

# Efectos aeroelásticos sobre seguidores solares de un solo eje

Aeroelastic phenomena on solar trackers with a single torque tube axe

#### Eva Martínez García<sup>a</sup>, Eduardo Blanco Marigorta<sup>b</sup>, Antonio Navarro-Manso<sup>\*,c</sup>

<sup>a</sup> Ms. Energy Engineer. Ph.D candidate. Energy Department. University of Oviedo. UO267991@uniovi.es

<sup>b</sup> Full Prof. Dr. Mechanical Engineer. Energy Department. University of Oviedo. eblanco@uniovi.es

<sup>c</sup> Associate Prof. Dr. Civil Engineer. Energy Department. University of Oviedo. navarroantonio@uniovi.es

#### RESUMEN

Los seguidores solares de un solo grado de libertad (disposición de los paneles de forma longitudinal sobre un tubo a torsión, "torque tube", accionado por un motor en la sección central) han evolucionado a estructuras extremadamente esbeltas, debido a la competitividad y la optimización que el mercado está llevando a cabo. Este artículo profundiza en el conocimiento e identificación de los fenómenos aeroelásticos (la divergencia torsional, las vibraciones inducidas por desprendimiento de vórtices y el galope o flameo torsional, i.e. de un solo grado de libertad) mediante ensayo completo de modelos a escala en túnel aerodinámico.

#### ABSTRACT

Solar trackers of a single degree of freedom (longitudinally arranged panels on a torque tube, driven by a motor in the central section) have evolved to extremely slender structures, due to competitiveness and optimization that the market is carrying out. This article deepens the knowledge and identification of aeroelastic phenomena (torsional divergence, vibrations induced by vortex shedding and galloping or torsional flutter, i.e. single degree of freedom) by means of a full aeroelastic test of scale models in a wind tunnel.

**PALABRAS CLAVE:** Galope, Túnel Aerodinámico, Análisis Dimensional, Seguidor Solar Fotovoltaico. **KEYWORDS:** Aeroelasticity, Wind Tunnel, Dimensional Analysis, Photovoltaic Solar Tracker.

#### 1. Introducción

La tendencia actual en la captación de energía fotovoltaica es utilizar seguidores solares de un solo grado de libertad, en vez de dos. Esto se consigue, en la práctica, con la disposición de los paneles de forma longitudinal sobre un tubo a torsión ("torque tube"), accionado por un motor en la sección central. De esta forma, se reduce en algo la energía obtenida, pero sigue siendo alrededor de un 30% superior que la obtenida con placas fijas [1]. Debido a la evolución y optimización estructural que el mercado está llevando a cabo, estas instalaciones resultan extremadamente esbeltas; si bien el diseño frente a las cargas estáticas y situaciones accidentales no extremas está correctamente resuelto, es posible que se produzcan inestabilidades aeroelásticas para algunas situaciones particulares [2].

La tipología estructural de estos captadores consiste en un tubo empotrado-libre

a torsión, de diámetro D, con varios soportes verticales en función de la longitud de los paneles; estos soportes coartan los desplazamientos, no los giros. El captador solar analizado tiene una longitud L y un ancho b, con un único motor o "driver" en el centro. Cada ala tiene varios soportes anclados al suelo, de altura h. La Figura 1 muestra las dimensiones y esquema estructural del seguidor solar, con los valores geométricos dispuestos de forma paramétrica (igualmente se hará con los resultados, ya que se han realizado múltiples ensayos con diversas configuraciones).



Figura 1. Esquema y dimensiones de un seguidor solar.

Así, los fenómenos fluidodinámicos que se pueden esperar son la divergencia torsional, las vibraciones inducidas por desprendimiento de vórtices y el galope o flameo (de un solo grado de libertad) torsional [3, 4]. Se han realizado numerosos estudios sobre placa plana (estática y giratoria) [5], tanto en túnel aerodinámico [6] como con Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) [7]. También existen recientes ensayos de campos (al menos, unas cuantas filas) de seguidores solares, con la particularidad de que los modelos son estáticos y se utilizan para estudiar el efecto de la direccionalidad del viento e interferencias entre captadores [6].

