

Estudio de coeficientes de presión en paneles solares frente a la acción del viento

Alejandro López Llanusa

correo electrónico: alo@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba, La Habana, Cuba

Artículo Original

Eric D. León Finalé

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba, La Habana, Cuba

Vivian B. Elena Parnás

correo electrónico: vivian@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba, La Habana, Cuba

José Cataldo Ottieri

correo electrónico: jcataldo@fing.edu.cu

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Resumen

Como consecuencia de la situación geográfica de Cuba, el viento desempeña un importante papel en el diseño de las construcciones, en particular de los paneles solares. El objetivo de esta investigación es evaluar las presiones actuantes sobre un panel solar según la norma cubana NC-285:2003, para obtener las diferencias que aparecen en sus reacciones de apoyo, a partir de variar el coeficiente de presión empleando las normas: NBR 6123: 1988, CIRSOC 102, NC-285:2003, Eurocódigo 1-4: 2005, ASCE 7-10 y AS-1170.2: 2011. Se calculan también estas reacciones a partir de los coeficientes de presión obtenidos mediante un ensayo en túnel de viento, realizado sobre un modelo a escala reducida del panel en estudio y de los coeficientes que propone otro trabajo internacional llevado a cabo en túnel de viento, sobre una tipología semejante a la estudiada. Las principales conclusiones del trabajo son que entre las normas, el empleo de los coeficientes de presión del Eurocódigo 1- 4: 2005 conduce a los mayores valores de reacciones y en cuanto a los estudios en túnel de viento, que el empleo de un valor global de coeficiente de presión, se aleja de la distribución de presiones que experimenta el panel dentro del flujo.

Palabras claves: carga de viento, paneles solares, túnel de viento

Recibido: 7 de junio del 2016 Aprobado: 8 de septiembre del 2016

INTRODUCCIÓN

Para países posicionados geográficamente entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, la energía solar es una apuesta certera, ya que estos reciben los mayores valores de radiación llegando a ser muy eficiente la transformación de energía solar en energía eléctrica. Cuba en su posición del Caribe cuenta con valores altos de radiación solar que pueden alcanzar los 1 900 W/m², por lo que la construcción de parques fotovoltaicos en la

isla es altamente recomendable, y es parte de la política energética del país. El Gobierno cubano siguiendo estas directivas, ha proyectado la construcción de diversos parques fotovoltaicos utilizando módulos de producción nacional.

Los paneles solares que conforman los parques fotovoltaicos, se montan sobre estructuras ligeras levantadas sobre el nivel del terreno con cierta inclinación, determinada por la mayor eficiencia en el

aprovechamiento de los rayos solares (unos 15° con la horizontal para Cuba debido a su latitud geográfica). Las estructuras se colocan generalmente en zonas abiertas y despejadas por lo que presentan gran vulnerabilidad ante la acción de los vientos. Cuba se encuentra en una zona de alta recurrencia de huracanes y aunque la energía fotovoltaica presenta bajos costos de operación y mantenimiento, su inversión inicial es considerable; por lo que se hace necesario preparar las estructuras para que resistan las cargas de viento durante su vida útil. La determinación de las cargas de viento sobre la estructura juega un papel fundamental, donde una serie de factores tales como: la exposición, la dirección del viento, la inclinación del panel y la ubicación tienen que considerarse cuidadosamente.

Los códigos y normas actuales para la obtención de la carga de viento sobre estructuras, no incluyen disposiciones para diseñar los paneles solares [1]; sin embargo, las consideraciones para el diseño de techos libres inclinados con una sola pendiente, presentan algunas similitudes con el tipo estructural y en dependencia de sus características geométricas pudieran emplearse. Debido a que no todas las configuraciones geométricas de módulos solares son abordadas por las normas, se han comenzado a realizar en la última década algunos estudios experimentales [2-5] que no son aún concluyentes, principalmente en cuanto a los coeficientes de presión. Dada la divergencia de criterios encontrados, el objetivo de este trabajo es evaluar y comparar las reacciones de apoyo generadas por la acción del viento en un panel solar teniendo en cuenta los coeficientes de presión obtenidos según diferentes normas y a partir de los coeficientes de presión alcanzados mediante ensayos de modelos a escala reducida en túnel de viento. Las normas analizadas fueron la norma brasilera NBR 6123: 1988 [6], la norma argentina CIRSOC 102 [7], la norma cubana NC-285:2003 [8], la norma europea Eurocódigo 1-4: 2005 [9], la norma estadounidense ASCE 7-10 [10] y la norma australiana AS-1170.2: 2011.

DESARROLLO

Análisis de los coeficientes de presión que proponen las normas

El panel soporte de los módulos solares es una estructura sobre la cual se apoya una placa plana inclinada a 15° con la horizontal, es un arreglo de módulos solares rectangulares, con dimensiones de 5 040 x 5 300 mm (figura 1). El arreglo cuenta con 20 módulos en una distribución 5 x 4 con pequeñas ranuras debido a la separación entre ellos de 20 mm. Se encuentra elevado sobre el nivel de terreno a 830 mm en la parte frontal y a 2 200 mm en la parte posterior.

Las pequeñas ranuras entre los laterales de los paneles solares no son significativas en la carga de viento con relación a las dimensiones del arreglo. Este cuerpo puede considerarse como una placa rectangular plana inclinada

inmersa en un flujo de aire, forma que aparece en las normas de carga de viento sobre estructuras, por lo que a continuación se describen las disposiciones que presentan algunas de las más importantes para la determinación de los coeficientes de presión en estos casos.

