. Aquí se actualiza la posición de las paredes del seguidor y se continúa repitiendo el proceso.

El paso de tiempo debe ser suficientemente pequeño, recomendándose 5 ms para frecuencias de seguidores en torno a 1Hz, que son la mayoría.

El procedimiento admite giros elevados del seguidor, pudiéndose resolver amplitudes de 40° e incluso mayores según las condiciones.

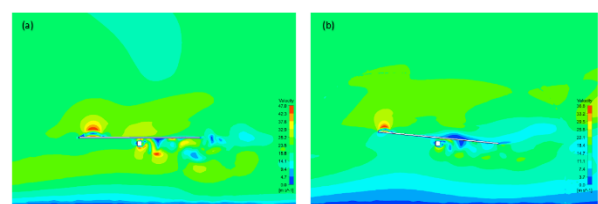


Figura 11. Campo de velocidades en dos tiempos consecutivos, con incremento de giro en el seguidor

6. Proceso de validación

En el estado actual del arte, la utilización de técnicas CFD para el diseño estructural requiere del uso paralelo de procesos de verificación y validación de los análisis [3]. El primer término se refiere a comprobar que las ecuaciones que describen el problema se han resuelto correctamente. Para ello se realizan análisis de sensibilidad con diferentes mallados, verificando que las diferencias en la solución son admisibles. En la referencia [8] se describen con detalle las técnicas y procedimientos de control recomendados por la asociación de ingenieros mecánicos de América, ASME.

La validación es el proceso para comprobar que las ecuaciones consideradas en la simulación son las adecuadas para el problema real físico que se quiere resolver. En este caso se realizan ensayos físicos a escala que representen el problema en estudio y se comparan los resultados con los obtenidos mediante simulación numérica.

En el caso que se presenta la validación se realizó en el túnel de viento del Instituto Tecnológico de Energías Renovables de Tenerife.

En este caso se validaba un caso de tres filas de seguidores de configuración 2V (4.60 m de cuerda) con posición de defensa 30°.

Las maquetas, diseñadas y fabricadas por MC2, constan de un eje de aluminio y paneles impresos digitalmente con resina de polvo de nylon, material homogéneo y muy resistente, adecuado para maquetas que deben soportar esfuerzos considerables durante los ensayos.

El montaje contempla la mitad de los seguidores, tomando la pared del túnel como plano de simetría.

Los materiales fueron seleccionados para mantener escala geométrica, cinemática y dinámica con un seguidor real.



Figura 12. Vistas del montaje

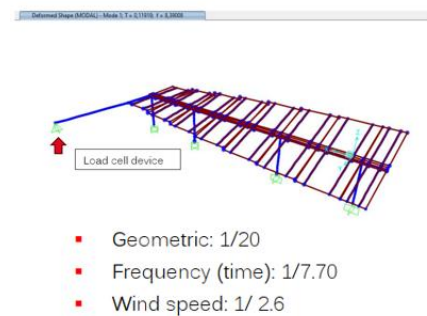


Figura 13. Modelo estructural de la maqueta para verificación de frecuencias y comprobación de escalas

El montaje incluye brazos rígidos en el plano de simetría conectados a células de carga para medir el momento torsor del empotramiento.

En paralelo se realizó una simulación CFD del montaje con idénticas técnicas a las utilizadas para hacer el análisis aeroelástico del seguidor.

Desde un punto de vista cualitativo se comprobó que el patrón de viento alrededor de la maqueta oscilando era equivalente en el modelo físico y en el numérico.

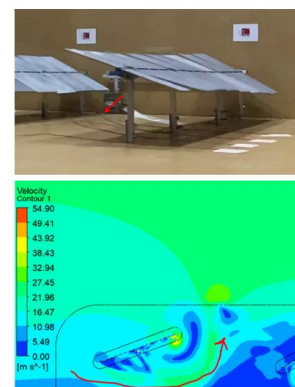


Figura 14. Identificación cualitativa de los patrones de viento en el ensayo físico y en la maqueta

En cuanto a la velocidad del viento a la que se produce el inicio de las grandes rotaciones que provocarían el colapso del seguidor real, se obtuvieron resultados correctos y coherentes.