Por estos motivos, dado que el estado de la técnica está todavía en una fase inicial con respecto a esta tipología estructural, se ha hecho un análisis inspeccional de la ecuación diferencial del movimiento torsional del eje [8], obteniendo así los parámetros adimensionales descriptivos del fenómeno aerodinámico y estructural. Con ellos se ha desarrollado uno de los primeros modelos aeroelásticos completos [9] a escala reducida y se ha ensayado en un túnel aerodinámico.

## 2. Objetivos

Los objetivos de la campaña experimental desarrollada en el túnel aerodinámico son los siguientes:

- Análisis dimensional de los modelos a utilizar en los ensayos aeroelásticos de seguidores solares de un solo eje ("tracker").

- Obtención y evaluación de los coeficientes de momento estáticos, en función de la velocidad de viento y del ángulo inicial del "tracker"; teniendo en cuenta la variación no lineal (a lo largo del eje del tubo) del ángulo del panel en cada instante.

- Explicación fenomenológica de los episodios aeroelásticos que causan inestabilidad en la estructura del seguidor solar, determinando las velocidades críticas para cada posición inicial.

- Estudio de medidas correctoras para los seguidores construidos; y establecimiento de criterios de diseño seguros, en términos de velocidad de viento de Proyecto y rigidez de la estructura, para la tipología analizada.

# 3. Análisis dimensional del fenómeno acoplado fluidodinámico-estructural

A continuación, se identifican las variables que intervienen en el fenómeno acoplado fluidoestructura; y se discute la adimensionalización del mismo para obtener la semejanza geométrica, cinemática y dinámica, requerida para que los ensayos en túnel aerodinámico puedan ser extrapolados al fenómeno real (prototipo) [10].

#### 3.1 Variables

La fuerza aerodinámica tiene dos variables: la magnitud y la frecuencia, dependientes del resto de factores: F [kg·m/s<sup>2</sup>], [MLT<sup>-2</sup>]; f [s<sup>-1</sup>], [Hz], [T<sup>-1</sup>]. Las variables debidas al fluido son: densidad, viscosidad y velocidad:  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], [ML<sup>-3</sup>];  $\mu$  [kg/(s·m)], [ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>]; U [m/s], [LT<sup>-1</sup>]. La principal variable del objeto es la geometría, que, para la semejanza geométrica, se puede reducir a una variable de tamaño. En caso de permanecer estático e indeformable, es la única variable: L [m], [L].

Cuando se trata de un objeto que se mueve, hay que tener en cuenta su inercia, y en el caso de que se deforme, su elasticidad. Para un seguidor solar de un solo eje con deformación por torsión, la inercia viene representada por el momento de inercia con respecto al eje de giro, I, y la deformación por la constante de deformación angular, K ("rigidez", que es función del momento, momento por unidad de giro): I [kg·m<sup>2</sup>], [ML<sup>2</sup>]; K [N·m/rad], [kg·m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>], [ML<sup>2</sup>T<sup>-2</sup>].

Se ha asumido que el amortiguamiento es pequeño C <<  $2 \cdot (\text{KI})^{1/2}$ , y que no influye en ese rango de valores. Si no fuese así, habría que incluir esta variable. Tampoco se ha considerado la influencia de la turbulencia del aire incidente, lo cual no quiere decir que se esté eliminando, sino simplemente que no se está escalando.

#### 3.2 Números adimensionales

Con las 8 variables (F, f,  $\rho$ ,  $\mu$ , U; L; I, K) y 3 dimensiones básicas (M, L, T), se obtienen 5 números adimensionales.