La norma brasileña, NBR 6123:1988 [6] define las cubiertas aisladas como cubiertas que se encuentran sobre un soporte ligero y por esto no constituye un obstáculo significativo al flujo del aire, la acción del viento es ejercida directamente sobre la cara superior e inferior de la cubierta. Los coeficientes de presión brindados por esta norma solo son aplicables en los casos en que se satisfagan simultáneamente las siguientes condiciones: cubierta de una inclinación $0 \leq \tan\theta \leq 0,7$ y $h \geq 0,5 L_2$, y cubierta de dos inclinaciones, $0,07 \leq \tan\theta \leq 0,6$; $h \leq 0,5 L_2$, donde θ es el ángulo de inclinación de la cubierta respecto a la horizontal, h es la distancia entre el piso y la arista horizontal más cercana al terreno y L_2 es la profundidad de la cubierta. Como el caso de estudio corresponde a una cubierta de una sola pendiente se cumple el primer criterio $\tan 15^\circ = 0,268$, pero en cambio no se satisface el segundo $h \geq 0,5 L_2$ y por lo tanto no se recomienda el empleo de los coeficientes que propone.

En la norma argentina, CIRSOC 102 [7], se define como cubierta aislada, a las cubiertas de una o más vertientes cuyas cumbres y bordes son horizontales, a las que el viento puede atacar por los bordes en toda la periferia, y cuya altura mínima e debe ser mayor o igual que 0,75 del lado inclinado más grande.

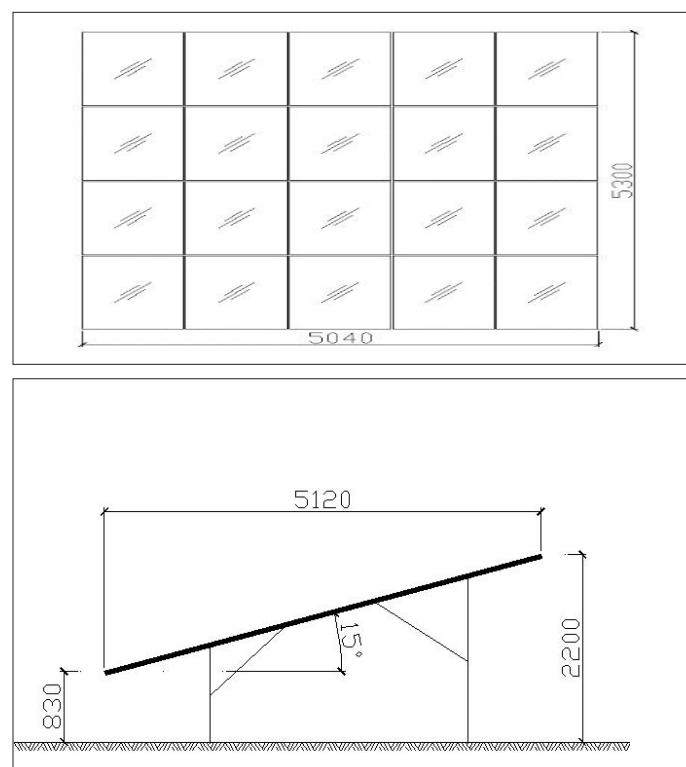


Fig. 1. Arreglo de paneles fotovoltaicos.

La norma cubana NC-285:2003 [8] establece que la altura del panel (H) (ver figura 2), debe ser mayor o igual a 0,75 el lado mayor de panel. Para los casos en los que no se cumplen estas restricciones, se recomienda la realización de ensayos experimentales [8].

Para el caso del panel en estudio e (norma argentina)= H (norma cubana)=830 mm, no se cumple el requisito expuesto, por lo que los coeficientes brindados por ambas normas no son confiables.

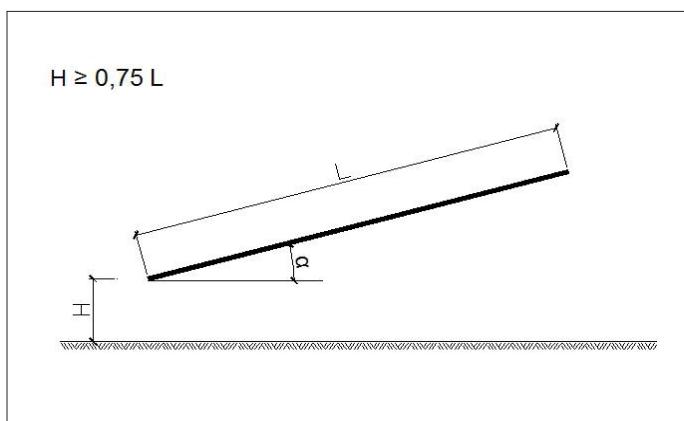


Fig. 2. Esquema de techos aislados de acuerdo con la norma NC 285:2003.

El Eurocódigo 1-4:2005 [9], define a una cubierta libre como el techo de una estructura que no tiene paredes permanentes, además tiene en cuenta el efecto de bloqueo (φ) siendo $\varphi = 1$ cuando está totalmente bloqueado y $\varphi = 0$ cuando no existe bloqueo, para el caso de estudio $\varphi = 0$. En el código se establece un coeficiente de fuerza global el cual representa la fuerza resultante (figura 3). El coeficiente de presión neto representa la presión local máxima (en presión y succión) sin especificar diferencias en cuanto a direcciones de viento. Como se muestra en la figura 3 este código a diferencia de las normativas antes observadas, divide a la cubierta en zonas, cada cual con un coeficiente de presiones propio y además los valores de presiones máximas están dados para cualquier valor de φ , mientras que los valores mínimos (succión) sí están representados en función de φ .

