

## Simulación Estacionaria de un Panel Solar Montado Sobre Suelo

### Steady-State Simulation of a Ground-Mounted Solar Panel

**Rigoberto Morales Hernández<sup>1\*</sup>, Julio César Martínez González<sup>2</sup>, Ingrid Fernández Lorenzo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil. La Habana, Cuba

<sup>2</sup>Inmobiliaria ALMEST, La Habana, Cuba

\*Autor de correspondencia: [rigobermorher@civil.cujae.edu.cu](mailto:rigobermorher@civil.cujae.edu.cu)

#### Resumen

Conocer el comportamiento del viento juega un rol de suma importancia cuando este puede generar cargas significativas sobre las estructuras. Aunque lo más común son los estudios físicos en túnel de viento, estos no son baratos, por lo que alternativas como la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) han demostrado ser una buena opción para determinar dicho comportamiento de manera más económica sin sacrificar la precisión en los resultados. El propósito de este trabajo es obtener un modelo en CFD de panel solar correctamente validado que permita realizar en el futuro simulaciones transitorias. Para ello, se utilizó la Dinámica Computacional de Fluidos con el software ANSYS Fluent, con la aplicación de un análisis estacionario que sirva como modelo preparatorio para utilizar posteriormente métodos más exactos pero complejos como la Simulación de Grandes Remolinos (LES, por sus siglas en inglés) o similares. Se logró producir un modelo matemático que responde correctamente a las características del viento ensayadas en túnel de viento. Además, se comprobó la pertinencia de la configuración de las tomas de presión utilizada en dicho estudio experimental, obteniéndose como resultado que es adecuada para describir las presiones hacia el centro del panel, pero para las zonas de los bordes cercanos a la incidencia del viento es necesaria una distribución más discretizada.

**Palabras clave:** coeficientes de presión, Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), panel solar, turbulencia, validación.

#### Abstract

Knowing the behavior of wind plays an important role when it can generate significant loads on structures. Although the most common are physical studies in wind tunnels, these are not cheap, so alternatives such as Computational Fluid Dynamics (CFD) have become a good option to determine such behavior more economically without sacrificing accuracy in the results. The objective of this work is to obtain a properly validated CFD model of a solar panel that allows to perform transient simulations. For this purpose, Computational Fluid Dynamics was used with ANSYS Fluent software, performing a stationary RANS analysis to serve as a preparatory model to later use more accurate but complex methods such as Large Eddy Simulation (LES) or similar. It was possible to obtain a mathematical model that responds correctly to the wind characteristics tested in a wind tunnel. In addition, the relevance of the pressure tap configuration used in the experimental study was verified, resulting in a suitable configuration to describe the pressures towards the center of the panel. Still, for the edge areas close to the wind incidence, a more adequate distribution is needed.

**Keywords:** pressure coefficients, Computational Fluid Dynamics (CFD), solar panel, turbulence, validation.

## 1. Introducción

Para el estudio del comportamiento de los paneles solares ante cargas de viento existen diversos métodos. El más generalizado es la experimentación de un modelo a escala en un ambiente controlado que replique las condiciones reales específicas que se quieren analizar. Esto se logra mediante el uso del túnel de viento, considerándose los resultados obtenidos de esta forma suficientemente precisos. Sin embargo, la gran inversión económica necesaria para construir y mantener este tipo de instalación limita en gran medida el desarrollo de las investigaciones. En la actualidad existen otros métodos que pueden llegar a ser más económicos a la vez que permiten obtener resultados igual de válidos.

La Dinámica Computacional de Fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) permite resolver este problema, ya que con una inversión mucho más pequeña se puede llegar a recrear diversas situaciones reales a las que puede estar sometida el objeto de estudio sin sacrificar la precisión de los resultados. Este método ha ganado popularidad en los últimos años, lo que se refleja en la cantidad de artículos que lo utilizan [1–13].

Dentro de los métodos para resolver la turbulencia del flujo mediante CFD, se distinguen dos grandes grupos: la promediación de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes y la Simulación de Grandes Remolinos (RANS y LES respectivamente, por sus siglas en inglés). Las simulaciones RANS se basan en resolver ecuaciones adicionales cuya cantidad e incógnitas dependen del modelo específico, y pueden ser utilizadas tanto para simulaciones transitorias como estacionarias. Presentan la ventaja de precisar de menores cantidades de recursos, siendo en muchos casos viable su implementación en computadoras personales.

Las simulaciones LES, por otra parte, calculan explícitamente los vórtices de mayores escalas mientras los más pequeños son resueltos mediante un modelo de sub-rejilla (sub-grid). Esto trae como consecuencia que necesiten de una mayor potencia computacional, pero en cambio ofrecen un aumento significativo de la precisión, especialmente en flujos con altos niveles de turbulencia y desprendimiento de vórtices [14]. Como práctica frecuente para disminuir los tiempos de cálculo, se suele realizar previamente una simulación RANS que sirva como punto de partida para el estudio LES [15], ya que esto permite tener datos de entrada con valores más cercanos a los resultados finales.

Dagher and Kandil [6] estudiaron el comportamiento del aire y la acumulación de polvo sobre un panel montado sobre suelo mediante simulaciones de CFD. El análisis lo llevaron a cabo solamente en dos dimensiones, ya que la sección transversal del panel es constante en la dimensión restante. Para describir la turbulencia utilizaron el modelo  $k-\omega$  SST para una simulación tipo RANS. Para el movimiento de las partículas de polvo utilizaron un modelo de fase discreta. Llegaron a la conclusión de que con este tipo de simulación es totalmente factible determinar el comportamiento de la interacción del viento y el polvo sobre paneles solares teniendo en cuenta la variación de diversos parámetros como la velocidad del viento, el material y el tamaño de las partículas de polvo.

Wang et al. [16] realizaron Simulaciones de Grandes Remolinos (LES, por sus siglas en inglés) a un grupo de paneles montados sobre cubierta plana para determinar el comportamiento de la presión del viento sobre dichos paneles, así como las características medias y transitorias del flujo. Utilizaron el modelo LES ya que, debido a la complejidad de la interacción del flujo entre los bordes de la cubierta y el arreglo de paneles, los modelos RANS no son adecuados para una

descripción detallada del comportamiento en el tiempo. Para asegurar la pertinencia de los resultados de la simulación, previamente realizan un ensayo en túnel de viento que presenta características del flujo similares. Como resultado obtuvieron, entre otros, que la turbulencia del flujo puede ser recreada correctamente en el modelo computacional a partir de replicar la configuración de espiras y bloques de rugosidad utilizadas en túnel de viento.

A pesar de las ventajas que presenta CFD, uno de los pasos fundamentales en el proceso de modelación es la calibración y validación del modelo; que se logra a partir de datos reales, muchas veces obtenidos del túnel de viento [3,6,13,16–26]. Esto hace que no se pueda prescindir totalmente de la experimentación física, aunque sí puede reducirla al mínimo.

