

Cimentación para parques solares considerando coeficientes de reducción de la carga de viento

Solar park foundation solutions considering reduction coefficients for wind load

Alejandro López Llanusa^(*), Ana María Mederos Barrios^(**), Willian Cobelo Cristiá^(*), Vivian Elena Parnás^(*)

RESUMEN

La necesidad de aprovechar la energía solar ha llevado a muchos países a construir grandes parques fotovoltaicos. Uno de los principales aspectos aún sin resolver es cómo considerar las presiones de viento sobre los paneles que conforman el parque, lo cual ha motivado varias investigaciones. En este trabajo se realiza el estudio del campo de presiones producido por el viento sobre paneles fotovoltaicos de acuerdo con su posición dentro del parque y se realiza el estudio de la solución de cimentación de acuerdo con las presiones de viento. Para ello se emplea un modelo, a escala reducida, en túnel de viento. Los resultados permiten corroborar que los valores de presiones de viento sobre un panel disminuyen al encontrarse en las filas interiores de un parque, dependiendo su posición. Como consecuencia de las variaciones de las presiones, las soluciones de cimentación varían y permiten una disminución del consumo de materiales.

Palabras clave: Coeficientes de presión; panel fotovoltaico; direcciones de viento; túnel de viento; cimentaciones

ABSTRACT

The need to take advantage of solar energy has led many countries to build large photovoltaic parks. One of the main aspects still unresolved is how to consider the wind pressures on the panels that make up the park, which has motivated several investigations. In this work, the study of the field of pressures produced by the wind on photovoltaic panels is carried out according to their position within the park. Pressures have been acquired through a reduced scale model tested in a wind tunnel. A comparative study of the foundation solution is carried out according to the wind pressures obtained. The results show that values of wind pressures on a panel decrease when they are in the interior rows of a park, depending on their position. As a consequence of pressure variations, a reduction in the consumption of materials of foundation solutions can be achieved.

Keywords: pressure coefficients; solar panel; wind directions; wind tunnel; foundations

(*) Doctor Ingeniero. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana (Cuba).

(**) Ingeniera. Proyectista. Empresa TRANSPROY, La Habana (Cuba).

Persona de contacto/Corresponding author: lopezllanusa@gmail.com (A. López/ A. Mederos, W. Cobelo, V. Elena)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9938-837x> (A. López); <http://orcid.org/0000-0002-9362-2938> (A. Mederos); <http://orcid.org/0000-0003-1532-8167> (W. Cobelo); <http://orcid.org/0000-0001-7912-7570> (V. Elena)

Cómo citar este artículo/Citation: Alejandro López Llanusa, Ana María Mederos Barrios, Willian Cobelo Cristiá, Vivian Elena Parnás (2022). Cimentación para parques solares considerando coeficientes de reducción de la carga de viento. *Informes de la Construcción*, 74(567): e453. <https://doi.org/10.3989/ic.84538>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 20/10/2020
Aceptado/Accepted: 27/01/2022
Publicado on-line/Published on-line: 15/09/2022

1. INTRODUCCIÓN.

Las energías renovables y la energía solar fotovoltaica, de manera específica, se han convertido en una opción frecuente para el desarrollo de los países. Los parques solares fotovoltaicos se han construido para aprovechar esta energía, en estos se disponen paneles en arreglos de filas y columnas ocupando áreas de considerable dimensión. Si bien los códigos internacionales exponen criterios para determinar las presiones de viento sobre los paneles aislados (canopi), el estudio de varias normativas por López, A., León, E. D., Elena, V. B., y Cataldo, J. (1) indica que no se ha llegado a un consenso sobre los valores a considerar ni la forma de la distribución de presiones sobre los mismos. Por otra parte, los códigos y normas no contemplan la posición de los paneles dentro del parque, lo cual implica variaciones del flujo de aire por efecto de vecindad, la cual produce una variación de las presiones de viento sobre los paneles dependiendo de su ubicación. En este contexto, el uso de túneles de viento como herramienta de trabajo ha sido una de las alternativas más empleadas.

Los estudios de la carga de viento, o más específicamente, sobre la determinación del campo de presiones en los paneles fotovoltaicos colocados sobre el terreno, han sido una línea de investigación que ha tomado auge en los últimos 10 años, aunque desde la década de los 80 se registra el trabajo pionero de Miller y Zimmerman (2). Estudios recientes (3-15) desarrollados en túnel de viento con flujo no uniforme (turbulento) mediante la correcta simulación de la capa límite o a través de técnicas computacionales de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés), han centrado su interés en la influencia de determinados aspectos en la obtención del campo de presiones sobre los paneles. Entre los aspectos estudiados se pueden mencionar las direcciones de incidencia del viento sobre las estructuras, las escalas geométricas de ensayo, la influencia del efecto de bloqueo de las estructuras en la sección de ensayo del túnel, las inclinaciones de los paneles, la separación entre filas y columnas en el caso de los parques, principalmente.

En cuanto a las direcciones de incidencia del viento sobre los paneles individuales y parques, varios estudios han llegado a conclusiones importantes. Stathopoulos, Zisis (4), desarrollaron su investigación sobre paneles individuales, estudiaron un intervalo de direcciones de viento de 0° (viento atacando por el borde más bajo del panel) a 180° , ver figura 1 (viento atacando por el borde más alto del panel) con cambios cada 15° y llegaron a la conclusión de que la dirección del viento que produce los mayores valores locales de presión sobre el panel es la de 135° (viento atacando por una de las esquinas más altas del panel).