Los números adimensionales típicos para fuerza, frecuencia y viscosidad (F, f,  $\mu$ ) son Euler, Strouhal y Reynolds, que representan, respectivamente, la fuerza sobre la estructura debida al viento, frecuencia de vibración del desprendimiento de vórtices debido al fluido, y la importancia de las fuerzas viscosas frente a las de inercia:

$$E_u = \frac{F}{1/2\rho U^2 L^2}$$
(1)

$$S_t = \frac{fL}{U} \tag{2}$$

$$R_e = \frac{\rho U L}{\mu} \tag{3}$$

Para el momento de inercia y la deformación, se pueden elegir: la frecuencia reducida  $f_r$ , función de la frecuencia propia  $\omega$  (para una barra empotrada-libre a torsión), y la variante del número de Euler para momentos  $E_m$ , que sirve para definir el punto de aplicación de la fuerza:

$$f_r = \frac{\omega L}{U} = \frac{\pi L}{2 U} \sqrt{K/I} = \frac{\pi L}{2 U} \sqrt{GJ/II}$$
(4)

$$E_m = \frac{k}{1/2\rho U^2 L^3}$$
(5)

Los mismos grupos se obtendrían adimensionalizando la ecuación general del movimiento, donde el subíndice c y el superíndice \* denotan magnitudes características:

$$\frac{U_c^2}{L_c^2} \frac{I}{K} \frac{d^2\theta}{dt^{*2}} + \frac{U_c}{L_c} \frac{C}{K} \frac{d\theta}{dt^*} + \theta = \frac{T}{K}$$
(6)

#### 3.3 Parámetros del modelo

En un modelo a escala, el tamaño debería ser lo mayor posible que permita el túnel de viento, mientras no haya efectos de bloqueo, borde, etc. Así se obtendría  $L_m/L_p$ . La velocidad también debería ser lo más alta posible para que los números de Re sean lo más parecidos posible, aunque hay un cierto margen en este aspecto por lo que  $U_m/U_p$  queda libre. A partir de la igualdad del número de Euler del momento entre modelo y prototipo  $E_{mm}$  y  $E_{mp}$ :

$$K_m = K_p \frac{U_m^2 L_m^3}{U_p^2 L_p^3}$$
(7)

Igualando  $f_{rm}$  y  $f_{rp}$ , y substituyendo las K:

$$I_m = I_p \frac{L_m^5}{L_p^5}$$
(8)

La constante de torsión  $K_m$  del modelo determinará la relación de velocidades. Sin embargo, el momento de inercia está totalmente definido por la escala. En el caso estudiado en este artículo, se han utilizado hasta tres materiales diferentes, uno para el eje de torsión y dos para el panel solar y su estructura de soporte, para conseguir la semejanza total entre modelo y prototipo.

Para el fenómeno que nos ocupa, las oscilaciones del flujo y del objeto están íntimamente relacionadas, por lo que se puede afirmar que el caso analizado es totalmente no estacionario, demostrando los experimentos que se está fuera del rango de aplicación de la teoría cuasi-estática, y con una fuerte componente 3D [11].

# 4. Túnel aerodinámico y modelos a escala

En este apartado se describirán las características del túnel aerodinámico, la construcción de los modelos a escala y el diseño de los experimentos realizados.

#### 4.1 Equipamiento experimental

Los ensayos se han realizado en el túnel aerodinámico EB40-oWT del Departamento de Energía [12] de la Universidad de Oviedo (Figura 2). Es un túnel de circuito abierto en impulsión, con cámara de ensayo abierta [13]. Las velocidades máximas alcanzan los 35 m/s (potencia nominal del ventilador de 30 kW). Tiene una longitud de 14.25 m con una cámara de ensayo de 0.68 x 0.68 m. La turbulencia del flujo en la cámara de ensayo es del 3%.



Figura 2. Esquema y dimensiones del túnel aerodinámico EB40-oWT (cotas en mm).

#### 4.2 Modelos

Se presentan aquí dos de los modelos finalmente ensayados, cuya única diferencia es que (cumpliendo ambos los criterios de semejanza anteriormente descritos y con valores adimensionales iguales) incorporan varilla de diferente material para la reproducción del "torque tube" (Figura 3).

