

A COMPUTATIONAL STUDY OF THE AERODYNAMIC HIDING FACTOR BETWEEN PANELS ARRAYS FOR THE OPTIMIZATION OF SUPPORT STRUCTURES IN SOLAR PARKS

Escrivá Pla, Ramón; Sánchez Carratalá, Carlos R.
Universitat Politècnica de València

The heuristic design process presently followed for the project of support structures in photovoltaic plants is driven primarily by cost reduction, devoting the greater efforts to optimize geometric shapes or production and logistics processes. Another synergic possibility to address the issue -although not exploited in practice- is to assess more precisely the wind loads on these structures, taking into account the particularities of each specific facility. Current standards and recommendations do not allow considering the hiding between successive arrays or tables of panels, either because they behave altogether like a disconnected roof or because they are comparable to a sequence of sloping walls with holes in the bottom. In this paper, numerical simulation and parallel computing techniques typical of Computational Fluid Dynamics (CFD) are used to characterize the effect that the aerodynamic hiding between tables has in the total loads on the support structures of photovoltaic panels. The results show a significant reduction of wind loads in most of the tables of the solar park, allowing to suggest a potential decrease in the construction cost of the plant.

Keywords: photovoltaic solar plants; support structures for panels; wind loads; hiding between panels arrays; parallel computing; Computational Fluid Dynamics

ESTUDIO COMPUTACIONAL DEL FACTOR DE OCULTAMIENTO AERODINÁMICO ENTRE PAÑOS DE PANELES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS SOPORTE EN PARQUES SOLARES

El proceso de diseño heurístico seguido actualmente para el proyecto de estructuras soporte de centrales fotovoltaicas está guiado fundamentalmente por la reducción de costes, dedicando los mayores esfuerzos a la optimización de las formas geométricas o de los procesos productivos y logísticos. Otra posibilidad sinérgica de abordar la cuestión -aunque no explotada en la práctica- consiste en evaluar con mayor precisión la acción del viento sobre esas estructuras, teniendo en cuenta las particularidades de cada instalación concreta. Las normas y recomendaciones actuales no permiten considerar el ocultamiento entre sucesivas mesas o paños de paneles, ya sea por comportarse en conjunto como una cubierta no conexas o por ser asimilables a una sucesión de muros inclinados con orificios en su parte inferior. En esta ponencia se utilizan técnicas de simulación numérica y de computación paralela propias de la Dinámica de Fluidos Computacional (DFC) para caracterizar el efecto que el ocultamiento aerodinámico entre mesas tiene en las cargas totales sobre las estructuras soporte de los paneles fotovoltaicos. Los resultados muestran una importante reducción de las cargas de viento en gran parte de las mesas del parque solar, lo que permite plantear un abaratamiento potencial en el coste de implantación de la central.

Palabras clave: centrales solares fotovoltaicas; estructuras soporte para paneles; cargas de viento; ocultamiento entre paños de paneles; computación paralela; Dinámica de Fluidos Computacional

Correspondencia: Carlos R. Sánchez-Carratalá - csanchez@mes.upv.es

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Valencia los recursos de computación puestos a su disposición para la realización del presente estudio.

1. Introducción

Las estructuras soporte para centrales de generación fotovoltaica son, en general, estructuras muy repetitivas formadas por barras de acero o aluminio, que resultan bastante ligeras y diáfanas; su altura es poco elevada, de manera que rara vez superan los 10 m sobre el terreno y casi siempre se encuentran por debajo de los 5 m. En su mayoría están compuestas por uno o dos pilares que sustentan una matriz plana de dinteles y correas a la que se sujetan los módulos o paneles fotovoltaicos. Dependiendo de los condicionantes de localización, construcción, mantenimiento y producción, el diseño puede llevar a plantear estructuras fijas o móviles (estas últimas también son conocidas como seguidores, con movimiento en uno o en dos ejes). En esta ponencia se aborda el caso de las estructuras fijas, que es la tipología mayoritaria en parques solares de gran extensión, debido a su menor coste tanto en la construcción como durante la explotación, lo que suele compensar la pérdida de producción derivada de no seguir al Sol en su trayectoria durante el día y a lo largo de las estaciones del año.

Las estructuras fijas se cimentan mediante zapatas de hormigón apoyadas o embebidas en el terreno, o mediante pilotes de pequeña longitud introducidos en el terreno — generalmente, metálicos, ya sean hincados o atornillados— (Sánchez-Carratalá, 2012). Entre las acciones más importantes a resistir por parte de la estructura destaca la presión (o succión) debida al viento, y la acumulación de nieve o arena sobre los módulos. Con el viento actuando en el sentido de los rayos solares, el mecanismo de fallo típico es el colapso de la estructura por pandeo a axil de los pilares o por fallo a flexión de los dinteles o correas del entramado. Por su parte, la acción lateral del viento puede tener un efecto sobre la estabilidad global de la estructura al provocar levantamiento de la cimentación, especialmente cuando actúa en sentido contrario a los rayos solares. Otro mecanismo de fallo de la estructura ante el viento soplando desde la parte trasera de los paneles, es el correspondiente a una excesiva deformación a flexión de las correas que dé lugar a una curvatura de la barra tal que permita a los módulos escapar de sus sujeciones a la estructura.

En la práctica profesional, es habitual para el diseñador de estructuras para parques fotovoltaicos tener que adoptar hipótesis conservadoras al considerar las cargas a las que dichas estructuras se verán sometidas durante su vida útil. Son estas hipótesis las que llevan a asimilar la estructura diseñada a casos de geometrías parecidas contempladas en la literatura o en los códigos, adoptando sus correspondientes valores para las cargas de diseño.

