

Integración de ensayos en túnel aerodinámico y simulaciones numéricas para el análisis de carga de viento en estructuras solares fijas

Integration of wind tunnel testing and numerical simulations for wind load analysis of fixed solar structures

Claudia González-Gutiérrez^a, Mario Suárez Álvarez^b, Carlos Rodríguez-Casado^c,
Eduardo Blanco-Marigorta^d, Pelayo Fernández-Fernández^e, Antonio Navarro-Manso^f

^a Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad de Oviedo, Energía. Becaria. UO288902@uniovi.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Media Madera Ingenieros Consultores, S-L. uo265199@uniovi.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Oviedo, Energía. Doctorando FPU. rodriguezccarlos@uniovi.es

^d PhD Ingeniero Industrial. Universidad de Oviedo, Energía. Catedrático. eblanco@uniovi.es

^e PhD Ingeniero Industrial. Universidad de Oviedo, Estructuras. Profesor Titular. fernandezpelayo@uniovi.es

^f PhD Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Oviedo, Energía. Profesor. navarroantonio@uniovi.es

RESUMEN

Este estudio presenta un enfoque integral del análisis de cargas de viento sobre estructuras fotovoltaicas. Se dividió en cuatro fases principales: pruebas en túnel aerodinámico para obtener datos experimentales, simulaciones CFD para complementar dichos resultados, verificación estructural para garantizar la integridad del diseño y visualización en túnel de humo para la interpretación de los datos y explicación de los fenómenos fluido-dinámicos asociados; realizándose consideraciones acerca de la capa límite atmosférica, la orografía del terreno, el resguardo de las filas interiores y la influencia de la direccionalidad del viento. Los resultados obtenidos permiten optimizar el diseño de las estructuras de energía renovable.

ABSTRACT

This study presents a comprehensive approach to wind load analysis on photovoltaic structures. The study was methodically divided into four phases: wind tunnel tests to obtain experimental data, CFD simulations to complement these results, structural verification to guarantee the integrity of the design, and smoke tunnel visualization to interpret the data and explain the associated fluid-dynamic phenomena. These phenomena include the atmospheric boundary layer, the terrain orography, the shelter of the inner rows, and the influence of wind directionality. The results obtained from this study allow for the optimization of the design of renewable energy structures.

PALABRAS CLAVE: modelo a escala, CFD, visualización con humo, energía fotovoltaica, metálicas.

KEYWORDS: scale model, CFD, smoke visualization, photovoltaic energy, steel.

1. Introducción

La acción del viento sobre ciertas estructuras llega a condicionar su diseño y operación. No sólo son comprometidas las situaciones

extremas (como huracanes o fuertes tormentas) sino muchas otras situaciones de servicio y a velocidades de viento no necesariamente muy

altas. Por esta razón es prioritario realizar un cálculo preciso, versátil, proporcionado y útil para el cliente final (en este caso, el propietario de la planta solar fotovoltaica); y debe ser realizado y justificado utilizando de forma coherente y rigurosa todas las herramientas disponibles, apoyándose en un sólido conocimiento de la fluido-dinámica de los fenómenos implicados.

Una primera aproximación de la carga de viento puede obtenerse aplicando los códigos vigentes en cada caso y país [1]. Debido a la intrínseca complejidad de la acción, a la existencia de fenómenos aeroelásticos y/o de interacción, a la multiplicidad de tipologías estructurales y a la imposibilidad de recoger toda la casuística en ningún documento normativo, numerosos estudios recogen la realización de ensayos experimentales y de simulaciones numéricas, e.g: [2].

Esta ponencia describe el ensayo en túnel aerodinámico, las simulaciones numéricas CFD (*Computational Fluid Dynamics*) y resultados obtenidos para el cálculo de una estructura para instalación fotovoltaica fija, en adelante “mesa”; la metodología presentada ha permitido realizar una comprobación exhaustiva de la estructura y realizar las modificaciones necesarias para garantizar la integridad de la misma.

Los ensayos se han realizado en el túnel aerodinámico ETHAN50_ABLWT (Figura 1, Escuela Politécnica de Mieres, Departamento de Energía, Universidad de Oviedo).

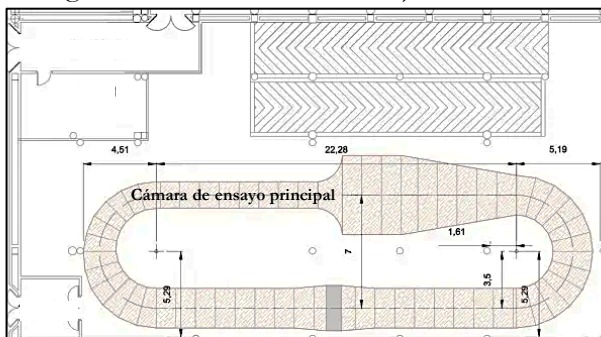


Figura 1. Planta general del túnel aerodinámico.