Para esos modelos, a escala 1/E, se imprime para medio "tracker" (en virtud de la

simetría) cada marco de panel en 3D, incluidas las correas y grapas de anclaje al "torque tube", materializando la superficie del mismo con unas láminas de cinta adhesiva ultra delgadas, y que permiten llevar los valores de masa e inercia a su correcta escala. Se fabrican dos varillas, una de madera y otra de acero, de área llena, con rigideces muy parecidas, función del diámetro; lo que implica que podremos evaluar la importancia de los amortiguamientos ( $\xi$  del 2.2% y 1.0%, respectivamente). Como para la varilla de acero se cumple  $\xi_m = \xi_p$  [14], se ha comprobado en los experimentos la escasa influencia del valor de la amortiguación (para valores bajos de amortiguamiento) en las velocidades críticas de disparo de la inestabilidad.



Figura 3. Modelos de paneles a diversas escalas y con diferentes geometrías.

Los valores de longitud, inercia a torsión y rigidez de cada modelo vienen determinados por el eje, porque la disposición de los paneles no contribuye a dar rigidez a torsión a la estructura; por el contrario, la inercia (masa) del sistema, viene determinada fundamentalmente por la superficie horizontal de los paneles, ya que la masa del tubo es muy pequeña y concentrada en el eje de giro. Se ha considerado un eje medio, ya que la variación en dos tramos de la sección del tubo real no tiene influencia práctica en los valores obtenidos en los ensayos. Y en ambos casos se ha escalado la distancia entre el eje y la superficie del panel.

Las siguientes Tablas 1, y 2 recogen los valores geométricos y mecánicos de los modelos, así como la relación de velocidades entre modelo y prototipo:

Material eje	D (m)	L (m)	J (m <sup>4</sup> )	K (G·J/L) (kg·m²/s²)	Masa (kg/m)	I (kg·m <sup>2</sup> )	ξ
Madera	0.006	0.670	1.270E-10	0,180	0.020	6.020E-08	0.022
Acero	0.002	0.670	1.570E-12	0,200	0.025	8.220E-09	0.010

Material eje	Ancho correa (m)	Canto correa (m)	Hueco panel (m)	Masa (kg/m²)	f (Hz)	I (kg·m²)	U <sub>m</sub> /U <sub>p</sub>
Madera	0.002	0.003	0.005	0.525	19.400	2.990E-05	0.550
Acero	0.002	0.003	0.005	0.525	20.500	2.990E-05	0.579

Tabla 2. Características de los paneles del modelo.

#### 4.3 Metodología experimental

Se realizan varias series de ensayos (3), partiendo el panel de cada posición inicial  $\theta_0$ ; al ir aumentando de forma gradual la velocidad del aire en la cámara de ensayo desde los 1.70 m/s hasta los 35.90 m/s, el modelo comienza a girar (divergencia), con ángulo variable a lo largo del tubo, reproduciendo perfectamente el giro diferencial de cada panel, en función de su distancia a la sección de empotramiento (Figura 4). Este comportamiento es radicalmente diferente al de placa plana con inclinación constante que se describe en toda la literatura [15], y se considera fundamental para la explicación del fenómeno.



Figura 4. Modelo en la sección de ensayo del túnel aerodinámico.

Se elige como variable de medida el giro total en el extremo libre del panel, así como su amplitud cuando empiezan las oscilaciones. A partir de una determinada velocidad, el seguidor comienza a oscilar a su frecuencia natural (de forma espontánea en la mayoría de los casos analizados o mediante la excitación exterior por medio de una oscilación inicial, en función del ángulo de posicionamiento inicial y del grado de rozamiento del modelo). No hay diferencia de comportamiento ya se suba la velocidad de golpe o gradualmente. Al detener el ventilador del túnel, el modelo recupera bien la deformación por torsión, volviendo a la posición original de partida. Para determinar con la mayor exactitud posible la velocidad crítica, una vez que el seguidor ha empezado a oscilar, se disminuye la

velocidad de aire en la cámara en escalones muy pequeños (0,07 m/s) hasta que cesa el movimiento. Se considera entonces que esa es la velocidad que provoca la inestabilidad V<sub>crit</sub>. Así, se tiene seguridad de que para velocidades inferiores - o ángulos superiores a los marcados - no se produce galope, incluso con las peores condiciones de ráfagas o turbulencia.

