

Gómez, O.†, Bayón, B.†, Fernández, D.†, Rodríguez, C.†, Martínez, E.†, Parrondo, G.*, Blanco, E.* y Navarro, A.*
 *Profesores Departamento de Energía, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo.
 † Investigadores Departamento de Energía, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo.

DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE LOS “SINGLE AXIS SOLAR TRACKERS”

Resumen.

El presente artículo recoge la investigación original [1,2] que el Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo está desarrollando desde hace dos años (2019-2021), en los túneles aerodinámicos de la Escuela Politécnica de Gijón y la Escuela Politécnica de Mieres; por primera vez, se valida y se publica el método denominado “Diagrama de Estabilidad del Tracker”, con el que es posible predecir el umbral de velocidad de viento (velocidad crítica) a partir del cual se produce el “galloping” del mismo. El método debe ser bien entendido para poder aplicarlo con éxito, evitando errores conceptuales que habitualmente se comenten, incluso entre empresas del sector.

El fenómeno denominado comúnmente galope, es, en realidad, una inestabilidad aeroelástica conocida como flameo de un grado de libertad; ha sido identificado y combatido desde hace años en estructuras flexibles (tales como alas de avión, puentes colgantes de gran vano, etc.) pero no ha sido hasta tiempos recientes que se ha observado su poder destructivo sobre elementos tan sensibles a la acción del viento como son los actuales seguidores solares de un solo eje para captación de energía fotovoltaica. La fuerte competitividad en este mercado ha llevado a los ingenieros a unas esbelteces a menudo incompatibles con la estabilidad aerodinámica de estas estructuras, sobrepasando los valores admisibles que se podrían obtener de un cálculo meramente estático.

Palabras clave: túnel aerodinámico, galope, flameo, “solar tracker”, CFD, impresión 3D.

Introducción.

La tipología estructural de estos seguidores consiste en un tubo (con sección transversal circular, cuadrada, octogonal, etc.) empotrado-libre a torsión, de diámetro D , con varios soportes verticales en función del número de paneles o módulos que soporta; estos soportes coartan los desplazamientos, no los giros. Un seguidor solar tiene una longitud L y un ancho b , con un único motor o “driver” en el centro (generalmente). Cada ala tiene varios soportes anclados al suelo, de altura h . La Figura 1 muestra las dimensiones y esquema estructural del seguidor solar.

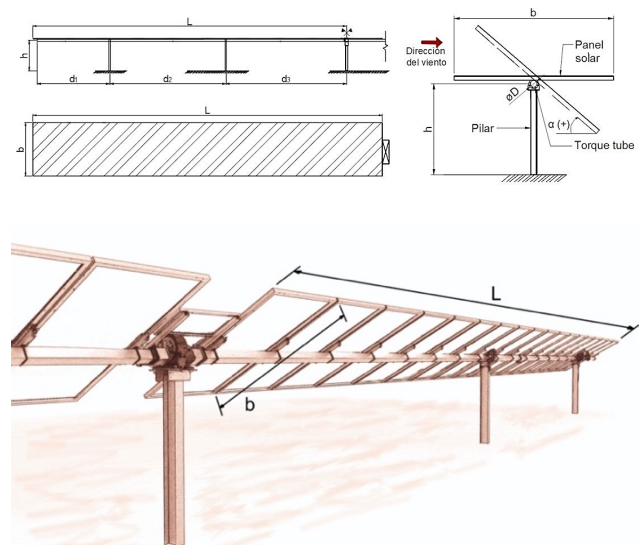


Figura 1. Esquema y dimensiones de un “solar tracker”.

A pesar de que existen varios estudios al respecto, realizados por los tres o cuatro mejores túneles aerodinámicos del mundo, así como diferentes métodos

de cálculo, el estado de la técnica está todavía en una fase inicial con respecto a esta tipología estructural concreta. En la Figura 2 se muestra una instalación y el efecto totalmente devastador del fenómeno del “galloping”.



Figura 2. Campo de seguidores solares y efectos de la acción dinámica del viento.

Para resolver el problema planteado, se ha hecho un análisis inspeccional de la ecuación diferencial del movimiento torsional del eje, obteniendo así los parámetros adimensionales descriptivos del fenómeno acoplado aerodinámico y estructural. Con ellos se ha desarrollado un nuevo modelo aeroelástico completo a escala reducida y se ha ensayado en un túnel aerodinámico (Figura 3), con la aplicación de un preciso método experimental.