Se ha construido un modelo a escala 1:30 (Figura 2) instrumentado con 84 puntos de

medida de presión y se han estudiado dos configuraciones: mesa situada en el medio de la fila y mesa situada en el extremo.

Con los datos obtenidos de los ensayos experimentales se han calculado los coeficientes de presión y los coeficientes de fuerza netos. Las fuerzas globales se calcularon para la velocidad de pico según el Eurocódigo, para un terreno tipo II. Adicionalmente se han comparado con los correspondientes coeficientes aerodinámicos y distribuciones de presión que resultarían de la aplicación del Eurocódigo.

Posteriormente, con estos resultados, se han calibrado los modelos de simulación numérica CFD que han permitido realizar estudios sobre la inclinación de los paneles, la pendiente del suelo, y la influencia de efectos como la consideración de la capa límite terrestre (*Atmospheric Boundary Layer, ABL*), la influencia del terreno y su orografía y los factores correspondientes que se consideran en el cálculo por la normativa vigente.

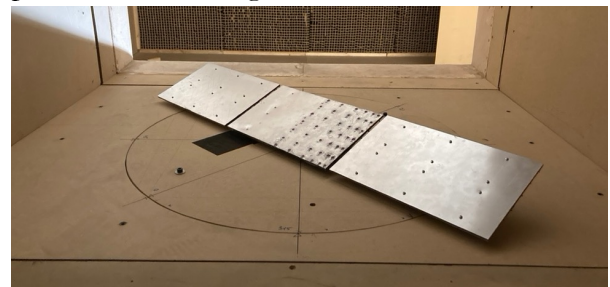


Figura 2. Modelo a escala en la cámara de ensayo.

Finalmente, la carga de viento obtenida se ha utilizado para la comprobación estructural de los elementos de la mesa (pilares, vigas, riostras y uniones).

2. Metodología

El proceso de cálculo propuesto en esta ponencia conjuga distintas herramientas, evitando la realización de costosos ensayos experimentales globales en flujo de capa límite, que sólo serían justificables en algunos casos particulares.

Así el flujo de la metodología se puede esquematizar como sigue:

- Medida de presiones sobre modelo rígido de una fila de mesas solares (en el extremo y en el medio de la fila), obteniendo la distribución de los coeficientes de presión (locales) en ambas caras para 7 direcciones de viento.
- Análisis de los coeficientes de presión netos (diferenciales) sobre la estructura.
- Cálculo de los coeficientes aerodinámicos de fuerza (coeficiente de fuerza neta) y de momento, caracterizando así la aerodinámica básica de la estructura.
- Comparación de los resultados experimentales con la normativa vigente, en este caso, el Eurocódigo UNE-EN-1991-1-4, 2018.
- Análisis numérico CFD para la determinación de la velocidad de Proyecto y valores pico de la presión.
- Cálculo estructural, incorporando los resultados anteriores para la combinación de la acción de viento.

2.1 Cálculo según el Eurocódigo

Para estructuras tipo marquesinas -que son los más adecuados para este tipo de mesa solar- se comienza definiendo la velocidad básica en función de la localización geográfica en el territorio nacional. El Eurocódigo corrige este valor principalmente con unos coeficientes de orografía y rugosidad, para obtener la velocidad media a la altura de referencia. Con esta velocidad media y una estimación de la intensidad de la turbulencia, se determina la velocidad pico, que es la que se utiliza para el cálculo de las fuerzas.

Estas fuerzas se calculan pasando la velocidad pico a presión, y multiplicando por los

coeficientes de presión y de fuerza, junto con las áreas correspondientes.

La velocidad básica que se contempla en el Eurocódigo es la velocidad media diez-minutal a 10 m de altura.

El coeficiente de orografía corrige la velocidad, sobre todo, en función de la posición de la estructura en una pendiente.

El factor de rugosidad se utiliza para hallar la velocidad media a la altura de referencia, teniendo en cuenta la variación de la velocidad en la capa límite atmosférica (ABL). Emplea una distribución de capa límite de tipo logarítmico en función de la longitud de rugosidad que, a su vez, depende de la categoría del terreno. La altura de referencia, para marquesinas a una sola agua, se corresponde con la altura máxima de la marquesina. Aunque se está teniendo en cuenta la variación de la velocidad con la altura, esto sólo es aplicable a la altura de referencia. Una vez hallada la velocidad media, este valor es constante para toda la estructura. No se usan velocidades más bajas para la parte de la estructura por debajo de la altura de referencia.

La intensidad de turbulencia se halla también a la altura de referencia. Depende de la categoría del terreno, y es constante para toda la estructura.