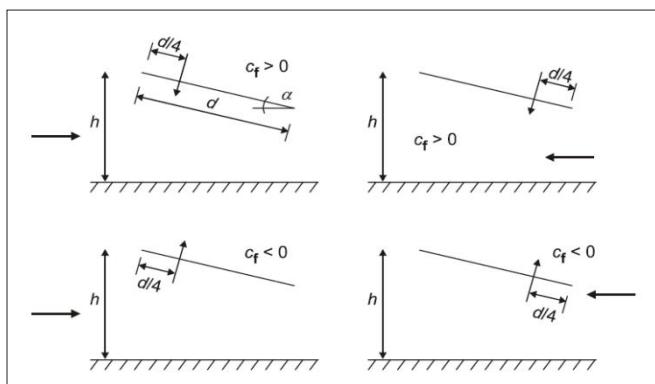


Fig. 3. Localización del centro de fuerzas para cubiertas libres de una inclinación. 1-4:2005 [9].

Debido al ángulo de inclinación de 15° y un bloqueo $\varphi = 0$ los coeficientes de presión propuestos por esta norma son los que se muestran en la figura 4.

En la norma estadounidense ASCE 7-10 [10], el coeficiente de presión para cubiertas aisladas incluye la contribución de las superficies a barlovento y sotavento, los símbolos positivos y negativos representan presión o succión respectivamente y se establece como limitante que la relación entre la altura media y la longitud horizontal de la cubierta debe ser mayor que 0,25 y menor que 1,00 y que la inclinación con respecto a la horizontal tiene que ser menor que 45°. Esta condición se cumple en la estructura estudiada, por lo que los coeficientes de presión resultantes sobre la estructura se muestran en la figura 5. Como particularidad de esta norma, para una misma estructura y ante la misma dirección de viento, se proponen dos distribuciones de coeficientes de presión que deben ser modelados y evaluados.

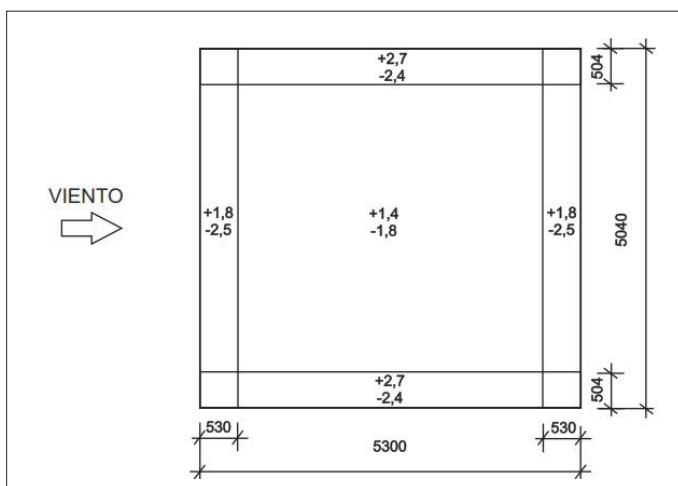


Fig. 4. Coeficientes de presión de acuerdo con el Eurocódigo 1-4:2005 [9].

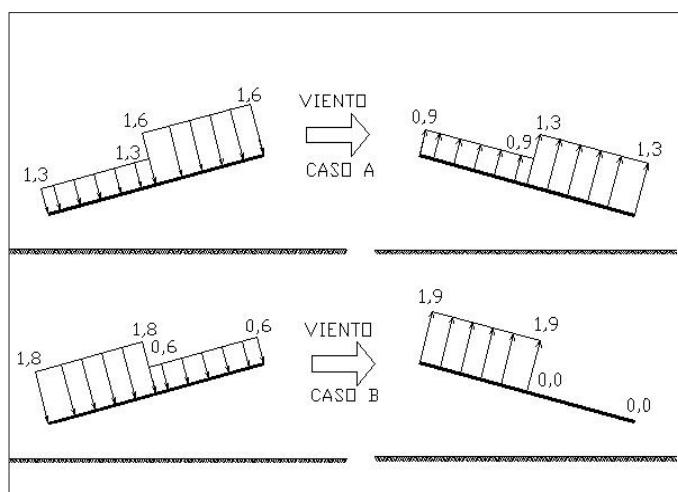


Fig. 5. Coeficientes de presión para el panel solar por la norma ASCE 7-10 [10].

La norma australiana AS-1170.2:2011 [11], para techos libres inclinados asume una presión neta en cada mitad del techo, y establece la misma limitante que la norma anterior en cuanto a la relación entre la altura del lado superior y la longitud horizontal (figura 6). Para el arreglo de paneles fotovoltaicos en estudio esta condición se cumple.

En la figura 6 se tiene en cuenta el efecto de bloqueo debajo de la cubierta, pero como el panel solar no tiene ningún cuerpo debajo, no se considera el efecto de bloqueo y los valores positivos y negativos representan presión y succión respectivamente. Los coeficientes de presión determinados por esta norma para el arreglo en estudio son los mostrados en la figura 7.

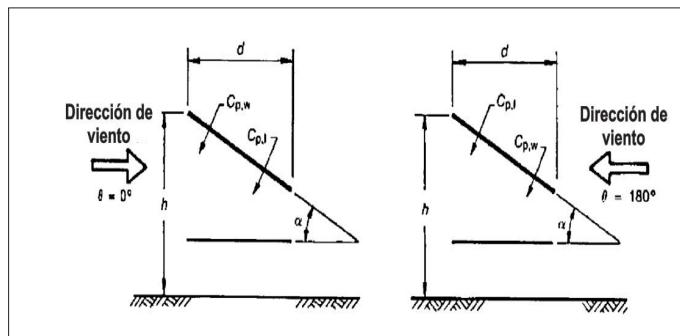


Fig. 6. Coeficientes de presión para cubierta aislada con una pendiente según AS-1170.2:2011 [11].