Los paños de paneles fotovoltaicos están formados por la unión en forma de matriz de los módulos generadores instalados, formando una única superficie plana que se sujeta a una misma estructura (más o menos alargada). Es esta superficie sobre la que el viento desarrolla la mayor parte de la presión que deberá resistir la estructura soporte. En la actualidad, para la obtención de las cargas de diseño que actúan sobre las superficies de los paneles dispuestos en una central fotovoltaica cualquiera, el proyectista suele recurrir a las normas y recomendaciones existentes, al margen de posibles ensayos físicos a escala reducida —túnel de viento—, que no son tan habituales.

Dentro de dichas normativas se proporcionan valores de diseño para la carga debida a la acción del viento a partir de la velocidad del viento en el emplazamiento, utilizando para ello coeficientes aerodinámicos de presión o fuerza sobre las superficies (p.ej., Comité Técnico AEN/CTN-140, 2005; Puertos del Estado, 1995; Dirección General de Carreteras, 2011). Para poder precisar dichos coeficientes, generalmente se establece una serie de geometrías —que son idealizaciones parametrizadas de los casos de uso más habituales—, sobre las cuales se han llevado a cabo estudios analíticos y/o experimentales (Tomás & Morales,

2012). El efecto del ocultamiento ante la acción del viento es considerado en las normas, bien implícitamente a través de casos de geometrías particulares donde se produce este efecto (p.ej., cubiertas en diente de sierra), bien explícitamente mediante el tratamiento general de una tipología estructural (p.ej., celosías) utilizando parámetros de consideración geométrica (separación, altura, superficie expuesta). En la Recomendación ROM-04/95 (Puertos del Estado, 1995) se encuentra un tratamiento más específico del problema al considerar parámetros adicionales sobre el régimen de flujo (subcrítico o supercrítico) con los que poder relacionar la estela resultante del trasiego del viento alrededor del cuerpo generador de la perturbación, con su desarrollo sobre el propio cuerpo que se encuentra sumergido en dicha estela.

Es dentro de las normativas y recomendaciones donde se abre la posibilidad de obtener las cargas de diseño mediante un estudio más detallado con el que obtener resultados de aplicación al caso específico estudiado, ya sea realizando experimentos físicos a escala reducida en túnel de viento, o, como en nuestro caso, efectuando una simulación numérica del caso particular de interés.

En esta ponencia se presentan el planteamiento, la metodología, los modelos y los resultados de una serie de ensayos numéricos llevados a cabo mediante técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional para el estudio de la afección e interacción entre paños o mesas subsiguientes de un parque fotovoltaico, ante la acción del viento. Asimismo, se detallan los casos a ensayar en función de la inclinación de los paños y la separación entre ellos, al objeto de establecer la correlación existente entre las fuerzas que se desarrollan en cada uno de las mesas debido al efecto de ocultamiento aerodinámico entre paños de paneles.

2. Modelización del Problema

Estudiar la realidad en toda su complejidad es una tarea que requiere tanto de rigor como de criterio ingenieril a la hora de tomar decisiones relativas a problemas en los que el conocimiento aún no ha avanzado lo suficiente. Una de las formas de abordar la cuestión consiste en intentar aislar del resto el fenómeno o parámetro que se pretende analizar, al objeto de comprender e interpretar mejor los resultados del estudio. Este proceso de simplificación de la realidad suele ser a costa de una pérdida en la fiabilidad de los resultados cuando el fenómeno estudiado presenta características no lineales, cosa que ocurre en casi cualquier tipo de ensayo aerodinámico, sea físico o numérico. Forma parte del diseño del ensayo intentar reducir las imprecisiones y las incertidumbres a un mínimo. La obtención de los valores de la presión sobre la superficie de un cuerpo sumergido en la capa límite terrestre es un problema complejo, por lo que la aproximación actual trata de simular los resultados en diferentes escalas (Blocken, Stathopoulos & Carmeliet, 2007; Cao, 2014).

2.1. Simplificaciones Adoptadas

Partiendo del esquema habitual de una central fotovoltaica tipo, debe asumirse una serie de simplificaciones de la realidad en el proceso de modelización (Escrivá-Pla, 2015). En nuestro caso, ese paso de la realidad al modelo conlleva la eliminación de la influencia en el análisis de los pilares, tanto en estructuras soporte tipo pórtico como monoposte, así como de los posibles arriostamientos entre pórticos que se interpongan al flujo. Ambos tipos de elementos estructurales (pilares y arriostamientos) u otros de tipo funcional presentes en la mesa o paño de paneles fotovoltaicos (cajas de conexiones, canaletas eléctricas, equipamiento diverso, etc.) tendrán una influencia en la generación de estructuras turbulentas, pero su poca entidad relativa conlleva a obviarlos en la definición concreta de la geometría a analizar.

Del mismo modo se tratará el emparrillado formado por los dinteles y correas que sujetan directamente el paño de paneles. Al estar dicho emparrillado justo por debajo de los paneles y ser su superficie expuesta bastante reducida (la superficie total de los paneles es siempre mucho mayor), tampoco se considerarán sus elementos en el análisis del trasiego de flujo. En cuanto al terreno, la rugosidad propia de su superficie será modelizada a través de su influencia en el comportamiento del flujo. Así, sus características quedarán definidas teniendo en cuenta la forma en que se desarrolla el perfil logarítmico de velocidades medias del viento, mientras que como condición de contorno se tomará la de no deslizamiento en su superficie. Geométricamente, se considerará el suelo como un plano horizontal.