El Eurocódigo utiliza además un factor estructural para tener en cuenta los efectos aeroelásticos. Como se justificará durante el cálculo, estos efectos no son esperables en este caso, aunque son realmente determinantes en otros relacionados con solar fotovoltaica, como los seguidores solares [3], y, por supuesto, puentes, edificios y otras estructuras [4].

Los coeficientes de presión y de fuerza son los coeficientes aerodinámicos de la estructura. El coeficiente de fuerza determina la fuerza total, y los coeficientes de presión la fuerza distribuida. Para una marquesina a una sola agua, el Eurocódigo da valores diferentes del coeficiente de presión para la parte central y para los bordes. Ambos coeficientes cambian

con el ángulo de la cubierta y con el bloqueo del flujo debajo de la marquesina.

Aunque no considera distintas direcciones del flujo, el Eurocódigo especifica valores máximos y mínimos (positivos y negativos) que, en este caso, se corresponden con dirección del viento predominantemente sur-norte y norte-sur, respectivamente.

La capa límite atmosférica no influye en los coeficientes de presión y fuerza. Tampoco se tiene en cuenta su variación con la relación de aspecto, con la distancia al suelo ni con las direcciones intermedias del viento. Estos se pueden considerar como la envolvente de los valores máximos y mínimos para esta clase de estructura.

2.2 Ensayos en túnel aerodinámico y modelos numéricos

En el caso de la estructura estudiada, los ensayos en túnel de viento y modelos numéricos se han utilizado para tener en cuenta, entre otras cosas, los detalles de la forma y el diseño específicos.

El método más completo de ensayo en túnel consistiría en hacer un modelo de la planta completa, junto con la orografía del terreno, y realizar los ensayos con diferentes orientaciones, utilizando una distribución de capa límite atmosférica y de intensidad de turbulencia adecuadas. Este tipo de ensayos obtiene las fuerzas (máximas) sobre la estructura directamente, sin utilizar los factores de corrección de la norma. Son muy adecuados cuando se prevén problemas por la orografía o construcciones cercanas. Sin embargo, tienen el inconveniente de que el tamaño del modelo a escala puede ser demasiado pequeño para representar –y apreciar– los detalles de las estructuras.

En el extremo opuesto está el ensayo centrado en la estructura, generalmente aislada. Este ensayo se realiza con velocidad uniforme del flujo, y está dirigido a hallar los coeficientes aerodinámicos específicos, que tengan en cuenta –en este caso– los detalles del diseño, la relación

de aspecto, la altura sobre el suelo, la separación entre mesas y la posición en la fila. Con este procedimiento, para el cálculo de las cargas de viento se utiliza la metodología propuesta por del Eurocódigo, sustituyendo únicamente los coeficientes de presión y fuerza genéricos por unos más ajustados a la realidad del caso.

Este sistema puede ser problemático cuando, delante del objeto a estudiar, hay elementos que hacen variar el flujo y/o la intensidad de turbulencia. Por ejemplo, cuando se quiere estudiar el efecto del resguardo de las primeras filas en las siguientes. Sin embargo, el mayor tamaño del modelo hace que sea el más adecuado cuando los elementos del diseño de la estructura puedan modificar significativamente su comportamiento respecto a una forma genérica (i.e., el efecto de las correas cuando el viento viene por la parte posterior de la mesa).

Entre estos dos tipos de ensayos hay muchas posibilidades intermedias, cada una con una orientación diferente. Se pueden ensayar, por ejemplo, unas cuantas filas de mesas, para centrarse en los efectos del resguardo. O estudiar solamente la topografía, hallando las variaciones de la velocidad del flujo (en lugar de las fuerzas).

Cuando en los ensayos se utiliza la distribución de capa límite atmosférica, hay que tener en cuenta que los resultados son particulares para la misma. Hay que hacer ensayos distintos para diferentes categorías de terreno; igualmente, para el estudio de la orografía. Por el contrario, los coeficientes aerodinámicos hallados con velocidad uniforme son aplicables siempre que las indicaciones de la norma lo sean.

En este trabajo se han realizado ensayos en túnel de viento de la estructura singular, con velocidad del flujo uniforme, para determinar los coeficientes aerodinámicos de una mesa expuesta (en primera fila), tanto en el medio de la fila como en el extremo, y con diferentes orientaciones de la dirección del viento.

Se han utilizado también modelos numéricos, ajustados y calibrados con los

ensayos experimentales, para hallar la variación de los coeficientes con el ángulo de inclinación, así como para estudiar el efecto de la capa límite, la orografía y el resguardo.

