

Experimentos en túnel de viento sobre paneles fotovoltaicos montados en el suelo

Wind Tunnel Experiments on Ground-Mounted Photovoltaic Solar Panels

A. López ^{1*}, V.E. Parnás *, J. Cataldo **

* Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, CUBA

** Universidad de la República, Montevideo, URUGUAY

Fecha de Recepción: 31/01/2019
Fecha de Aceptación: 05/03/2019
PAG 15-24

Abstract

Over the last decades, renewable energy resources have gained an increasing interest for human development and, specifically, photovoltaic solar energy has shown a speedy and rising expansion. Several photovoltaic solar panel farms have been built in many countries to take advantage of this energy. Standards and codes for wind load action have not been an adequate tool for evaluating wind load on photovoltaic (PV) solar panels yet; thus, deeper studies on this subject are necessary. This paper presents an experimental study of wind load on a ground-mounted PV panel in a wind tunnel. The model was tested with inclinations of 15° and 23° for different wind attack directions in an open field. The detailed characteristics of pressure distribution of the mean and peak load coefficients on the panel surfaces were obtained. The shape coefficients from the peak loads were obtained using the 3-s (three-seconds) and area-average approach. Pressure coefficient increases are critical for 0° and 180° with an approximated total increasing percentage of 57% and 61% respectively when varying the angle from 15° to 23°.

Keywords: Pressure coefficients, photovoltaic solar panels, wind directions, wind tunnel

Resumen

En décadas recientes, el recurso de energías renovables suscita cada vez más interés para el desarrollo humano y la energía solar fotovoltaica ha mostrado una rápida y creciente expansión. Muchos países han construido parques de paneles solares fotovoltaicos para aprovechar esta energía. Las normas y códigos existentes para medir la acción de la carga de viento no son una herramienta adecuada para evaluar esta carga sobre los paneles FV, por lo cual se requieren estudios que profundicen en el tema. Este artículo presenta un ensayo experimental de las cargas de viento en túnel sobre paneles FV montados en el suelo. El modelo fue probado con inclinaciones de 15° y 23° con diferentes ángulos de ataque del viento a campo abierto. Con ello se obtuvieron las características de la distribución de la presión de los coeficientes máximos y medios de las carga sobre las superficies de los paneles. Los coeficientes de forma de las cargas máximas se obtuvieron mediante el enfoque de 3-s (tres segundos) y el promedio de áreas. Los incrementos de los coeficientes de presión resultan críticos para 0° y 180° con un porcentaje de aumento total aproximado del 57% y 61%, respectivamente, al variar el ángulo de 15° a 23°.

Palabras clave: Coeficientes de presión, paneles fotovoltaicos, dirección del viento, túnel de viento

1. Introducción

En décadas recientes, el recurso de energías renovables suscita cada vez más interés para el desarrollo humano y, en este contexto, la energía solar fotovoltaica ha mostrado una rápida y creciente expansión. Muchos países han construido parques de paneles solares fotovoltaicos (FV) para aprovechar esta energía. Algunas zonas del planeta con buen potencial solar también tienen fuertes vientos, los que inducen una gran carga de viento en los parques de paneles solares. Las normas y códigos existentes para medir la acción de la carga de viento no son una herramienta adecuada para evaluar la carga de viento en los paneles solares FV, por lo cual se requieren estudios que profundicen en este tema. Para diseñar la carga de viento aplicada deben considerarse

diversos factores, como la inclinación, las dimensiones y la altura del panel, la exposición aguas arriba y los ángulos de ataque del viento.

La literatura especializada ha reportado estudios de carga de viento en paneles FV montados en el suelo o sobre techos de edificios. Existen ejemplos representativos de estos estudios y en este artículo se presentan algunos de ellos.

Uno de los primeros estudios fue realizado por Miller y Zimmerman (1981), quienes analizaron la carga de viento en un parque fotovoltaico a través de mediciones en un modelo de túnel de viento. Estos autores concluyeron que los coeficientes de presión adimensionales eran independientes del número de Reynolds. También observaron una diferencia considerable entre los coeficientes normales de fuerza en flujos uniformes y no uniformes. Además, propusieron el uso de barreras y espiras para reducir la fuerza del viento sobre los paneles FV ubicados en el borde o esquina del parque FV.

En las últimas décadas se han desarrollado múltiples estudios de cargas de viento en paneles FV montados en el techo a través de ensayos en túnel de viento (Aly y Bitsuamlak 2013b, Bienkiewicz y Endo 2009, Bronkhorst et al. 2010, Ginger et al. 2011, Radu y Axinte 1989, Radu et al.

¹ Autor de Correspondencia:

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, CUBA
E-mail: alo@civil.cujae.edu.cu



1986, Stathopoulos et al. 2015, Stathopoulos et al. 2014, Stenabaugh et al. 2015, Wood et al. 2001), mediciones a escala real (Geurts y Blackmore, 2013) y simulaciones numéricas (Banks 2013, Bienkiewicz y Endo 2009, Bronkhorst et al. 2010). Una revisión de la literatura realizada por Stathopoulos et al. (2012) muestra aspectos detallados de algunos de estos trabajos. Sin embargo, pocos estudios informan el efecto de la carga de viento sobre los paneles FV montados en suelo a través de ensayos en túnel de viento (Abiola-Ogedengbe et al. 2015, Aly y Bitsuamlak 2013a, Stathopoulos et al. 2014), propósito de este trabajo.