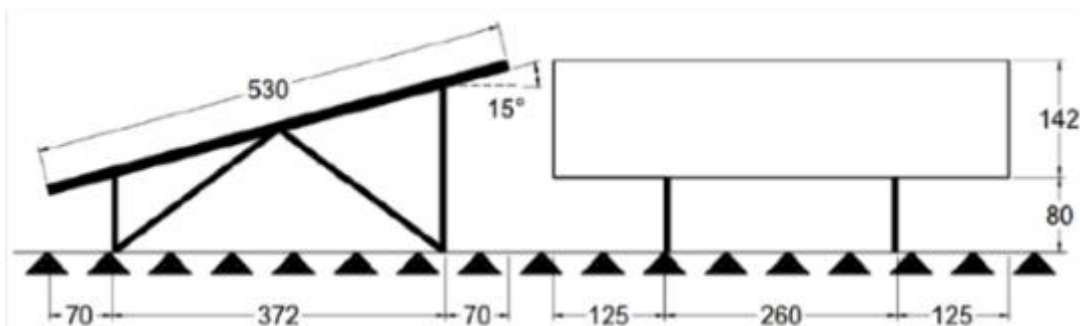
Sobre paneles solares montados sobre el suelo existen diversos estudios que utilizan principalmente la experimentación en túnel de viento [27–32]. En cambio, para este tipo de estructura no se encuentran tantas investigaciones que utilicen la Dinámica Computacional de Fluidos como método principal [18,19,33].

Entre los estudios de viento sobre paneles solares montados sobre el suelo, López Llanusa et al. [30] utilizan modelos con escala geométrica 1:100 y ángulos de inclinación del panel de  $15^\circ$  y  $23^\circ$ , los cuales someten a ángulos de incidencia del viento de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  y  $180^\circ$  en un túnel de viento. Como resultado obtienen patrones de distribución de las presiones netas, tanto medios como picos, lo que les permite proponer formas de dividir los paneles en áreas para determinar los coeficientes de forma. Además, determinan que los mayores valores del coeficiente de presión se observan para ángulos de ataque de  $45^\circ$  y  $135^\circ$  y se ubican en un área muy pequeña, siendo relevantes en los análisis de daños locales. Con motivo de seguir expandiendo la investigación previa de López Llanusa et al. [30], este trabajo se propone realizar simulaciones de CFD tipo RANS a paneles fotovoltaicos montados en suelo. Para la validación del modelo matemático fueron utilizados los datos obtenidos por dicho autor en túnel de viento.

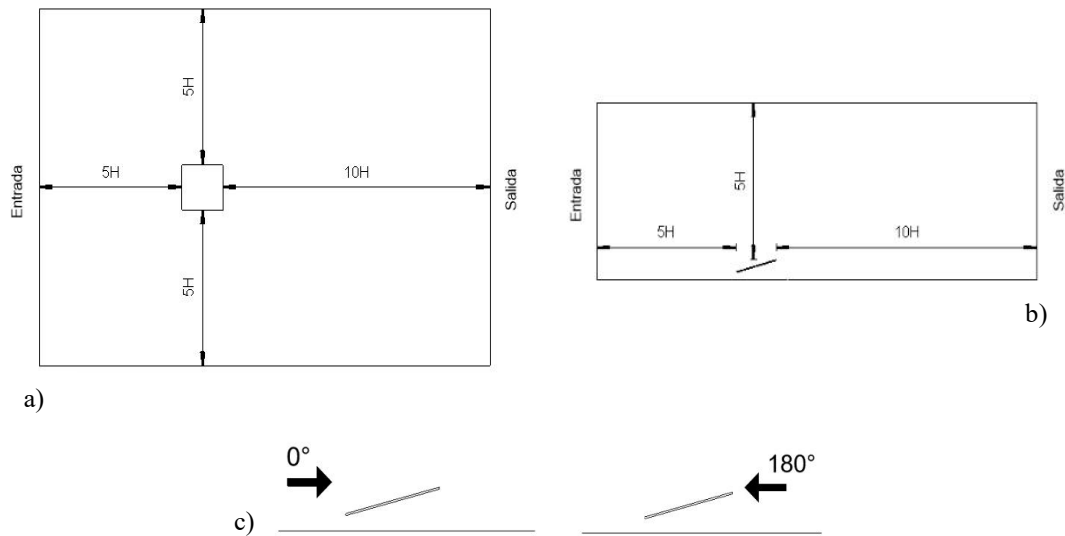
## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Geometría y dominio

En el presente trabajo se recreó mediante CFD un panel solar con el empleo de datos de estudios previos realizados por López Llanusa et al. [30]. Se consideró un modelo geométrico de un panel con un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal de  $15^\circ$  (Figura 1). El dominio computacional está dado como un múltiplo de la altura máxima del panel (H), como se muestra en la Figura 2. Para las dimensiones laterales, frontal y superior se utiliza 5H, mientras que para la parte posterior del panel se utiliza 10H. Estas dimensiones se establecieron a partir de estudios previos [17,34,35] y garantizan una relación de bloqueo de 3,1 %, cumpliendo con lo recomendado de hasta un 5 %. Dichas distancias permiten asegurar que no hay interacción del flujo cercano a las paredes con la estructura analizada.



**Fig.1** Geometría del panel simulado

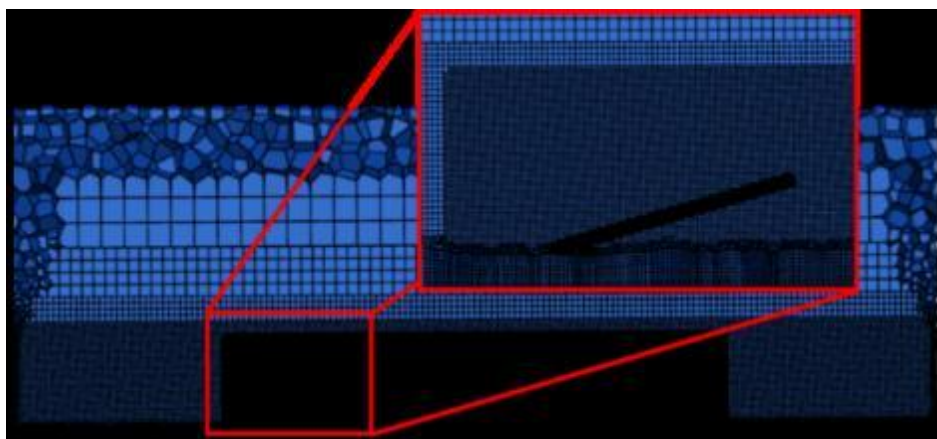


**Fig.2** Dimensiones del dominio en planta (a) y elevación (b) y dirección de ataque del viento(c)

Las condiciones de borde del dominio se consideraron de la manera siguiente: en la cara delantera se utilizó una entrada de velocidad del flujo; en la cara trasera, salida de presión; en las paredes laterales, condición de simetría; en el suelo, pared sin deslizamiento; en el techo se fijaron los valores de velocidad e intensidad de turbulencia para la máxima altura: velocidad del viento ( $v$ ) de 14,88 m/s, energía cinética turbulenta ( $k$ )  $6,88 \text{ m}^2/\text{s}^2$  y tasa de disipación energía cinética turbulenta ( $\epsilon$ )  $2,51 \text{ m}^2/\text{s}^3$ .