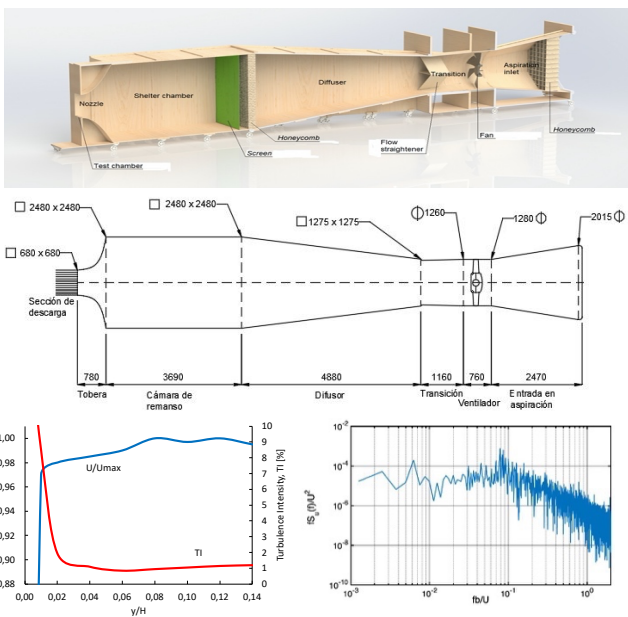


Figura 3. Esquema del túnel aerodinámico EB40-oWT y caracterización del flujo en la cámara de ensayo.

Metodología.

Con las 8 variables de fuerza, frecuencia, densidad y viscosidad del aire, velocidad de viento, longitud, inercia y rigidez ($F, f, \rho, \mu, U; L, l, K$) y 3 dimensiones básicas (M, L, T), se obtienen 5 números adimensionales. Se ha asumido que el amortiguamiento estructural es pequeño $C \ll 2 \cdot (KI)^{1/2}$, y que no influye en ese rango de valores. Tampoco se ha escalado la turbulencia del aire incidente, habiendo realizado los ensayos en flujo uniforme (turbulencia inferior al 1%).

Los números adimensionales típicos para fuerza, frecuencia y viscosidad (F, f, μ) 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:

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

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

$$R_e = \frac{\rho UL}{\mu}$$

Para el momento de inercia y la deformación, se pueden elegir: la frecuencia reducida f_r (una variante del St), función de la frecuencia propia ω_0 (para una barra empotrada-libre a torsión), y la variante del número de Euler para momentos E_{mom} , que sirve para definir el punto de aplicación de la fuerza:

$$f_r = \frac{\omega_0 L}{U} = \frac{\pi L}{2U} \sqrt{K/I} = \frac{\pi L}{2U} \sqrt{GJ/LI}$$

$$E_{mom} = \frac{K}{1/2 \rho U^2 L^3}$$

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

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

Igualando E_{mom} y f_r en el prototipo p y el modelo m , se obtiene:

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

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

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 los casos estudiados 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. De esta manera ambos se comportarán igual, en valores reducidos (adimensionales) y de forma proporcional en valores absolutos, en todo momento y para todos los fenómenos (“galloping”, vibración inducida por vórtices, divergencia

torsional; en el caso del bataneo, se debería escalar la turbulencia también).

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.

Las Figura 4 muestran los detalles y variedad de los modelos a escala utilizados en los ensayos:

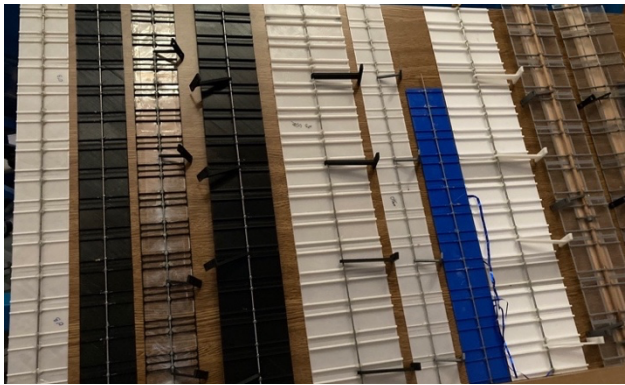


Figura 4. Detalles constructivos de los modelos.

La Tabla 1 recoge las características geométricas y estructurales de algunos los modelos a escala analizados:

Id	L (m)	b (m)	k (N·m)	I (kg·m ²)	ω_0 (Hz)
1	0.677	0.067	0.200	5.43E-6	48.0
2	0.677	0.100	0.200	3.65E-5	18.5
3	0.677	0.067	0.200	7.82E-6	40.0
4	0.677	0.067	0.200	9.24E-6	36.8
5	0.677	0.067	0.202	1.14E-5	33.2
6	0.677	0.091	0.200	2.84E-5	21.0
7	0.677	0.134	0.900	1.34E-4	20.0

Tabla 1. Características de los modelos.