En otro orden de cosas, el presente estudio trata también sobre la simulación numérica del comportamiento de un fluido —aire— y su influencia sobre un cuerpo romo, dejando de lado la deformación del cuerpo, que se supone infinitamente rígido. Analizar la interacción fluido-estructura es un problema complicado que puede enfocarse mediante la utilización de funciones de respuesta de la estructura frente al viento, cuyos parámetros deben ser obtenidos de forma experimental (Nieto, 2006). Otra forma consiste en analizar el conjunto de ambos dominios mediante simulación numérica: por una parte, el dominio fluido, que se abordaría con un análisis similar al llevado a cabo para la presente ponencia; y, por otra, el dominio sólido correspondiente a la estructura, en el cual, para cada paso de tiempo, se analiza y se obtiene su deformación —en régimen elástico o plástico— ante la acción de las presiones producidas en su contacto con el dominio fluido, modificando a su vez la propia acción de éste sobre la estructura deformada. La interacción descrita produce un problema altamente no lineal que, pese a la posibilidad de su resolución (Jasak & Tuković, 2010), requiere de grandes potencias de cálculo para su resolución que no se justifican en los casos habituales.

2.2. Problemática Asociada a la Turbulencia

Los modelos lineales y deterministas, como el flujo laminar, no son muy frecuentes en la realidad de los campos de viento, quedando relegados en la mayoría de los casos a la curiosidad de laboratorio o a la aplicación de métodos de cálculo simplificados. Por ello, son las representaciones no lineales y/o aleatorias de tipo turbulento —no tan fácilmente tratables en el plano formal—, las que imperan a nuestro alrededor. Pese a esta cotidianeidad, que debería conformar nuestra apreciación, no somos capaces (con el nivel de conocimiento actual) de entender, modelizar y prever la naturaleza con rigurosidad analítica total. De ahí que en ciertos problemas, surja la necesidad e idoneidad de los métodos numéricos.

En el caso que nos ocupa, relativo a la variación de la carga de viento debida al ocultamiento (efecto sombra) entre estructuras soporte de paneles para generación fotovoltaica, se ha intentado que las conclusiones obtenidas sean útiles para diversas tipologías estructurales, disposiciones de matrices de paneles, mesas y geometrías de campo; incluso para distintas tecnologías de producción, más allá de la fotovoltaica, que basen su funcionamiento en disponer elementos independientes en el espacio siguiendo cierto patrón de repetición y a cierta altura sobre el suelo, con la condición de no restricción (no bloqueo) del flujo por la parte inferior. Así, los resultados obtenidos podrían ser objeto de extrapolación a otros casos parecidos, aunque para lograr una mayor precisión se requerirá de estudios adicionales para la geometría y/o condiciones de flujo concretas.

3. Metodología de Análisis

El análisis del problema se realiza aplicando las técnicas propias de la Dinámica de Fluidos Computacional, DFC (en inglés *Computational Fluid Dynamics*, CFD). La metodología general de análisis DFC seguida se desglosa en las siguientes etapas:

1. Análisis del problema y parámetros intervinientes.
2. Modelización del problema real.
3. Obtención de la geometría y procesado.
4. Mallado del dominio.
5. Resolución mediante algoritmo numérico.
6. Postproceso analítico y gráfico.
7. Análisis de resultados.

En nuestro caso particular, se utiliza en todo el proceso programas de código libre. Primero se genera la geometría mediante el programa de dibujo asistido por ordenador *FreeCAD* y se exporta dicha geometría al paquete (*suite*) de mallado *Salome*. A continuación la malla generada se visualiza y se depura mediante el programa *MeshLab*, tras lo cual se exporta el dominio fluido al programa *OpenFOAM* con el que se resuelven las ecuaciones diferenciales del problema; en este paso es cuando se introducen los parámetros del fluido, del flujo y de los contornos sólidos, así como las condiciones iniciales y las condiciones de contorno del dominio, y se establece el tiempo de cómputo de la simulación. Una vez ejecutado el modelo, se realiza el postproceso analítico y gráfico de los resultados mediante diversas aplicaciones, entre ellas la aplicación *ParaView* o la planilla de cálculo *Excel*.

En cuanto a la elección del algoritmo numérico de resolución, se ha optado por el programa *OpenFOAM* ya que, aparte de ser un proyecto colaborativo de código abierto (*open source*), goza de gran versatilidad y modularidad, permitiendo al usuario el acceso al código y su modificación a voluntad, lo que facilita su adaptación a cualquier tipo de problema (Jasak, Jemcov & Tuković, 2007). Dicho programa tiene una importante implantación en el ámbito académico y científico, pues cuenta con una gran comunidad de usuarios y desarrolladores que en conjunto fomenta y sustenta el código.

4. Aplicación Numérica

En esta ponencia se pretende estudiar la influencia del espaciamiento entre alineaciones de mesas subsiguientes, entendida como ocultamiento, sobre las fuerzas resultantes en cada uno de los paños; es decir, se trata de ver cómo la interposición de las mesas situadas corriente arriba en el flujo actuante sobre una mesa en concreto afecta al desarrollo de las fuerzas producidas por la presión del fluido sobre esta última. Los resultados así obtenidos se pueden comparar con las recomendaciones existentes en la literatura y en las normas sobre ocultamiento en agrupaciones o secuencias de estructuras. Para ello se simula una serie de cinco mesas, considerando que la primera en el sentido de avance del flujo es la que se encuentra en el extremo del campo que primero recibe la acción del viento (no tiene ocultamiento previo).

Se considera como orientación principal del flujo la correspondiente al viento soplando en dirección perpendicular a los bordes superior e inferior de la mesa (que coincide con la dirección en la que trabajan las estructuras soporte). De las dos direcciones principales posibles —viento a 0° y viento a 180° —, se toma la dirección de 0° como la de ángulo de ataque positivo (el flujo genera presión sobre la cara superior del módulo). Las direcciones intermedias del viento se supone que producen una resultante global del viento sobre la estructura de menor valor absoluto, según se puede observar en las normas. Para el propósito de obtención de un orden de magnitud del ocultamiento entre estructuras, en esta ponencia se ensaya únicamente la dirección principal correspondiente a 0° .