Aly y Bitsuamlak (2013a) analizaron la carga de viento en paneles solares montados en el suelo a diferentes escalas geométricas, por medio de ensayos experimentales en un túnel de viento y el análisis numérico con CFD (dinámica de fluidos computacional). Las dimensiones del panel a escala real eran de 1,336 m x 9,44 m. Se ensayaron con escalas de 1:50, 1:30, 1:20, 1:10, 1:5, con ángulos de inclinación de 25° y 40° para cuatro perfiles de viento y dirección del viento de 0° en el túnel de viento. Los resultados de estos ensayos muestran que la media de los coeficientes de carga no se vieron significativamente afectadas por el tamaño del modelo, mientras que la desviación estándar y los coeficientes de carga máxima variaron de acuerdo al tamaño del modelo y al contenido espectral del flujo de ensayo. Sin embargo, estos investigadores señalan que los valores máximos de 3-s (tres segundos) de los coeficientes normales de fuerza fueron similares en todas las escalas utilizadas con el modelo (1:30, 1:20, 1:10, 1:5), excepto con el modelo a escala de 1:50, puesto que su configuración estaba muy cerca del suelo.

Stathopoulos et al. (2014) recopiló varios experimentos en túnel de viento realizados el año 2014 en paneles FV montados en el suelo y en techos planos de edificios. Las dimensiones del panel modelo fueron de 129 mm x 28 mm, considerando una escala geométrica de 1:200 para su construcción. El modelo se probó con distintas inclinaciones de ángulo (20°, 30°, 40° y 45°) para un rango de la dirección del viento de 0° a 180° a intervalos de 15°. Los autores concluyeron que la dirección del viento que arroja los valores más altos de coeficientes de presión es de 135° (viento que ataca la esquina superior del panel). Con respecto a las variaciones de la inclinación de los paneles ubicados en el suelo, su investigación (Stathopoulos et al., 2014) destaca que una mayor inclinación del panel produce una mayor succión, lo que implica valores más altos de coeficientes de presión. En su trabajo mencionan que el efecto de la inclinación del panel sólo es significativo para la dirección crítica del viento. Asimismo, ellos proporcionaron coeficientes de presión neta, que fueron simplificados para el diseño de los paneles solares.

Abiola-Ogedengbe et al. (2015) realizaron experimentos en túnel de viento con un modelo de panel FV de 1:10 ubicado en el suelo, considerando cuatro direcciones diferentes del viento. Las dimensiones del modelo eran de 730 mm x 249 mm y se probó con inclinaciones de ángulo de 25° y 40°, con exposiciones de viento uniformes y a campo abierto. Los resultados de este estudio muestran una distribución simétrica de la presión alrededor del plano medio de la superficie del modelo para direcciones del viento de 0° a 180° y una distribución asimétrica con direcciones del viento de 30° y 150°. Estos investigadores obtuvieron valores más altos en las magnitudes de presión al aumentar la inclinación del panel. También observaron que las

magnitudes medias de presión eran más altas bajo condiciones de exposición de viento suave que bajo exposición a campo abierto.

La simulación numérica es una de las alternativas para obtener coeficientes de presión en paneles FV autónomos montados en suelo (Bitsuamlak et al. 2010, Shademan et al. 2014). Aun cuando esta técnica no se aplica en este trabajo, los resultados de esos estudios son interesantes y ayudan a comprender mejor el comportamiento de la distribución de la presión en los paneles FV. Bitsuamlak et al. (2010) investigaron los efectos del viento en paneles FV autónomos montados en el suelo con inclinación de 40° para tres ángulos de ataque (0°, 30° y 180°). Se utilizaron mediciones experimentales a escala real para validar los resultados de la dinámica de fluidos computacional (CDF, en inglés). Los autores que trabajaron en esta investigación (Bitsuamlak et al. 2010) informan que los valores más altos de todas las cargas de viento corresponden al ángulo de ataque del viento de 180°. Shademan et al. (2014) realizaron simulaciones CDF para predecir las cargas de viento en paneles FV autónomos y en matrices de paneles FV. Se estudiaron los efectos de la separación lateral entre subpaneles y la distancia al suelo sobre la carga de viento del panel autónomo, el cual presenta una inclinación de 45°. Las simulaciones se realizaron considerando un rango de dirección del viento de 0° a 180° a intervalos de 30°. Sus resultados muestran que en el panel autónomo las fuerzas aerodinámicas máximas se producen en la dirección del viento de 0° y 180°. Los autores (Shademan et al. 2014) también reportan que el introducir separaciones entre los subpaneles cambia significativamente la estructura del flujo en la zona de la estela aerodinámica. Ellos señalan además que el aumento de la distancia al suelo produce una mayor carga de viento promedio sobre la estructura.

Las normas y códigos de viento no se refieren de manera específica a la carga de viento que actúa sobre los paneles solares, por lo que podrían diseñarse como toldos. El estudio de varias normas y códigos (AS/NZS1170.2 2011, ASCE7-10 2010, CIRSOC-102 1992, EN1991-1-4 2004, NBR6123 1988, NC-285 2003) evidencia un amplio espectro de distribuciones de presión y coeficientes de presión para este caso. Las normas norteamericana (ASCE7-10 2010) y australiana (AS/NZS1170.2 2011) recomiendan dos valores de coeficientes de presión para el panel, uno para la parte inferior y otro para la parte superior. El Eurocódigo (EN1991-1-4 2004) propone dividir el área del panel en tres zonas: el centro y los costados del panel, cada una con distintos valores de coeficiente de presión. Las normas de Cuba (NC-285 2003), Brasil (NBR6123 1988) y Argentina (CIRSOC-102 1992) recomiendan una distribución trapezoidal de la presión. Además de las diferentes distribuciones de presión, los valores de los coeficientes de presión también difieren entre las normas, lo que conlleva una gran imprecisión en el diseño de los paneles (López Llanusa et al. 2014).

