

## SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA ACCIÓN DEL VIENTO SOBRE ARREGLOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

### COMPUTATIONAL SIMULATION OF THE WIND EFFECT ON PHOTOVOLTAIC ARRAYS

José M. López del Campo<sup>a,b</sup>, Marcelo F. Valdez<sup>b,c</sup> y Sergio Preidikman<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Consejo de Investigación, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina,  
[lope0682@gmail.com](mailto:lope0682@gmail.com), <http://ci.unsa.edu.ar>

<sup>b</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina,  
[mfvaldez@unsa.edu.ar](mailto:mfvaldez@unsa.edu.ar), <https://www.ing.unsa.edu.ar>

<sup>c</sup>Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional, CONICET, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta,  
Argentina, <http://inenco.unsa.edu.ar>.

<sup>d</sup>Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT), Universidad Nacional de  
Córdoba-CONICET, Av. Velez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina,  
<http://www.inv.idit.efn.uncor.edu>

**Palabras clave:** Panel Fotovoltaico, Interacción Aerodinámica, Viento, RANS, Energía Solar

**Resumen.** Las cargas de viento son un aspecto fundamental a tener en cuenta durante el diseño de los sistemas fotovoltaicos de generación de energía solar. El efecto del viento sobre las filas individuales de paneles fotovoltaicos no sólo depende de las dimensiones de las mismas, sino también de la configuración del arreglo al que pertenecen (espaciamiento entre las filas y altura de los paneles respecto al suelo). En este artículo, se emplea la simulación numérica computacional para analizar el efecto del viento sobre diferentes arreglos de paneles fotovoltaicos. Los arreglos se diferencian en la cantidad de filas de paneles FVs que poseen. Se emplea el software OpenFoam para realizar las simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Las cargas aerodinámicas que experimentan las filas de paneles fotovoltaicos y las características del flujo de aire alrededor de las mismas son analizadas para distintas configuraciones del arreglo.

**Keywords:** Photovoltaic Panel, Aerodynamic Interaction, Wind, RANS, Solar Energy

**Abstract.** Wind loads are a fundamental aspect to consider during the design of photovoltaic systems. The effect of the wind over the individual rows of photovoltaic panels depends, not only on the dimensions of the panels, but also on the configuration of the array (spacing between rows and height above the ground). In this article, computational simulation is employed to analyze the effect of the wind over different arrays of photovoltaic panels. The arrays differ from each other on the number of photovoltaic rows they have. The software OpenFoam is employed to carry out the CFD simulations. The aerodynamic loads on the photovoltaic rows and the characteristics of the airflow around them are analyzed for different configurations of the array.

## 1 INTRODUCCIÓN

La popularidad de los paneles fotovoltaicos (FVs) en últimos años ha tenido un aumento constante tanto a nivel doméstico como industrial. Esta popularidad se debe a que el proceso de producción de electricidad no es intrusivo, requiere poco mantenimiento y puede emplearse en un amplia gama de escalas, desde pequeños relojes pulsera hasta el abastecimiento eléctrico de ciudades enteras. Entre las diversas fuentes renovables de energía, la solar fotovoltaica presenta un notable crecimiento cada año con inversiones anuales a escala global.

Una granja solar, consiste en una arreglo de filas de paneles FVs montados sobre un terreno abierto. Por lo general, los módulos FVs se encuentren sometidos a cargas de viento variables que puedan provocar daños a los mismos o a sus estructuras de anclaje al suelo. En relación a esto, actualmente hay pocas provisiones acerca de cargas de viento sobre estas estructuras particulares en los reglamentos o códigos de construcción (Aly, 2016; Abiola-Ogedengbe, Hangan y Siddiqui, 2015; Jubayer y Hangan, 2014).

La fuerza ejercida por el viento sobre una sistema fotovoltaico depende de diversos factores, entre ellos, la dirección del viento y su velocidad, condiciones del terreno y la geometría de la estructura. Los paneles FVs en granjas solares están montados a poca altura del suelo, lo que los sitúa en la región más baja de la capa límite atmosférica (ABL por sus siglas en inglés) donde el flujo del aire es altamente impredecible. El perfil de velocidad media del viento en este estrato de la ABL es muy afectado por la rugosidad de la superficie, la cual es imposible de determinar con precisión (Abiola-Ogedengbe, Hangan y Siddiqui, 2015).

Desde el punto de vista experimental, el estudio de sistemas FVs montados en tierra es demasiado complejo ya que las escalas espaciales de flujo implicadas requieren la realización de modelos muy reducidos para pruebas de túnel de viento de capa límite. Debido a estas dificultades, el análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) emerge como una herramienta atractiva de predicción para las configuraciones de paneles FVs montados en el suelo y en techos de edificios (Wu *et al.* 2010, Reina y De Stefano, 2017).