#### 5. Resultados

Las velocidades en el prototipo han sido calculadas considerando una rigidez  $K_p$  N·m/rad, que sería el valor real del seguidor solar analizado. Los resultados de ambos

modelos son esencialmente iguales en valores medios adimensionales.

# 5.1 Velocidad crítica de galope en función del ángulo de posicionamiento inicial

La Figura 5 muestra el mapa de estabilidad del "tracker", para todos los ángulos iniciales, expresando las diferentes velocidades críticas adimensionales en función de V<sub>crit,mín</sub>:



Figura 5. Velocidad crítica de galope.

Por encima de la velocidad crítica, el galope no desaparece una vez establecido, aunque se detecta que puede ser más difícil su incepción, sobre todo para ángulos iniciales grandes.

El hecho de que no haya galope por encima de las posiciones indicadas, se puede explicar por la cercanía del borde al suelo (de sotavento y barlovento, respectivamente), que dificulta la alternancia de vórtices de desprendimiento de la capa límite.

# 5.2 Ángulo girado por el extremo libre en función del ángulo de posicionamiento inicial

El análisis conjunto de los datos de la Figura 6 y de la anterior, sugiere que para que comience el galope del "tracker" hacen falta dos condiciones: un ángulo de giro mínimo en el extremo ( $\theta_{crit}$ , mínimo=100%) y una velocidad mínima del aire ( $V_{crit}$ , mínima=100%).



#### Figura 6. Ángulo total girado a velocidad crítica.

También parece hacer falta una oscilación mínima para que el fenómeno comience, tal y como se ha visto en el apartado anterior. En la práctica, esta oscilación se produciría por desprendimiento de vórtices, ráfagas o turbulencia.

En el túnel aerodinámico, con condiciones muy estables, en ocasiones se puede conseguir entrar en la zona de galope sin que se dispare el fenómeno espontáneamente.

Fuera de los ángulos centrales (5°, 0°, -5° y -10°) y de las dos posiciones extremas, el giro de torsión en el extremo del "tracker" es lineal con el ángulo inicial y relativamente pequeño cuando se llega al galope, entre uno y dos grados.

# 5.3 Coeficiente de momento en función de la velocidad para distintos ángulos iniciales

El coeficiente de momento se ha calculado usando como referencia de dimensión el área del panel (L·b) y la cuerda (b). La Figura 7 muestra los valores medios de  $C_m$  para varias posiciones iniciales del seguidor en función de la velocidad de viento, hasta el punto de galope, adimensionalizado con  $C_{m,máx}$ :



Figura 7. Coeficiente de momento en función de la velocidad de viento.

En la Figura 8 se dibuja el coeficiente de momento medio a la velocidad crítica de galope, para cada posición inicial:



Figura 8. Coeficiente de momento medio para la velocidad crítica de galope.

Para la mayoría de los ángulos iniciales, el valor del coeficiente de momento es bastante constante, a partir de una cierta velocidad del aire. Esto ha resultado sorprendente ya que se esperaba una mayor deformación torsional del "tracker", acompañada de una mayor variación del coeficiente.

Se ha encontrado una influencia importante del rozamiento en los apoyos, sobre todo para valores bajos de la velocidad. Los datos representados aquí son los que se consideran menos afectados por este efecto, de entre todos los modelos que se han ensayado.

Para muchos ángulos iniciales no hay cambio del signo de la pendiente del momento en las proximidades de V<sub>crit</sub>. Además, en general ángulos iniciales positivos muestran los pendientes negativas, mientras que para los negativos son positivas. Debido a estas consideraciones, se cree que la derivada del coeficiente de momento con respecto al ángulo de ataque no afecta directamente al fenómeno, al menos los valores medios medidos. Se han realizado algunas medidas de momento por encima de las velocidades críticas de galope, sin que se llegara a disparar el galope (debido al rozamiento, como se ha explicado anteriormente). Estos valores fuera de la zona estable parecen continuar con las tendencias de sus respectivas curvas.