De entre las direcciones intermedias, merecen mención especial las de $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 120^\circ$ y $\pm 150^\circ$, que son aquéllas donde se pueden generar calles de torbellinos como los estudiados en la recomendación PV2-12 (SEAOC, 2012). No obstante, debido a que sus efectos son locales sobre la superficie en la que se generan, sólo serían de interés para el cálculo de presores (elementos de sujeción de las placas a la estructura soporte) y otros anclajes, pero

resultan de escasa entidad como para tener mayor repercusión que las direcciones principales, ya que su efecto sobre las resultantes totales se suponen no decisorios.

Se ensayan tres casos de mesas de paneles con diferentes inclinaciones, θ , de los paños con respecto a la horizontal (10, 25 y 40°), al objeto de poder estudiar el efecto de esta variable sobre el ocultamiento.

4.1. Geometría del Modelo

La geometría utilizada corresponde a una agrupación de cinco mesas sucesivas, cada una con paños compuestos por una única fila de diez módulos colocados en posición vertical [1V×10] y separados por presores de 20 mm. Teniendo en cuenta que los módulos modelizados corresponden con el estándar comercial de 1.955×995×50 mm, se obtiene una longitud total de mesa de 10,130 m. El mallado de toda la superficie del paño se obtiene como una única superficie conexa sin considerar ni huecos ni presores, ya que de hacerlo la malla adquiriría un tamaño extremadamente grande para la disponibilidad de potencia de cálculo. Esta simplificación queda justificada por la pequeña influencia que la separación entre módulos tiene sobre las fuerzas en las mesas, según han podido comprobar los autores.

La altura libre bajo las mesas es de 0,800 m, siendo éste el límite superior habitual en las centrales fotovoltaicas. Se impone dicho valor a fin de obtener una mayor exposición (un menor ocultamiento) de las mesas situadas a sotavento de otras, pues a menor altura libre, para una misma rugosidad del suelo, se obtiene menor trasiego de flujo inferior que pueda afectar a las siguientes estructuras. Así se obtendrá una estima conservadora (un valor mayor) de la fuerza resultante sobre las mesas ocultadas.

La elección de la separación entre mesas en una instalación real se suele hacer con base en un criterio de producción; por ejemplo, fijando el número mínimo de horas que se quiere tener producción sin sombra durante el solsticio de invierno. Con la localización de la planta (latitud) se decide la inclinación de los paños considerando la eclíptica solar y la radiación particular de la zona. Con la inclinación y el área en planta de la central se obtiene la altura máxima del paño (aplicando programación lineal se consigue obtener el máximo de área de paneles fotovoltaicos). Con la inclinación y la altura máxima del paño se determina la separación entre mesas.

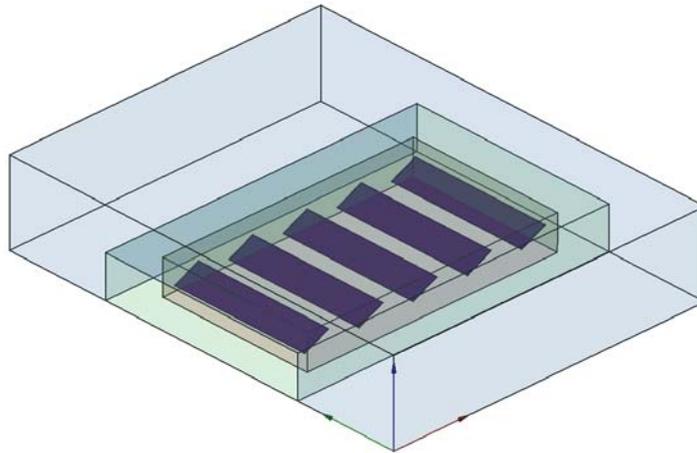
En nuestro caso, la separación o distancia entre mesas, D , es: para $\theta=10^\circ$, $D=0,940$ m; para $\theta=25^\circ$, $D=2,289$ m; y para $\theta=40^\circ$, $D=3,481$ m. Por su parte, la altura del borde superior del paño sobre el terreno es: para $\theta=10^\circ$, $H=1,139$ m; para $\theta=25^\circ$, $H=1,626$ m; y para $\theta=40^\circ$, $H=2,057$ m. Así pues, ninguna relación separación/altura de las estudiadas en el ensayo numérico supera el valor de 2 previsto en la recomendación PV2-12 (SEAOC, 2012), por lo que la sucesión de estructuras compone un nuevo contorno (a modo de una capa de desplazamiento) que no permite la readhesión del flujo superior a la superficie del terreno; esto hace que sean de esperar efectos similares a los indicados en dicha publicación.

El dominio exterior considerado tiene unas dimensiones de $A \times B \times H = A \times 30 \times 6$ m; la medida A depende de la separación entre las mesas y, por tanto, de la inclinación de los paños. La distancia frontal a respetar desde la entrada de flujo hasta la primera mesa es de 3 m. Con ello se tiene: para $\theta=10^\circ$, $A=17,329$ m; para $\theta=25^\circ$, $A=23,304$ m; y para $\theta=40^\circ$, $A=27,895$ m. Estas grandes dimensiones fuerzan a no considerar una mayor resolución de mallado de los paños debida a huecos y presores, según lo razonado anteriormente, y a usar estrategias como la división en subdominios de mallado, según se puede observar en la Figura 1.