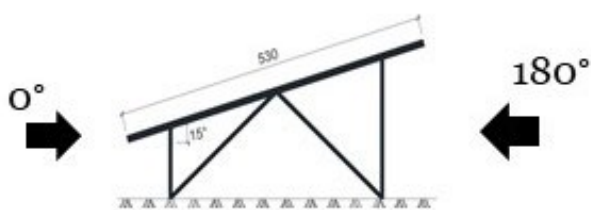


Figura 1. Direcciones de viento de 0° y 180°

Miller y Zimmerman (2), estudiaron en un túnel de viento para el caso de los parques cuatro direcciones de ataque del viento (0° , 45° , 135° y 180°) y demostraron que los efectos de protección sobre las filas de paneles que se encuentran por detrás de la primera que recibe el ataque del viento, resultaron iguales para las direcciones de 0° y 180° . Jubayer y Hangan (10), con el empleo del CFD, estudiaron también el efecto de los ángulos de incidencia del viento en parques fotovoltaicos para las mismas cuatro direcciones de viento (0° , 45° , 135° y 180°) que Miller y Zimmerman (2). Los autores concluyeron que, para las direcciones de 0° y 180° , las filas de la dos a la cinco se encontraron en la estela de la primera fila, lo que significa que hay un efecto de protección de esta sobre las restantes. Para las direcciones de viento 45° y 135° todos los paneles ubicados en las filas extremas en contacto directo con el viento de ataque, experimentaron vórtices de esquina, concluyendo que para estas direcciones no hay efecto de protección en los paneles extremos. La primera fila experimentó las cargas máximas de viento (presión o succión, en dependencia de la dirección de ataque) para las cuatro direcciones ensayadas (0° , 45° , 135° y 180°), en las filas de la dos a la cinco, las presiones locales del viento fueron mayores para las direcciones de 45° y 135° en comparación con las direcciones de 0° y 180° . Otra de las variables que estudiaron fue como se modificaba el campo de presiones de los paneles al variar la separación entre filas y columnas, quedando demostrado que la primera fila a barlovento protege a las otras filas lo que genera que las presiones sobre estas sean inferiores.

Las escalas geométricas de los modelos de los paneles fotovoltaicos construidos en túnel de viento para estudiar el campo de presiones actuantes, ha sido uno de los aspectos de investigación menos tratados; sin embargo, es un elemento muy importante en la obtención de una adecuada simulación de las condiciones a escala real. El trabajo desarrollado por Aly y Bitsuamlak (5) es el único que se encontró dentro de las referencias estudiadas que profundiza en el efecto de las variaciones de las escalas en los resultados experimentales obtenidos. Estos autores analizaron la carga de viento sobre paneles fotovoltaicos sobre el terreno para diferentes escalas geométricas a través de pruebas experimentales en un túnel de viento. Se estudiaron cinco escalas geométricas del panel, 1:50, 1:30, 1:20, 1:10, 1:5. Los resultados mostraron que las presiones medias no se vieron afectadas significativamente por el tamaño del modelo, mientras que la desviación estándar y la carga máxima sí experimentaron variaciones. Este trabajo también evidenció modificaciones considerables en el contenido espectral de la turbulencia del flujo del ensayo.

El número de Reynolds y el efecto de bloqueo fueron algunos de los factores más importantes que incidieron en la determinación de las escalas geométricas según Aly y Bitsuamlak (5). En el estudio realizado por Miller y Zimmerman (2) se demuestra que para estructuras afiladas donde el punto de separación del flujo es fijo, para números de Reynolds mayores de 2×10^4 no se producen cambios significativos en los valores de los coeficientes aerodinámicos. En su estudio utilizaron un valor cercano a 5×10^4 en el túnel de viento, que garantizó una buena semejanza. Estudios más recientes como el de Kopp, Farquhar (16) y Pratt y Kopp (17) utilizaron un número de Reynolds de $1,9 \times 10^5$ para estudiar un modelo con escala geométrica de 1/30 en un túnel de viento. Los autores plantean que con este número de Reynolds se garantizó una apropiada semejanza cinemática; sin embargo, según Aly y Bitsuamlak (5) para edificaciones bajas no hay tanta dependencia del número de Reynolds, como para las edificaciones altas modeladas en túnel de viento. Des-

de la perspectiva de la construcción del modelo y la obtención de los números de Reynolds, es deseable tener un modelo tan grande como sea posible; pero desde el aspecto de la simulación de la capa límite atmosférica, las grandes escalas de los modelos no son usuales, debido a que están limitadas por el tamaño del túnel de viento, debiéndose cumplir que la relación de bloqueo esté por debajo del 5% (18, 19), de lo contrario se necesitan aplicar correcciones a los resultados. La mayoría de los autores tratan de cumplir con este criterio de bloqueo inferior al 5%, aunque algunos autores como Banks (9), han aceptado en sus estudios hasta un 7% sin hacer correcciones.

En el caso del diseño de los parques fotovoltaicos la solución de cimentación es fundamental en el monto de la inversión debido a las succiones que ocasiona el viento sobre los paneles. Los aspectos antes mencionados que intervienen en la determinación de las presiones del viento, principalmente la inclinación del panel y su posición dentro de un parque fotovoltaico, influyen de manera directa en los valores de las reacciones de apoyo y repercuten en el diseño de la cimentación; máxime cuando la estructura de soporte es ligera y al estar sometida a fuertes cargas de viento, se producen succiones, como es el caso parques solares en Cuba.

Este trabajo se propone la obtención del campo de presiones producidas por el viento sobre un panel fotovoltaico dentro de un arreglo de paneles en un parque fotovoltaico en Cuba, con el empleo de un túnel de viento; así como el diseño de soluciones de cimentación de hormigón armado que tengan en cuenta esa diferenciación por posición del panel, tanto para suelos cohesivos como granulares. El trabajo se divide en tres partes: una primera donde se describe el ensayo realizado en túnel de viento para obtener las presiones del viento, una segunda donde se analizan los resultados del ensayo en el túnel y una tercera parte donde se aplican estos resultados en el diseño de variantes de cimentación de hormigón armado para un parque prototipo de 1 MW.

2. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

El modelo a escala reducida fue construido de acuerdo con los paneles a escala real seleccionados como prototipos, representativos de los utilizados en Cuba en los parques fotovoltaicos (figura 2). Las dimensiones generales de un panel son de 5,1 x 5,3 m, compuesto por 20 módulos solares individuales de 1 m x 1,325 m en un arreglo de 4x5 módulos. La estructura soporte de paneles tiene una inclinación de 15° con respecto a la horizontal (suelo) y está diseñada con perfiles UPN 80 que conforman las columnas y los elementos horizontales.