Algunos de los estudios más actuales que utilizan CFD corresponden a Shademan *et al.* (2014a) y Jubayer y Hangan (2014), los cuales investigaron las cargas producidas sobre un único panel fotovoltaico. Por otro lado, Shademan y Hangan (2009) estimaron las cargas de viento en arreglos rectangulares de módulos FVs y advirtieron que la resistencia aerodinámica de los paneles corriente abajo alcanza un mínimo para un valor determinado de la distancia entre ellos. Bitsuamlak *et al.* (2010) estudiaron, utilizando CFD, las características aerodinámicas de paneles solares montados en el suelo que se encontraban bajo la acción de la ABL. Estas simulaciones lograron capturar los fenómenos de separación de flujo, sombra aerodinámica y la distribución de presión en los paneles; sin embargo, se observó que los resultados numéricos generalmente subestiman las mediciones en túnel de viento. Shademan *et al.* (2014b) realizó simulaciones CFD para analizar la influencia del suelo en paneles fotovoltaicos aislados y en conjuntos de estos. Dicha investigación concluyó que una mayor separación respecto del suelo produce una carga de viento mayor en los módulos y que la selección adecuada del espaciamiento entre estos dentro de un arreglo puede reducir significativamente la carga vertical por el efecto de sombra aerodinámica.

De todo lo expuesto, queda en evidencia que el estudio de las cargas de viento es un aspecto fundamental a considerar durante el diseño de los sistemas fotovoltaicos. Por esa razón, en el presente artículo se emplea la simulación numérica de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con el propósito de analizar las cargas aerodinámicas que experimentan las filas de paneles FVs en distintos arreglos y las características del flujo de aire alrededor de las mismas. La herramienta empleada es el software OpenFoam<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> <https://www.openfoam.com>

## 2 MODELO COMPUTACIONAL

En esta sección se describe el modelo computacional empleado para realizar las simulaciones CFD en OpenFoam, es decir: la geometría del dominio fluido computacional y del arreglo de paneles FVs utilizado y las condiciones de borde empleadas.

### 2.1 Dominio computacional y geometría del arreglo de paneles FVs

Se propone un modelo computacional bidimensional para el estudio del viento sobre un arreglo de paneles FVs. La elección de un dominio bidimensional responde principalmente a los limitados recursos computacionales disponibles. Si las filas de paneles FVs son lo suficientemente largas, los resultados bidimensionales son representativos del efecto global del viento sobre los mismos. Sin embargo, los efectos locales altamente tridimensionales en los extremos de las filas no son tenidos en cuenta en el presente modelo.

El modelo computacional se muestra esquemáticamente en la [Figura 1](#). La dimensiones del modelo computacional, se expresan en términos de la longitud de cuerda  $c$  (1 m) de los paneles fotovoltaicos. En este trabajo, se considera una altura de montaje de los paneles de  $H = 0,75c$ , medida verticalmente desde el suelo al punto medio del panel. Se adoptó  $\alpha = 30^\circ$  para la inclinación de los paneles. Este ángulo no obedece a una ubicación geográfica específica, sino que fue elegido en virtud de observaciones de [Shademan y Hangan \(2009\)](#) que determinaron que, para esa inclinación, las cargas de viento sobre las filas de paneles corriente abajo son prácticamente independientes de la separación entre los mismos. El espesor  $t$  de los paneles FVs se fijó en 40 mm. Dada la naturaleza bidimensional del problema, el ancho de las filas de paneles FV es irrelevante. El espaciamiento entre las filas  $\Delta x$  se fijó en  $c/\cos\alpha$ , el cual garantiza la ausencia de sombras en una fila sobre las filas posteriores.

El arreglo de paneles FVs está inmerso en un dominio computacional rectangular de  $28c$  de longitud y  $8c$  de altura. Las filas de paneles FVs se colocan a una distancia de  $8c$  aguas abajo de la sección de entrada del dominio (*inlet*). Los resultados muestran que esta distancia es suficiente, ya que el arreglo de paneles FVs no afecta el perfil de la ABL en la entrada. Para los distintos arreglos analizados, la distancia mínima entre el último panel FV y la sección de salida del dominio (*outlet*) del dominio es de  $14c$ .

Se consideran dos direcciones de viento. La primera, de izquierda a derecha como se muestra en la [Figura 1](#), corresponde al viento frontal al arreglo de paneles FVs (equivalente al sentido norte-sur para una instalación en el hemisferio sur del planeta). La otra dirección estudiada es la opuesta, correspondiente al viento posterior al arreglo. Este último caso se obtiene manteniendo la configuración del dominio fluido pero orientando los paneles FVs con  $\alpha=150^\circ$ .

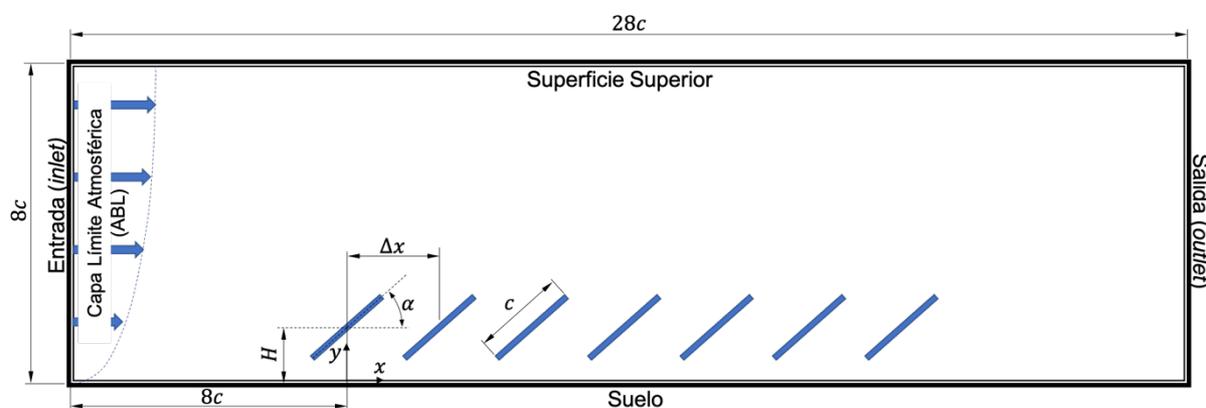


Figura 1: Representación esquemática del dominio computacional y geometría del arreglo de paneles FVs.