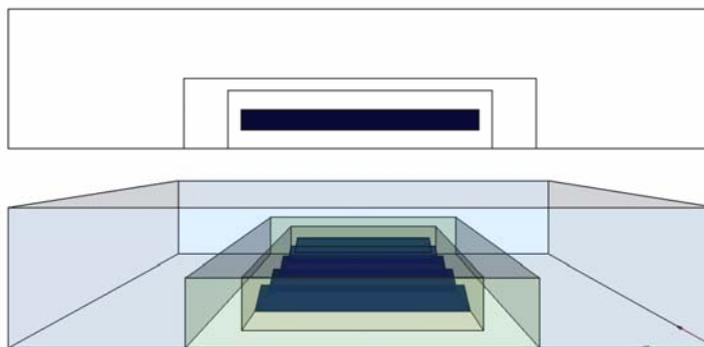
La intención del ensayo definido es obtener las diferencias entre las resultantes de fuerzas en mesas de un mismo caso debidas a las interferencias entre ellas y la corriente fluida. Para ello se determinará la reducción de la integral de las presiones sobre todas las

Figura 1: Definición Geométrica del Modelo para $\theta=25^\circ$

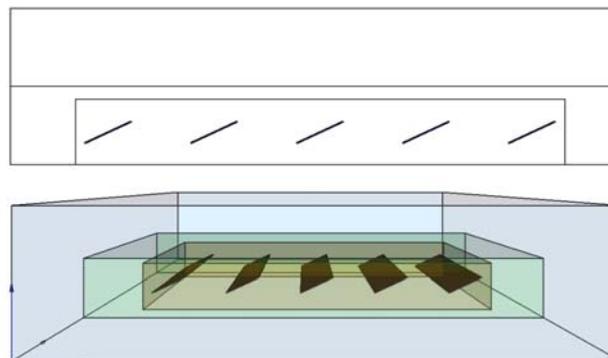
a) Vista 3D (axonométrica)



b) Alzado frontal (proyección y cónica)



c) Alzado lateral (proyección y cónica)



superficies de cada mesa que queda oculta por otras precedentes en el sentido del flujo, mediante el siguiente factor de ocultamiento:

$$\lambda_h = 1 - \frac{F_i}{F_1} \quad (1)$$

donde F_i es la fuerza total resultante debida a la presión del viento sobre la mesa i -ésima en el sentido del flujo, siendo F_1 por tanto la fuerza correspondiente a la primera mesa expuesta

al flujo, que es la de mayor carga en todos los casos. El factor de ocultamiento mide la reducción de la fuerza debido al efecto de sombra aerodinámica de unas mesas sobre otras. Este parámetro se relaciona de manera inmediata con el factor de exposición (factor por el que se debe multiplicar la carga calculada sin ocultamiento), que es el habitualmente facilitado en diversas normas:

$$\lambda_e = \frac{F_i}{F_1} = 1 - \lambda_h \quad (2)$$

4.2. Mallado del Dominio

Para el mallado se utiliza el paquete *Salome*, ya que permite diferenciar entre superficies y subdominios, pudiendo tener postproceso de las librerías para cada superficie de estudio (cada superficie de cada mesa) y diferentes resoluciones de malla para cada subdominio, optimizando así los pesos de malla.

Como parámetro de estudio se toma únicamente la inclinación de los paneles, θ , según lo expuesto anteriormente. La codificación adoptada es la siguiente:

- G10: inclinación $\theta=10^\circ$
- G25: inclinación $\theta=25^\circ$
- G40: inclinación $\theta=40^\circ$

En el ensayo propuesto las geometrías malladas dan resultados similares (mismas condiciones de mallado), pese a sus diferentes dimensiones: entre 601.000 y 634.000 nodos; entre 3.237.000 y 3.433.000 celdas; y archivos de malla con formato UNV de entre 414 y 438 Mo (megaoctetos).