Las consideraciones sobre la incepción del fenómeno, y el análisis de los coeficientes de

momento descartan que el fenómeno pueda ser explicado por una teoría cuasi-estática. También se ha encontrado que no son aplicables las ecuaciones definidas por el Eurocódigo [16] actualmente.

Como se puede ver en la Figura 7, los ángulos iniciales de 0°, -5° y -10° muestran tendencias que no son totalmente conformes con los otros ángulos, y refuerzan la hipótesis comentada anteriormente.

# 5.4 Coeficiente de momento en el punto crítico de galope en función del ángulo inicial

Los valores del coeficiente del momento a la  $V_{crit}$  (estrictamente hablando, un escalón anterior al disparo del galope) parecen indicar que este valor es relativamente constante, con un valor parecido para ángulos positivos y negativos, aunque con distinto signo, tal y como se observa en la Figura 8, con la salvedad del ángulo inicial de 0°.

#### 5.5 Otras consideraciones

Para intentar retrasar el fenómeno de galope se han tanteado diversas medidas:

- Alerones y bloqueo del flujo entre los soportes, con distintas configuraciones: no se han obtenido resultados eficaces.

- Pantallas aguas arriba del seguidor: la determinación del tamaño mínimo necesario, porosidad y la distancia protegida aguas abajo requeriría un estudio aparte.

- Enclavamientos: se ha demostrado que el bloqueo del giro a torsión en los soportes medio 2 y extremo 3 (especialmente, en el 2), es una medida muy eficaz.

Los efectos del rozamiento y del amortiguamiento (para pequeños valores) no se han cuantificado de forma exhaustiva. Sin embargo, en una prueba puntual y puramente cualitativa, se ha encontrado que amortiguaciones grandes pueden retrasar significativamente la velocidad crítica de galope. Poner valores a este efecto requiere un estudio complementario.

# 6. Conclusiones

Se ha caracterizado el comportamiento de un seguidor solar de un solo eje horizontal, mediante ensayo en túnel aerodinámico de un modelo completo "full aeroelastic", obteniendo inestabilidad aeroelástica, en este caso, galope torsional.

La inestabilidad se puede producir para la mayoría de las posiciones en el rango de operación del sistema, siendo la estructura susceptible de sufrir oscilaciones catastróficas para dichos ángulos iniciales.

El fenómeno de inestabilidad se originaría debido al desprendimiento de vórtices o a cualquier otra causa que inicie las oscilaciones torsionales del panel, como imperfecciones geométricas, turbulencia atmosférica, ráfagas de viento u otros. En cualquier caso, la estructura no parece sufrir vibraciones inducidas por vórtices (VIV), toda vez que el fenómeno oscilatorio no desparece al aumentar la velocidad, una vez iniciado.

Las oscilaciones se producen a la primera frecuencia natural de la estructura, salvo un caso particular detectado en la posición inicial de -5° en el modelo con varilla de madera (alto rozamiento), en que se detecta una oscilación forzada a una frecuencia menor.

La amplitud de las oscilaciones es creciente con la velocidad, con valores inadmisibles generalmente, para los grados de amortiguamiento estudiados. Se han observado, para algunas posiciones, la aparición de amplitudes variables.

Se ha calculado la velocidad mínima necesaria para que se manifieste inestabilidad en el "tracker", para cada ángulo inicial. Para ángulos fuera del rango marcado, no se detecta inestabilidad de galope torsional.

Se han obtenido los coeficientes de momento estáticos medios, en función de la

velocidad de viento y del ángulo inicial del "tracker", así como los ángulos girados en el extremo (divergencia) en el comienzo de la inestabilidad. Se detectan dos comportamientos fenomenológicos claramente diferentes.

Se han analizado, de forma somera, algunas medidas correctoras para los seguidores, con distinto grado de eficacia; así como establecido el valor de una rigidez crítica por encima de la cual no se dispararía la inestabilidad, para una velocidad de viento de Proyecto determinada. No obstante, se necesitan ensayos complementarios para analizar exhaustivamente esta tipología estructural y determinar las medidas correctoras más pertinentes, en su caso.