## 2.2 Generación de la malla de volúmenes finitos en OpenFoam

Para la generación de la malla computacional se emplean las utilidades de OpenFoam, principalmente *blockMesh*, *snappyHexMesh* y *extrudeMesh*. Con *blockMesh* se crea una malla de fondo compuesta por hexaedros. Esta malla no tiene en cuenta la presencia de los paneles FVs y su resolución no es necesariamente alta ya que se emplea para describir el flujo alejado de los paneles FVs. Esta malla estructurada incluye inflación para generar una mayor densidad de celdas en la cercanía del suelo. Con *snappyHexMesh* se realiza el mallado alrededor de los paneles FVs. La geometría de los paneles fotovoltaicos es provista en forma de un archivo en formato *stl* generado con un software CAD. La malla resultante posee una región rectangular con 1 nivel de refinamiento que se extiende  $1c$  a cada lado del arreglo de paneles y tiene  $1.5c$  de alto (ver Figura 2). Además se genera una zona con 5 niveles de refinamiento limitada por una distancia de  $3t$  sobre la superficie de cada uno de los paneles. Finalmente, se incluyen 10 capas próximas a la superficie de los paneles para capturar correctamente la capa límite. El espesor de la primera capa es de  $0.00625t$ . Finalmente, con *extrudeMesh* se extrude, en la dirección del eje  $z$ , la cara posterior de la malla con un espesor  $1c$  cubierto enteramente por una celda (requerimiento de OpenFoam para simulaciones bidimensionales). La malla resultante del proceso secuencial descrito, junto con los detalles de las zonas de refinamiento y las capas sobre los paneles se muestran en la Figura 2 para el caso de un arreglo formado por 6 paneles FVs. Esta malla posee un total de 5.189.578 celdas hexaédricas. Para la visualización de los resultados y la malla se emplea el software ParaView<sup>2</sup>.

## 2.3 Modelo de turbulencia y las condiciones de borde del sistema

El flujo turbulento incompresible se simula empleando la estrategia RAS (Reynolds-Averaged Simulation). En particular, se utilizó el modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport), un modelo de dos ecuaciones, muy difundido en aplicaciones aerodinámicas.

Las condiciones de contorno para la presión, la velocidad, la energía cinética turbulenta  $k$  y la velocidad de disipación turbulenta específica  $\omega$  en la entrada (*inlet*), en la salida (*outlet*) y en la superficie superior del dominio se definieron de manera similar al estudio de Hargreaves y Wright (2007). Se imponen las condiciones de gradiente nulo (*zeroGradient*) y de valor fijo igual a 0 para la presión en la entrada y salida del dominio, respectivamente. Para definir el perfil de velocidad, de  $k$  y de  $\omega$  de en la entrada del dominio se emplean las condiciones de contorno derivadas de la clase *atmBoundaryLayer*<sup>3</sup> provista por OpenFoam. En particular, se emplean los tipos *atmBoundaryLayerInletVelocity*, *atmBoundaryLayerInletK* y *atmBoundaryLayerInletOmega*, respectivamente.

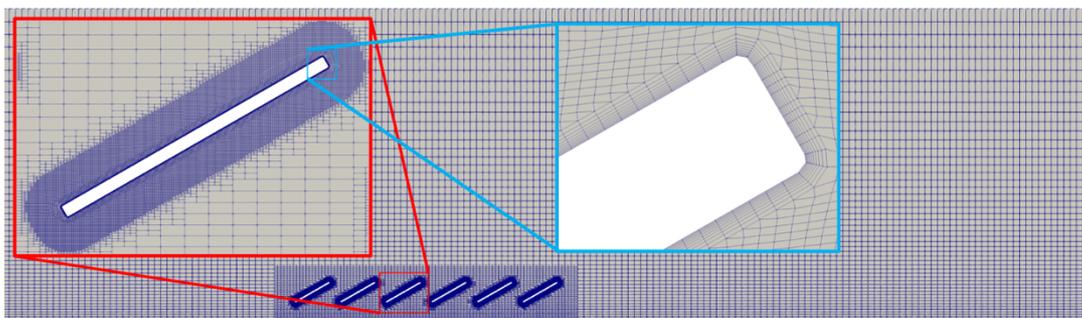


Figura 2: Malla de volúmenes finitos para el estudio del flujo sobre de un arreglo de paneles FVs. Se observan la malla de fondo, las dos zonas de refinamiento y las diez capas generadas sobre la superficie de los paneles.