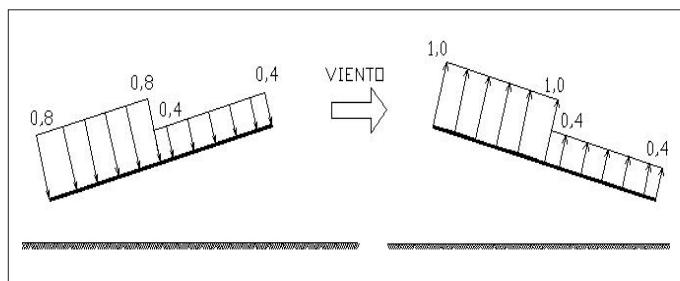


Fig. 7. Coeficientes de presión para el panel por la norma AS-1170.2:2011 [11].

Análisis de los coeficientes de presión obtenidos en el ensayo realizado en túnel de viento

De acuerdo con el análisis de las normas anteriores, existen varias condiciones que limitan el empleo de las mismas para algunas configuraciones geométricas de paneles solares; además, se detectan diferencias considerables en los patrones de los coeficientes de presión de aquellas que pudieron aplicarse para el caso de estudio. Estas diferencias, así como que las normativas actuales no contemplen aspectos como: la influencia de las inclinaciones con respecto al nivel de terreno de los paneles y la influencia de un mayor número de ángulos de ataque del viento, han despertado especial interés sobre esta tipología estructural y motivado el surgimiento de estudios particulares a escala reducida en túneles de

viento, a escala real y simulación computacional [2, 3, 12-17] en los últimos años.

En esta sección se describen las características del ensayo que se llevó a cabo del panel en estudio. El trabajo experimental se realizó en el túnel de viento existente en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Universidad de la República (UDELAR), en Montevideo, Uruguay. Este túnel 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. Cuenta con un ventilador axial con un rotor de 2,5 m de diámetro el cual proporciona un caudal de 121,5 m³/s y una velocidad de rotación de 750 rpm, lo cual permite desarrollar una velocidad de trabajo regulable de hasta 30 m/s, además, tiene un difusor de 4,1 m a la salida para equilibrar las variaciones de presión del aire en el interior de la cámara. Para este estudio se trabajó con una velocidad de 20 m/s.

Los perfiles de velocidad y de intensidad de turbulencia fueron generados a partir de las técnicas que se conocen como métodos de rugosidad, barrera y dispositivos de mezcla (figura 8). El instrumento utilizado para las mediciones de los perfiles de velocidad y la obtención de las intensidades de turbulencia es el anemómetro de hilo caliente [18].

A partir de estos dispositivos se obtuvo el perfil de velocidades y la intensidad de turbulencia utilizada en los ensayos. La intensidad de turbulencia, es definida como el cociente entre la desviación estándar de las fluctuaciones de la velocidad y una velocidad de referencia, la cual fue registrada en la altura media del túnel (0,9 m), medida en el eje longitudinal.

Los módulos solares se construyeron con material acrílico y la estructura de soporte con perfiles de aluminio, para garantizar una adecuada rigidez. El panel se dividió en cuatro placas de acrílico, la superior y la inferior de 3 mm de espesor, y dos interiores de 2 mm que son las encargadas de conducir las tomas de presión para que no se desprendan durante el ensayo.

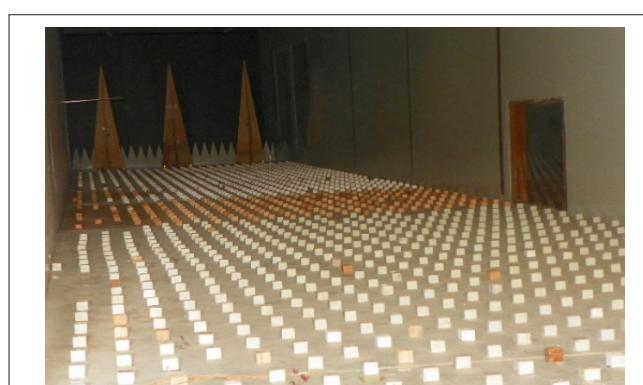


Fig. 8. Arreglo de los dispositivos de simulación para generación del flujo turbulento.

El área del panel se fraccionó en cuatro y cada una se instrumentó con 28 tomas de presión de 1 mm de diámetro interior como se muestra en la figura 9. Se estudió el panel con una inclinación de 15°, y cinco direcciones de ataque del viento 0°, 45°, 90°, 135° y 180° ya que las restantes se analizaron por simetría.

Los coeficientes de presión resultantes del estudio experimental, para las direcciones de 0° y 180° se muestran en la figura 10, para ser consecuentes con las direcciones propuestas en las normas. No obstante, se analizaron las restantes direcciones estudiadas en el ensayo. La tabla 1 resume los valores máximos y mínimos resultantes en los bordes de ataque para las direcciones 0°, 45°, 90°, 135° y 180°. De la tabla puede evidenciarse, de forma similar a lo descrito por Stathopoulos *et al.* [2], que la dirección de viento más desfavorable es la de 135°. Este trabajo de Stathopoulos *et al.* [2] decidió incluirse para tener un referente comparativo en cuanto a estudios similares en túnel de viento, ya que el autor es uno de los máximos exponentes en la temática, y además, condujo su estudio en condiciones similares de exposición y con características geométricas semejantes a la tipología estudiada.