La falta de cláusulas de diseño en las normas y códigos relativos a la carga de viento y el reducido número de estudios en la literatura especializada indican la necesidad de realizar nuevos estudios sobre la carga de viento en paneles FV montados en el suelo. Este artículo presenta un estudio experimental de la carga de viento en un panel FV autónomo montado en el suelo en un túnel de viento. El modelo se probó con ángulos de inclinación de 15° y 23° en diferentes direcciones de ataque del viento a campo abierto. Se obtuvieron las características detalladas de la distribución

de presión de los coeficientes de carga máximos y medios sobre la superficie de los paneles. Las cargas máximas se obtuvieron con el método de 3-s (tres segundos) y también se utilizó el enfoque de promedio de áreas.

2. Descripción del ensayo experimental

En este estudio, el ensayo experimental se realizó de acuerdo con los requisitos definidos por Kopp y Banks (2012); aun cuando estos aluden específicamente a matrices solares montadas en techo, también se pueden aplicar a los paneles FV montados en suelo.

2.1 Modelo

El modelo reducido del panel FV se construyó según los datos recopilados de un módulo FV a escala real (prototipo) y se trata de una forma muy frecuente utilizada en los parques solares cubanos instalados en el suelo. Las dimensiones generales del módulo FV son de 5,1 x 5,3 metros; está compuesto por 20 paneles FV individuales de 1,00 m x 1,325 m en una matriz de 4x5. El prototipo consta de una estructura de cuatro patas con marco y puntales de acero de 80 mm sobre los cuales van instalados los paneles, según se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Parque solar fotovoltaico en Cuba (prototipo)

El modelo del panel FV se construyó a una escala geométrica de 1:10, considerando la independencia de los coeficientes de presión del número de Reynolds, los materiales adecuados para la construcción del modelo, el bloqueo del túnel de viento y un sistema apropiado de válvulas de presión, con el objeto de detallar las distribuciones de las presiones. En la Figura 2, se muestran las dimensiones del modelo reducido. El índice máximo de bloqueo calculado para el modelo es igual a 2%, por lo que no se hicieron correcciones. El modelo permite ángulos de inclinación del panel de 15° y 23°. Se utilizó aluminio y acrílico para construir el modelo, garantizando la rigidez adecuada para el ensayo. El modelo FV se montó con cuatro láminas de acrílico de 10 mm de espesor con probetas de

presión flexibles en su interior. La estructura del modelo se diseñó tomando en cuenta que todas las probetas de presión se instalaran sin modificar el flujo del viento. Los tubos se introdujeron dentro de las patas y de los puntales, según se aprecia en la Figura 3a. La superficie del panel se dividió en cuatro secciones simétricas, en las cuales se distribuyeron 28 válvulas de presión con diámetro interno de 1 mm en las caras superior e inferior, tal como se muestra en la Figura 3b. Cada válvula de presión ubicada en el lado superior e inferior se encuentra sobre la misma recta normal de la cara. Se incrementó la cantidad de válvulas de presión en las esquinas del panel con el objeto de captar los efectos de los vórtices producidos en esta zona.

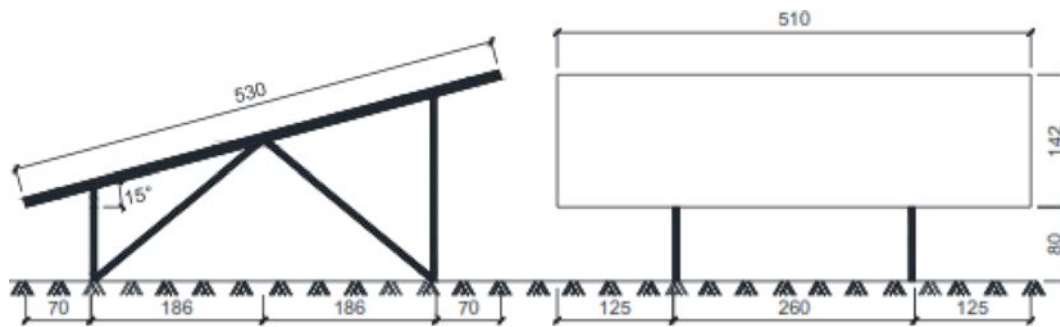


Figura 2. Modelo reducido a escala geométrica de 1:10 con inclinación de 15° (dimensiones en mm)