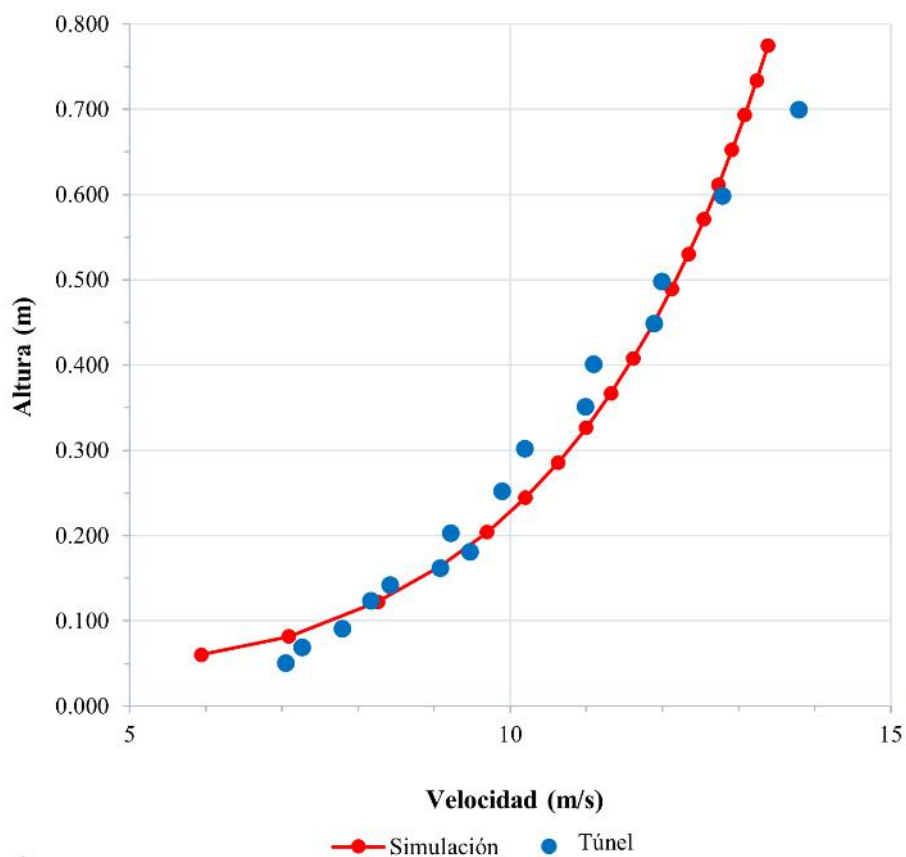
## 2.2 Mallado y descripción del viento

El mallado (Figura 3) cuenta con tres regiones principales: la zona más alejada de la estructura, donde se utilizó un tamaño máximo de elementos de 0,100 m; una zona intermedia, de transición, con un tamaño de elementos de 0,009 m y una región más cercana a la estructura, donde la dimensión máxima de los elementos del mallado fue de 0,003 m. Además, se utilizó una zona de inflación para recrear con mayor precisión el comportamiento de la capa límite cercano a la superficie del suelo. La cantidad de elementos que constituyen la malla es de 9,5 millones de celdas y 5 millones de nodos aproximadamente. Para recrear las condiciones del viento presentes en el ensayo del túnel se introdujeron en el software los perfiles de viento e intensidad de turbulencia, inferidos a partir de los datos experimentales de López Llanusa et al. [30] (Figura 4).



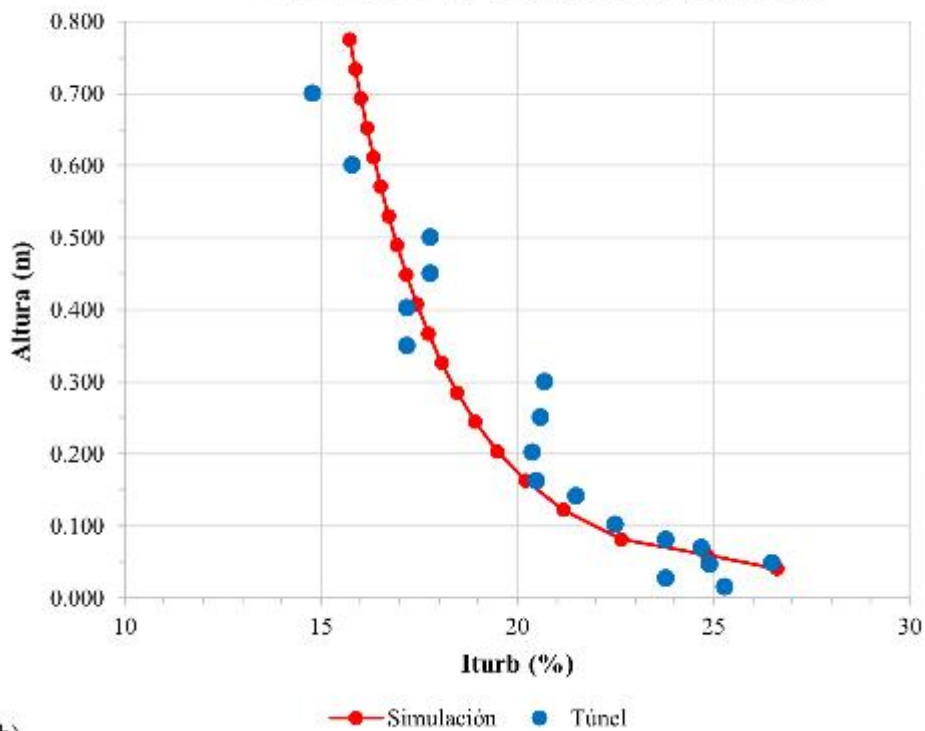
**Fig.3** Mallado

### Perfil de Velocidad



a)

### Perfil de Intensidad de turbulencia



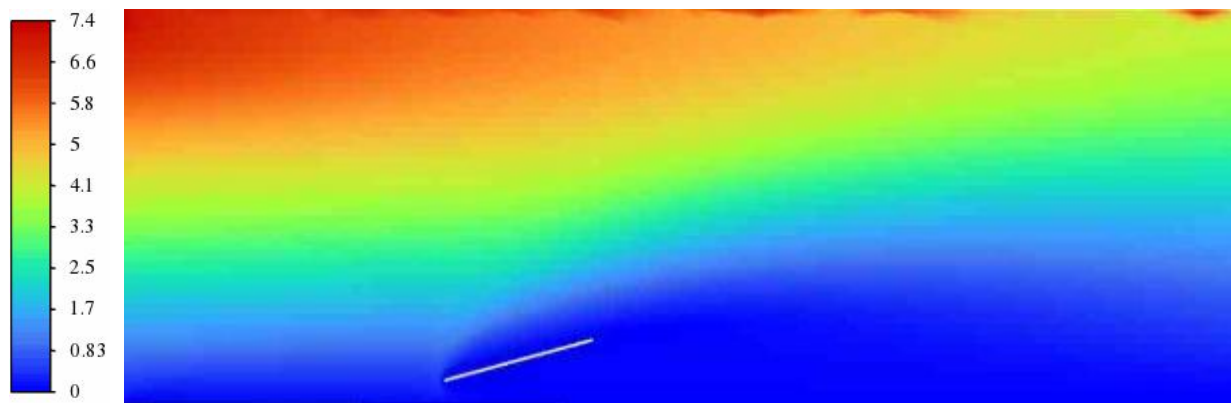
b)

**Fig.4** Perfiles de velocidad de viento (a) e intensidad de turbulencia (b) para simulación y túnel

La altura de referencia, utilizada para obtener la velocidad de referencia, fue tomada en la misma ubicación que en el ensayo en túnel de viento, a la mitad de la altura del panel, lo que corresponde a 151 mm a partir del suelo en el modelo a escala. A partir de esta velocidad de referencia se infirió la velocidad de fricción ( $u^*$ ) mediante el perfil logarítmico de velocidad del viento.