Los ensayos se han realizado con una configuración geométrica bien definida: aprovechando la simetría de la estructura, solo se ensaya medio “tracker” disponiendo un plano vertical en la sección de empotramiento o “driver”. Igualmente, se coloca otra pared en el borde libre, para eliminar los efectos de borde. El bloqueo de la sección es menor del 8% y ninguno de los dos bordes longitudinales del panel penetra en la pequeña capa límite que se comienza a desarrollar en el suelo de la sección de ensayo (Figura 5). Se ha tenido un especial cuidado además en el detalle de la cabeza del pilar, asegurando un rozamiento prácticamente nulo en el “torque tube”.

De esta manera, partiendo del panel de cada posición inicial θ_0 y al ir aumentando de forma gradual la velocidad del aire en la cámara de ensayo el modelo comienza a girar, 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 6).

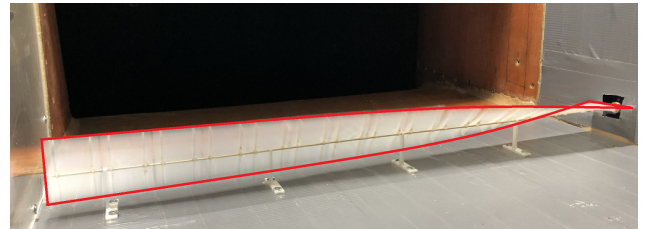
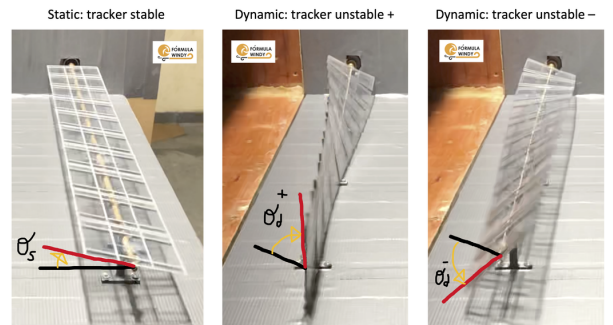


Figura 5. Ensayo de un “tracker” en el túnel aerodinámico.

Este comportamiento es radicalmente diferente al de placa plana con inclinación constante que se describe en toda la literatura, y se considera fundamental para la explicación del fenómeno.



FULL AEROELASTIC WIND TUNNEL TEST. ENERGY DEPARTMENT, UNIVERSITY OF OVIEDO. #formulawind

Figura 6. Deformación torsional en el modelo.

Además, 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. Por lo que se puede asumir que $\xi_m = \xi_p$, añadiendo a las leyes de semejanza el siguiente número adimensional:

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{KI}}$$

Se deduce de todo lo expuesto anteriormente, que la solución de la fuerza aerodinámica y de su frecuencia de oscilación se podrá expresar en la siguiente forma:

$$C_T = f(Re, C_K, \omega^*, \xi)$$

$$St = g(Re, C_K, \omega^*, \xi)$$

Finalmente, el método de ensayo ha consistido en la medición sistemática, para ángulos de inclinación inicial, “tilt”, en el rango operacional de los “trackers” (60° a -60°) de los momentos en el “driver”, de los ángulos girados en el extremo libre y de las velocidades de galope. Para ello, desde una velocidad superior a la velocidad crítica de galope, se ha ido bajando la velocidad del flujo en escalones de 0,15 m/s aproximadamente.

Análisis y resultados.

A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos. Para un mayor detalle (tanto en este apartado como en los anteriores), se remite encarecidamente a las fuentes originales de la investigación [1,2].

Las primeras medidas que se obtienen para cada caso son las señales temporales del momento en el “driver”, y su correspondiente transformada rápida de Fourier (FFT), lo que permite calcular las frecuencias y amplitudes de las oscilaciones del “tracker” debidas a la acción del viento (Figura 7):

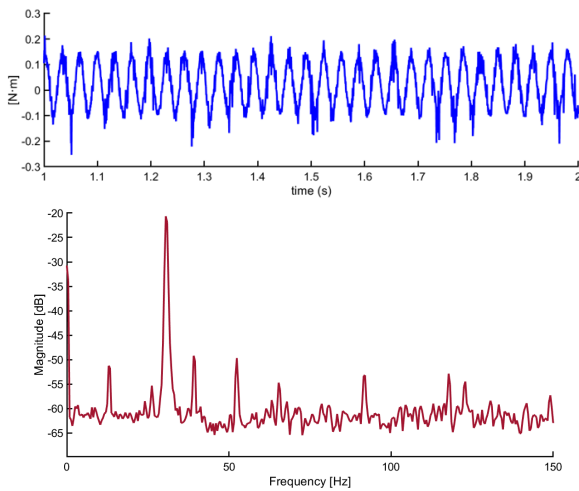


Figura 7. Modelo a 20° y 9,2 m/s.