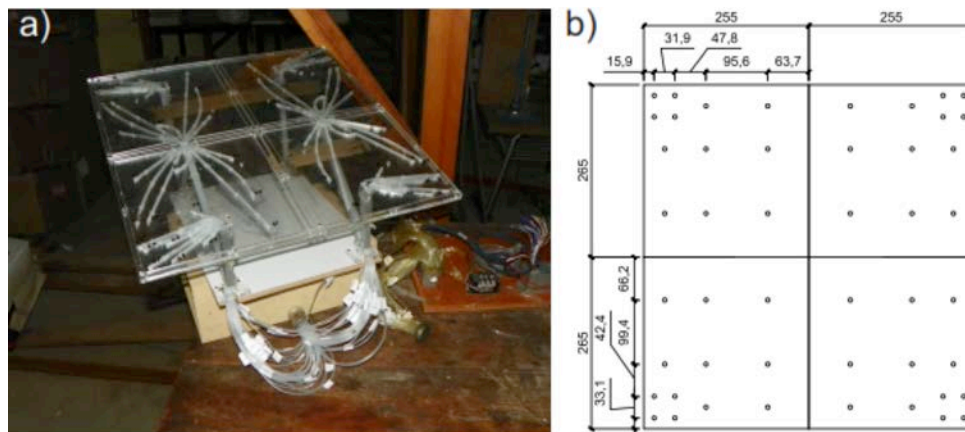


Figura 3. a) Fotografía de las válvulas de presión del modelo de panel FV; b) Diagrama de las válvulas de presión en el lado superior del panel. Cada superficie del modelo tiene 56 válvulas, señaladas por los círculos

2.2 Instalaciones y procedimiento del ensayo

El túnel que mide la capa límite atmosférica, utilizado en el ensayo descrito a continuación, está ubicado en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Universidad de la República (UDELAR) en Montevideo, Uruguay. El túnel posee una cámara de ensayo de 17 m de largo y una sección de 2,25 m de ancho por 1,8 m de alto. En las referencias se describen otras características de este túnel (Cataldo y Durañona, 1998).

El modelo instrumentado se instaló sobre el suelo del túnel, en una mesa giratoria en la sección de ensayo de la parte de abajo del túnel de viento, y se conectó a los dispositivos de los escáneres de presión SCANIVALVE ZOC33/64 Px. El escáner se conectó a dos canales independientes del sistema de recolección de datos y cada canal obtuvo los datos de presión de las 56 probetas de presión. Las mediciones de presión se registraron a una frecuencia de muestreo de 120 Hz y un tiempo de muestreo

de 8,22 μ s. Se recogió un total de 27.000 datos, los cuales se procesaron digitalmente.

Los ensayos se realizaron considerando el perfil de viento en una exposición a campo abierto. La Figura 4a muestra que el perfil medido se aproxima bastante al perfil medio de viento descrito en la ley logarítmica (Davenport, 1967) expresada por la ecuación (1).

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{K} \ln \left(\frac{z}{Z_0} \right) \quad (1)$$

Donde $\bar{U}(z)$ representa la velocidad media del viento a la altura z , u^* es la velocidad de fricción, K es el coeficiente von Kármán, de aproximadamente 0,4, $Z_0 = 0,5 \text{ cm}$ es la rugosidad para una exposición a campo abierto a la escala del modelo. La intensidad de la turbulencia fluctuó entre 19% y 23% a lo largo del panel (ver Figura 4b). Los perfiles de velocidad del viento e intensidad de la turbulencia se

SPANISH VERSION.....

midieron con un anemómetro de hilo caliente IFA100 de TSI Company U.S. Para el ensayo se estableció una velocidad del viento de 20 m/s. La Figura 4c muestra los espectros de fluctuación de velocidad en la altura media del panel y el espectro coincide con el de von Kármán. En todos los ensayos, las mediciones se registraron durante 3,7 minutos. El modelo asumió una tormenta a escala real de alrededor de 10 minutos con una velocidad del viento de 45 m/s y una altura de 10 m. Durante los ensayos se utilizó un tubo de Pitot para medir la velocidad del flujo libre a una altura no

alterada sobre el modelo. La Figura 5 muestra el esquema del experimento realizado en el túnel de viento para este estudio. Los ensayos se realizaron con una dirección del viento de 0° a 180° a intervalos de 45° debido a la simetría del modelo FV, tal como se indica en la Figura 6.

Según la escala aplicada en el prototipo, este flujo corresponde a una exposición de terreno rural con una longitud de rugosidad de 5 cm y una escala de velocidad de 33,29 m/s.

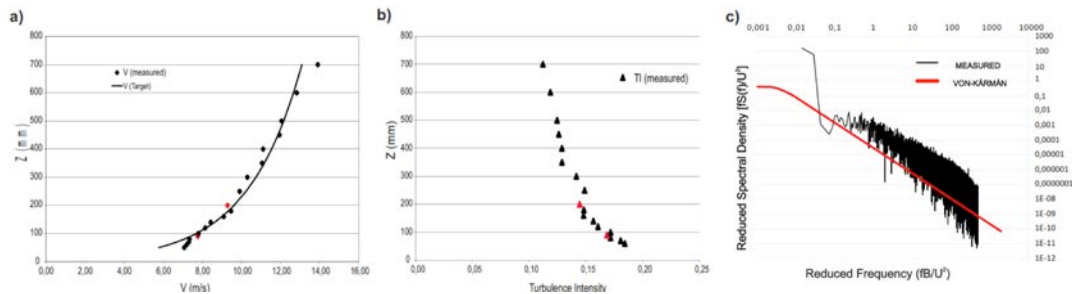


Figura 4. a) Perfil de velocidad del viento, b) Perfil de intensidad de la turbulencia, c) Espectro de las frecuencias en el túnel de viento