Para verificar la correcta configuración del mallado se estudió el tamaño de los vórtices, medida representada por la escala longitudinal turbulenta ( $l_0$ ). Este estudio sirve de configuración previa para una simulación de grandes remolinos. En este tipo de simulación, la viscosidad a escala de sub-rejilla ( $\nu_{sgs}$ ) es una función del tamaño de los elementos del mallado, la cual es resuelta por el modelo de sub-rejilla. Al variar la malla, se modifican igualmente las ecuaciones que describen al flujo, siendo impracticable un análisis de independencia del mallado. Sin embargo, se utilizan otros medidores de la calidad del mallado, como puede ser que la fracción de la energía cinética turbulenta resuelta directamente por la simulación sea mayor que el 80 % [14,15]. Esto asegura que los remolinos de mayor tamaño y que, siguiendo la cascada de energía turbulenta planteada por Kolmogorov [36], contienen la mayor cantidad de energía, sean resueltos numéricamente. Mientras, el 20 % restante, correspondiente con los vórtices más pequeños, es modelado.

Para esto se graficó  $l_0$  (Figura 5), lo que da la medida de dónde se producen los vórtices de mayor tamaño y, por tanto, dónde es menos necesario utilizar un mallado más preciso. La relación entre la longitud turbulenta ( $l_0$ ) (Ecuación 1) y la dimensión característica de la celda ( $V_{celda})^{1/3}$  está representada por el término  $\Delta$  (Ecuación 2). Para lograr describir adecuadamente una cantidad suficiente de vórtices que aseguren la precisión de la simulación, el valor de  $\Delta$  debe ser por lo menos mayor que 5 [14].



**Fig.5** Contornos de  $l_0$  (m)

$$l_0 = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{l_0}{(V_{celda})^{1/3}} > 5 \quad (2)$$

La Figura 6 muestra la distribución de esta variable en el dominio, donde se observa que las zonas a sotavento del panel y cercanas al suelo son las que muestran los menores valores, siendo para el resto de la superficie  $\Delta \geq 20$ . Esto indica que el tamaño de las celdas es suficientemente pequeño



para resolver la mayor parte de la turbulencia sin utilizar la sub-rejilla. Esta configuración preliminar permite verificar la calidad de la malla en análisis transitorios posteriores.

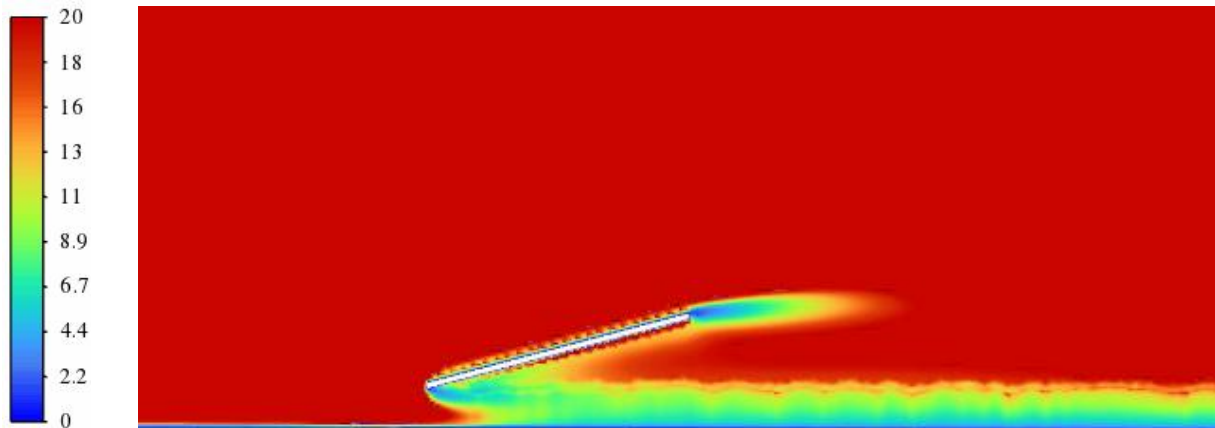
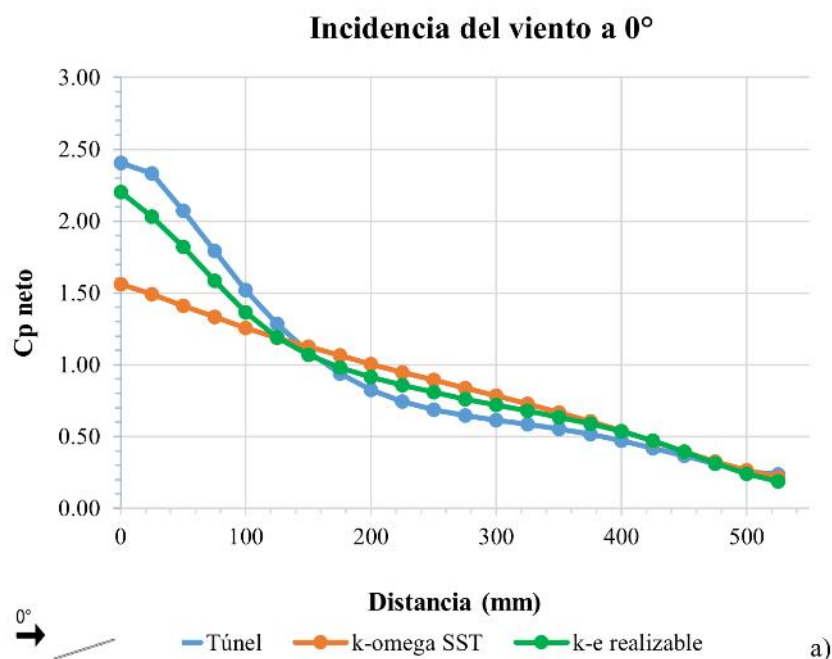
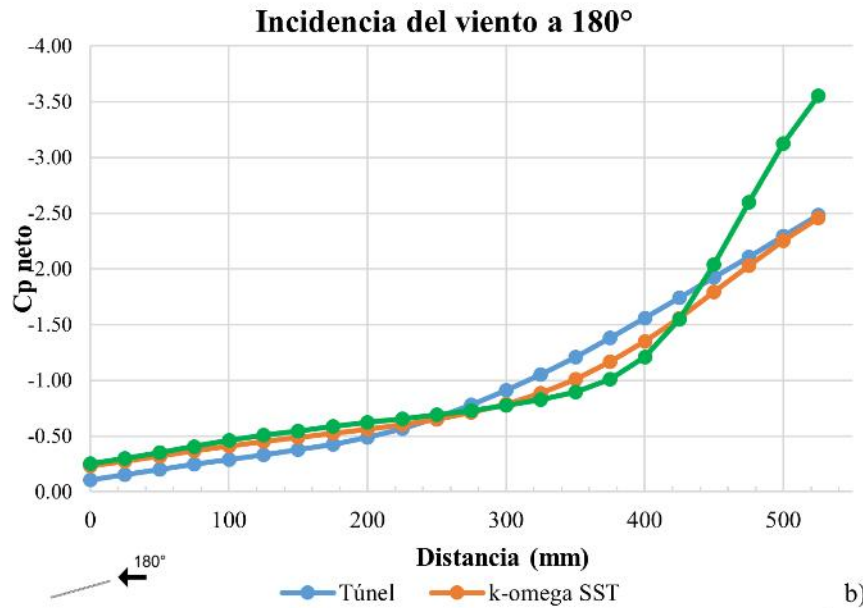