Con estas curvas y la medida del ángulo girado en el extremo libre, es posible correlacionar las medidas de velocidades críticas de galope observadas con el comienzo de las ampliaciones de las oscilaciones (Figura 8). De hecho, estos datos permiten afirmar que el fenómeno que primariamente se produce (sin descartar que en algunos puntos singulares puedan aparecer otros) es el de “galloping” o flameo de un grado de libertad, dado que la oscilación tiene una frecuencia menor que el primer modo propio de torsión, comienza a partir de un determinado umbral y mantiene amplitudes crecientes con la velocidad de viento hasta el colapso de la estructura.

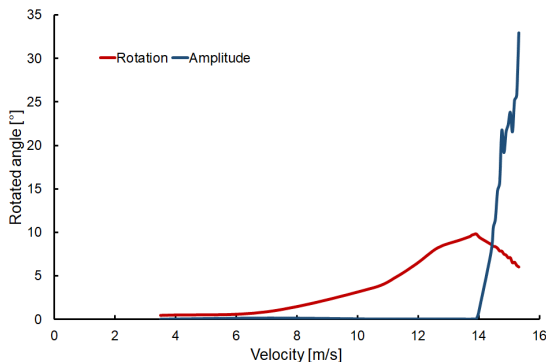


Figura 8. Modelo con un ángulo de 0°.

Con las curvas en el dominio de la frecuencia de cada seguidor, en función de la velocidad de viento, se pueden completar las cascadas de espectros (Figura 9) que identifican totalmente los fenómenos presentes, para cada ángulo de “tilt”.

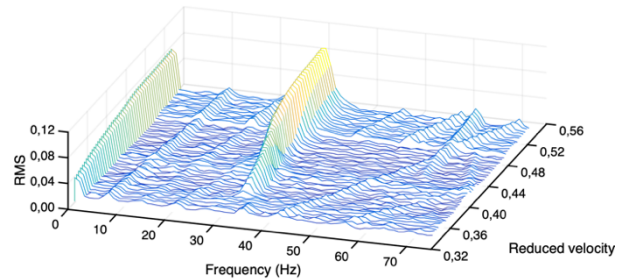


Figura 9. Cascada de espectros para modelo a 25°.

A continuación, se pueden dibujar las curvas de estabilidad (en velocidad absoluta) para cada “tracker” ensayado”, Figura 10:

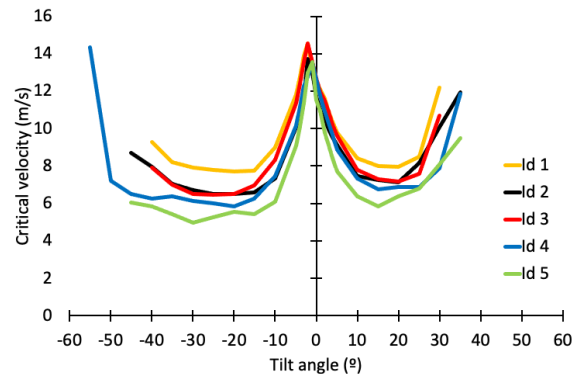


Figura 10. Velocidad crítica de galope.

Para comparar los distintos especímenes ensayados (recordemos, de momento todos semejantes), se utiliza el parámetro adimensionalizado de la velocidad, denominado velocidad reducida:

$$U^* = \frac{U}{b\omega_0} = \frac{U}{b} \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{I}{k}}$$

Redibujando las curvas de nuevo, se observa que, ya que todos los “trackers” tienen el mismo comportamiento, tienen entonces la misma velocidad reducida crítica de galope (Figura 11):

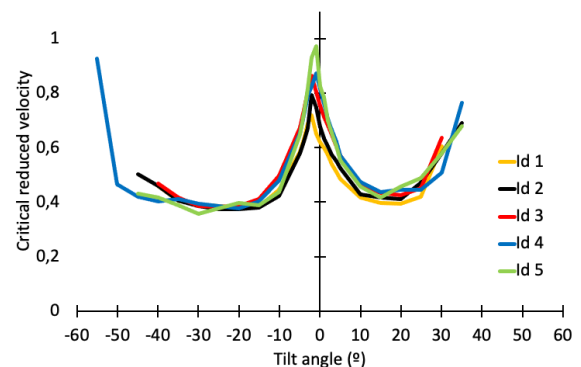


Figura 11. Diagramas de estabilidad de los modelos.