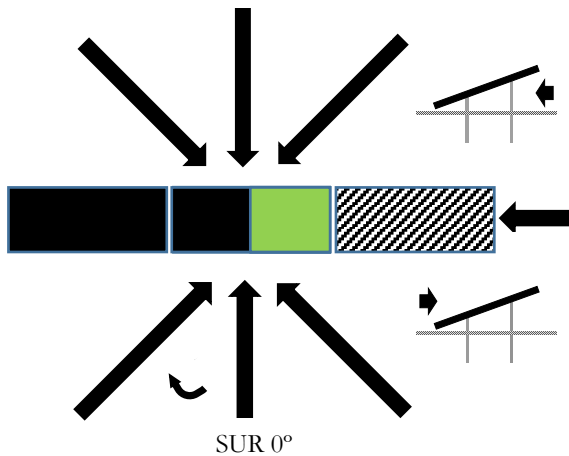


Figura 3. Configuración de ensayo (en verde zona instrumentada, rayado “dummy”).

3. Ensayos experimentales

Se han realizado un total de 14 ensayos para obtener la distribución espacial de las presiones, producidas por el viento, sobre dos configuraciones: 2M mesa en el borde de la fila y 3M mesa en el medio de la fila. La Figura 3 muestra un esquema de las configuraciones, con incrementos del ángulo de la dirección de viento de 45°.

Los ensayos se han realizado sobre un modelo a escala de presión (rígido), en flujo de baja turbulencia (0.6%) y perfil uniforme de velocidad (<1%), con un número de Reynolds del orden de $Re=3 \cdot 10^5$. La velocidad media de los ensayos ha sido aproximadamente de $U_{WT}=17.1$ m/s. Nótese que los valores de los coeficientes aerodinámicos, en cuerpos romos o de flujo desprendido, son independientes de este número con tal de que sea superior a $Re=10^4$.

2.3 Prototipo y modelo a escala

Cada mesa fotovoltaica analizada se corresponde con una estructura de 11.43 x 6.83 m, separadas 30 cm, inclinadas 20° y con una distancia del borde más bajo al suelo de 0.5 m (Figura 4).

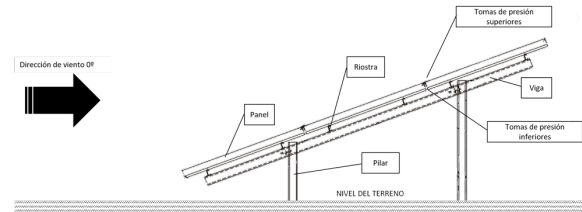


Figura 4. Prototipo de mesa solar.

Las características fundamentales del prototipo que se han reproducido en el modelo a escala 1:30, ya que tienen una influencia bastante significativa en el comportamiento aerodinámico, son: la geometría de los paneles, el ángulo del panel solar, la distancia del borde de ataque al suelo, la relación de aspecto (largo/ancho), separación entre mesas, la posición en la fila, los pilares, las vigas y las riostras (también denominadas correas).

El modelo (Figura 5) se ha construido en acero, aluminio y madera, siendo los 84 puntos de medida impresos en 3D con PLA (Figura 6).



Figura 5. Modelo a escala de mesa solar.



Figura 6. Detalle de las tomas de presión.

3.1 Coeficientes de presión locales

Los coeficientes de presión locales se obtienen con la expresión (1):

$$C_p = \frac{P_i - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} = \frac{P_i - P_\infty}{P_{c \text{ remanso}} - P_\infty} \quad (1)$$

Los casos analizados demuestran que el efecto de borde, cuando la mesa está situada en el extremo de la fila (2M), ocupa aproximadamente un 30% a 40% de la semi-

longitud de la mesa, en función de la dirección del viento.

También se aprecia la influencia de la viga del pórtico (y pilares) en algunos de los casos, modificando localmente las presiones, aunque en ningún caso suponen incrementos críticos de los valores del coeficiente de presión.

Otro efecto que se aprecia es la existencia de torbellinos cónicos en las esquinas, en algunas orientaciones oblicuas, fundamentalmente.

Los gradientes de presión más significativos se dan en los bordes de ataque y esquinas, mientras que las caras a sotavento se mantienen en valores de presión negativos y relativamente constantes, tal y como cabe esperar. Las modificaciones de los valores de presión (con respecto a una placa plana) en la cara inferior de los casos en que ésta se encuentra a barlovento (influenciada por la presencia de las riostras) son apreciables, aunque de nuevo, no especialmente críticos.

La Figura 7 muestra un ejemplo de los mapas de presiones.