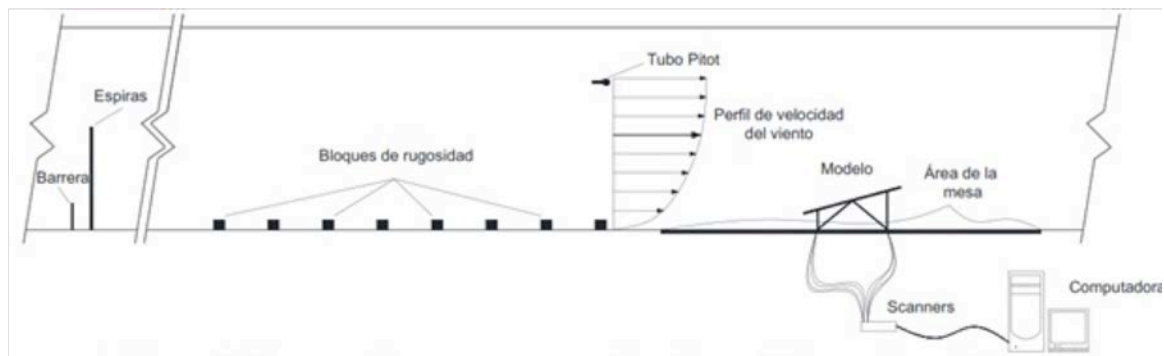


Figura 5. Esquema del experimento en el túnel de viento

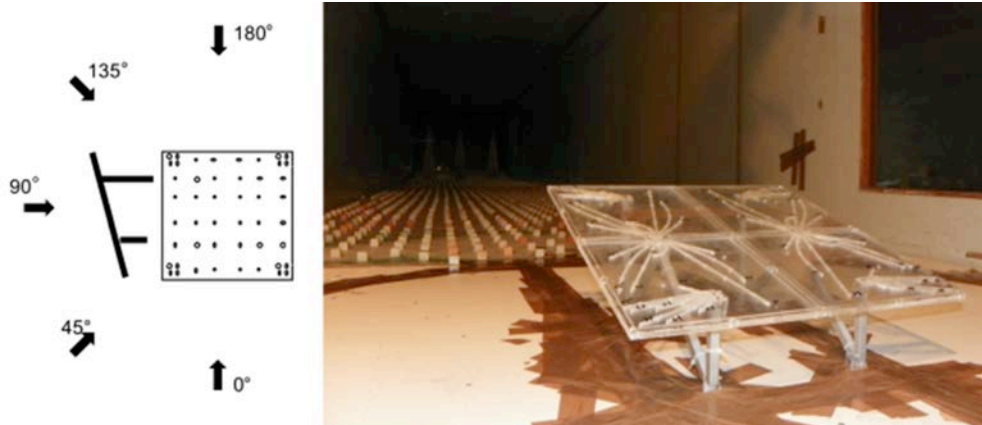


Figura 6. Panel FV ensayado con cinco ángulos de ataque del viento en el túnel de viento

Se asume una pequeña escala de turbulencia de alrededor de 0,2 m para esta estructura a escala del prototipo, es decir, de 1/10 de la altura. A escala del modelo, esta escala representaría una frecuencia de 450 Hz. Este valor se encuentra dentro del subrango inercial del espectro.

3. Resultados y discusión

3.1 Coeficientes de presión

Se procesaron las mediciones de presión de las superficies superior e inferior del panel para calcular los coeficientes de presión neta en función del tiempo histórico $C_{pi(net)}(t)$ en cada válvula de presión por medio de la ecuación 2.

$$C_{pi(net)}(t) = \frac{P_i^U(t) - P_i^L(t)}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad (2)$$

Donde $P_i^U(t)$ y $P_i^L(t)$ son las presiones medidas en las superficies superior e inferior de la válvula i respectivamente, ρ es la densidad del aire, V_{ref} es la velocidad media del viento a la altura de referencia, que fue tomada a la altura media del modelo inclinado. Los coeficientes de presión neta se definen como negativos cuando actúan en la dirección ascendente y como positivos cuando actúan en la dirección descendente. Se obtuvieron los coeficientes de carga media $C_{p,med}$ y máxima $C_{p,max}$ de los coeficientes de presión neta en función del tiempo histórico. Para obtener los coeficientes de carga máxima 3-s, el historial de tiempo de los coeficientes de presión neta se dividió en varios intervalos de 3 segundos, en tiempo real, con un número W de muestras para cada intervalo, donde se puede observar un valor máximo y mínimo de presión neta $p(máx o mín)3s$, respectivamente. El valor máximo de 3-s de los coeficientes de presión se puede calcular como la suma del valor máximo o mínimo de cada intervalo dividido por el número total de intervalos.

$$C_{p(máx)3s} = \frac{p(máx o mín)3s}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad (3)$$

$$p(máx)3s = máx o mín \{ \langle p(neto) \rangle_{3s,i} \}_{i=1 a N}$$

La imagen de la Figura 7 muestra los valores medios y máximos (3-s) de la distribución de coeficientes de presión neta, asociados a una inclinación del panel de 15° y 23° para cada dirección del viento ensayada. Se observa que las distribuciones de la presión son similares en ambas inclinaciones del panel; sin embargo, los valores más altos de los coeficientes de presión neta se encontraron en la inclinación del panel de 23°, lo que concuerda con estudios anteriores (Abiola-Ogedengbe et al. 2015, Stathopoulos et al. 2014), que establecen que una mayor inclinación del panel arroja valores más altos de coeficientes de presión.