Figura 2. Parque solar fotovoltaico en Cuba (prototipo)

Después de un estudio de análisis dimensional y semejanza, así como funcional (que tuvo en cuenta las características de la instrumentación para no afectar las mediciones del flujo), fue seleccionada una escala geométrica de 1/20 que permitió colocar 12 paneles distribuidos en cuatro columnas y tres filas dentro de la sección de trabajo del túnel de viento como se observa en la figura 3. Se verificó el cumplimiento de las recomendaciones establecidas para este tipo de estudios sobre la relación de bloqueo inferior al 5% (18, 19). En este caso la relación de bloqueo fue de 4%. El material empleado fue acrílico de 5 mm para los paneles instrumentados y planchas de madera de igual espesor para los paneles restantes que no fueron instrumentados. La posición de los paneles instrumentados se varió en función de las exigencias del diseño de experimentos con el objetivo de evaluar la influencia de cinco variables, en las modificaciones del campo de presiones sobre el panel fotovoltaico dentro del parque.

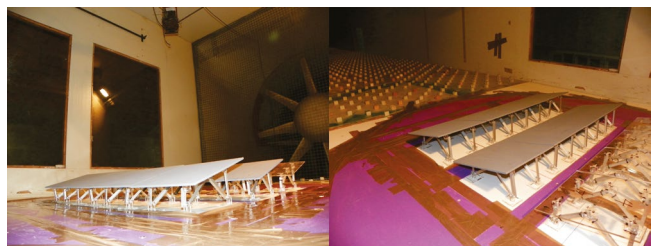
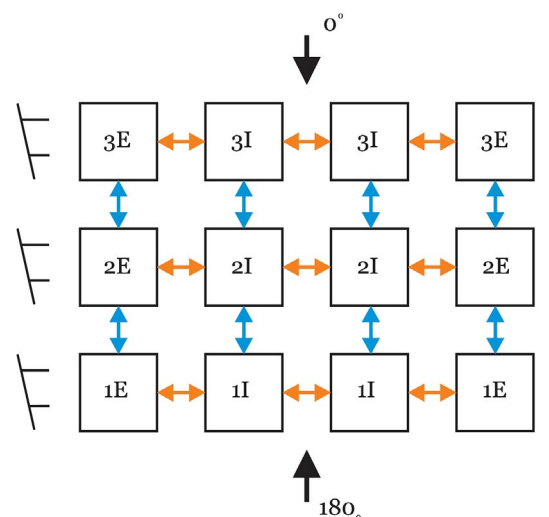


Figura 3. Modelo del parque solar instrumentado para el túnel de viento.

Se realizó un diseño de experimentos factorial con tres variables de tres niveles (separación entre filas, separación entre columnas, posición en las filas en el parque) y dos de dos niveles (colocación en las columnas interior o exterior y la dirección de ataque del viento) (20).



- ✓ Dirección de viento (**0° y 180°**)
- ✓ Posición en las columnas (**Interior y exterior**)
- ✓ Separación entre Columnas (**0, 1 y 2 m**)
- ✓ Separación entre filas (**1, 2 y 3 m**)
- ✓ Posición del Panel (**1ra fila, 2da fila y 3ra fila**)

Figura 4. Esquema del experimento con las variables independientes y los niveles evaluados en cada una de ellas

Se realizó un diseño de experimentos factorial con tres variables de tres niveles (separación entre filas, separación entre columnas, posición en las filas en el parque) y dos de dos niveles (colocación en las columnas interior o exterior y la dirección de ataque del viento). En la figura 4 se presenta la nomenclatura asignada a cada una de las variables dentro del estudio.

2.1. Equipos y procedimientos

El túnel de viento de capa límite atmosférica utilizado presenta una zona de trabajo de 17 m de longitud con una sección de 2,25 m de ancho por 1,80 m de alto. El modelo instrumentado se colocó en la mesa circular rotativa de la sección de prueba del túnel de viento, acoplado a los dispositivos del escáner de presión. El escáner se conectó a dos canales separados en el sistema de adquisición de datos; cada canal adquiere los datos de presión de 48 tubos de presión. Las mediciones de la presión se registraron a una frecuencia de muestreo de 120 Hz y un tiempo de muestreo de 8,22 μ s. Se recogieron un total de 27 000 datos por toma.

De las mediciones se obtuvo una longitud de rugosidad ($Z_0=0,006$ m) a escala del modelo, equivalente a una ($Z_0=0,06$ m) a escala de prototipo, representativas del tipo de terreno: llano, abierto, sin presencia de obstáculos y con baja vegetación, similar a la de la ubicación más frecuente en Cuba. La descripción detallada de toda la simulación de la capa límite atmosférica en el túnel de viento puede obtenerse de estudios previos de (21).

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS PRESIONES DE VIENTO OBTENIDAS

En la figura 5 se observan los resultados del primer experimento. En él se analizó la influencia de la separación entre filas en el campo de presiones del parque. Se analizaron las tres separaciones entre filas propuestas: 1 m (figura 5 a), 2 m (figura 5 b) y 3 m (figura 5 c) para la dirección de ataque del viento de 0° , sin separación entre las columnas del parque, es decir, los cuatro paneles de la fila están unidos. Se definió el experimento de la siguiente manera: en la nomenclatura, es el modelo, el primer número es la posición de las filas, el segundo la separación entre filas y el tercero la separación entre columnas, en este caso igual a cero.