Fig.6 Distribución de  $\Delta$

### 2.3. Modelo de turbulencia

Para seleccionar el modelo de turbulencia a utilizar se tuvieron en cuenta tanto el k- $\epsilon$  realizable como el k- $\omega$  SST, al comparar los coeficientes de presión netos ( $C_p$ . neto) obtenidos con cada modelo y los alcanzados experimentalmente. Para esto, se analizaron los valores de  $C_p$ . neto en varios puntos de una línea imaginaria en el centro del panel a través de toda su dimensión longitudinal a la incidencia del viento (Figura 7).





**Fig.7** Coeficientes de presión medios sobre el panel, para ángulos de incidencia de 0° (a) y 180° (b)

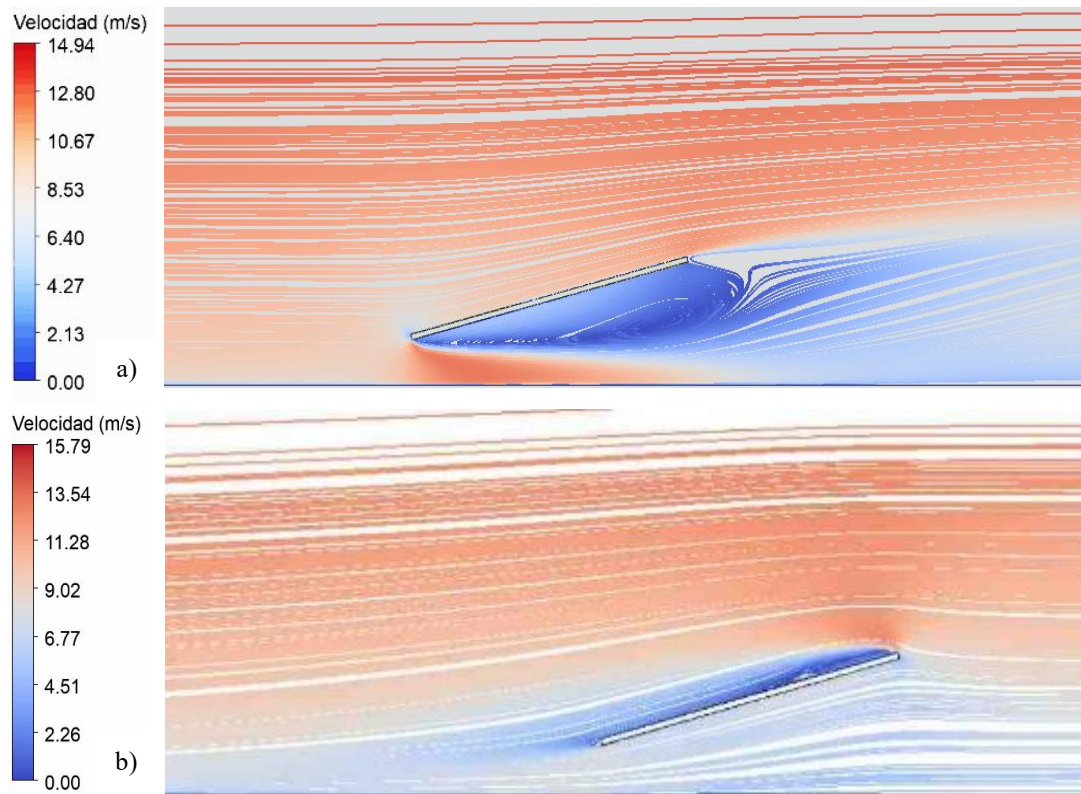
Estos dos modelos mostraron diferentes comportamientos en dependencia del ángulo de incidencia del viento. Para un ángulo de 0° (Figura 7a), el modelo k- $\epsilon$  realizable mostró un comportamiento más cercano a los datos experimentales, con unos valores de presión elevados en la zona más próxima a la entrada del viento y que van disminuyendo a medida que se avanza en la longitud del panel. En cambio, el modelo k- $\omega$  SST exhibe un comportamiento mucho más lineal, con valores menores que los experimentales al inicio, aunque en el resto del panel los valores de presiones son más acordes al ensayo de túnel de viento. La solución numérica que empleó este modelo (k- $\omega$  SST) conllevó más tiempo de cálculo que aquella que utilizó el modelo k- $\epsilon$  realizable, con un tiempo de cómputo en el primer caso de aproximadamente 330 minutos, mientras que en el segundo fue de 240 minutos.

Para el ángulo de ataque del viento de 180° (Figura 7b) ocurre todo lo contrario: con el uso del modelo k- $\omega$  SST es que se llega a valores más cercanos a los experimentales. Mientras que este modelo muestra un muy buen ajuste en toda la longitud del panel, el k- $\epsilon$  realizable falla en predecir correctamente las presiones (sobre todo en la zona más cercana a barlovento) y solo después de aproximadamente el centro de la longitud es que el comportamiento se acerca al obtenido por López Llanusa et al. [30]. En los análisis posteriores se tuvieron en cuenta el rendimiento de los modelos en cada caso, utilizándose finalmente los resultados del k- $\epsilon$  realizable con el viento a 0° y los del k- $\omega$  SST con el viento a 180°.

### 3. Resultados y Discusión

A partir de las simulaciones, se obtuvieron las líneas de flujo del viento alrededor de la estructura (Figura 8). Para el caso de viento a 0°, se observa la formación de vórtices a sotavento, en la cara inferior del panel, mientras que para 180° esto ocurre en la cara superior. Esta es una zona de baja velocidad del flujo, pero alta turbulencia, lo que concuerda con los modelos teóricos del comportamiento del flujo alrededor de este tipo de estructuras.