Como se puede ver en la Figura 7, la distribución de la presión neta varía según el ángulo de ataque del viento. Con ángulos de ataque del viento de 0° y 45°, el panel se encuentra totalmente bajo presión descendente, mientras que con ángulos de 135° y 80°, el panel está completamente bajo presión ascendente. Los gráficos de la dirección del viento de 0° y 180° muestran una distribución simétrica de la presión alrededor del eje medio que concuerda con la dirección del viento; estos resultados son congruentes con los estudios desarrollados por Abiola-Ogedengbe et al. (2015) y (Shademan et al., 2014). Las distribuciones de los coeficientes de presión neta para la dirección del viento de 0° muestra los valores más altos en la parte inferior del panel FV, donde los valores disminuyen hacia el borde superior. Con respecto a la dirección del viento de 180°, se produce el fenómeno contrario, como se observa en la Figura 7e. Por otro lado, en la Figura 7c se observa que los coeficientes de presión neta son prácticamente cero para la dirección del viento de 90°, debido a la misma distribución de presión en las superficies superior e inferior del panel. En la dirección oblicua del viento de 45° y 135°, los mayores valores de los coeficientes de presión neta se producen en la esquina del panel y ellos disminuyen hacia la esquina contraria de la dirección de

ataque del viento, tal como se puede apreciar en las Figuras 7b y 7d.

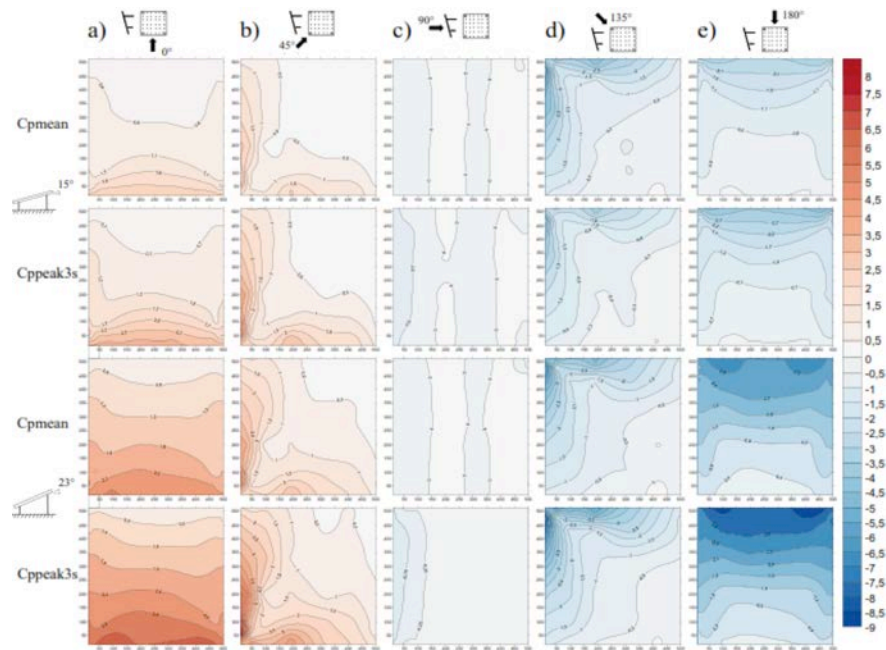


Figura 7. Distribución de los coeficientes medios y máximos de presión neta para una inclinación del panel FV de 15° y 23° y cinco ángulos de ataque del viento

La variación de la inclinación del panel de 15° a 23° provocó un aumento de 2,48 a 2,83 del valor más alto de la presión promedio y una variación en la válvula de presión donde se obtienen estos valores; sin embargo, estos siempre se obtienen en el borde de ataque del viento. Con ángulos de ataque del viento de 0° y 180°, los aumentos de la presión se elevan entre 1% y 14% cuando el ángulo de inclinación varía de 15° a 23°, mientras que para los ángulos de ataque del viento de 45° y 135°, estos se encuentran entre 30% y 54%. Si se aumenta a 23°, se produce un mayor bloqueo local; el flujo presenta una mayor curvatura, un mayor aumento de la velocidad local y una mayor disminución de la presión en el extremo del panel.

En el caso de una variación del ángulo de ataque del viento de 0° a 45°, la presión máxima se eleva de 3,70 a 5,92 para una inclinación de 23° y de 3,47 a 3,87 para una inclinación de 15°. Respecto del ángulo de ataque del viento de 180° a 35°, los valores de succión varían de -4,20 a -8,76 para una inclinación de 23° y de -4,15 a -5,96 para una inclinación de 15°. Como se puede observar, se produce un aumento significativo en los valores de presión cuando el ángulo de ataque del viento se modifica, independientemente de la inclinación del panel. Aunque los valores más altos se

obtienen en los ángulos de ataque de 45° y 135°, ellos se ubican en el borde de ataque. Por otro lado, en los ángulos de 0° y 180°, los valores se ubican en un área más extensa.

3.2 Coeficientes de forma locales

Los coeficientes de forma locales se utilizan para calcular cargas de viento en estructuras a escala real. Se pueden calcular sumando varios coeficientes de presión individuales, que se multiplican por las zonas tributarias (ver ecuación 4). Aly (2013) definió la zona tributaria como el área que rodea la válvula de presión donde se asume que la presión es igual. La Figura 8 muestra las zonas tributarias seleccionadas para cada válvula del modelo de panel FV presentado en este trabajo.

$$Cf = \frac{\sum_i^n C_{p(máx\ o\ mín)3s} * A_i}{\sum_i^n A_i} \quad (4)$$

Donde Cf es el coeficiente de forma local para cada zona local, $C_{pi,máx3s}$ es el coeficiente máximo de presión neta 3-s de la válvula i , n es el número total de válvulas de presión en cada área local, A es la zona tributaria para cada válvula i .