Esto implica la velocidad crítica de galope para un "tracker" concreto (prototipo), se puede calcular a partir del diagrama obtenido para un "tracker" semejante (i.e. un modelo reducido) ensayado en el túnel aerodinámico; y, además, como son semejantes, el comportamiento del prototipo será el mismo que el ensayado (en todos los aspectos, temporales y fenomenológicos):

$$U_{cr} = U_{cr}^* \cdot \frac{b \cdot \pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{k}{I}}$$

Todas estas consideraciones, se han apoyado también en modelos FEM (no lineales) y CFD (FSI) calibrados con las medidas experimentales y validados mediante resultados de campo y campaña experimental adicional (Figura 12):

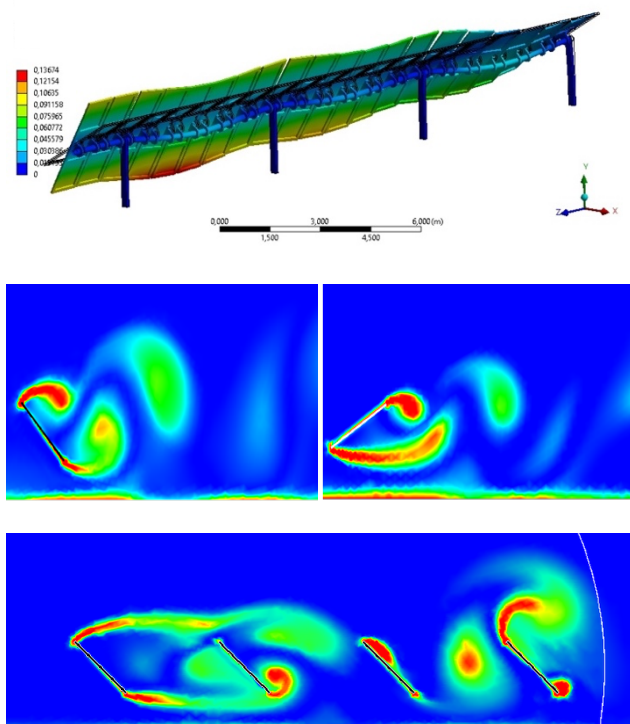


Figura 12. Modelos FEM y CFD.

Pero la verdadera potencia del método que se presenta es su posibilidad de extenderlo a todo el rango de estructuras en el mercado, así como la obtención de las transformaciones entre "trackers" no semejantes que sirven para calcular, al menos, el comienzo de la inestabilidad (velocidad crítica de galope). Además de la vía experimental (ensayando en el túnel una gran cantidad de "trackers" con distintas inercias, relaciones de aspecto y rigidez a torsión del eje), que demuestra que la velocidad reducida crítica solo depende del ángulo inicial o "tilt", también se ha analizado la ecuación del movimiento para cuantificar la influencia de la inercia y de la relación de aspecto L/b .

Así, para la inercia, la ecuación del movimiento del "tracker" por unidad de longitud es:

$$I_0 \ddot{\theta} + 2I_0 \xi \omega_0 \dot{\theta} + \frac{k}{L} \theta = M$$

De acuerdo con Scanlan, en el momento de comienzo de la inestabilidad, el término de las fuerzas aerodinámicas se puede escribir como:

$$M = \frac{1}{2} \rho U^2 b^2 \left(K \frac{b}{U} A_2^* \dot{\theta} + K^2 A_3^* \theta \right)$$

Igualando:

$$\ddot{\theta} + 2\omega_0 \left(\xi - \frac{\rho U b^3 K A_2^*}{2I_0 \omega_0} \right) \dot{\theta} + \left(\omega_0^2 - \frac{\rho U^2 b^2 K^2}{I_0} A_3^* \right) \theta = 0$$

Esta ecuación es inestable cuando:

$$\xi - \frac{\rho U b^3 K A_2^*}{2I_0 \omega_0} < 0$$

Que indica, básicamente, el galope se producirá cuando la derivada de flameo A_2^* pasa de ser negativa a positiva. La influencia de la inercia se produce solo a través del parámetro velocidad reducida, ya que A_2^* es función solamente de la forma de la estructura y de la velocidad reducida.

Y para la relación de aspecto, se parte de la ecuación de un medio continuo en derivadas parciales, sin amortiguamiento externo:

$$GJ \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} + M(x, t) = I_0 \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial t^2}$$

Asumiendo la hipótesis de que el comportamiento tridimensional del fenómeno acoplado de interacción fluido-estructura se puede descomponer en un continuo de estados diferenciales cuya integración puede hacerse sobre la longitud del "tracker", se puede realizar el siguiente cambio de variable:

$$GJ \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 \theta'(x', t)}{\partial x'^2} + M'(x', t) = I_0 \frac{\partial^2 \theta'(x', t)}{\partial t^2}$$

Resultando:

$$I' = \frac{I}{a}$$

$$k' = \frac{GJ'}{L'} = \frac{GJ}{La} = \frac{k}{a}$$

$$U^* = \frac{U}{b} \sqrt{\frac{I}{k}} = \frac{U}{b} \sqrt{\frac{I'}{k'}} = U^{**}$$

Con lo que queda demostrado que dos "trackers" no semejantes tienen el mismo comportamiento en velocidades reducidas, al menos en cuanto al punto de comienzo de la inestabilidad de galope se refiere.