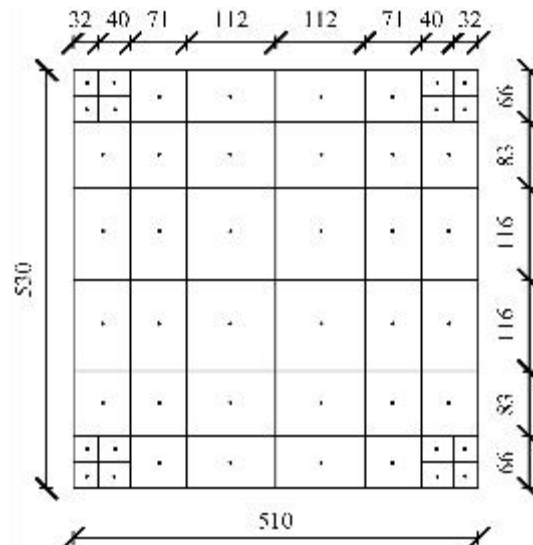




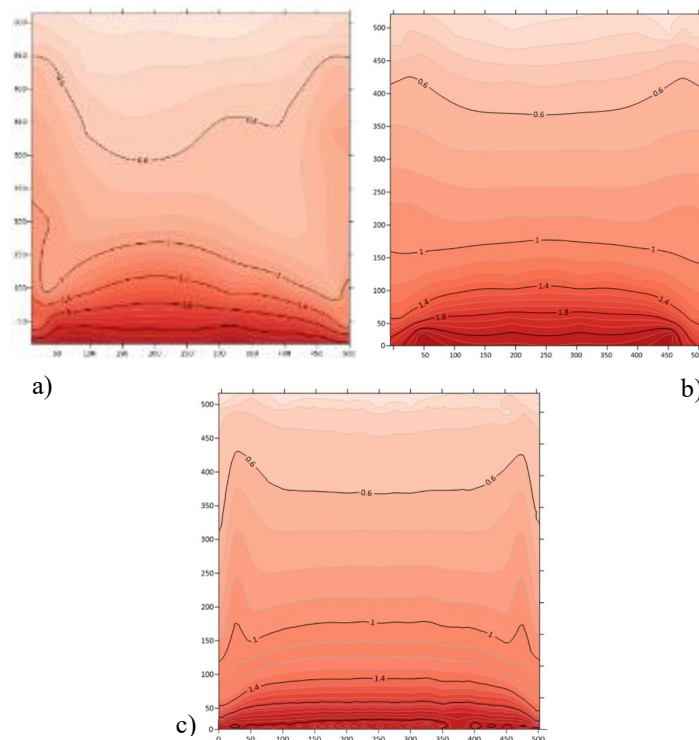
**Fig.8** Líneas de flujo alrededor del panel para 0° (a) y 180° (b)

Los coeficientes de presión fueron obtenidos para cada cara del panel (superior e inferior) y posteriormente fueron sumados algebraicamente para determinar los coeficientes de presión netos ( $C_p$ . neto). Estos fueron comparados con los coeficientes de presión medios de López Llanusa et al. [30], ya que al ser una simulación estacionaria no es posible obtener valores picos u otros dependientes del tiempo, solo valores medios.

En su estudio, López Llanusa et al. [30] utilizan la distribución de tomas de presión mostrada en la Figura 9, por lo que en la presente simulación se utilizaron inicialmente estos mismos puntos para determinar los coeficientes de presión sobre la estructura. En la Figura 10 se muestran los valores de  $C_p$ . neto para una incidencia del viento de 0° del ensayo experimental (a) y la simulación (b). Para estos resultados de la simulación se utilizó solamente una muestra de 48 puntos ubicados sobre el panel en correspondencia con la disposición de las tomas de presión en el túnel de viento (Figura 9). En la Figura 10c se tomó una muestra mucho mayor, de 2100 puntos distribuidos a una distancia equidistante sobre la superficie del panel. Estos puntos individuales de  $C_p$ . neto se transformaron en isolíneas de  $C_p$ . neto con la aplicación del método de interpolación Kriging mediante el software Surfer v25.1. Este método es el recomendado por el propio software debido a su flexibilidad y precisión.



**Fig.9** Distribución de tomas de presión y áreas tributarias para postprocesado utilizadas en el ensayo en túnel de viento. López Llanusa et al. (2019)



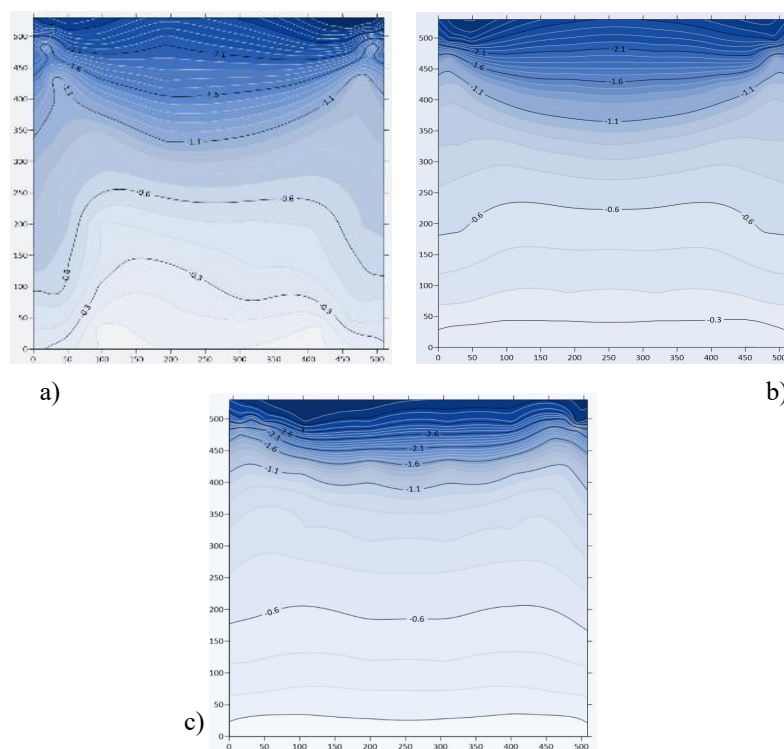
**Fig.10** Isolíneas de  $C_p$ . neto con viento a  $0^\circ$  para túnel de viento (a) simulación con 48 puntos (b) y simulación con 2100 puntos (c)

En estas figuras se observa una ligera asimetría en las líneas correspondientes al ensayo experimental. Estas pudieran deberse a una perturbación externa durante la realización del experimento, ya que en teoría la distribución de presiones para el ángulo de incidencia del viento de  $0^\circ$  es totalmente simétrica con respecto al eje central del panel. En las simulaciones sí se hace evidente esta simetría

Excepto por las diferencias en la simetría antes mencionadas, la distribución de las presiones simuladas muestra un comportamiento muy semejante a las obtenidas en el ensayo por López Llanusa et al. [30]. En la zona del panel más cercana a la entrada del flujo es donde se observan las mayores presiones (con un valor máximo de 2,4), disminuyendo a medida que se avanza en la longitud del panel (valor mínimo de 0,2).