<sup>2</sup> <https://www.paraview.org>

<sup>3</sup> <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-bcs-inlet-atm-atmBoundaryLayer.html>

Los perfiles de velocidad, de  $k$  y de  $\omega$  en capa límite atmosférica en la entrada del dominio están definidos de la siguiente manera:

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \text{Ln} \left( \frac{y - d + y_0}{y_0} \right), \quad v = 0, \quad w = 0 \quad (1)$$

$$k = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \omega = \frac{u^*}{\kappa \sqrt{C_\mu}} \frac{1}{y - d + y_0} \quad (2)$$

donde  $\kappa = 0,40$  es la constante de von Kármán,  $C_\mu = 0,09$  es una constante empírica,  $y_0$  es la rugosidad aerodinámica de la superficie,  $d = 0$  la altura de desplazamiento normal al suelo y  $u^*$  es la velocidad de fricción que se calcula en función de la velocidad  $u_{ref}$  y la altura  $y_{ref}$  de referencia como sigue:

$$u^* = \frac{u_{ref} \kappa}{\text{Ln} \left( \frac{y_{ref} + y_0}{y_0} \right)} \quad (3)$$

En el presente trabajo se adoptan,  $u_{ref} = 10$  m/s y  $y_{ref} = 6$  m. Teniendo en cuenta que la viscosidad cinemática del aire es  $\nu = 1,5 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s, el número de Reynolds basado en la cuerda de un panel FV resulta igual a  $6,6 \times 10^5$ . Para los valores de  $u_{ref}$  y  $y_{ref}$ , el valor obtenido de  $k$  es 1,3 y, la intensidad de la turbulencia en la entrada del dominio se estima en 9,3%.

En el suelo y en las superficies de los paneles, se emplea la condición de no deslizamiento (*noSlip*) y de gradiente nulo (*zeroGradient*), para la velocidad y presión, respectivamente. Para  $k$  y  $\omega$  se emplearon las funciones de pared *kqRWallFunction* y *omegaWallFunction*.

Finalmente, las condiciones de contorno en las superficies posterior y frontal son de tipo vacío (*empty*) para todas las variables. Esto es necesario para las simulaciones bidimensionales.

## 2.4 Solución numérica

Para resolver las ecuaciones RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) para el flujo medio junto con las ecuaciones de cierre del modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST se emplea la aplicación *simpleFoam*. Esta aplicación es un solucionador para flujo turbulento e incompresible en estado estacionario que emplea el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Los esquemas numéricos empleados se definen en el diccionario *fvSchemes*. Se empleó el esquema numérico *bounded Gauss linear* para la advección de la velocidad ( $\text{div}(\phi, U)$ ) y *bounded Gauss limited linear* con coeficiente 1 para la advección de  $k$  y de  $\omega$  ( $\text{div}(\phi, k)$  y  $\text{div}(\phi, \omega)$ ), respectivamente). Para los términos difusivos se empleó el esquema *Gauss linear corrected*.

Inicialmente, se realizaron simulaciones RANS inestacionarias empleando los solvers *pisoFoam* y *pimpleFoam* con los mismos esquemas mencionados anteriormente y pasos de tiempo entre  $5 \times 10^{-4}$  y  $1 \times 10^{-6}$ . Se observó en todos los casos que luego de un tiempo relativamente corto, el campo de velocidad se estabiliza convergiendo a la solución estacionaria obtenida con *simpleFoam*. Resultados similares fueron obtenidos por Jubayer y Hangan (2014), quienes atribuyeron la ausencia de desprendimiento de vórtices a las deficiencias de los modelos RANS. Sin embargo, dichos autores observaron que las cargas aerodinámicas medias obtenidas aproximan razonablemente, con error entre el 20% y el 2% dependiendo del caso de carga, los valores mínimos de las normas de diseño estadounidenses para cubiertas aisladas monopendiente. Por este motivo, se considera apropiado el empleo de *simpleFoam* como un paso preliminar a simulaciones más fidedignas que requieren más recursos computacionales.

### 3 RESULTADOS

Se analizaron en total 6 arreglos de paneles FVs que se diferencian por la cantidad de filas de paneles FVs. En cada caso, se evaluó la distribución del coeficiente de presión ( $C_p$ ) sobre la superficie de los paneles FVs, el perfil de velocidad en distintas estaciones del dominio fluido y las fuerzas resultantes sobre cada fila. Las filas de paneles FVs se numeran según la dirección del viento, siendo la primera fila la que se encuentra a barlovento.

#### 3.1 Distribución del coeficiente de presión ( $C_p$ ) sobre las filas de paneles FVs

En la [Figura 3](#) se muestran las distribuciones del coeficiente de presión sobre la superficie de las 6 filas de paneles FVs para la situación de viento frontal. Cada gráfico corresponde a una misma fila como parte integrante de cada una de las 6 configuraciones. La fila a barlovento (fila 1) forma parte de las 6 configuraciones. Por el contrario, la fila 6 sólo forma parte de la configuración de 6 filas de paneles FVs y es la fila a sotavento en ese caso.

El coeficiente de presión se define como sigue:

$$C_p = \frac{p - p_{\text{ref}}}{0.5\rho V_{\text{ref}}^2} \quad (4)$$

donde  $p$  es la presión en el punto analizado,  $p_{\text{ref}}$  es la presión de referencia y  $V_{\text{ref}}$  es la velocidad de referencia. En este caso,  $V_{\text{ref}}$  es la velocidad media de aire en la sección de entrada entre las alturas correspondientes al punto inferior y superior de los paneles FVs y  $p_{\text{ref}}$  es la presión media en dicha sección de entrada, la cual, para los fines del cálculo del  $C_p$ , se asume igual a la presión impuesta en la sección de salida del dominio (igual a 0).