Pudiéndose utilizar las siguientes relaciones de transformación:

$$I_2 = I_1 \frac{L_2}{L_1} \left(\frac{b_2}{b_1} \right)^4$$

$$U_2 = U_1 \frac{b_1}{b_2} \sqrt{\frac{k_2 L_1}{k_1 L_2}}$$

Conclusiones y líneas futuras.

La potencia del método del "Diagrama de Estabilidad del Tracker" (Figura 13), investigación original y publicada por primera vez por el Departamento de Energía de la

Universidad de Oviedo en revistas científicas Q1, radica en su capacidad para calcular la velocidad crítica de galope de los seguidores solares de un solo eje, con independencia de su relación de aspecto, rigidez del eje e inercia de la estructura. Pocos meses después de su publicación, ya está siendo citado entre los más prestigiosos laboratorios del mundo (CPP, RWDI, AGD-WEG, idr, CITEEC, O&B, etc.).

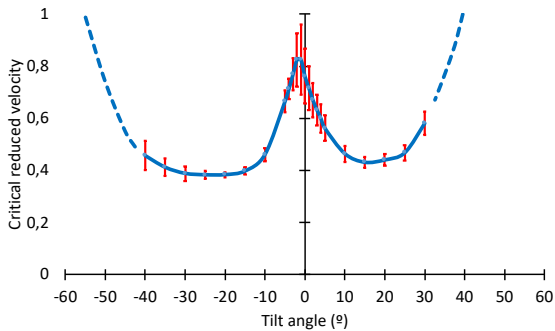


Figura 13. Diagrama de estabilidad del "tracker".

Tras el completo "set" de ensayos (sobre modelos a escala geométrica, cinemática y dinámica, diseñados y contruidos íntegramente por el equipo investigador), y con un desarrollo analítico basado en la semejanza de modelos, se obtiene el valor límite de velocidad de viento (a través de la velocidad crítica reducida) en función del ángulo de posicionamiento o "tilt". El método es válido para todo el rango de seguidores actualmente presentes en el mercado; y evita la laboriosa labor de obtener las derivadas de flameo de un modelo seccional y su posterior integración a lo largo de toda la estructura. También se obtienen las relaciones de transformación entre "trackers" no semejantes.

Las principales aportaciones y conclusiones aportadas por este trabajo son:

- La necesidad de utilizar un túnel aerodinámico (en este caso, de régimen subsónico y de flujo laminar) correctamente caracterizado, diseñado y construido de forma precisa. Este tipo de estudios requiere generalmente de la utilización de infraestructura avanzada, por equipos de trabajo especializados, sin caer en la tentación de extrapolar resultados desde otros estudios, sin un detenido análisis fenomenológico y metodológico. Si bien esos trabajos pudieran tener cierta relación, la complejidad de la materia exige un cuidado planteamiento de las hipótesis. No se trata solamente de oír la música... conviene dirigirla.

- Si los modelos han sido escalados correctamente, tanto en sus características geométricas como mecánicas, es posible obtener los valores correspondientes al prototipo. Además, para el caso de modelos no semejantes, se han obtenido las relaciones de transformación que permiten calcular el comportamiento del prototipo, al menos, en el punto de comienzo de la inestabilidad.

- Es imprescindible el uso de una instrumentación adecuada (rango, precisión, etc.). En este caso, además de un manómetro para la medida de la velocidad de viento

(que incluye medida de la temperatura cuando el túnel es de circuito cerrado), anemometría de hilo caliente para la medida de la turbulencia en la cámara de ensayo, se ha utilizado una balanza de fuerzas diseñada y construida por el equipo investigador, que permite la medida del momento en la sección de empotramiento o "driver". También se ha empleado la grabación de video en alta definición para la medida de los ángulos de giro en el extremo libre. Finalmente, se ha desarrollado un código informático para el procesamiento de la gran cantidad de datos, realizar la FFT para el paso del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, y el dibujo de las cascadas de espectros, que identifican de forma precisa el fenómeno y sus principales características fluido-dinámicas.

- El "Diagrama de Estabilidad" permite obtener entonces el valor de la velocidad crítica de galope para un "tracker" cualquiera, dentro de un intervalo de confianza, en función de la velocidad crítica reducida, del ancho (cuerda) del panel y de la frecuencia propia del primer modo de torsión (función, a su vez, de la rigidez del "torque tube" y de la inercia de la estructura). Este resultado es una cota inferior para dicho valor crítico en condiciones de turbulencia, y debe ser usado para viento incidente perpendicularmente al "tracker" y en configuración "monorow" (típicamente, el "tracker" de primera línea, en el medio de una fila).

- Se ha obtenido la optimización de los elementos fundamentales de la estructura, para una superficie de captación determinada (cuerda por envergadura o longitud); así como la justificación de las posiciones de defensa o "stow" más efectivas.