Para el caso (c), con una mayor muestra de valores, los resultados son muy semejantes a los anteriores. La principal distinción es que se aprecia un mayor valor de  $C_p$  neto máximo (3,2) en un área muy localizada cerca del borde del panel. Esto puede deberse a que con la distribución de tomas de presión utilizadas en el túnel no es posible obtener datos en puntos tan cercanos al borde, por lo que deben ser interpolados. No obstante, estos valores actúan en un área pequeña, por lo que al determinar valores de coeficientes de presión ponderados en área su influencia es poco significativa. En los tres casos el panel se encuentra totalmente en succión, ya que todos los valores de  $C_p$  neto son mayores que 0.

En la Figura 11 se muestran los valores de  $C_p$  neto para una incidencia del viento de  $180^\circ$  del ensayo experimental (a) la simulación con el empleo de 48 puntos (b) y la simulación con el empleo de 2100 puntos (c). En esta ocasión, la distribución de las presiones va de un mayor valor en el borde superior del panel a uno menor en el borde inferior, encontrándose toda la superficie del panel en succión ya que los valores de  $C_p$  neto son siempre menores que 0



**Fig.11** Isolíneas de  $C_p$  neto con viento a  $180^\circ$  para túnel de viento (a) simulación con 48 puntos (b) y simulación con 2100 puntos (c)

Se puede notar la semejanza de los resultados de la simulación y el túnel de viento, aunque en este último se vuelve a apreciar una ligera asimetría. La mayor succión en el túnel de viento fue de -3,0 y la menor de -0,1. Para las simulaciones el mayor valor fue de -2,9 y -3,4 en los casos (b) y (c), mientras que el menor valor fue de -0,3 en ambos. Como sucede para  $0^\circ$ , estos valores extremos ocurren en áreas muy pequeñas, siendo la distribución de  $C_p$  neto similar en los tres casos en la mayor parte de la superficie del panel.

#### 4. Conclusiones

Partiendo de los datos del ensayo en túnel de viento llevado a cabo por López Llanusa et al. [30] se conformó un modelo matemático que se corresponde con los resultados obtenidos en el modelo

físico por dichos autores. Para esto, se utilizó la Dinámica Computacional de Fluidos mediante un análisis estacionario aplicado a un modelo de panel ante ángulos de ataque del viento de  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .

Como resultado, se verificó que con las configuraciones de dominio y mallado propuestas se logra obtener un modelo matemático acorde con resultados experimentales. También se comprobó que la relación entre la longitud turbulenta ( $l_0$ ) y la dimensión característica de la celda ( $V_{celda}$ )<sup>1/3</sup> es un buen indicador para comprobar la adecuación del mallado con vistas a realizar posteriormente simulaciones transitorias de tipo LES o similares.

Dentro de los modelos RANS, el k- $\epsilon$  realizable es el que muestra un comportamiento más acertado al predecir las presiones sobre el panel para el caso del viento incidiendo a  $0^\circ$ . En cambio, para el viento a  $180^\circ$  fue el modelo k- $\omega$  SST fue el que arrojó resultados más acordes a los obtenidos en los ensayos experimentales. Esto puede deberse a los diferentes niveles de turbulencia generados según la dirección de ataque del viento y la capacidad de los modelos de describirlos adecuadamente en cada situación.

Tanto para el caso de un ángulo de ataque del viento de  $0^\circ$  como  $180^\circ$ , la simulación mediante CFD y el posterior procesamiento teniendo en cuenta la misma ubicación de tomas de presión que en el modelo físico arroja resultados muy similares al túnel de viento, tanto en la forma de la distribución como en los valores. Tras esto, se considera que el modelo matemático responde correctamente a los resultados experimentales, por lo que está correctamente validado.

Adicionalmente, al procesar los resultados de la simulación con una mayor cantidad de datos se obtienen distribuciones de presión con mayores valores en zonas cercanas al borde de incidencia del viento. Esto puede implicar que la configuración de las tomas de presión utilizadas en el ensayo es correcta para reflejar el comportamiento de las presiones hacia el centro del panel, pero precisa de mayor resolución hacia la periferia, donde ocurren fenómenos turbulentos complejos que no son captados adecuadamente con la actual disposición de tomas de presión en el modelo físico.

## Referencias

- [1] Amador, M. A., Fernández Lorenzo, I., López Llanusa, A., and Elena Parnás, V. B., “Estudio Comparativo de Coeficientes de Presión Normativos y Experimentales En Cubiertas de Naves Industriales,” *Ingeniería y Desarrollo*, Vol. 39, No. 2, 2021. <https://doi.org/10.14482/inde.39.2.725.4>
- [2] Geleta, T. N., and Bitsuamlak, G., “Validation Metrics and Turbulence Frequency Limits for LES-Based Wind Load Evaluation for Low-Rise Buildings,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 231, 2022, p. 105210. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105210>
- [3] Agarwal, A., Irtaza, H., and Ahmad, M. J., “Numerical Analysis of the Ground-Mounted Solar PV Panel Array Mounting Systems Subjected to Basic Wind for Optimum Design,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 48, No. 6, 2021, pp. 656–668. <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0280>
- [4] Reddy, P., Swapna, K., Kumar, G. K., and Varma, K. P. V. K., “Comparative Analysis of Effect of Wind Loads with Variation in Altitude and Angle of Inclination of Wind Direction on Solar Panels,” *Ecological Engineering & Environmental Technology*, Vol. 22, No. 6, 2021, pp. 61–68. <https://doi.org/10.12912/27197050/141526>
- [5] Al-Rawi, M., Rajan, N., Anand, S. S., Tony Pauly, and Nikhil Thomas, “Prototyping Roof Mounts for Photovoltaic (PV) Panels: Design, Construction and CFD Validation,” *CFD Letters*, Vol. 14, No. 2, 2022, pp. 59–71. <https://doi.org/10.37934/cfdl.14.2.5971>