Fig. 9. Modelo a escala reducida con toda la instrumentación colocada por las columnas de la estructura.

Tabla 1
Resumen de los valores máximos y mínimos de coeficientes de presión

Valores	Direcciones de viento				
	0°	45°	90°	135°	180°
Máximos	2,83	1,60	0	3,43	3,20
Mínimos	0,46	0,97	0	1,01	0,56

En el caso de los ensayos en túneles de viento sobre paneles, al ser estructuras situadas en la región interna de la capa límite atmosférica, son aplicables los planteamientos de Holmes [19] y Cook [20] sobre edificaciones bajas, referidos a la dependencia de los parámetros adimensionales, como el coeficiente de presión, de las características turbulentas del flujo tales como: la intensidad, la escala y el espectro de turbulencia. Según Holmes [19], algunos investigadores prefieren tratar estas características como parámetros independientes, pero es difícil realizar esta separación en ensayos en túneles de viento en las condiciones descritas. Esta es una de las principales razones por la cual el coeficiente de presión resultante de los ensayos en túneles de viento sobre paneles, contiene el efecto de las características turbulentas del flujo, con lo cual no es necesario incluirlas en la expresión para obtener la carga final de viento sobre las estructuras.

MODELACIÓN CON CARGA DE VIENTO GENERADA CON LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN ESTUDIADOS

Para evidenciar la medida en la que repercuten las variaciones que presentan los coeficientes de presión obtenidos anteriormente, se realizó la modelación de la estructura en condiciones de carga de peso propio y carga de viento, con el fin de obtener las reacciones de apoyo (figura 11). Los números 1, 2, 3 y 4 hacen referencia a las reacciones de apoyo en cada columna.

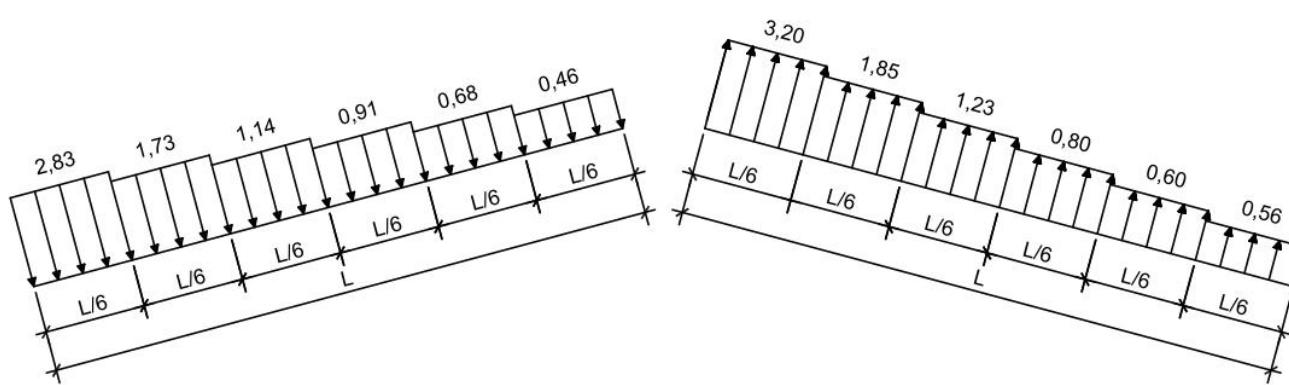


Fig. 10. Coeficientes de presión obtenidos en el ensayo en túnel de viento.

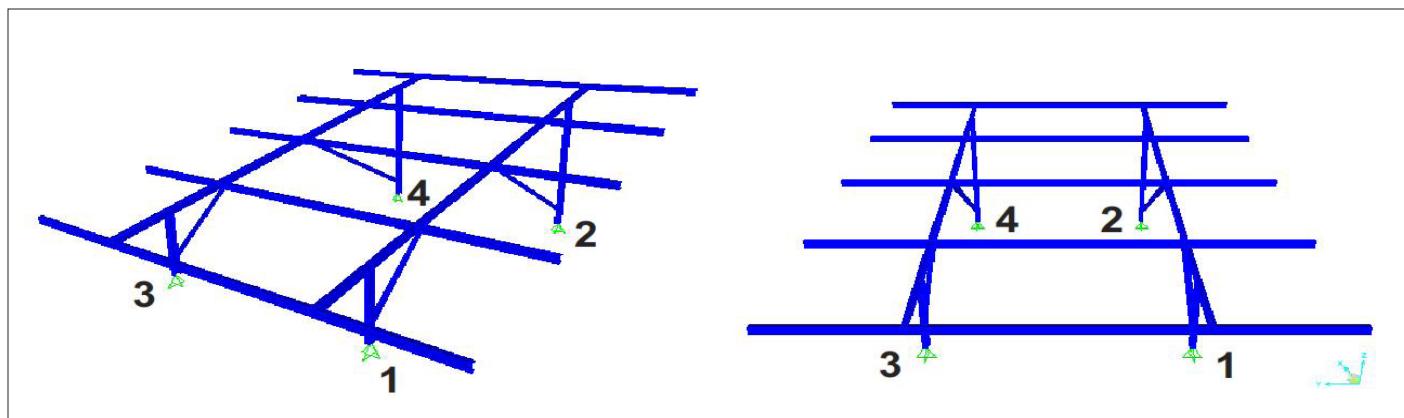


Fig. 11. Estructura de soporte medida en SAP-2000.