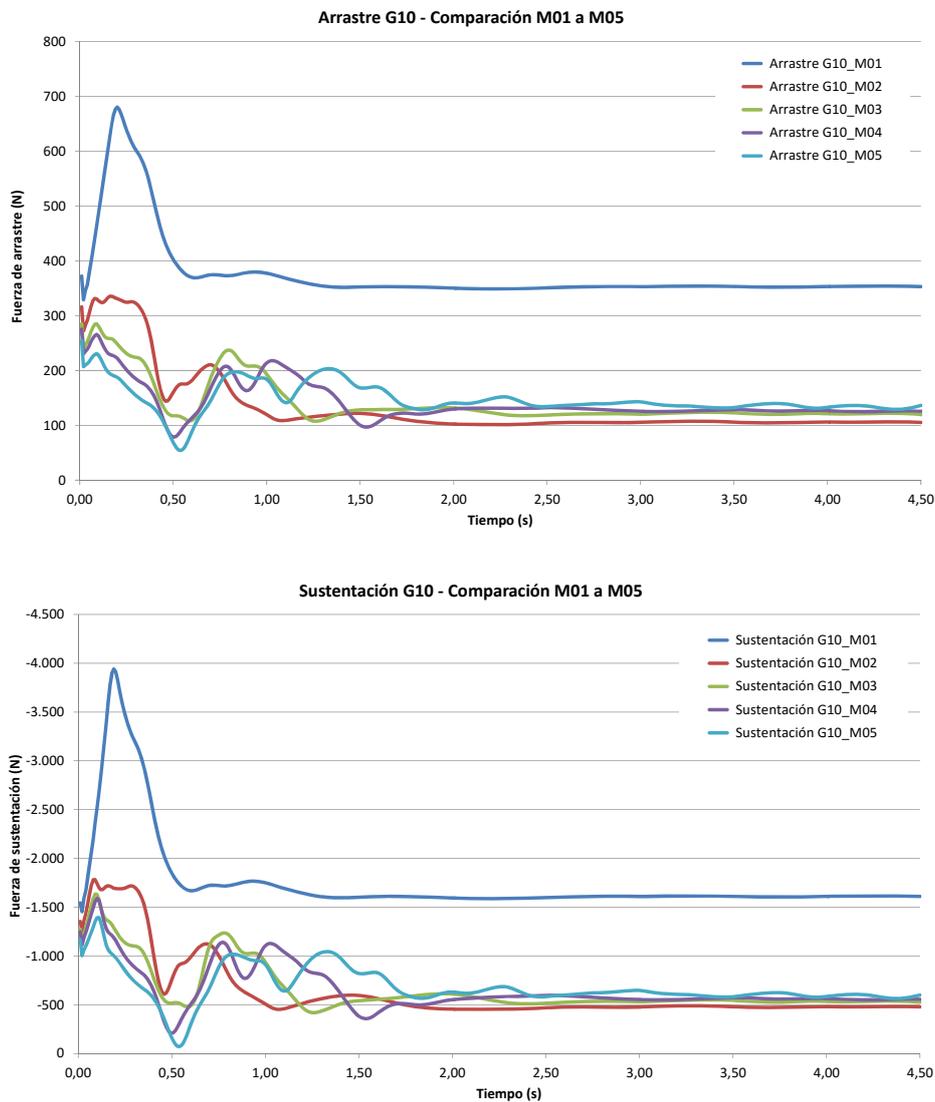
4.3. Parámetros de Cálculo

En todos los casos se utiliza un método RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations*), con un modelo k-epsilon para la turbulencia. El tiempo de simulación se establece en 4,5 s, que se comprueba suficiente para alcanzar un régimen estable en los casos con condición de contorno de velocidad de perfil logarítmico constante para un dominio como el proporcionado.

La velocidad media del viento considerada en el experimento numérico es de 22,5 m/s. El valor de la velocidad utilizado es simplemente un valor de referencia que sólo influye en el valor concreto de las fuerzas actuantes sobre las mesas, pero no tiene prácticamente efecto sobre la relación entre las fuerzas en unas mesas y otras, que es lo que nos interesa en nuestro caso.

Se simula un perfil logarítmico constante como condición a la entrada. Debido a que no se introduce variabilidad temporal ni espacial en forma de estructuras de vórtices, también podría tomarse este caso como cercano para un campo fluido que se desarrollara en un terreno con muy baja rugosidad superficial o en terrenos donde la rugosidad de desarrollo del campo fluido (a barlovento de la zona de actuación) fuera muy baja y con orografía llana, como ocurre en superficies de agua, hielo o llanuras de arena. El ensayo realizado, aparte de para perfil constante, también podría darnos una idea del comportamiento turbulento en ese tipo de terrenos, puesto que la distribución de la turbulencia se concentra en escalas que o bien son muy pequeñas, o bien demasiado grandes para poderse representar en el dominio.

Figura 2: Fuerzas de Arrastre y de Sustentación en un Grupo de Mesas para $\theta=10^\circ$