Como futuras líneas de investigación, actualmente en marcha, se puede mencionar las siguientes:

- Análisis del comportamiento de configuraciones "multirow" y con diversas direcciones de viento.
- Estudio exhaustivo de la influencia de los medios de amortiguación externa, y su repercusión en la naturaleza dinámica del fenómeno aeroelástico.
- Diseño de otras medidas correctoras que aumenten la velocidad crítica de galope en instalaciones ya construidas, tales como pantallas, barreras, bloqueos, alerones, etc.
- Análisis de la existencia de otros fenómenos aeroelásticos, tales como Vibración Inducida por Vórtices, "VIV". Los ensayos realizados hasta el momento demuestran su concurso en algunos puntos específicos del diagrama, y su probable independencia del galope o flameo (Figura 14):

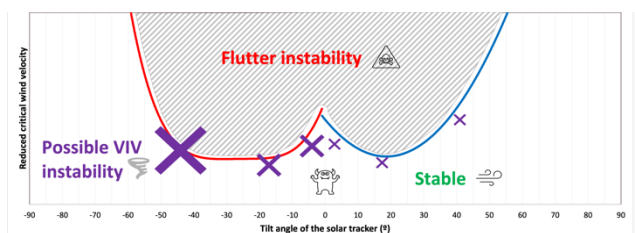


Figura 14. Regiones y puntos de inestabilidad.

- Investigación de la influencia de la flexibilidad propia del panel (en su plano), de la altura sobre el suelo del panel (este parámetro está actualmente estrechamente relacionado con la cuerda del panel).
- Construcción de modelos CFD que reproduzcan fielmente la interacción fluido-estructura.

Bibliografía.

Trabajos originales publicados:

[1] Eva Martínez-García, Eduardo Blanco Marigorta, Jorge Parrondo Gayo and Antonio Navarro-Manso. "Experimental Determination of the Resistance of a Single-Axis Solar Tracker to Torsional Galloping", *Structural Engineering and Mechanics, An International Journal*, Vol. 78, Nº 5 (2021) 519-528. DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2021.78.5.519>, <http://www.techno-press.org/?page=container&journal=sem&volume=78&num=5#>

[2] Eva Martínez-García, Eduardo Blanco Marigorta, Jorge Parrondo Gayo and Antonio Navarro-Manso. "Influence of Inertia and Aspect Ratio on the Torsional Galloping of Single-Axis Solar Trackers", *Engineering Structures* (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112682>, <https://www.journals.elsevier.com/engineering-structures>

Referencias:

Aydogdu, M., Arda, M. and Filiz, S. (2018), "Vibration of axially functionally graded nano rods and beams with a variable nonlocal parameter", *Adv. Nano Res.*, **6** (3), 257–278. <https://doi.org/10.12989/anr.2018.6.3.257>.

Bahrami A, Onyeka Okoye C, Atikou U. Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries. *Renew Energy* 2017;113:563–579. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.095>.

Blevins RD. *Flow-Induced Vibration*. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold Co.; 1990.

Davenport AG. The buffeting of large superficial structures by atmospheric turbulence. *Ann N Y Acad Sci* 1964;116:135–159. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1964.tb33943.x>

Dyrbye, C. and Hansen, S.O. (1997), *Wind Loads on Structures*, John Wiley & Sons, Ltd., Baffins Lane Chichester, Sussex, UK.

Ebrahimi, F., Barati, M.R. and Civalek, O. (2020), "Application of Chebyshev–Ritz method for static stability and vibration analysis of nonlocal microstructure-dependent nanostructures", *Engineering with Computers*, **36**, 953–964. <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00742-z>.

Energy Information Administration. *Levelized Costs and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook*. U.S. Energy International Agency; 2020.

Fan X, Wang Z, Chen X, Wang Y, Tan W. Experimental investigation on flow-induced vibration of flexible multi cylinders in atmospheric boundary layer. *Int J Mech Sci* 2020;183:105815. <https://doi.org/10.1016/j.iimecs.2020.105815>.

Galuppi L, Royer-Carfagni G. Enhanced Effective Thickness for laminated glass beams and plates under torsion. *Eng Struct* 2020;206:110077. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110077>.

Jia J. Wind and structural modelling for an accurate fatigue life assessment of tubular structures. *Eng Struct* 2011;33(2):477–491. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.004>.

Jubayer, C.M. and Hangan, H. (2015), "Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted Photovoltaic (PV) system", *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, **134**, 1–37. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.008>.

Katariya, P.V. and Panda, S.K. (2019), "Numerical frequency analysis of skew sandwich layered composite shell structures under thermal environment including shear deformation effects", *Struct. Eng. Mech.*, **71**(6), 657–668. <https://doi.org/10.12989/SEM.2019.71.6.657>.