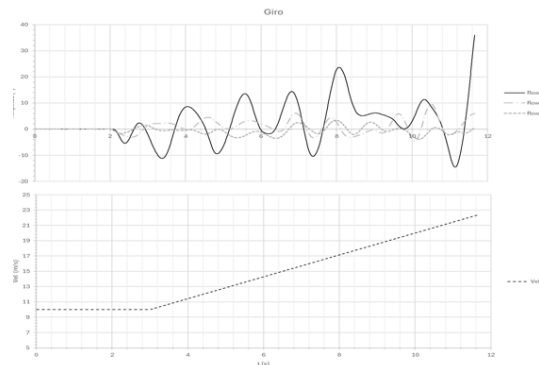


Figura 15. Identificación del inicio de vibración fuerte en la simulación numérica.

Túnel	CFD ($\xi = 5\%$)	CFD ($\xi = 15\%$)
23.4-26.0 m/s*	22.8 m/s	23.0 m/s

* Aplicada escala

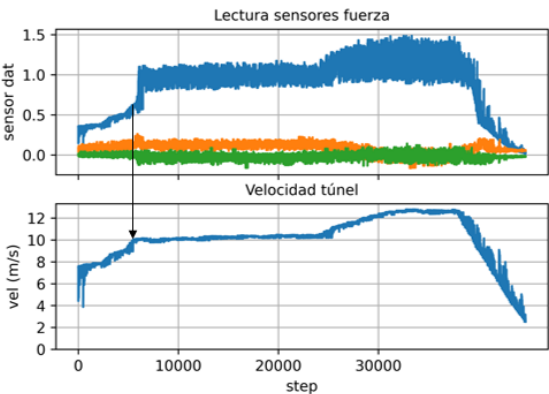


Figura 16. Identificación del inicio de vibración fuerte en el túnel de viento y tabla de comparación.

7. Conclusiones

Los seguidores solares de un eje horizontal son estructuras que están siendo intensivamente utilizadas en la actualidad para la producción de energía fotovoltaica, y en su diseño presentan una problemática fundamental debido a su alta sensibilidad a experimentar fenómenos aeroelásticos.

En esta ponencia se presentan sucintamente los aspectos principales de la problemática desde el punto de vista teórico, y

se muestra un procedimiento de control y auditoría desarrollado por MC2 para analizar la vulnerabilidad de estas estructuras. El procedimiento incorpora el análisis de interacción viento-estructura mediante simulaciones CFD y un procedimiento de validación en túnel de viento, siguiendo las recomendaciones técnicas que definen el estado actual del arte.

Referencias

- [1] AEN/CTN 140 Eurocódigos Estructurales. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4:2018 Acciones generales. Acciones de viento. Junio 2018.
- [2] CEN/TC 250/SC1. Final Draft EN 1991-1-4 Wind actions, 20 de mayo de 2020.
- [3] ASCE/SEI 7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. 2022. United States.
- [4] AS/NZS 1170.2:2021. Structural design actions. Part 2: Wind actions. 2021. Australia/New Zealand.
- [5] Comisión Federal de Electricidad, CFE. Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento. 2020. México.
- [6] C.Rohr, P.A. Bourke and D. Banks. Torsional Instability of Single-axis Solar Tracking Systems. ICWE14 14th International Conference on Wind Engineering 2015. Porto Alegre, Brazil.
- [7] E. N. Strømmen. Theory of bridge aerodynamics. Springer. 2006.
- [8] American Society of Mechanical Engineers. ASME V&V 20-2009_Standard for Verification and Validation in Computational Fluid_Dynamics and Heat Transfer. 2006 (reaffirmed 2016).