Como se puede apreciar de la figura 5 para los tres casos de separación estudiados, los mayores valores de presión están en la primera fila la cual ofrece protección a la segunda y a la tercera. Para el caso de la separación de 1 m (figura 5a) se produce, por la interacción entre el flujo con la primera fila de paneles, una separación de capa límite generando una estela, región de baja velocidad y elevada turbulencia, en la cual están sumergidos los paneles ubicados corriente abajo. Este fenómeno disminuye al aumentar la separación, como se ve expresado en las figuras 5b y 5c, donde las filas dos y tres presentan un comportamiento similar al de la primera en cuanto a la distribución de las presiones, pero con valores más pequeños. Es de destacar que los mayores valores de presión se obtuvieron en el borde inferior de los paneles, particularmente en la primera fila, excepto para los paneles de la segunda fila separados a 1 m, ya que, al estar tan próximos, quedan sumergidos en la estela que se produce por la separación de capa límite en la primera fila.

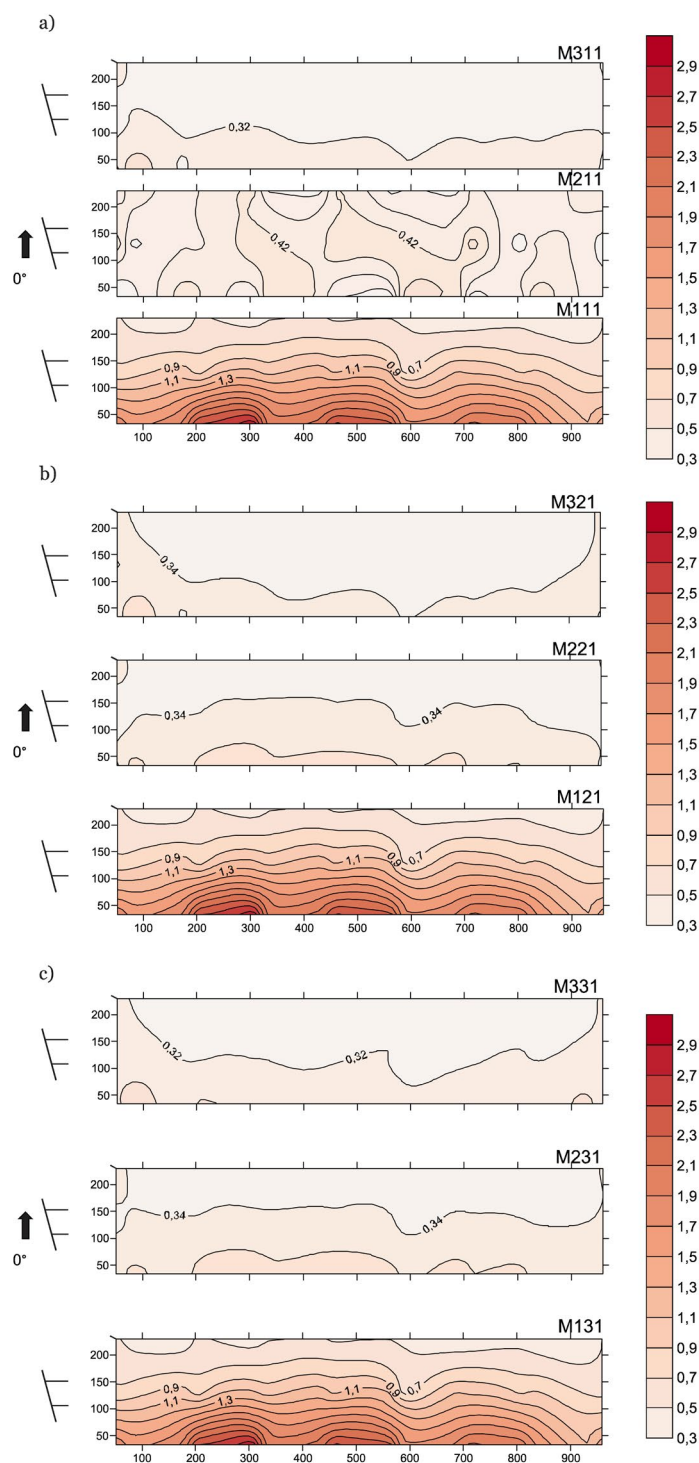


Figura 5. Distribución de presiones para la dirección de 0° sin separación entre columnas y para la separación de a) un metro, b) dos metros y c) tres metros

Para determinar cuánto se reduce la presión sobre los paneles detrás de la primera fila de ataque del viento, se calculó un único valor de coeficiente de presión, obtenido como el promedio de los resultados de todos los puntos instrumentados de la estructura ya que todos presentan la misma área tributaria, con el objetivo de establecer coeficientes de protección de la primera fila sobre la segunda y la tercera. La Tabla 1 resume los valores de los coeficientes de protección, obtenidos a partir de la ecuación [1].

$$[1] \quad Crp = (Cp(fp) / Cp(fe))$$

Donde:

Crp : coeficiente de reducción por protección

$Cp(fp)$: coeficiente de presión de la fila protegida

$Cp(fe)$: coeficiente de presión de la fila expuesta

minuyen entre un 30 y 65%, para la separación de 2 m entre un 33 y un 59% y para la separación de 3 m entre un 34 y un 57%.

De los valores expuestos en la tabla 1 se puede observar que, para la separación de 1 m, los valores de presión dis-

De igual manera que para la dirección de 0° se procedió con la dirección de 180° quedando como resultado de protección los coeficientes expresados en la Tabla 2.