Las presiones de viento a considerar en los cálculos para obtener las reacciones de apoyo, se determinan por la ecuación 2 que responde a los planteamientos de la norma cubana NC-285:2003 [8].

$$q = q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_H \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_f \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1)$$

Donde q_{10} es la presión básica de viento para la región occidental de Cuba (1,3 kN/m²); C_t es el coeficiente de recurrencia (1); C_s es el coeficiente de topografía o sitio (1); C_H coeficiente de altura (0,8), C_r coeficiente de ráfaga (1,22); C_{ra} es el coeficiente de reducción de área (1) y C_f es el coeficiente de presión. Esta expresión es aplicable de esta forma en el caso de las distribuciones de coeficientes de presión que responden a las normas estudiadas, para lo cual se mantienen constantes todos los parámetros meteorológicos de la norma cubana y se varía el coeficiente de presión según lo propone cada norma.

Para el caso de las presiones de viento obtenidas con los coeficientes de presión determinados mediante el ensayo en túnel de viento, como ya quedó establecido en la sección anterior, estos contemplan las características turbulentas del flujo, con lo cual los coeficientes de ráfaga y de reducción de área de la ecuación 2, están incluidos en el valor de coeficiente de presión. Los restantes parámetros de la ecuación toman los mismos valores enunciados en el párrafo anterior. Los resultados de las presiones obtenidas sobre el panel en función de los diferentes coeficientes de presión se muestran en la tabla 2.

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

La presente sección se enfoca en la discusión de la forma en la que repercuten las variaciones que presentan los coeficientes de presión obtenidos anteriormente, en las reacciones de apoyo del panel estudiado. Se establecieron dos comparaciones: entre las tres normas y entre los ensayos en túnel de viento.

En primer caso se analizan las comparaciones entre las normas para el viento actuando en la dirección 0°, el

cual genera cargas de presión perpendicular a los paneles que dan como resultado que las cuatro reacciones estén trabajando a compresión sobre los cimientos. Los valores de las reacciones en los cuatro apoyos del panel se muestran en la figura 12.

La figura evidencia que los resultados de las reacciones de apoyo para el caso de la compresión presenten variaciones considerables, alcanzando valores de hasta un 48 % entre el Eurocódigo 1- 4: 2005 y la australiana [11] para las reacciones de las columnas delanteras (1 y 3) y de 62 % entre el Eurocódigo 1- 4: 2005 y la AS-1170.2: 2011 para las reacciones de apoyo traseras (2 y 4). La aplicación de los coeficientes de presión de estas dos normas son las que arrojan los mayores y menores valores de reacciones de apoyo respectivamente. Puede apreciarse que los resultados entre el Eurocódigo 1- 4: 2005 y la ASCE 7-10 presentan bastante concordancia, pues para las reacciones de las columnas delanteras (1 y 3) las diferencias no superan el 1 % y en el caso de las traseras (2 y 4), aunque mayores, no llegan al 10 %.

Para el caso de la incidencia del viento en 180° las reacciones de apoyo resultaron todas en tracción, los resultados obtenidos se muestran en la figura 13.

En la figura 13, el comportamiento es similar al descrito en la compresión, pero en este caso, las variaciones entre la norma AS-1170.2: 2011 y el Eurocódigo 1- 4: 2005 son mayores, pues, aunque para las reacciones de apoyo traseras se mantienen prácticamente las mismas diferencias que en la compresión, el Eurocódigo 1- 4: 2005 llega a reportar valores 8,7 veces mayores para las reacciones de apoyo de las columnas delanteras ante los efectos de la tracción. Para esta condición, las diferencias entre el Eurocódigo 1- 4: 2005 y la ASCE 7-10 se acentúan al alcanzar valores del 27 % para las columnas traseras.

Para los tres casos evaluados coincide que los máximos valores de tracción se obtienen en las columnas traseras.

Tabla 2

Colocación de la carga de viento en el panel según los coeficientes de presión propuestos por las normas y los estudios realizados en túnel de viento

Estudio	Presión			Succión			
Eurocódigo 1-4: 2005		+3,38			-3		
	VIENTO	+2,25	+1,75	+2,25	-3,3	-2,25	-3,3
							+3,38
ASCE 7-10 (A)		+1,63	+2		-1,13	-1,63	
	VIENTO						
ASCE 7-10 (B)		+2,25	+0,75		-2,38	0	
	VIENTO						
AS-1170.2: 2011		+1	+0,5		-1,25	-0,5	
	VIENTO						
Stathopoulos		+1,56			-1,56		
	VIENTO						
Ensayo en túnel de viento	+3,33	+1,92	+1,28	+0,83	+0,62	+0,58	
	VIENTO						
	-2,94	-1,80	-1,18	-0,94	-0,71	-0,50	

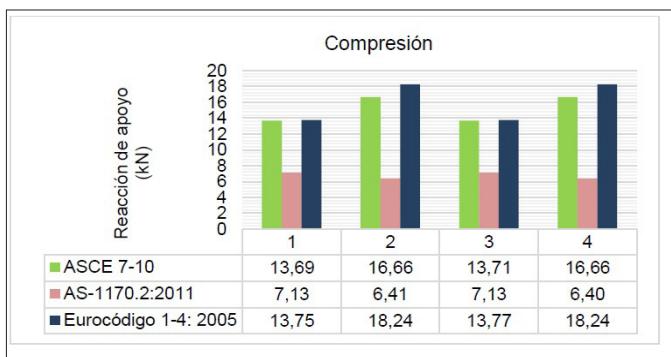


Fig. 12. Gráfico comparativo de las reacciones de apoyo en compresión, para los coeficientes de presión ofrecidos por las normas (valores en kN) para la dirección de 0°.