Para la fila a barlovento (fila 1), se incluye en el gráfico los valores experimentales de [Fage y Johansen \(1927\)](#) para una placa plana inclinada a  $29.85^\circ$  e inmersa en una corriente uniforme. Se observa que la distribución de presión en la configuración de una única fila de paneles FVs es muy similar a la distribución experimental. Las diferencias se atribuyen al perfil de capa límite atmosférica y a la presencia del suelo.

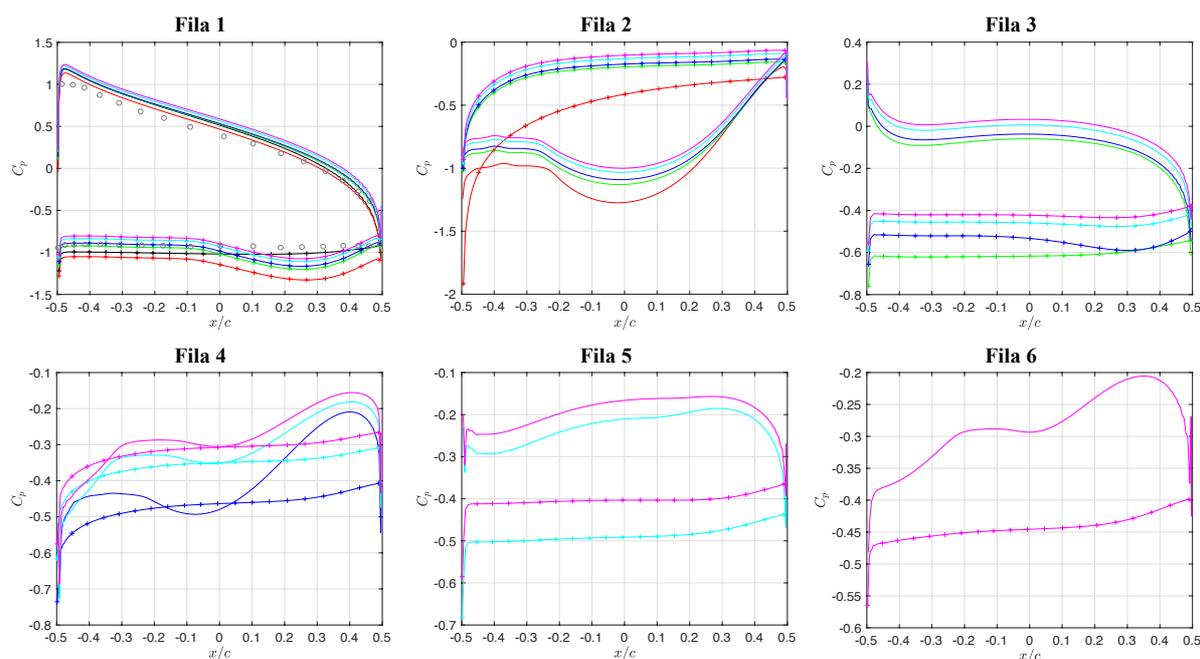


Figura 3: Distribución del coeficiente de presión ( $C_p$ ) sobre la superficie de los paneles FVs para la dirección del viento frontal. Línea continua: superficie a barlovento; (+): superficie a sotavento. Configuraciones del arreglo: negro (—) 1 fila, rojo (—) 2 filas, verde (—) 3 filas, azul (—) 4 filas, celeste (—) 5 filas y rosado (—) 6 filas.