Tabla 1. Coeficientes de reducción de la carga de viento para las filas segunda y tercera con respecto a la primera fila para las diferentes separaciones entre las columnas estudiadas, dirección de 0°

Coeficientes de reducción de la carga de viento para 0,0 m de separación entre columnas (0°)						
Fila	Separación entre filas					
	1 m	2 m		3 m		
2	0,30	0,33		0,34		
3	0,26	0,28		0,29		
Coeficientes de reducción de la carga de viento para 1 m de separación entre columnas (0°)						
Fila	Separación entre filas					
	1 m (Int)	1 m (Ext)	2 m (Int)	2 m (Ext)	3 m (Int)	3 m (Ext)
2	0,52	0,48	0,59	0,56	0,30	0,60
3	0,27	0,65	0,37	0,50	0,26	0,56
Coeficientes de reducción de la carga de viento para 2 m de separación entre columnas (0°)						
Fila	Separación entre filas					
	1 m (Int)	1 m (Ext)	2 m (Int)	2 m (Ext)	3 m (Int)	3 m (Ext)
2	0,38	0,28	0,44	0,32	0,57	0,34
3	0,39	0,32	0,44	0,35	0,37	0,36

Tabla 2. Coeficientes de reducción de la carga de viento para las filas dos y tres con respecto a la fila uno para las diferentes separaciones entre las columnas estudiadas, dirección de 180°

Coeficientes de reducción de la carga de viento para 0 m de separación entre columnas (180°)						
Fila	Separación entre filas					
	1 m	2 m		3 m		
2	0,38	0,67		0,80		
3	0,62	0,74		0,73		
Coeficientes de reducción de la carga de viento para 1 m de separación entre columnas (180°)						
Fila	Separación entre filas					
	1 m (Int)	1 m (Ext)	2 m (Int)	2 m (Ext)	3 m (Int)	3 m (Ext)
2	0,45	0,81	0,71	0,67	0,80	0,68
3	0,65	0,53	0,70	0,65	0,80	0,66
Coeficientes de reducción de la carga de viento para 2 m de separación entre columnas (180°)						
Fila	Separación entre filas					
	1 m (Int)	1 m (Ext)	2 m (Int)	2 m (Ext)	3 m (Int)	3 m (Ext)
2	0,46	0,41	0,53	0,49	0,57	0,55
3	0,55	0,45	0,62	0,58	0,66	0,58

4. APLICACIÓN DE LOS COEFICIENTES POR POSICIÓN EN EL DISEÑO DE SOLUCIONES DE CIMENTACIÓN DE HORMIGÓN ARMADO

Se consideraron en esta sección los resultados del estudio experimental en túnel de viento y se emplearon los coeficientes de reducción por posición de las presiones sobre un panel dentro del parque con el objetivo de investigar la variación en las reacciones de apoyo en función de la ubicación.

Para llevar a cabo esta parte del estudio, fue seleccionada una separación entre las filas de los paneles de 2 m, debido a que esta longitud es la más racional de las utilizadas en Cuba; pues evita la sombra que un panel le crea al otro por la proximidad y por lo tanto produce una disminución de las pérdidas en la generación de electricidad. Esta distancia además proporciona una utilización coherente del área de terreno. No se consideraron separación entre las columnas de paneles del parque debido a que es la separación más empleada en los parques cubanos (20) (figura 6).



Figura 6. Casos típicos de parques fotovoltaicos sin separación entre columnas.

La tabla 3 muestra los valores de los coeficientes de reducción por posición dentro del parque del panel para 0° y 180° de incidencia del flujo del viento. Como se puede ver, la dirección de 0° ofrece mayor protección a las restantes las filas que la dirección de 180°, debido a la geometría del panel respecto al frente de ataque del viento.

Tabla 3. Coeficiente de reducción por posición dentro del parque del panel

Coeficiente de reducción por posición dentro del parque		
Fila	Dirección del flujo del viento	
	0°	180°
1	1	0,64
2	0,33	0,74
3	0,28	1

Para el caso 1 figura 7 se afecta al coeficiente de forma, para todas las combinaciones de carga que presenten la dirección del viento de 180°, por 0,74, mientras que en la dirección de 0° no ocurrirán afectaciones debido a que la acción del viento actúa totalmente sobre los paneles. En el caso 2 ocurre igual que para el caso 1 con la diferencia de que está afectado además por las direcciones de viento de 45° y 135° (condición de borde).

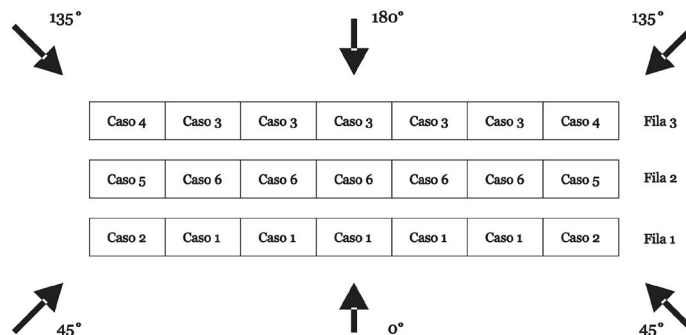


Figura 7. Casos típicos de posiciones de panel en el parque fotovoltaico

El caso 3 es inverso al 1, se afecta al coeficiente de forma, para todas las combinaciones de cargas que presenten la dirección del viento de 0°, por 0,28. El caso 4 es el inverso a 2, se realiza el mismo análisis que en 1 y se incluyen además las direcciones de 45° y 135°.

En el caso 5 no se afecta el coeficiente de forma para las direcciones de 45° y 135° ya que se consideran trabajando como un panel individual. Las combinaciones de cargas que presentan la dirección del viento de 0° se afectan por un coeficiente de reducción de 0,33, mientras que la dirección de 180° se afecta por un coeficiente de reducción de 0,74. Para el caso 6, similar al caso 5 para las direcciones de 0° y 180°, los paneles se consideran interiores y se produce una reducción de las presiones de valor 0,33 y 0,74 respectivamente.

Para el cálculo de las reacciones de apoyo de los paneles se trabajó con 3 filas y 6 direcciones de viento. Las filas se dividieron en 7 paneles acorde a la distribución de los apoyos del panel a la cimentación. Se incorporaron las direcciones de ataque del viento de 45° y 135°, ya que de acuerdo con los estudios previos (20, 4), aunque no son las direcciones que representan las condiciones más desfavorables para los paneles interiores de un parque, sí han de considerarse en el caso de los paneles de borde o esquina. Estos paneles de borde sometidos a los efectos del viento en esas direcciones se tratan como paneles individuales. La carga actuante sobre ellos fue obtenida de forma similar a un estudio previo realizado al panel aislado en el mismo túnel de viento (20). La carga de viento actuante se consideró de acuerdo con la norma cubana NC-285:2003 (22) pero contemplando los coeficientes de ráfaga, forma y reducción de área que se obtuvieron del análisis experimental, así como los coeficientes de reducción por posición para cada caso.