3.2 Coeficientes de presión netos

Sumando con su signo los coeficientes de presión locales, se obtienen los coeficientes netos:

$$C_{p,net} = C_{p,sup} - C_{p,inf} \quad (2)$$

3.3 Coeficientes de fuerza

Aprovechando las simetrías de espejo para la parte no instrumentada de la mesa, integrando las presiones, se calculan las fuerzas:

$$F = \sum_{i=1}^{42} F_i = q_p \cdot \sum_{i=1}^{42} (C_{p,net\ i} \cdot A_i) \quad (3)$$

$$M = \int_1^{42} (F_i \cdot y_i) \quad (4)$$

Y los coeficientes se obtienen con las siguientes expresiones:

$$C_f = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot A} \quad (5)$$

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot A \cdot b} \quad (6)$$

$$d = \frac{\int_1^{42} (F_i \cdot y_i)}{F} \quad (7)$$

4. Velocidad de viento y fuerzas sobre la estructura

La Tabla 1 muestra los resultados finales y su comparación con el Eurocódigo. Sin ánimo de hacer un comentario exhaustivo de todos los casos analizados, únicamente se menciona aquí como ejemplo que ilustra la utilidad del método propuesto que, para el caso de 180°, además, la fuerza en el borde de sotavento es hacia abajo, en vez de hacia arriba (diferente a lo propuesto en el Eurocódigo), debido al efecto de la riostra más cercana al borde inferior.

La presión de pico a la altura de $z=2.84$ m (parte superior de la mesa) se ha tomado, según el Eurocódigo, para terreno de categoría II, como $q_p(z)=747$ N/m².

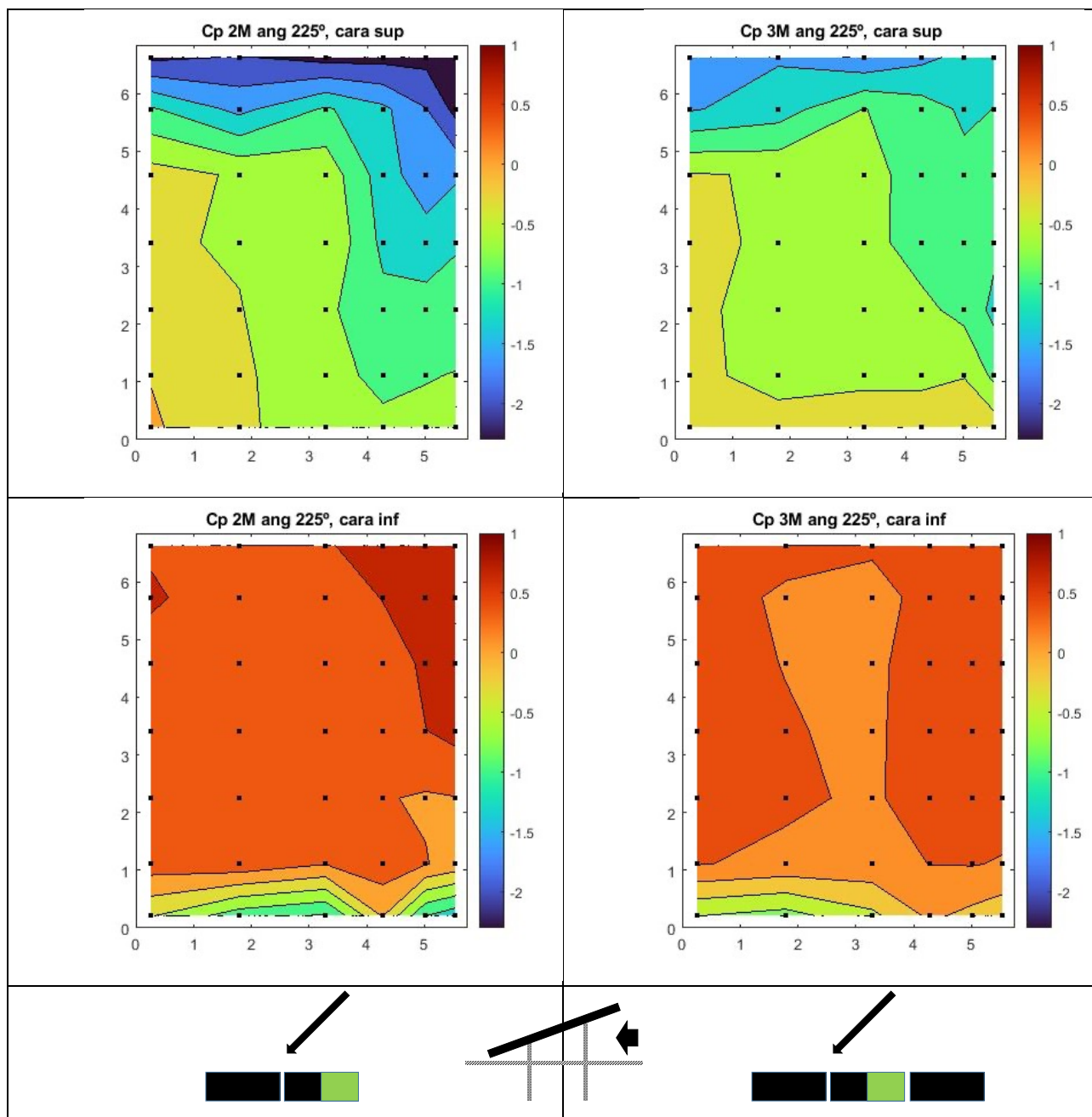


Figura 7. C_p locales, viento 225°, caras superior e inferior 2M (izqda.) y caras superior e inferior 3M (dcha.).