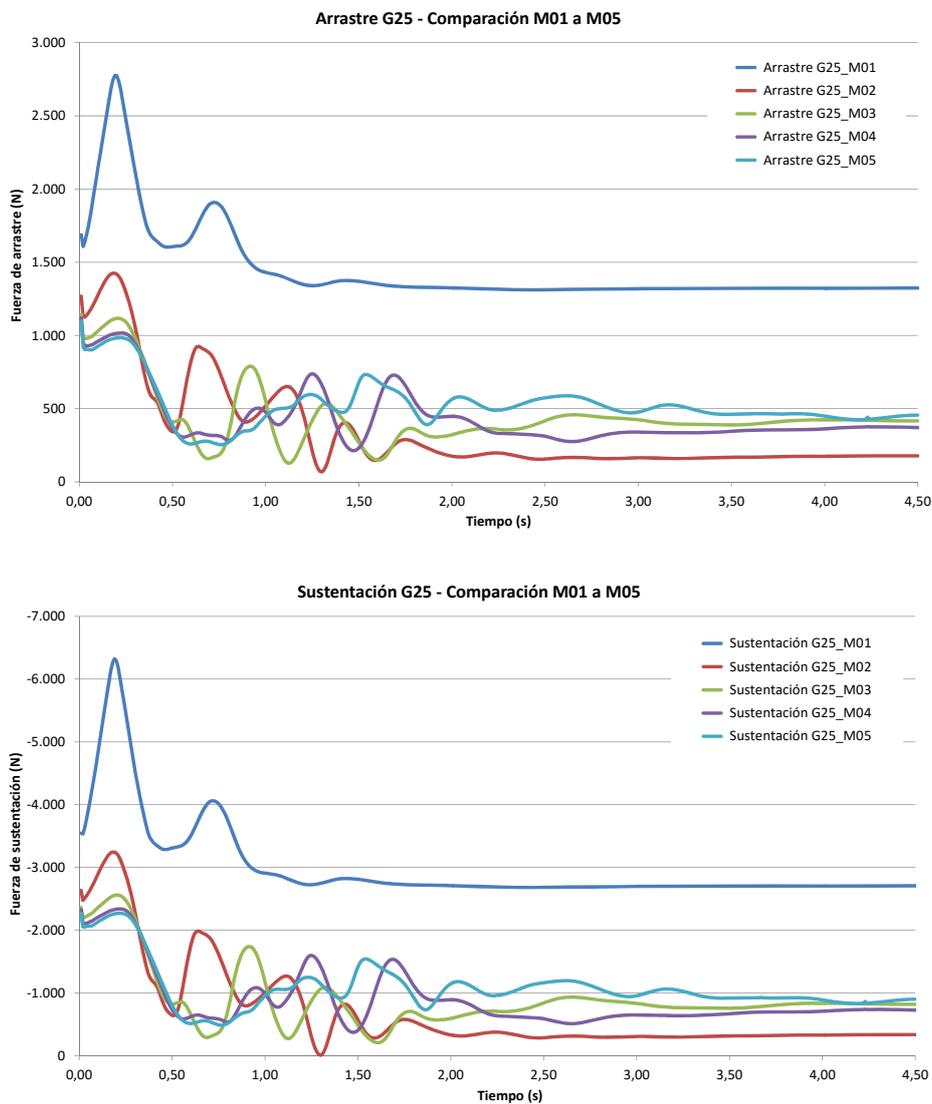


4.4. Análisis de Resultados

En las Figuras 2 a 4 se da la evolución temporal de las fuerzas actuantes sobre cada mesa (M01 a M05, en el sentido del flujo) para los 3 ángulos de inclinación estudiados (G10, G25 y G40), diferenciando en cada caso entre la componente horizontal o de arrastre, y la vertical o de sustentación (sale negativa en casi todos los casos porque se estudia el caso de viento a 0° , que produciría presión sobre la cara superior de una mesa aislada). Se comprueba la importante reducción de la fuerza debido al ocultamiento entre mesas, reducción que tiende a ser mayor cuanto más próxima se encuentra la mesa ocultada a la primera en el sentido del flujo. La reducción resulta especialmente notoria para la segunda mesa a medida que aumenta la inclinación de los paños.

En la Tabla 1 se proporcionan los estadísticos (media y mediana) del factor de ocultamiento (parámetro de reducción de fuerza total) dado en la Ec. (1) para el total de los tiempos guardados en el postproceso, sin importar la dirección y sentido de actuación de dicha fuerza. A partir de los resultados obtenidos, puede apreciarse que la influencia del

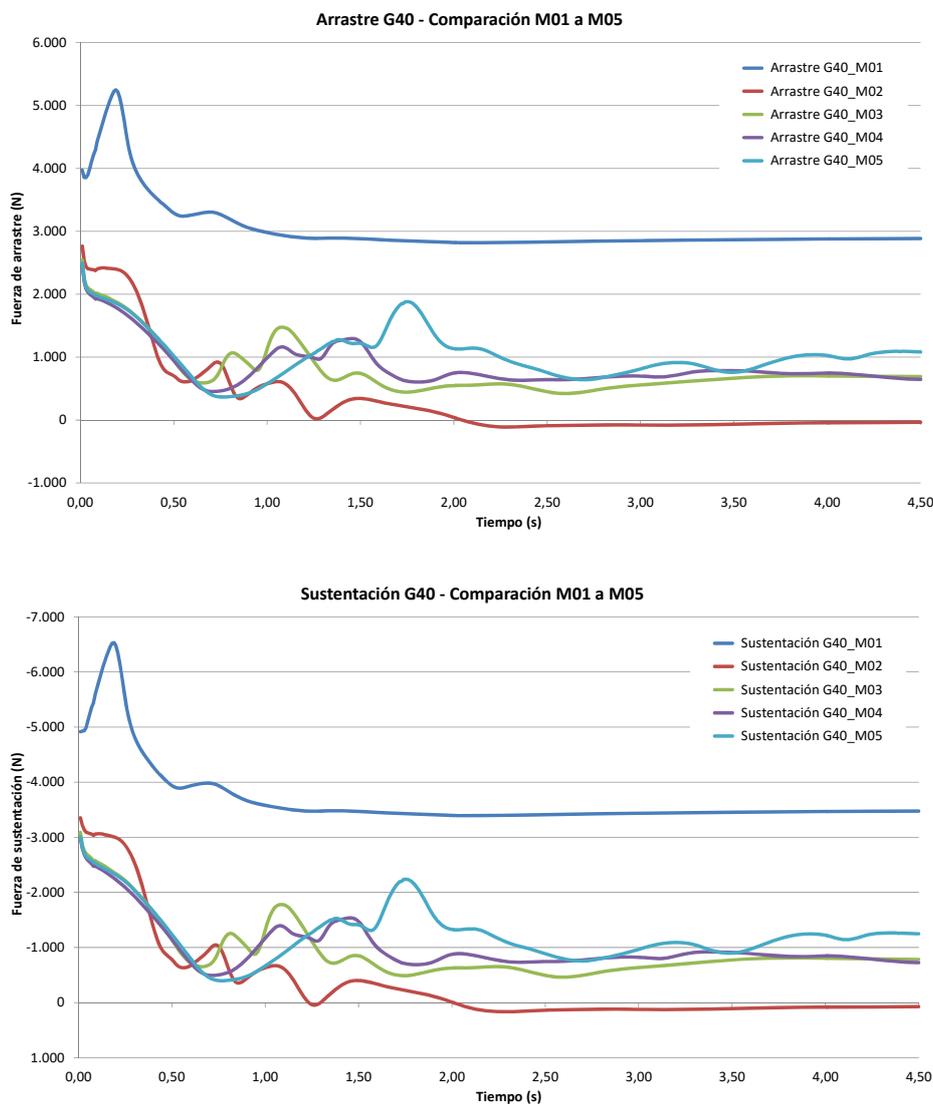
Figura 3: Fuerzas de Arrastre y de Sustentación en un Grupo de Mesas para $\theta=25^\circ$



ocultamiento es de una gran importancia en parques solares con estructuras fijas, pudiéndose evaluar la reducción de la fuerza en al menos un 60-70% para las mesas situadas a sotavento de la primera, y ello pese a la no existencia de bloqueo del flujo inferior. El factor de ocultamiento puede llegar a valores del 80-90% en la mesa inmediatamente a resguardo de la primera, con inclinaciones superiores a 25° . Debe tenerse en cuenta que los valores anteriores corresponden a un caso de aplicación con geometría, rugosidad del terreno y condiciones de contorno concretas, pero muestran claramente la importancia del fenómeno estudiado.