Para obtener las reacciones de apoyo de cada una de esas variantes, la estructura fue modelada, teniendo en cuenta las cargas y sus combinaciones según se establece en la Norma Cubana (23).

La figura 8 muestra los resultados con las combinaciones más desfavorables después de la modelación para cada uno de los seis casos definidos.

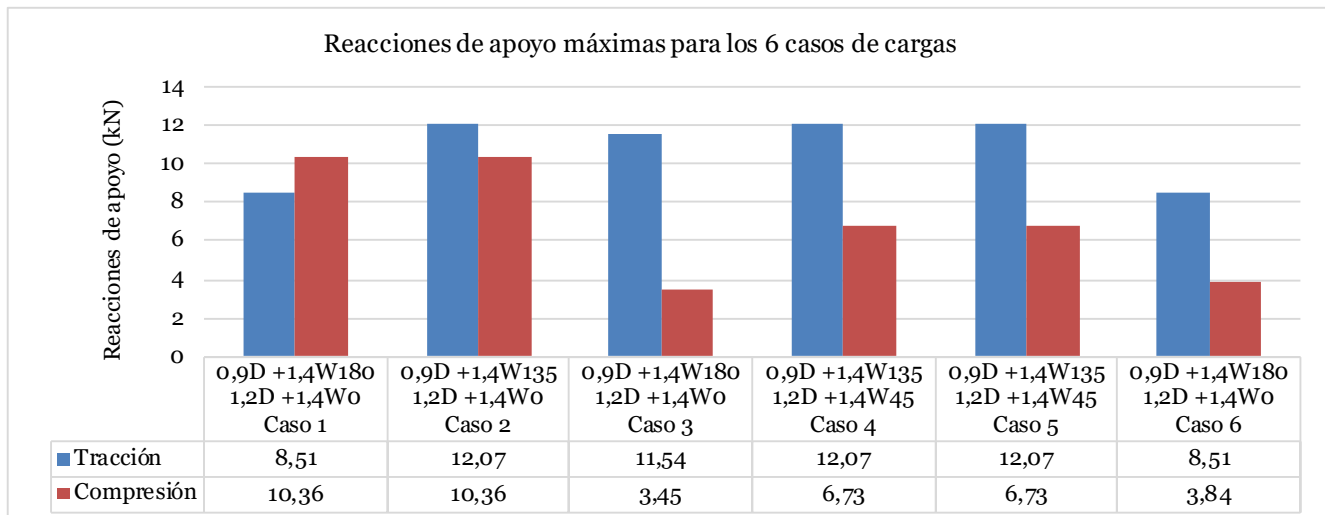


Figura 8. Reacciones de apoyo máximas para los seis casos de posición en el parque estudiado

Una vez colocada todas las cargas se seleccionó la máxima reacción de apoyo en compresión y en tracción para cada una de las seis posiciones. Puede observarse que las máximas tracciones en los puntos de apoyo de los soportes se presentan para las direcciones del viento de 180° y 135° y las máximas compresiones para 0° de acción del viento.

La dirección del viento con respecto a la disposición geométrica del parque demuestra la validez de los coeficientes de protección, que se hacen más notables bajo los esfuerzos de tracción en la orientación de 0°, donde se refleja una clara disminución de las reacciones de apoyo para los casos protegidos en esa dirección (casos 3 y 6).

Las máximas tracciones tienen igual valor para los casos 2, 4 y 5 con una mínima diferencia de 0,53 kN con respecto al caso 3, por lo que se puede concluir que los casos 2, 3, 4 y 5 frente a las acciones del viento presentan igual comportamiento. De la misma manera pueden ser igualadas las máximas tracciones de los casos 1 y 6. De este análisis se dedujo que se debían diseñar dos grupos de cimientos en el parque prototipo teniendo en cuenta la posición: 1) los interiores hasta la fila dos y 2) los de borde e interiores restantes.

Con los resultados de las reacciones de apoyo se resolvió establecer una comparación en cuanto a volumen de hormigón (m³), encofrado (m²) y cantidad de acero (kg) empleada para llevar a cabo la cimentación de un parque fotovoltaico prototipo de 1 MW mediante dos vías: 1) realizar el mismo tipo de cimentación para todo el parque sin tener en cuenta los coefi-

cientes de reducción por posición, denominada solución única de cimentación (SUC) y 2) diseñar los cimientos teniendo en cuenta los coeficientes de reducción, denominada solución con coeficientes de reducción (SCR). Se decidió además emplear tres variantes de cimientos: corridos (C), aislados (A) y pilotes cortos de hormigón armado (P).

En el diseño geotécnico, los cimientos se apoyaron en suelos con comportamiento cohesivo y granular. Todas las variantes fueron diseñadas para las solicitaciones de tracción, condición crítica en el diseño geotécnico en este caso y revisadas para las solicitaciones de compresión. Para el caso de los pilotes cortos, la capacidad de carga última a tracción depende fundamentalmente del diámetro y la longitud del mismo, para el análisis se seleccionó la profundidad mínima de cimentación por aspectos constructivos (1,2 m) y se obtuvo el diámetro garantizando un diseño seguro y económico. También para los pilotes cortos se realizó un diseño diferenciado para suelos con comportamientos cohesivo y friccional, considerando la variación de las propiedades físico mecánicas del suelo.