4. Estudio numérico CFD

En este apartado se recogen las simulaciones RANS 2D y 3D realizadas con un software de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), *Ansys-Fluent*. Los estudios tienen como objetivos, además del propio cálculo de la carga sobre la mesa, validado con los ensayos experimentales:

- Fuerzas tangenciales sobre paneles y riostras.
- Influencia de pendiente y orografía.
- Efecto de *ABL*.
- Análisis del resguardo de la primera fila de mesas sobre las filas sucesivas.

Todos los modelos se han validado con los resultados experimentales (Figura 8) y se han realizado los pertinentes análisis de sensibilidad del mallado (Figura 9), del modelo de turbulencia

(hasta 10 modelos) y el análisis de la convergencia de los resultados.

Tabla 1. Valores de coeficiente de fuerza neta, momento y posición.

CASO	Cf WT	Cm WT	d/b WT	Cf Eu, 0	Cf Eu, 1	d/b Eu
2M_000G	0.78	0.27	0.34			
3M_000G	0.80	0.27	0.34			
2M_045G	0.45	0.17	0.33	0.8	0.8	
3M_045G	0.52	0.17	0.33			
2M_135G	-0.68	0.26	0.37			
3M_135G	-0.82	0.31	0.38			
2M_180G	-1.09	0.43	0.40	-1.3	-1.4	0.25
3M_180G	-1.16	0.46	0.40			
2M_225G	-0.90	0.32	0.35			
3M_225G	-0.82	0.31	0.38			
2M_270G	-0.06	0.03	0.46			
3M_270G	-0.02	0.01	0.39	-	-	
2M_315G	0.68	0.25	0.37	0.8	0.8	
3M_315G	0.52	0.18	0.34			

A continuación, se comentan los principales resultados y conclusiones extraídas de los modelos numéricos. La Figura 10 muestra el detalle del campo de presiones en el caso de dirección de viento de 180°, donde se aprecia la influencia de las riostras y el cambio de signo en el borde de sotavento. La influencia de las tensiones tangenciales es lógicamente despreciable.

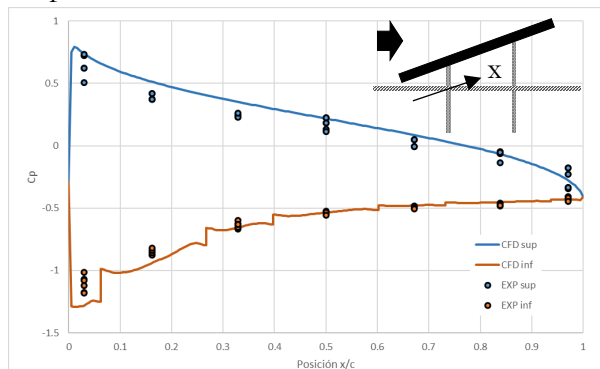


Figura 8. Comparación de los Cp obtenidos en CFD y túnel aerodinámico (EXP), modelo 2D, viento 0°.

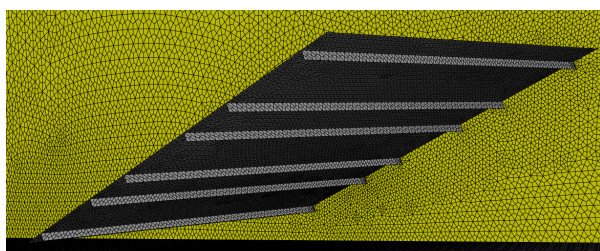


Figura 9. Detalle del mallado en la cara inferior del panel y riostras (modelo 3D, 5 060 000 celdas).

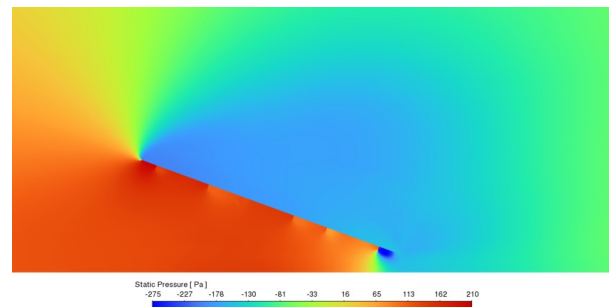


Figura 10. Presiones, viento 180°.

En cuanto a la influencia del terreno, se analizaron por separado el cambio de ángulo relativo con respecto al panel (Figura 11) y la propia modificación de la velocidad de viento por el efecto de dicha pendiente.