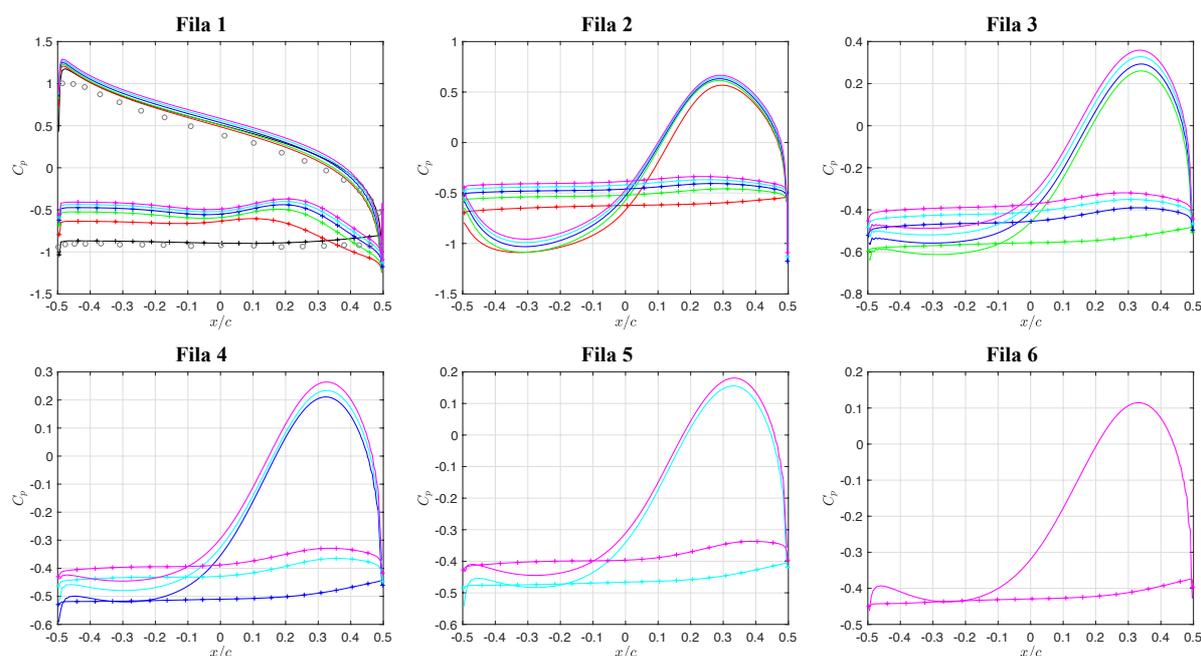


Figura 4: Distribución del coeficiente de presión ( $C_p$ ) sobre la superficie de los paneles FVs para dirección del viento posterior. Línea continua: superficie a barlovento; (+): superficie a sotavento. El código de colores es el mismo que el de la Figura 3.

Se observa que para todas las configuraciones, la superficie a barlovento de la primera fila es la que está expuesta a las mayores sobrepresiones. Para una configuración cualquiera del arreglo, se observa que, excepto para la segunda y la cuarta fila, la variación de la presión a lo largo de la superficie a sotavento (variación en  $x$ ) es relativamente pequeña. Por el contrario, la variación de la presión a lo largo de las superficies a barlovento es relativamente más pronunciada.

En la Figura 4, se muestran los mismos resultados para la situación de viento posterior al arreglo. Se observa en esta figura, que la situación para la primera fila a barlovento es similar a la del caso con viento frontal. Sin embargo, la depresión en la superficie a sotavento es notoriamente menor que en el caso anterior. Además, se evidencia un cambio notorio en la forma de la distribución de presión sobre las superficies a barlovento de cada una de las filas corriente abajo con respecto al caso anterior.

### 3.2 Perfil de velocidad en diferentes puntos del sistema

El perfil de velocidad se muestreó en 4 estaciones a lo largo del dominio computacional. Las estaciones son: (1) entrada del dominio, (2)  $4c$  corriente arriba de la primera fila de paneles FVs, (3)  $4c$  corriente abajo de la última fila de paneles FVs y (4) salida del dominio.

En la Figura 5, se muestran los perfiles de velocidad en las 4 estaciones para el caso de viento frontal y posterior. En los gráficos se incluye el perfil de velocidad dado por la Ec. (1), con el propósito de visualizar las fluctuaciones generadas por la presencia de los paneles FVs sobre la capa límite atmosférica. En la estación (1), se comprueba la correcta aplicación del perfil de ABL en la entrada del dominio. Se observa que el perfil de velocidad en la estación (2) es prácticamente inalterado e independiente de la configuración del arreglo de paneles FVs. Esto confirma el correcto dimensionamiento del dominio computacional. En la estación (3), se puede apreciar claramente la influencia del arreglo de paneles FVs como fluctuaciones en los estratos más cercanos al suelo. En la estación (4), se evidencia la tendencia de recuperación del perfil de velocidad inicial luego del arreglo.

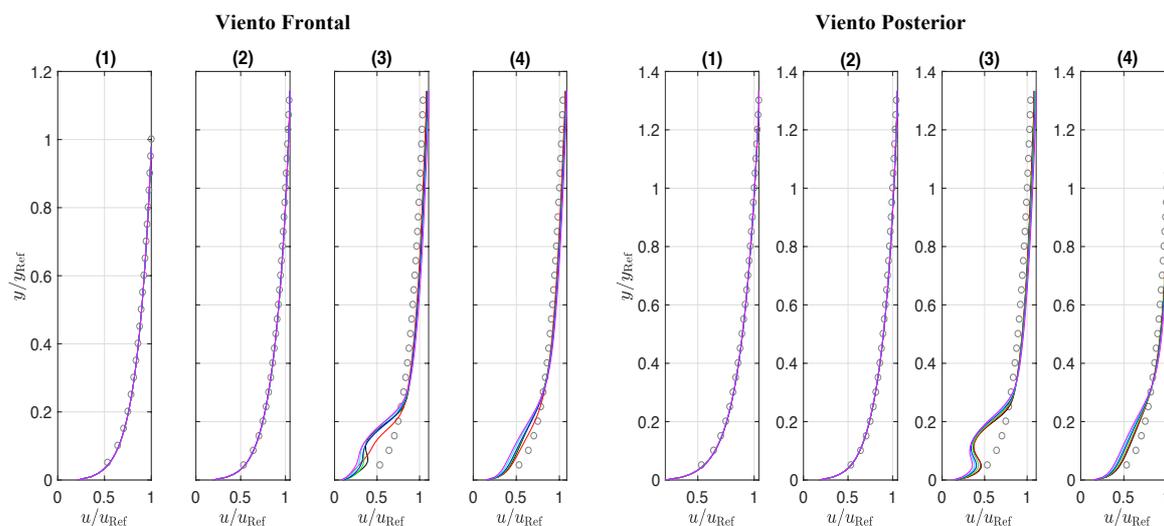


Figura 5: Perfil de velocidad en la distintas estaciones de muestreo a lo largo del dominio. El código de colores es el mismo que el de la Figura 3. (o): Perfil de velocidad dado por la Ec. (1).