Tabla 4. Propiedades físico-mecánicas de los suelos empleados para el diseño de los cimientos (peso específico húmedo)

Ø°	25			28			30			32			35		
γ _f (kN/m ³)	17	18	19	16	17	18	19	16	17	18	19	16	17	18	19

Tabla 5. Comparación empleando diferentes diámetros en los pilotes cortos en cuanto a cantidad de materiales para suelos granulares

Cimiento para suelos granulares						
Parque	Profundidad (m)	Diámetro (m)	Cantidad de pilotes cortos	Volumen de hormigón (m ³)	Área de encofrado (m ²)	Peso del acero (kg)
SUC	1,2	0,5	182	429,52	3428,88	15084,16
SCR	1,2	0,5	38	307,12	2886,29	14071,32
	1,2	0,4	144			

Tabla 6. Comparación empleando diferentes diámetros en los pilotes cortos en cuanto a cantidad de materiales para suelos cohesivos.

Cemento para suelos cohesivos						
Parque	Profundidad	Diámetro	Cantidad de pilotes cortos	Volumen de hormigón (m³)	Área de encofrado (m²)	Peso del acero (kg)
	(m)	(m)				
SUC	1,2	0,25	182	107,38	1714,44	11883,87
SCR	1,2	0,25	38	77,14	1443,14	11377,45

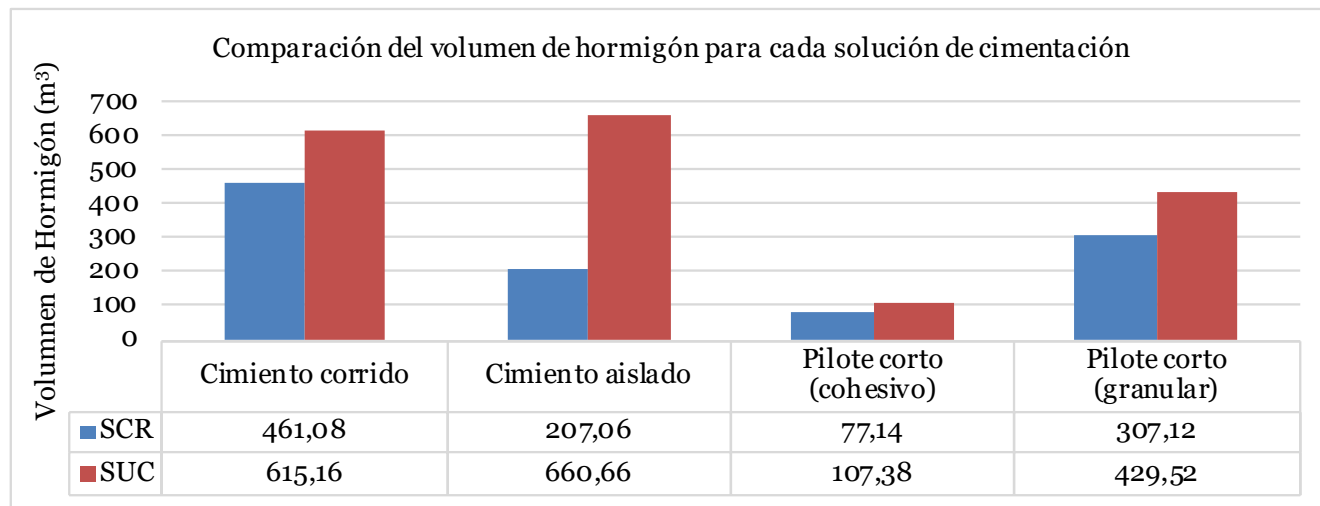


Figura 9. Comparación de los consumos de hormigón para los diferentes tipos de cimientos evaluados

Para evaluar el comportamiento resistente de la cimentación se elaboró la tabla 4, donde se resumen las propiedades de los suelos granulares y para los suelos con comportamiento cohesivo puro se seleccionó la cohesión (c) = 35 kPa y se rediseñó luego para los valores de 50, 60, 80 y 100 kPa.

En las tablas 5 y 6 se muestra la cantidad de materiales para la solución de cimentación con pilotes cortos en función del tipo de suelo, considerando la acción de la fuerza máxima de tracción.

Los resultados presentados en las tablas 5 y 6, indican que el empleo de la solución SCR con respecto a la solución SUC tanto en suelos con comportamiento granular como cohesivo, para la solución de pilotes cortos, aporta un menor consumo de hormigón y acero. Para ambos suelos la relación de volúmenes de hormigón SCR/SUC es de 0.71, lo cual implica un ahorro sustancial de materiales.

Las dimensiones de la cimentación para las variantes de cimientos aislado y corrido, fueron calculadas garantizando las exigencias del diseño para las combinaciones de cargas considerando el empleo de los coeficientes de reducción y sin tenerlos en cuenta. Como resultado se obtiene que predominan los lados y peralte total que garantizan que no se produzca el fallo por arranque de los cimientos, siendo la tracción la condición crítica de carga. Los volúmenes de hormigón que corresponden a estas soluciones aparecen en la figura 9. El consumo de acero de refuerzo en estas soluciones es considerablemente mayor en relación a la solución de pilotes cortos.

La solución de cimentación con pilotes cortos es la de menor consumo de hormigón entre las variantes evaluadas. Su

implementación reduce en un 88,32% el empleo de hormigón en comparación con la solución de cemento aislado como solución única para todos los apoyos de los soportes del parque situado en suelos cohesivos y un 53,51% para el caso de suelos granulares. Es evidente que el uso de los coeficientes de reducción para el diseño de la cimentación de parques solares conlleva a un menor consumo de materiales minimizando los costos de construcción.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó el estudio del campo de presiones producido por el viento sobre paneles fotovoltaicos de acuerdo a su posición dentro del arreglo de paneles del parque en túnel de viento. Se obtuvieron los coeficientes de reducción para las filas de paneles debido al efecto de protección de la primera hilera y luego de determinar las fuerzas de reacción en la cimentación se realizó un análisis comparativo de la solución de cimentación de acuerdo a las variaciones de las presiones de viento.