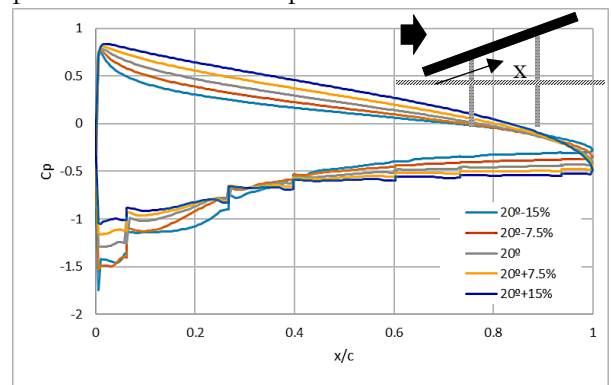


Figura 11. Cp en función de la pendiente, viento 0°.

La Figura 12 muestra los perfiles de velocidad sobre un modelo de pendiente 2D; en la Figura 13 se puede ver el modelo 3D con la velocidad a la altura de referencia $z=2.84$ m y la

Figura 14 muestra el coeficiente de orografía para dos casos de pendiente constante de colina.

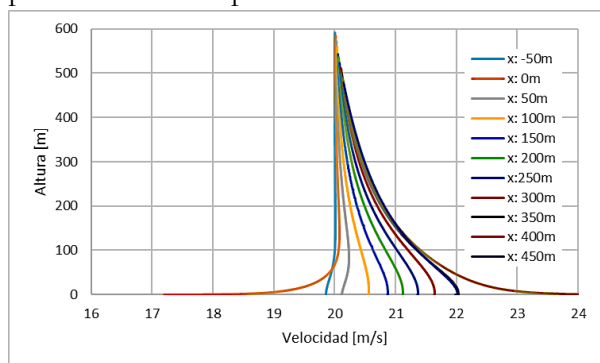


Figura 12. Perfiles de velocidad cada 50 m, modelo de pendiente 2D.

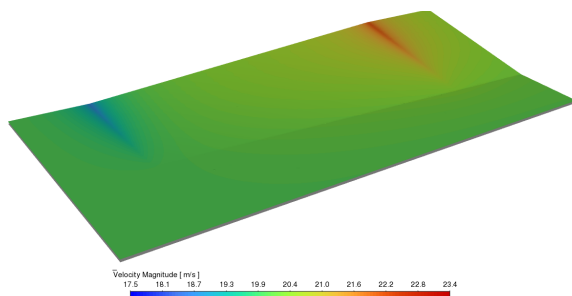


Figura 13. Campo de velocidades a $z=2,84$ m, modelo de orografía 3D.

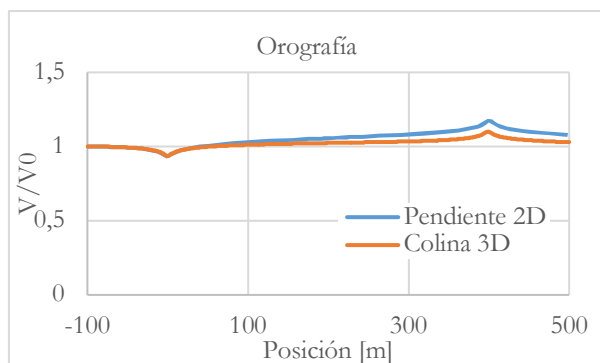


Figura 14. Coeficiente de orografía para $z=2,84$ m.

Adicionalmente, se analizó la influencia de la consideración de un perfil de velocidad correspondiente al de capa límite atmosférica. En este caso, en el que la estructura no es susceptible de efectos de sufrir efectos dinámicos significativos, se puede considerar que los valores de fuerza en flujo uniforme (el ensayado en el túnel) está del lado de la seguridad (Figura 15).

Finalmente, se analizó de forma comparativa el efecto del resguardo, en diversos modelos de orografía, tanto en el plano medio

(Figura 16) como en las mesas de esquina o de perímetro.

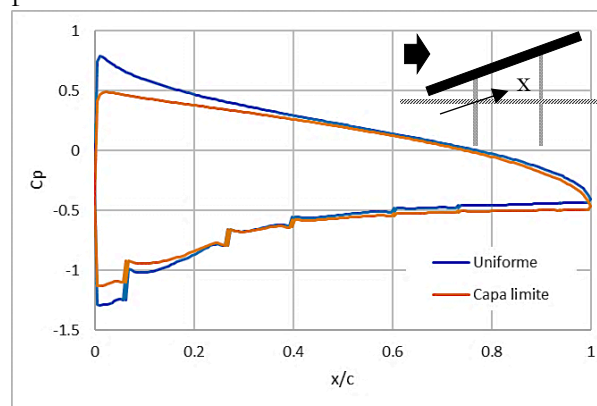


Figura 15. C_p en flujo uniforme y ABL.