## Agradecimientos

Los Autores agradecen de forma especial la colaboración de Francisco José Álvarez González y de Jorge Parrondo Gayo, así como la ayuda recibida del personal de las Áreas de Mecánica de Fluidos y de Ingeniería Hidráulica del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo (Grupo de Ingeniería Fluidodinámica GIFD).

Esta investigación ha sido financiada parcialmente con el Programa de Ayudas IDI/2018/000205 para Grupos de Investigación de la Consejería de Empleo, Industria y Turismo del Principado de Asturias Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FICYT e iasturias Innovación).

## Referencias

- R. Bruno, P. Bevilacqua, L. Longo, N. Arcuri, Small Size Single-axis PV Trackers: Control Strategies and System Layout for Energy Optimization, Energy Procedia 82 (2015) 737 – 743.
- [2] M. T. L. Browne, DY-WIND, Dynamic Wind Analysis for Solar Trackers, Soltec/RWDI.
- [3] M. P. Païdoussis, S. J. Price, E. de Langre, Fluid-Structure Interactions - Cross-Flow-

Induced Instabilities, Cambridge University Press, New York, 2011.

- [4] R. D. Blevins, Flow-Induced Vibration, Van Nostrand Reinhold, 2nd edition, New York, 1990.
- [5] Y. Yang, Experimental Investigations of Vortex Induced Vibration of a Flat Plate in Pitch Oscillation, MSc. Thesis, Texas A&M University, December, 2010.
- [6] K. Strobel, D. Banks, Effects of Vortex Shedding in Arrays of Long Inclined Flat Plates and Ramifications for Ground-Mounted Photovoltaic Arrays, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 133 (2014) 146–149.
- [7] C. M. Jubayer, H. Hangan, Numerical Simulation of Wind Effects on a Stand-Alone Ground Mounted Photovoltaic (PV) System, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 134 (2014) 56– 64.
- [8] C. Rohr, P. A. Bourke, D. Banks, Torsional Instability of Single-Axis Solar Tracking Systems, ICWE14, Porto Alegre, Brasil, Junio de 2015.
- [9] A. Roedel, S. Upfill-Brown, Designing For The Wind, Using Dynamic Wind Analysis And Protective Stow Strategies To Lower Solar Tracker Lifetime Costs, Nextracker Whitepaper, MKT-000073, 2018.
- [10] N. Isyumov et Al., Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, N 67, Virginia, 1999.
- [11] N. Nikitas, J.H.G. Macdonald, Misconceptions and Generalizations of the Den Hartog Galloping Criterion, Journal of Engineering Mechanics, 140 (4) (2014).
- [12] A. Navarro Manso et Al. Enhancing Civil Aerodynamics Learning: Solar Panel Testing Carried Out in a Wind Tunnel, III International Conference Learning of Structural Engineering, ACHE, Valencia, España, 2013. ISBN 978-84-89670-77-8.

- [13] M. Rodríguez Lastra, J. M. Fernández Oro, M. Galdo Vega, E. Blanco Marigorta, C. Santolaria Morros, Novel Design and Experimental Validation of a Contraction Nozzle for Aerodynamic Measurements in a Subsonic Wind Tunnel, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 118, (2013), 35–43
- [14] Y. Ge, J. Xia, L. Zhao, S. Zhao, Full Aeroelastic Model Testing for Examining Wind-Induced Vibration of a 5,000 m Spanned Suspension Bridge, Frontiers on Build Environment. doi: 10.3389/fbuil.2018.00020 (2018).
- [15] X. Xia, K. Mohseni, Lift Evaluation of a 2D Flapping Flat Plate, Phys. Fluids. 25 (9), 091901 (2013).
- [16] Eurocódigo 1, Bases de Proyecto y Acciones en Estructuras, Parte 2-4: Acciones en Estructuras. Acciones del Viento, UNE-ENV 1991-2-4, AENOR, España, 2018.