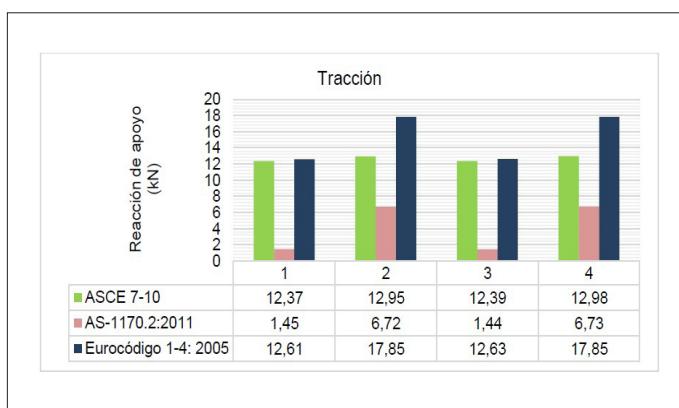


Fig. 13. Gráfico comparativo de las reacciones de apoyo en tracción, para los coeficientes de presión ofrecidos por las normas (valores en kN) para la dirección de 180°.

Comparación de los resultados a partir de ensayos

La comparación planteada en cuanto a las reacciones de apoyo obtenidas a partir de los coeficientes de presión alcanzados por el ensayo en túnel de viento realizado por los autores y las reacciones de apoyo obtenidas a partir de los coeficientes de presión del ensayo realizado por Stathopoulos se muestran en las figuras 14 y 15.

A partir de las reacciones de apoyo calculadas y mostradas en la figura 15, se observa que, en el diseño a tracción de la cimentación, los valores obtenidos en el ensayo son ligeramente mayores en las patas traseras del panel y menos de la mitad de los valores en las patas delanteras que los obtenidos por la propuesta de Stathopoulos.

En el caso del diseño a compresión se observa que, si bien para las patas delanteras los valores de compresión son similares para los dos ensayos, para las patas traseras estos valores se reducen a algo más de la mitad comparados con la propuesta de Stathopoulos.

Es de notar que los valores del coeficiente de presión propuestos por Stathopoulos a partir de sus ensayos es un valor promedio único para toda el área del panel. Si se obtuviera un valor promedio a partir de los ensayos

realizados en este trabajo se obtendría un valor igual a 1,42 en succión y de 1,35 en compresión, valores algo menores que los obtenidos por Stathopoulos. La discretización de los valores presentada en este ensayo conlleva a las diferencias observadas dadas por la variación de los coeficientes de presión en las diferentes zonas del panel.

Los coeficientes que se proponen en el ensayo realizado sobre el panel se asemejan más al comportamiento descrito en otros trabajos internacionales recientes [4, 5].

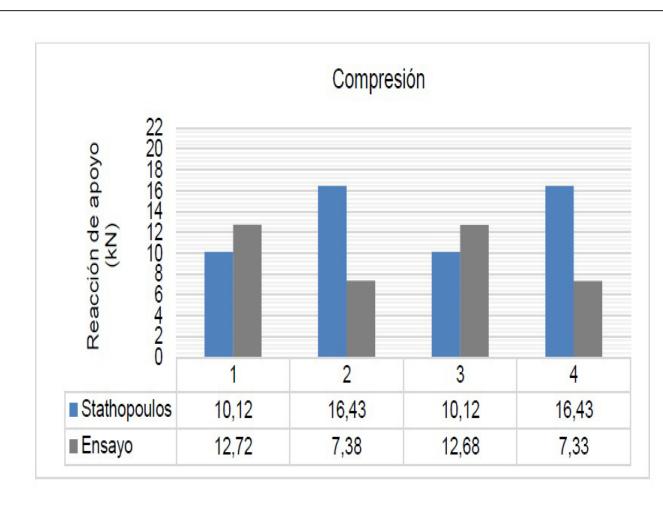


Fig. 14. Gráfico comparativo de las reacciones de apoyo en compresión, para los coeficientes de presión ofrecidos por los ensayos (valores en kN) para la dirección de 0°.

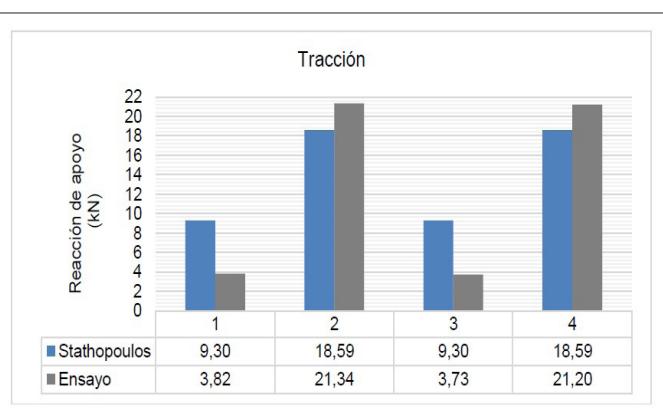


Fig. 15. Gráfico comparativo de las reacciones de apoyo en tracción, para los coeficientes de presión ofrecidos por los ensayos (valores en kN) para la dirección de 180°.

CONCLUSIONES

1. Del análisis de las normas se concluye que la NC 285:2003, la CIRSOC 102 y la NBR 6123:1988 no son aplicables por no cumplirse los requerimientos de la distancia de los modelos con respecto al suelo que se plantean para los coeficientes de presión.