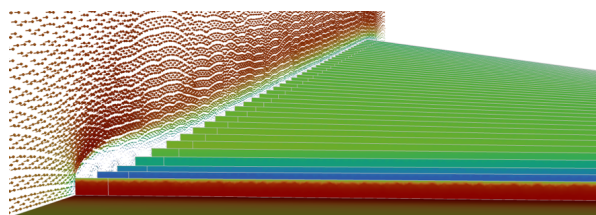


Figura 16. Resguardo en el modelo de colina.

Como complemento a este análisis, se han realizado numerosas visualizaciones en el túnel de humo CRC5-sWT, construido por el equipo investigador (Figura 17).

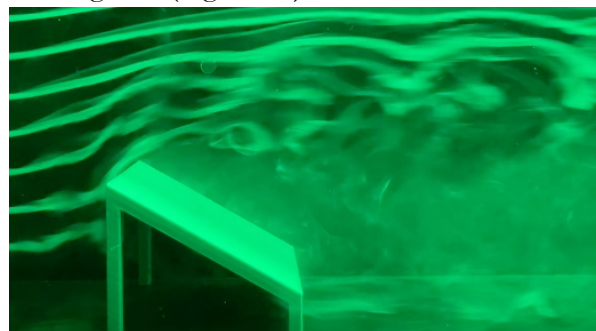


Figura 17. Visualización en humo, viento 180° .

5. Conclusiones

Se ha realizado un estudio experimental y numérico para obtener las cargas de viento sobre una estructura fija para soporte de paneles fotovoltaicos.

La parte experimental recoge los ensayos de un modelo rígido a escala 1:30, realizados en el túnel aerodinámico ETHAN50_ablWT (Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo). En los ensayos en flujo uniforme se

han medido los valores medios de las presiones en ambas caras de los paneles, con los que se han obtenido los coeficientes de presión y coeficientes de fuerza neta medios para cada una de las configuraciones. Todos los coeficientes de fuerza hallados son iguales o algo inferiores a los recomendados por la norma. Los mayores valores se han encontrado en las direcciones de 0° (sur-norte) y 180° (norte sur) para la configuración equivalente a una mesa en el medio de la fila.

Respecto a los coeficientes de presión locales, solamente hay uno superior a la recomendación de la norma, para la dirección de viento de 225° , en la esquina más expuesta (-3.15 frente a -2.9 o -3.0, según el bloqueo que se considere). Las distribuciones halladas también son diferentes, como es lógico, considerando que los valores de la norma se corresponderían con los máximos de todas las configuraciones.

En la parte numérica, se han hallado las cargas tangenciales (en el plano del panel), y perpendiculares a las riostras. Se ha realizado un estudio de la influencia de la orografía. Por último, se ha hecho un análisis de la influencia de la distribución de velocidad en la capa límite atmosférica, y de los efectos del resguardo.

A partir de este estudio, teniendo en cuenta los requerimientos técnicos y el análisis de la localización concreta de la planta, se considera que las condiciones más exigentes con respecto a la carga de viento son:

- Dirección 0° (sur-norte): ángulo respecto al suelo de $20^\circ + 7.5\%$ (24.3°). Los coeficientes de fuerza y presión son un 7,5% mayor que para la inclinación nominal, con un coeficiente de orografía $C_o = 1.00$.
- Dirección 180° (norte-sur): respecto al suelo de $20^\circ + 7.5\%$ (24.3°). Los coeficientes de fuerza y presión son un 4.5% mayor que para la inclinación nominal, con un

coeficiente de orografía $C_o = 1.15$. En este último caso, también hay que considerar una fuerza tangencial sobre la última riostra de un 2% de la fuerza neta normal, en la dirección del flujo.

Estas cargas de viento se han introducido en un modelo de cálculo estructural para la comprobación de la mesa, incluyendo valores pico de la velocidad de viento y los coeficientes de seguridad preceptivos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el trabajo de todo el equipo de Fórmula Windy y de su laboratorio en la Escuela Politécnica de Mieres de la Universidad de Oviedo.

Referencias

- [1] ENV 1991-2-4 - Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4: Acciones en estructuras. Acciones del viento, 2018.
- [2] J.H. Cain, D. Banks, C. Peterka Petersen, Wind loads on utility scale solar PV power plants, in: SEAOC Convention Proceedings. (2015) 1–8.
- [3] C. Rodríguez-Casado, E. Martínez-García, R. Manzanares-Bercial, J.L. Ruiz-Moral, E. Blanco-Marigorta, A. Navarro-Manso, Experimental Benchmark for the 3D wind tunnel testing of torsional aeroelastic instabilities in single-axis solar trackers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 253 (2024), 105838.
- [4] Scanlan, R., Jones, N.P., 1990. Aeroelastic analysis of cable-stayed bridges. Journal of Structural Engineering. 116, 2 (1990), 279-297.