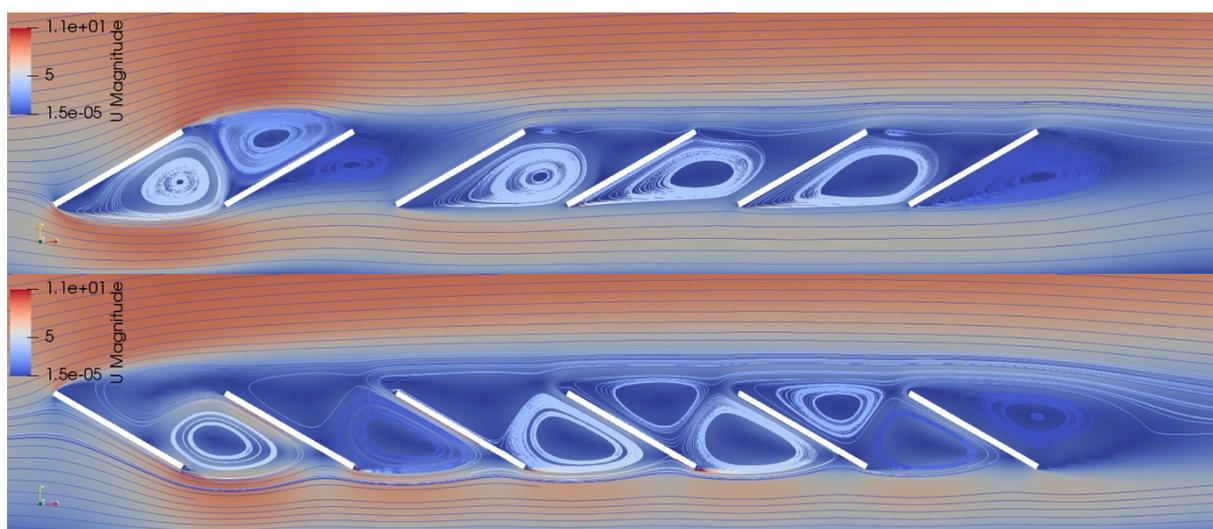


Figura 6: Campo de Velocidad y líneas de corriente para la configuraciones de 6 filas de paneles con viento frontal (arriba) y posterior (abajo).

Finalmente, en la Figura 6 se presenta muestra la magnitud del campo de velocidad y algunas líneas de corriente para los casos de viento frontal y posterior en el arreglo de 6 paneles FVs. Se observa que para el viento frontal, detrás de las filas 2 en adelante se forma un único vórtice, mientras que para el caso de viento posterior, se forman dos vórtices de sentido opuesto.

### 3.3 Coeficientes de fuerza horizontal y vertical

Los coeficientes de fuerza aerodinámica horizontal ( $C_x$ ) y vertical ( $C_y$ ) en cada una de las filas de las 6 configuraciones del arreglo se resumen en la Tabla 1 y Tabla 2 para los casos de viento frontal y posterior, respectivamente. Los coeficientes de fuerza se calculan como sigue:

$$C_x = \frac{|F_x|}{0.5c\rho V_{ref}^2} \text{sign}(\mathbf{F} \cdot \mathbf{V}_{ref}), \quad C_y = \frac{F_y}{0.5c\rho V_{ref}^2} \quad (5)$$

donde  $F_x$  y  $F_y$  son las componentes horizontal y vertical de la fuerza aerodinámica resultante,

respectivamente, y  $V_{ref}$  es la misma velocidad de referencia empleada para calcular el  $C_p$ . El signo del coeficiente de fuerza horizontal es positivo cuando la fuerza tiene el mismo sentido que la velocidad del viento. El signo positivo del  $C_y$  corresponde a una fuerza vertical en el sentido positivo del eje  $y$  (hacia arriba).

Para la situación de viento frontal (Tabla 1), se observa que la primera fila de paneles a barlovento experimenta las mayores cargas, tanto verticales como horizontales. Se observa que la magnitud de las fuerzas horizontal y vertical actuando sobre la primera fila son máximas para el arreglo de 2 filas. Para arreglos de 3 filas o más, la magnitud de los coeficientes  $C_x$  y  $C_y$  decrecen monótonicamente al aumentar la cantidad de filas. Salvo la segunda fila, todas las filas de paneles FVs experimentan una resistencia aerodinámica positiva ( $C_x > 0$ ) y una fuerza vertical hacia abajo ( $C_y < 0$ ). Es interesante lo que ocurre en la segunda fila de paneles FV, ya que los signos de las fuerzas son opuestos al resto de las filas ( $C_x < 0$  y  $C_y > 0$ ). También, se observa que las magnitudes de los coeficientes de fuerza en la cuarta fila son considerablemente menores que para el resto de las filas (un orden de magnitud menor que en las filas corriente arriba).

Para la situación de viento posterior (Tabla 2), se observa que la magnitud de los coeficientes de fuerzas horizontal y vertical en la primera fila a barlovento son menores que los obtenidos para el viento frontal y las mismas configuraciones. Se destaca que en esta situación, la magnitud de los coeficientes de fuerza en la segunda fila de paneles son los más pequeños para todas las configuraciones. Esto pone en evidencia el efecto de resguardo que ejerce la primera fila del arreglo sobre la segunda principalmente. Para esta dirección del viento, todas las fuerzas horizontales y verticales son positivas ( $C_x > 0$  y  $C_y > 0$ ).