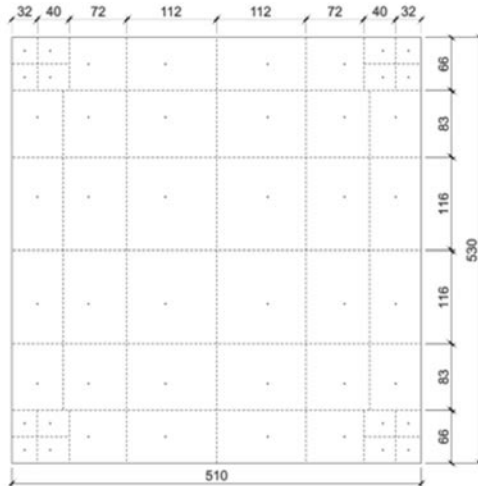


Figura 8. Zonas tributarias del modelo de panel FV. Las líneas punteadas representan las barreras tributarias y los círculos representan las válvulas de presión (mm)

La Figura 9 muestra los coeficientes de forma locales máximos con ángulos de dirección del viento de 0°, 45°, 135° y 180°. Los coeficientes se calcularon para áreas asignadas que se definieron a partir de las formas de las distribuciones de los coeficientes máximos de presión neta. Los valores máximos positivos de C_f (descendentes) son de

2,83 y 3,78 para inclinaciones del panel de 15° y 23°, respectivamente, y corresponden a una dirección del viento de 0°. Los valores máximos negativos de C_f (ascendentes) son de -3,43 y -5,03 para inclinaciones del panel de 15° y 23°, respectivamente, y corresponden a una dirección del viento de 135°.

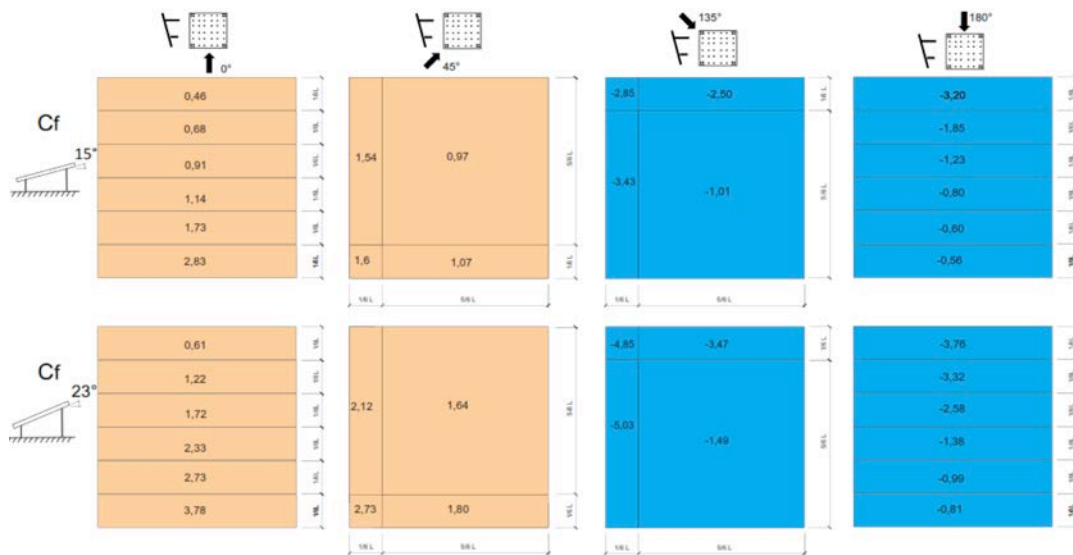


Figura 9. Coeficientes de forma locales máximos con ángulos de dirección del viento de 0°, 45°, 135° y 180°

En la bibliografía consultada se pueden encontrar diversos trabajos de investigación (Ginger et al. 2011, Stathopoulos et al. 2014) que proponen un valor del coeficiente de forma para este tipo de estructuras. Este artículo sugiere dividir el panel solar en varias zonas, tomando en cuenta el comportamiento de la gradiente de la presión neta en su superficie.

El proponer un solo coeficiente de forma para la dirección del viento, por ejemplo de 180°, implicaría subestimar las presiones en la parte superior del panel y, al mismo tiempo, sobreestimar la parte inferior.

Además, se sugiere realizar un análisis de las distintas direcciones del viento, puesto que los patrones varían. Y en el caso de asumir un solo valor, los bordes de ataque, que son los que están sometidos a mayores presiones, no estarían incluidos en este tipo de análisis.

Todo lo anterior significa que, en la estructura de soporte del panel, sin duda se generan diferentes fuerzas que debieran considerarse como parte integral del diseño.

4. Conclusión

Este estudio investiga las cargas de viento en los paneles fotovoltaicos y sus principales conclusiones se pueden resumir de la siguiente manera:

Los patrones de distribución de la presión neta son similares tanto para las inclinaciones del panel de 15° como de 23°, lo que permite dividir el panel en varias secciones para obtener los coeficientes de forma.