Kopp GA, Farquhar S, Morrison MJ. Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted solar arrays. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2012;111:40–52. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.08.004>.

Koussa M, Chekneane A, Hadji S, Haddadi M. Nouredine S. Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions. *Applied Energy* 2011;88:1756–1771. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.002>.

Lave M, Kleissl J. Optimum fixed orientations and benefits of tracking for capturing solar radiation in the continental. *Renew Energy* 2011;36:1145–52. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.032>.

Lazard. *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis – Version 12.0*. Lazard, New York, USA; 2018. <https://www.lazard.com/media/450784/lazards-levelized-cost-of-energy-version-12-0-vfinal.pdf>.

Masson G, Kaizuka I. *Trends 2019 in Photovoltaic Applications*. (IEA) International Energy Agency; 2019. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/02/5319-iea-pvps-report-2019-08-lr.pdf>.

Miller RD, Zimmerman DK. *Wind Loads on Flat Plate Photovoltaic Array Fields*. Seattle, Washington: Boeing Engineering and Construction Company; 1981.

Mohammadnejad, M. (2015), "A new analytical approach for determination of flexural, axial and torsional natural frequencies of beams", *Struct. Eng. Mech.*, **55**(3), 655–674. <https://doi.org/10.12989/SEM.2015.55.3.655>.

Païdoussis, M.P., Price, S.J. and De Langre, E. (2011), *Fluid Structure Interaction: Cross flow induced Instabilities*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Pfahl A, Buselmeier M, Zschke M. Wind loads on heliostats and photovoltaic trackers of various aspect ratios. *Solar Energy* 2011;85(9):2185–2201. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.006>.

Pickrel K. How the Solar Industry is Responding to the Increasing Intensity of Natural Disasters. *Solar Power World (SPW)* 2018, January 29th. <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/01/solar-industry-responding-increasing-intensity-natural-disasters/>.

Rao SS. *Vibration of Continuous Systems*. New York: Wiley; 2007.

Rodríguez Lastra, M., Fernández Oro, J.M., Galdo Vega, M., Blanco Marigorta, E. and Santolaria Morros, C. (2013), "Novel design and experimental validation of a contraction nozzle for aerodynamic measurements in a subsonic wind tunnel", *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, **118**, 3–43. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.04.008>.

Rohr C, Bourke PA, Banks D. Torsional instability of single-axis solar tracking systems. *Proc. 14th Int. Conf. Wind. Eng.* 2015, Porto Alegre Brazil, June.

Roedel, A. and Upfill-Brown, S. (2018), "Designing for the Wind, using dynamic wind analysis and protective stow strategies to lower solar tracker lifetime costs". White Paper. NEXTracker.

Scanlan RH, Tomko JJ. Airfoil and bridge deck flutter derivatives. *J Eng Mech Div* 1971; ASCE 97:1717–1737.

Seo D, Caracoglia L. Estimation of torsional-flutter probability in flexible bridges considering randomness in flutter derivatives. *Eng Struct* 2011;33(8):2284–2296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.03.016>.

Simiu E, Scanlan RH *Wind Effects on Structures: Fundamentals and applications to design*, 3th ed. New York: John Wiley & Sons, Ltd.; 1996.

Stathopoulos T, Zisis I, Xypnitou E. Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2014;125:195–206. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.007>.

Strobel K, Banks D. Effects of vortex shedding in arrays of long inclined flat plates and ramifications for ground-mounted photovoltaic arrays. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2014;133:146–149. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.06.013>.

Talavera DL, Muñoz-Cerón E, Ferrer-Rodríguez, JP, Pérez-Higueras, PJ. Assessment of cost-competitiveness and profitability of fixed and tracking photovoltaic systems: the case of five specific sites. *Renew Energy* 2019;134:902–913. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.091>.

Taylor ZJ, Browne MTL. Hybrid pressure integration and buffeting analysis for multi-row wind loading in an array of single-axis trackers. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2020; 197: 104056. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104056>.

Timoshenko S, Gere JM. *Theory of elastic stability*. New York: Mc-Graw Hill;1963.

Yang, Y. (2010), "Experimental Investigations of Vortex Induced Vibration of a Flat Plate in Pitch Oscillation", M.Eng. Dissertation, A&M University, Texas.

Wardlaw RL. Flutter and Torsional Instability. In: Sockel H. (eds) *Wind-Excited Vibrations of Structures*. International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures), 335. Vienna: Springer; 1994. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2708-7_6.

Wesoff E. Solar Trackers in Wind and the Terror of Torsional Galloping. *PV Magazine USA*; 2020, January 17th. <https://pv-magazine-usa.com/2020/01/17/dan-shugar-nexttracker-ceo-on-solar-trackers-in-wind-and-the-terror-of-torsional-galloping/>.

Willuhn M. Tracking in the wind. *PV Magazine Australia* 2019, September 7th.