#### 4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los resultados de simulaciones de dinámica de fluidos computacional realizadas por medio del software OpenFoam para determinar el efecto del viento y la capa límite atmosférica sobre distintos arreglos de paneles fotovoltaicos. Las simulaciones corresponden al flujo medio en estado estacionario, en el cual no se observó la generación intermitente de vórtices desde las filas de paneles FVs. Estas observaciones coinciden con las reportadas en la literatura. Sin embargo, se considera que los valores de las

Fila →	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Configuración ↓	$C_x$						$C_y$					
1 Fila	0,75	-	-	-	-	-	-1,25	-	-	-	-	-
2 Filas	0,80	-0,24	-	-	-	-	-1,35	0,38	-	-	-	-
3 Filas	0,77	-0,32	0,28	-	-	-	-1,29	0,53	-0,43	-	-	-
4 Filas	0,76	-0,32	0,25	0,04	-	-	-1,27	0,53	-0,39	-0,06	-	-
5 Filas	0,74	-0,31	0,24	0,03	0,14	-	-1,25	0,52	-0,36	-0,03	-0,21	-
6 Filas	0,74	-0,31	0,23	0,02	0,12	0,09	-1,24	0,52	-0,35	-0,03	-0,17	-0,13

Tabla 1: Coeficientes de fuerza horizontal ( $C_x$ ) y vertical ( $C_y$ ) para viento frontal a los arreglos de paneles FVs.

Fila →	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Configuración ↓	$C_x$						$C_y$					
1 Fila	0,70	-	-	-	-	-	1,15	-	-	-	-	-
2 Filas	0,62	0,09	-	-	-	-	0,96	0,18	-	-	-	-
3 Filas	0,58	0,07	0,12	-	-	-	0,90	0,13	0,22	-	-	-
4 Filas	0,57	0,06	0,09	0,12	-	-	0,88	0,12	0,17	0,22	-	-
5 Filas	0,56	0,06	0,09	0,10	0,10	-	0,87	0,11	0,16	0,18	0,19	-
6 Filas	0,56	0,05	0,09	0,09	0,08	0,09	0,87	0,11	0,16	0,17	0,15	0,17

Tabla 2: Coeficientes de fuerza horizontal ( $C_x$ ) y vertical ( $C_y$ ) para viento posterior a los arreglos de paneles FVs.

fuerzas y distribuciones de presión obtenidas son representativos y constituyen un buen punto de partida para análisis más detallados. Cabe destacar que, la configuración del modelo puramente bidimensional es algo novedoso, ya que los estudios en la literatura en general proponen modelos tridimensionales. Un modelo bidimensional reduce significativamente el costo computacional y puede arrojar resultados de gran valor. Para capturar correctamente la inestabilidad de las estelas es necesario recurrir a modelos de mayor fidelidad como el LES (*Large Eddy Simulation*) o el DES (*Detached Eddy Simulation*), cuyo costo computacional lo hacen prohibitivo para los autores en este momento. Los resultados sugieren que para las dos direcciones de viento analizadas el agregado de filas de paneles FVs a un arreglo alivia las fuerzas horizontales y verticales en el resto de las filas a barlovento. Además, se observa que la fila de paneles a barlovento es la que mayores cargas debe soportar y la que cumple el rol de resguardo para el resto de las filas.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo y financiación del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) por medio del proyecto CIUNSa 2658 y la Beca de Investigación para Estudiantes Avanzados (BIEA) otorgada al primer autor de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Abiola-Ogedengbe, A., Hangan, H., and Siddiqui, K., Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module. *Renewable Energy*, 78:657-665, 2015.
- Aly, A. M., On the evaluation of wind loads on solar panels: The scale issue. *Solar Energy*, 135:423-434, 2016.
- Bitsuamlak, G.T., Dagnew, A.K. and Erwin, J., Evaluation of wind loads on solar panel modules using cfd. *Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE)*, Chapel Hill, NC, Mayo, p. 23-27, 2010.
- Page, A. and Johansen, F.C., On the flow of air behind and inclined flat plate of infinite span. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 116: 170-197, 1927.
- Hargreaves, D.M. and Wright, N.G., On the use of the k- $\epsilon$  model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95:355-369, 2007.
- Jubayer, C.M., and Hangan, H., Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 134:56-64, 2014.
- Reina, G. P., and De Stefano, G., Computational evaluation of wind loads on sun-tracking ground-mounted photovoltaic panel arrays. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 170:283-293, 2017.
- Shademan, M., Balachandar, R. and Barron, R., Detached eddy simulation of flow past and isolated inclined solar panel. *Journal of fluids and structures*, 50:217-230, 2014a.
- Shademan, M., Barron, R., Balachandar, R. and Hangan, H., Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(8):728-738, 2014b.
- Shademan, M. and Hangan, H., Wind loading on solar panels at different inclination angles. *11th Americas Conference on Wind Engineering*, San Juan, PR, Junio, p. 22-26, 2009.
- Wu, Z., Gong, B., Wang, Z., Li, Z. and Zang, C., An experimental and numerical study of the gap effect on wind load on heliostat. *Renewable Energy*, 35:797-806, 2010.