En cuanto a los resultados del estudio experimental en túnel de viento se concluye que los valores de presiones de viento sobre un panel fotovoltaico dependen de la posición relativa del panel dentro del mismo y disminuyen al encontrarse detrás de la primera fila a barlovento. La primera fila del parque ofrece un efecto de protección sobre las restantes para las dos direcciones de viento analizadas y que este efecto de protección disminuye a medida que aumenta la separación entre filas, lo cual está en correspondencia con los estudios internacionales. Las presiones de viento obtenidas sobre los paneles presentaron disminuciones entre un 20 y un 62% para la dirección de 180° y entre un 44 y 74% para la dirección de 0°

para los paneles ubicados dentro del parque, protegidos por la primera fila.

En cuanto al diseño de soluciones de cimentación para un parque de 1 MW utilizando los resultados experimentales de las presiones del viento se concluye que la consideración de los coeficientes de reducción por posición de un panel dentro de un parque fotovoltaico, produce en el diseño de las cimentaciones, una disminución de la cantidad de materiales necesarias en comparación con el empleo de un único tipo de cimiento para todos los apoyos de las estructuras. Con las condiciones de suelos establecidas, la solución con pilotes cortos de hormigón, es la variante más económica en cuanto a cantidad de materiales a emplear.

AGRADECIMIENTOS

A todos los que han contribuido a la realización de este trabajo, a la Asociación Uruguaya de cooperación internacional (AUCI) y a la Empresa de fuentes de energía renovables (EDIFRE) por el financiamiento proporcionado para las estancias de investigación en la Universidad de la República de Montevideo, Uruguay. A los colegas del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) en especial, a José Cataldo, Alejandro Gutiérrez, Pablo País, Gabriel Narancio y Rodolfo Pienica, por sus consejos y apoyo durante el estudio y realización de los ensayos en el túnel de viento existente en el IMFIA de la Universidad de la República (UDELAR), en Montevideo, Uruguay.

REFERENCIAS

- (1) López Llanusa, A., León Finalé, E. D., Elena Parnás, V. B., y Cataldo Ottieri, J. (2017). Estudio de coeficientes de presión en paneles solares frente a la acción del viento. *Revista Cubana de Ingeniería*, 7(3), 35-44. Recuperado de <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/576>
- (2) Miller, R. D., y Zimmerman, D. K. (1981). *Wind Loads on Flat Plate Photovoltaic Array Fields*. Recuperado de [https://www2.jpl.nasa.gov/adv_tech/photovol/2016CTR/Boeing%20Wind%20Load%20\(nonsteady\)%20-%20Ph%20IV%20Final%20Rpt_1981.pdf](https://www2.jpl.nasa.gov/adv_tech/photovol/2016CTR/Boeing%20Wind%20Load%20(nonsteady)%20-%20Ph%20IV%20Final%20Rpt_1981.pdf)
- (3) Abiola-Ogedengbe, A., Hangan, H., y Siddiqui, K. (2015). Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module. *Renewable Energy*, 78, 657-665. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.037>
- (4) Stathopoulos, T., Zisis, I., y Xypnitou, E. (2014). Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 125, 195-206. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.007>
- (5) Aly, A. M., y Bitsuamlak, G. (2013). Aerodynamics of ground-mounted solar panels: test model scale effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, 250-260. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.07.007>
- (6) Geurts, C., y Blackmore, P. (2013). Wind loads on stand-off photovoltaic systems on pitched roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.016>
- (7) Bienkiewicz, B., y Endo, M. (2009, April 30-May 2). Wind considerations for loose-laid and photovoltaic roofing systems. Trabajo presentado en el *Structures Congress – American Society of Civil Engineers (ASCE)*, Austin, Texas, USA.
- (8) Bronkhorst, A., Franke, J., Geurts, C., Bentum, C., y Grepinet, F. (2010, 23-27 Mayo). Wind tunnel and CFD modelling of wind pressures on solar energy systems on flat roofs. Trabajo presentado en el *5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*, Chapel Hill, North Carolina, USA.
- (9) 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, 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.015>
- (10) Jubayer, C., y Hangan, H. (2014, May 31 – June 4.). Effect of atmospheric wind on a ground mounted solar panel array. Trabajo presentado en el *25th CANCAM*, London, Ontario, Canada.
- (11) Aly, A. M. (2016). On the evaluation of wind loads on solar panels: The scale issue. *Solar Energy*, 135, 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.018>
- (12) Warsido, W. P., Bitsuamlak, G. T., Barata, J., y Chowdhury, A. G. (2014). Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array. *Journal of Fluids and Structures*, 48, 295-315. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.03.005>
- (13) Shademan, M., Barron, R., Balachandar, R., y Hangan, H. (2014). Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(8), 728-738. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0537>
- (14) Bitsuamlak, G. T., Dagnew, A. K., y Erwin, J. (2010, May 23-27). Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD. Paper presented at the *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE)*, Chapel Hill, North Carolina, USA.
- (15) Jubayer, C. M., y Hangan, H. (2014). Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 134, 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.008>
- (16) Kopp, G. A., Farquhar, S., y Morrison, M. J. (2012). Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted, solar arrays. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 111, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.08.004>
- (17) Pratt, R. N., y Kopp, G. A. (2013). Velocity measurements around low-profile, tilted, solar arrays mounted on large flat-roofs, for wall normal wind directions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, 226-238. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.09.001>
- (18) Cook, N.J., (1990). *The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static structures*.
- (19) Holmes, J.D., (2004). *Wind loading of structures*. ed. Taylor & Francis e-Library.
- (20) López Llanusa, A. (2017). Determinación de coeficientes de presión para paneles fotovoltaicos dentro de un parque bajo la acción del viento (Tesis doctoral). Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría (CUJAE).

- (21) López, A., Cataldo, J., y Elena, V. (2017). Modelación de capa límite atmosférica para estudios de paneles solares en túnel de viento. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(3), 52-64. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382017000300005
- (22) NC-285 (2003). Carga de viento. Método de cálculo. Oficina Nacional de Normalización (NC), Cuba.
- (23) NC-450 (2006). Edificaciones-Factores de Carga o Ponderación-Combinaciones. Oficina Nacional de Normalización (NC), Cuba.