- [6] Dagher, M. M., and Kandil, H. A., “Computational Prediction of Dust Deposition on Solar Panels,” *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 30, No. 5, 2022, pp. 12545–12557. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22993-y>
- [7] Khan, A. Y., Ahmad, Z., Sultan, T., Alshahrani, S., Hayat, K., and Imran, M., “Optimization of Photovoltaic Panel Array Configurations to Reduce Lift Force Using Genetic Algorithm and CFD,” *Energies*, Vol. 15, No. 24, 2022, p. 9580. <https://doi.org/10.3390/en15249580>
- [8] Tu, Z., Zheng, G., Yao, J., Shen, G., and Lou, W., “Computational Investigation of Wind Loads on Tilted Roof-Mounted Solar Array,” *Sustainability*, Vol. 14, No. 23, 2022, p. 15653. <https://doi.org/10.3390/su142315653>
- [9] Uematsu, Y., Yambe, T., and Yamamoto, A., “Application of a Numerical Simulation to the Estimation of Wind Loads on Photovoltaic Panels Installed Parallel to Sloped Roofs of Residential Houses,” *Wind*, Vol. 2, No. 1, 2022, pp. 129–149. <https://doi.org/10.3390/wind2010008>
- [10] Aly, A. M., and Clarke, J., “Wind Design of Solar Panels for Resilient and Green Communities: CFD with Machine Learning,” *Sustainable Cities and Society*, Vol. 94, 2023, p. 104529. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104529>
- [11] Eslami Majd, A., Adebayo, D. S., Tchuentebou-Magaia, F., Willetts, J., Nwosu, D., Matthews, Z., and Ekere, N. N., “Wind Flow and Its Interaction with a Mobile Solar PV System Mounted on a Trailer,” *Sustainability*, Vol. 16, No. 5, 2024, p. 2038. <https://doi.org/10.3390/su16052038>
- [12] Xu, A., Ma, W., Yuan, H., and Lu, L., “The Effects of Row Spacing and Ground Clearance on the Wind Load of Photovoltaic (PV) Arrays,” *Journal of Renewable Energy*, Vol. 220, 2024, p. 119627. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119627>
- [13] Zhang, J., and Lou, Y., “Study of Wind Load Influencing Factors of Flexibly Supported Photovoltaic Panels,” *Buildings*, Vol. 14, No. 6, 2024, p. 1677. <https://doi.org/10.3390/buildings14061677>
- [14] Pope, S. B., “Turbulent Flows,” Cambridge University Press, Cornell University, New York, 2011.
- [15] ANSYS, “ANSYS Fluent Theory Guide,” ANSYS, Inc., U.S.A, 2020.
- [16] Wang, J., Van Phuc, P., Yang, Q., and Tamura, Y., “LES Study of Wind Pressure and Flow Characteristics of Flat-Roof-Mounted Solar Arrays,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 198, 2020, p. 104096. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104096>
- [17] Chowdhury, M. G., Goossens, D., Goverde, H., and Catthoor, F., “Experimentally Validated CFD Simulations Predicting Wind Effects on Photovoltaic Modules Mounted on Inclined Surfaces,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 30, 2018, pp. 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.10.005>
- [18] Reina, G. P., and De Stefano, G., “Computational Evaluation of Wind Loads on Sun-Tracking Ground-Mounted Photovoltaic Panel Arrays,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 170, 2017, pp. 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.002>
- [19] Shademan, M., Barron, R. M., Balachandar, R., and Hangan, H., “Numerical Simulation of Wind Loading on Ground-Mounted Solar Panels at Different Flow Configurations,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 41, No. 8, 2014, pp. 728–738. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0537>
- [20] Yao, J. F., Tu, Z. B., Shen, G. H., Guo, Y., and Wang, D., “Experimental Investigation of Wind Pressures on Photovoltaic (PV) Panel Installed Parallel to Residential Gable Roof,” *Journal of Solar Energy*, Vol. 271, 2024, p. 112452. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112452>



- [21] Nan, B., Chi, Y., Jiang, Y., and Bai, Y., “Wind Load and Wind-Induced Vibration of Photovoltaic Supports: A Review,” *Sustainability*, Vol. 16, No. 6, 2024, p. 2551. <https://doi.org/10.3390/su16062551>
- [22] Chen, F., Zhu, Y., Wang, W., Shu, Z., and Li, Y., “A Review on Aerodynamic Characteristics and Wind-Induced Response of Flexible Support Photovoltaic System,” *Atmosphere*, Vol. 14, No. 4, 2023, p. 731. <https://doi.org/10.3390/atmos14040731>
- [23] Yao, J., Tu, Z., Wang, D., Shen, G., and Lou, W., “Experimental Investigation of Wind Loads on Roof-Mounted Solar Arrays,” *Sustainability*, Vol. 14, No. 14, 2022, p. 8477. <https://doi.org/10.3390/su14148477>
- [24] Wittwer, A. R., Podestá, J. M., Castro, H. G., Mroginski, J. L., Marighetti, J. O., De Bortoli, M. E., Paz, R. R., and Mateo, F., “Wind Loading and Its Effects on Photovoltaic Modules: An Experimental–Computational Study to Assess the Stress on Structures,” *Solar Energy*, Vol. 240, 2022, pp. 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.061>
- [25] Browne, M. T. L., Taylor, Z. J., Li, S., and Gamble, S., “A Wind Load Design Method for Ground-Mounted Multi-Row Solar Arrays Based on a Compilation of Wind Tunnel Experiments,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 205, 2020, p. 104294. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104294>
- [26] Alrawashdeh, H., and Stathopoulos, T., “Wind Loads on Solar Panels Mounted on Flat Roofs: Effect of Geometric Scale,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 206, 2020, p. 104339. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104339>
- [27] Chou, C.-C., Chung, P.-H., and Yang, R.-Y., “Wind Loads on a Solar Panel at High Tilt Angles,” *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 8, 2019, p. 1594. <https://doi.org/10.3390/app9081594>
- [28] Chung, P.-H., Chou, C.-C., Yang, R.-Y., and Chung, C.-Y., “Wind Loads on a PV Array,” *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 12, 2019, p. 2466. <https://doi.org/10.3390/app9122466>
- [29] López Llanusa, A., Elena Parnás, V. B., and Cataldo Ottieri, J., “Modelación de capa límite atmosférica para estudios de paneles solares en túnel de viento,” *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. 38, No. 3, 2017, pp. 52–64. <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/409>
- [30] López Llanusa, A., Elena Parnás, V. B., and Cataldo Ottieri, J., “Experimentos en túnel de viento sobre paneles fotovoltaicos montados en el suelo,” *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 34, No. 1, 2019, pp. 15–24. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732019000100015>
- [31] Stathopoulos, T., Zisis, I., and Xypnitou, E., “Local and Overall Wind Pressure and Force Coefficients for Solar Panels,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 125, 2014, pp. 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.007>
- [32] Warsido, W. P., Bitsuamlak, G. T., Barata, J., and Gan Chowdhury, A., “Influence of Spacing Parameters on the Wind Loading of Solar Array,” *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 48, 2014, pp. 295–315. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.03.005>
- [33] Bitsuamlak, G. T., Dagnew, A. K., and Erwin, J., “Evaluation of Wind Loads on Solar Panel Modules Using CFD,” presented at the The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE), Chapel Hill, North Carolina, USA, 2010. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0537>
- [34] Morales Hernández, R., and Fernández Lorenzo, I., “Simulación de la Capa Límite Atmosférica mediante CFD,” presented at the 20 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba, 2022.
- [35] Shademan, M., and Naghib-Lahouti, A., “Effects of Aspect Ratio and Inclination Angle on Aerodynamic Loads of a Flat Plate,” *Advances in Aerodynamics*, Vol. 2, No. 1, 2020, p. 14. <https://doi.org/10.1186/s42774-020-00038-7>
- [36] Jiménez, J., “The Contributions of A. N. Kolmogorov to the Theory of Turbulence,” *Arbor*, Vol. CLXXVIII, No. 704, 2004, pp. 589–606. <https://doi.org/10.3989/arbor.2004.i704.550>



### Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses en la realización del presente artículo.

### Contribución de los autores

**Rigoberto Morales Hernández.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2897-9284>

Participó en el trabajo en el software, el procesamiento de datos, análisis e interpretación de resultados, la redacción del manuscrito y edición final del mismo.

**Julio César Martínez González.** ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8899-3316>

Participó en el trabajo en el software, procesamiento de datos y análisis de resultados.

**Ingrid Fernández Lorenzo.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1223-0968>

Participó en la conceptualización y diseño de la investigación, análisis de resultados y revisión del manuscrito.