2. Del estudio realizado en túnel de viento, y corroborado con el trabajo de Stathopoulos, se evidenció que la

dirección 135° es la que mayores valores de coeficiente de presión arroja, por lo tanto, las normas deberían considerar otras direcciones de viento además de 0° y 180°.

3. Entre las normas, el empleo de los coeficientes de presión del Eurocódigo 1- 4: 2005 conduce a los mayores valores de reacciones de apoyo, tanto para la compresión como para la tracción.

4. Entre el estudio realizado en túnel de viento sobre el panel y el trabajo de Stathopoulos se encontraron diferencias considerables, debido al empleo por Stathopoulos de un solo valor de coeficiente de presión o succión, lo cual se aleja de la distribución de presiones que experimenta el panel dentro del flujo.

5. Las diferencias entre las reacciones de apoyo obtenidas mediante el empleo de los coeficientes de presión de las normas y los derivados de los ensayos en túnel de viento no deben atribuirse únicamente al coeficiente de presión; sino también, al enfoque que se sigue para este tipo particular de estructura inmersa en la región interna de la capa límite, de considerar la turbulencia dentro del coeficiente de presión y no como un parámetro independiente, que es el procedimiento habitual que plantean las normas donde el coeficiente de ráfaga es tratado independiente del coeficiente de presión.

REFERENCIAS

1. STATHOPOULOS, T.; XYPNITOU E.; ZISIS, I. *Wind Loads on Solar Collectors and PV Panels on Roofs*. Structures Congress. 2013, pp. 1545-1554.
2. STATHOPOULOS, T.; ZISIS, I.; XYPNITOU, E. "Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014, vol.125, pp. 195-206. ISSN: 0167-6105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.007>.
3. GINGER, J. et. al. *Investigation on Wind Loads Applied to Solar Panels Mounted on Roofs*, S.o.E.P.S. Cyclone Testing Station, Editor. 2011, James Cook University, Townsville, Australia. Report No. TS821.
4. ABIOLA OGEDENGBE, A.; HANGAN, H.; SIDDIQUI, K. "Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module". *Renewable Energy*. 2015, vol.78, pp. 657-665. 0960-1481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.037>. ISSN: 0960-1481.
5. ALY, A. M.; BITSUAMLAK, G. "Aerodynamics of ground-mounted solar panels: test model scale effects". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013, vol.123, pp. 250-260. ISSN: 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.07.007>.
6. NC-285:2003 *Norma Cubana: Carga de viento. Método de cálculo*.
7. NBR6123:1988 ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas : *Forças devidas ao vento em edificações*.
8. CÓDIGO DE ARGENTINA: CIRSOC 102 1992. *Acción del viento sobre las construcciones*.
9. EN1991-1-4: 2004. *Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions*.
10. ASCE7-10: 2010. *American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*.
11. AS/NZS1170.2-2011:2011. *Australian/New Zealand Standard: Structural Design actions, Part 2: Wind Actions*.
12. SHADEMAN, M. et. al. "Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2014. vol. 41, núm.8, pp. 728-738. ISSN: 0315-1468, <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0537>.
13. BITSUAMLAK, G. T.; DAGNEW, A. K.; ERWIN, J. "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 2010*.<http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0537>.
14. MAFFEI, J. et. al. "Wind design practice and recommendations for solar arrays on low-slope roofs". *Journal of Structural Engineering*. 2013, vol.140, núm. 2, pp. 04013040-(1-10). ISSN: 0733-9445, <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0537>.
15. STATHOPOULOS, T.; XYPNITOU, E.; ZISIS. I. *Wind Loads on Rooftop Solar Panel Systems: A Contribution to NBCC*. 2015, <http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/APECWW/Report/2012/Canada.pdf>.
16. JUBAYER, C. M.; Hangan, H. "Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014, vol.134, pp. 56-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.008>.
17. SAMANI, Z. *Wind Loading on Full-scale Solar Panels*. [On line] 2016, The University of Western Ontario.
18. BANKS, D. "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*. 2013, vol. 123, Part A, pp. 192-201. ISSN: 0167-6105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.015>.
19. HOLMES, J. D. *Wind loading of structures*. Ed. T.F. e-Library. Taylor & Francis e-Library. 2004. ISBN: 0-203-30164-1 Master e-book.
20. COOK, N. J. *The designer's guide to wind loading of building structures*. Part 2: Static structures. 1990.

AUTORES

Alejandro López Llanusa

Ingeniero Civil, Máster en Reducción de Desastres, Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Eric D. León Finalé

Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

José Cataldo Ottieri

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Vivian B. Elena Parnás

Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora Titular, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Study of Drag Coefficients in Solar Panel Under Wind Loads

Abstract

Due to the geographical situation of Cuba the wind plays an important role in the design of the solar panels. The aim of the research is to evaluate the differences that appear in the support reactions of the panel, due to pressures acting, in correspondence with the implementation of the Cuban standard NC-285: 2003 but varying the pressure coefficient by using standards NBR 6123: 1988, CIRSOC 102, CN-285: 2003, Eurocode 1-4: 2005, ASCE 7-10 and AS-1170.2: 2011. These reactions are also calculated from pressure coefficients obtained by wind tunnel testing on a scale model and coefficients proposed by another international work carried out on a wind tunnel on a similar solar panel. The main conclusions are that: among the standards, the use of the pressure coefficients proposed by the Eurocode 1- 4: 2005 leads to higher values of the support reactions and about the studies on wind tunnel testing, it can be concluded that the use of a total value of pressure coefficient it is not a good approximation to the actual behavior of the pressures on the panel.

Key words: wind force, solar panels, wind tunnel