Los valores obtenidos en este estudio para el factor de exposición (en torno al 30-40%, en líneas generales) se encuentran en consonancia con el orden de magnitud de los recogidos en normativas que tratan este fenómeno, entre ellas la Recomendación ROM-0.4/95 (Puertos del Estado, 1995) y la Instrucción IAPC/11 (Dirección General de Carreteras, 2011). Sin embargo, se observan discrepancias con los valores del factor de exposición propuestos en el Eurocódigo EC1-1-4/07 (Comité Técnico AEN/CTN-140, 2005) para tipologías constructivas que en ocasiones se han tomado como análogas a las mesas de

Figura 4: Fuerzas de Arrastre y de Sustentación en un Grupo de Mesas para $\theta=40^\circ$



paneles a falta de otros datos concretos (p. ej., cubiertas en dientes de sierra). Los valores de dicha norma resultarían excesivamente conservadores.

5. Conclusiones

Se ha presentado una serie de ensayos numéricos de Dinámica de Fluidos Computacional para la evaluación del factor de ocultamiento aerodinámico entre paños de paneles fotovoltaicos sucesivos. La aplicación a diferentes geometrías ha permitido la obtención de resultados tanto de interés científico como de utilidad ingenieril para el proyecto de estructuras soporte de paneles. Se ha establecido una metodología propia y un flujo de trabajo versátil y adaptable a las circunstancias del equipo y del entorno de cálculo, lo que permite optimizar los recursos informáticos disponibles.

Se ha constatado la importancia del ocultamiento entre mesas sucesivas, debido al efecto sombra de unos paños sobre otros. Pese a la no existencia de bloqueo en la parte inferior, se observa una reducción de la fuerza total sobre un paño a resguardo de otros de al menos

Tabla 1: Factor de Ocultamiento de una Mesa Situada a Sotavento de Otras, en Función de la Inclinación

Mesa	Factor de ocultamiento, λ_h					
	$\theta=10^\circ$		$\theta=25^\circ$		$\theta=40^\circ$	
	Media	Mediana	Media	Mediana	Media	Mediana
2	0,651	0,702	0,792	0,874	0,895	0,965
3	0,630	0,666	0,705	0,702	0,755	0,771
4	0,624	0,650	0,707	0,740	0,729	0,752
5	0,603	0,619	0,639	0,639	0,668	0,666

el 60-70%, tomando como referencia la fuerza correspondiente a la primera mesa, que funciona de manera similar a una estructura exenta. La reducción de la fuerza aumenta hasta el 80-90% en el caso de la segunda mesa de un grupo para ángulos de inclinación habituales en latitudes medias (25 a 40°). Los resultados obtenidos comparan bien en orden de magnitud con los valores del factor de exposición incluidos en ciertas normativas.

Se concluye la posibilidad de abordar el cálculo de las estructuras fijas de centrales fotovoltaicas incorporando de manera sistemática el efecto del ocultamiento, lo que se puede traducir en una reducción de costes importante, tanto de las propias estructuras soporte como de sus cimentaciones. Los resultados obtenidos apuntan a la conveniencia de aumentar al máximo el tamaño de los sectores de mesas y a la utilización de geometrías en planta próximas a la rectangular, como forma de maximizar el efecto sombra en el conjunto de la instalación.

Referencias

- Blocken, B., Stathopoulos, T., & Carmeliet, J. (2007). CFD simulation of the atmospheric boundary layer: Wall function problems. *Atmospheric Environment*, 41(2), 238–252.
- Cao, S. (2014). Advanced physical and numerical modeling of atmospheric boundary layer. *Journal of Civil Engineering Research*, 4(3A), 14–19.
- Comité Técnico AEN/CTN-140 (2005). *UNE-EN 1991-1-4:2007. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento*, EC1-1-4/07, versión en español de la EN 1991-1-4:2005. Madrid, España: AENOR.
- Dirección General de Carreteras (2011). *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*, IAPC/11. Madrid, España: Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento.
- Escrivá-Pla, R. (2015). *Estudio aerodinámico del factor de ocultamiento para la determinación de las cargas de viento a aplicar en el proyecto de centrales fotovoltaicas de generación eléctrica. Aplicación al proyecto de planta solar de 20 MW en Beneixama (Alicante)*. Proyecto Final de Carrera, ETSICCP, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Jasak, H., Jemcov, A., & Tuković, Z. (2007). OpenFOAM: A C++ library for complex physics simulations. *Proc. International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics*, Dubrovnik, Croatia, 20 pp.
- Jasak, H., & Tuković, Z. (2010). Dynamic mesh handling in OpenFOAM applied to fluid-structure interaction simulations. *Proc. V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, ECCOMAS CFD 2010, Lisbon, Portugal, 19 pp.

- Nieto, F. (2006). *Análisis de sensibilidad y optimización aeroelástica de puentes colgantes en entornos de computación distribuida*. Tesis Doctoral, ETSICCP, Universidad de La Coruña, España.
- Puertos del Estado (1995). *Recomendaciones para obras marítimas: Acciones climáticas II: Viento*, ROM-0.4/95. Madrid, España: Puertos del Estado, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- Sánchez-Carratalá, C.R. (2012). Bases para el proyecto de cimentaciones de pilotes hincados para estructuras de apoyo de placas en parques solares fotovoltaicos. *Actas XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, CIIP2012, AEIPRO, Valencia, España. 1404–1415.
- SEAOC (2012). *Wind design for low-profile solar photovoltaic arrays on flat roofs*, PV2-12. Sacramento, CA: Structural Engineers Association of California.
- Tomás, A., & Morales, M. (2012). Revisión y estudio comparativo de la acción del viento sobre las estructuras empleando Eurocódigo y Código Técnico de la Edificación. *Informes de la Construcción*, 64(527), 381–390.