Según estudios anteriores mencionados más arriba, al aumentar la inclinación del panel se obtienen valores más altos en los coeficientes de presión, tanto para la presión ascendente como descendente.

Al variar el ángulo de 15° a 23°, los aumentos de los coeficientes de presión son críticos en los ángulos de 0° y 180°, con un porcentaje de aumento total aproximado del 57% y 61%, respectivamente.

Los mayores valores del coeficiente de presión se ubican en la capa límite de los paneles en un área muy pequeña. Estos valores máximos de los coeficientes de presión se observaron en los ángulos de ataque del viento de 45° y 135°, lo cual debiera tomarse en cuenta por posibles daños locales.

5. Referencias

- Abiola-Ogedengbe A., Hangan H., Siddiqui K. (2015)**, Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module. *Renewable Energy*, 78, pp. 657-665.
- Aly A. M. (2013)**, Proposed approach for determination of tributary areas for scattered pressure taps. *Wind and Structures*, 16(6), pp. 617-627.
- Aly A. M., Bitsuamlak G. (2013a)**, Aerodynamics of ground-mounted solar panels: test model scale effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, pp. 250-260.
- Aly A. M., Bitsuamlak G. (2013b)**, Wind-induced pressures on solar panels mounted on residential homes *Journal of Architectural Engineering*, 20(1), pp. 04013003.
- AS/NZS1170.2 (2011)**, Standart: Structural Design actions, Part 2: Wind Actions. in, Australian/New Zeland: Australian/New Zeland.
- ASCE7-10 (2010)**, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. in, USA: American Society of Civil Engineers.
- Banks D. (2013)**, The role of corner vortices in dictating peak wind loads on tilted flat solar panels mounted on large, flat roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, Part A(0), pp. 192-201.
- Bienkiewicz B., Endo M. (2009)**, Wind considerations for loose-laid and photovoltaic roofing systems. in *Structures Congress, Austin, Texas*. pp. 2578-2587.
- Bitsuamlak G. T., Dagnew A. K., Erwin J. (2010)**, Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD. in *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering, Chapel Hill, North Carolina, USA, May*. pp. 23-27.
- Bronkhorst A., Franke J., Geurts C., Bentum C. v., Grepinet F. (2010)**, Wind tunnel and CFD modelling of wind pressures on solar energy systems on flat roofs. in *5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina, USA, 23th-27th*.
- Cataldo J., Durañona V. (1998)**, Open Boundary-Layer Wind Tunnel Built in Uruguay. in Loredou Souza, A. M., (ed.) *Jubileum Conference on "Wind Effects on Buildings and Structures, Gramado, Brasil*.
- CIRSOC-102 (1992)**, Acción del viento sobre las construcciones. in, Argentina.
- Davenport A. G. (1967)**, The dependence of wind loads on meteorological parameters. in *International Research Seminar: Wind effects on Buildings and Structures, Ottawa*.
- EN1991-1-4 (2004)**, Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions. in, Europe.
- Geurts C., Blackmore P. (2013)**, Wind loads on stand-off photovoltaic systems on pitched roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, Part A(0), pp. 239-249.
- Ginger J., Payne M., Stark G., Sumant B., Leitch C. (2011)**, *Investigation on Wind Loads Applied to Solar Panels Mounted on Roofs*: James Cook University, Townsville, Australia.
- Kopp G. A., Banks D. (2012)**, Use of the wind tunnel test method for obtaining design wind loads on roof-mounted solar arrays. *Journal of Structural Engineering*, 139(2), pp. 284-287.
- López Llanusa A., Elena Parnás V. B., León Finalé E. D. (2014)**, Estudio de coeficientes de forma en paneles solares frente a la acción del viento. in *17 Convención de Ingeniería y Arquitectura, Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba*.
- Miller R. D., Zimmerman D. K. (1981)**, *Wind Loads on Flat Plate Photovoltaic Array Fields*. Boeing Engineering and Construction Company: Seattle, Washington, April 1981.
- NBR6123 (1988)**, ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas : Forças devidas ao vento em edificações. in, Brasil.



- NC-285 (2003), Norma Cubana: Carga de viento. Método de cálculo. in: Cuba.
- Radu A., Axinte E. (1989), Wind forces on structures supporting solar collectors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 32(1), pp. 93-100.
- Radu A., Axinte E., Theohari C. (1986), Steady wind pressures on solar collectors on flat-roofed buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 23(0), pp. 249-258.
- Shademan M., Barron R., Balachandar R., Hangan H. (2014), Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(8), pp. 728-738.
- Stathopoulos T., Xypnitou E., Zisis I. (2015), Wind Loads on Rooftop Solar Panel Systems: A Contribution to NBCC
- Stathopoulos T., Zisis I., Xypnitou E. (2012), Wind Loads on Solar Collectors: A Review. in *Structures Congress 2012*. pp. 1169-1179.
- Stathopoulos T., Zisis I., Xypnitou E. (2014), Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 125(0), pp. 195-206.
- Stenabaugh S. E., Iida Y., Kopp G. A., Karava P. (2015), Wind loads on photovoltaic arrays mounted parallel to sloped roofs on low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, pp. 16-26.
- Wood G. S., Denoon R. O., Kwok K. (2001), Wind loads on industrial solar panel arrays and supporting roof structure. *Wind and Structures*, 4(6), pp. 481-494.

