

Estudio De Carga De Viento Para Estructuras Soportes De Paneles Solares En Edificaciones Bajas

Study Of Wind Load For Support Structures Of Solar Panels In Low Buildings

Autores

Rigoberto Morales Hernández¹, Roberto Álvarez Hurtado de Mendoza², Alejandro López Llanusa³

¹ Ingeniero Civil, de la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Calle 114, #11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. E-mail: : rigobermorher@civil.cujae.edu.cu

² Ingeniero Civil ,de Axial Sistemas Solares, Valencia , España E-mail: ralvarez@axialstructural.com

³Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Calle 114, #11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. E-mail: alo@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

En la década del 80, los paneles fotovoltaicos eran muy caros y en Cuba sólo se utilizaban para casos excepcionales donde se hacía imposible llegar con líneas de transmisión eléctricas. En los últimos años se ha producido una disminución gradual de los precios de los paneles lo cual ha propiciado el desarrollo de una política para incrementar el número de parques fotovoltaicos a lo largo de todo el país en el periodo comprendido entre 2011 y 2022. Es una tendencia internacional la colocación de paneles solares sobre edificaciones (naves industriales, edificios, viviendas) debido a los altos costos que tiene el suelo en la actualidad, lo que atenta contra la utilización de esta fuente de energía. En Cuba, esta forma de colocación de los paneles no se encuentra bien aprovechada. La incorporación de la energía solar como fuente alternativa en las residencias y otros centros grandes consumidores de las ciudades cubanas es uno de los retos del Ministerio de Energía y Minas (MINEN). En este contexto, el espacio para ubicar los paneles tiene un papel decisivo y el empleo de las cubiertas de las edificaciones adquiere especial significación. Este trabajo tiene como objetivo ofrecer recomendaciones en cuanto a las características ideales que deben tener las cubiertas de edificaciones bajas para la colocación de estas estructuras teniendo en cuenta el efecto de la carga de viento. Se ejemplifican esas recomendaciones a través de un caso de estudio.

Palabras claves: Carga de Viento; Paneles Solares; Edificios Bajos, Coeficientes de Presión.

ABSTRACT:

In the 80's, photovoltaic panels were very expensive and in Cuba they were only used for exceptional cases where it was impossible to reach with electric transmission lines. In recent years there has been a gradual decrease in the prices of panels which has led to the development of a policy to increase the number of photovoltaic parks throughout the country in the period between 2011 and 2020. It is an international trend the placement of solar panels on buildings (industrial buildings, buildings, houses) due to the high costs of the soil currently, which threatens the use of this energy source. In Cuba, this way of placing the panels is not well exploited. The incorporation of solar energy as an alternative source in residences and other large consumer centers in Cuban cities is one of the challenges of the Ministry of Energy and Mines (MINEN). In this context, the space to locate the panels has a decisive role and the use of the roofs of the buildings acquires special significance. The purpose of this work is to offer recommendations regarding the ideal characteristics that low-level building roofs must have for the placement of these structures taking into account the effect of wind load. These recommendations are exemplified through a case study.

Keywords: Wind Load; Solar Panels; Low-Rise Buildings, Pressure Coefficients.

Nota Editorial: Recibido: Agosto 2022 Aceptado: Septiembre 2022

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar es seguramente la más accesible de las energías renovables, lo que la convierte en un punto de atención mundial, pues permite la aplicación de paneles solares fotovoltaicos en varias escalas de servicios públicos y ofrece beneficios económicos a nivel individual y nacional.

Hoy en día, los paneles solares se utilizan cada vez más en edificios residenciales e industriales de baja altura con variedad de instalaciones y geometrías. Según su sistema de montaje se reconocen dos grupos principalmente: Energía Fotovoltaica Adjunta a Edificios (EFAE) y Fotovoltaica Integrada en los Edificios (EFIE) [1]. En esta última los módulos fotovoltaicos se integran a los componentes del edificio (es decir, el techo, la fachada o las ventanas) sustituyendo los elementos tradicionales de construcción, considerándose en este caso a los paneles solares como parte de la estructura. En el (EFAE) los paneles solares se fijan a las paredes o al techo del edificio (es decir, inclinados hacia arriba en techos planos, en paralelo a techos inclinados o montados en paredes). En este tipo de aplicación, los sistemas fotovoltaicos no son parte del sistema estructural del edificio, sino que se consideran adjuntos.

Los paneles solares montados sobre cubiertas en Cuba deben diseñarse para soportar el peso propio del conjunto y las cargas debido al viento. Estos sistemas son estructuras livianas y si no se suponen adecuadamente las presiones del viento en sus superficies, pueden provocar daños en los paneles. Para la obtención de estas presiones sobre los paneles solares frente al viento suelen emplearse ensayos a escala real [2-6], simulación computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés), [4, 7-13] y experimentos en túnel de viento de capa límite atmosférica [14-21]. Este último método es considerado el más confiable para la determinación de la carga sobre la estructura [1].

Según Alrawashdeh and Stathopoulos [1], el interés reciente en determinar la carga del viento para el diseño de paneles solares ha introducido datos de coeficientes de presión originados principalmente a partir de estudios de túneles de viento, generando recomendaciones tanto para la determinación de la carga de viento como para la instalación del panel. Luego de realizar ensayos en túnel de viento de capa límite atmosférica (ABLWT, por sus siglas en inglés) a modelos de paneles con diferentes escalas geométricas, estos autores concluyeron que no estimar correctamente la escala longitudinal de la turbulencia correspondiente a la escala geométrica utilizada puede llevar a sobreestimar o subestimar las presiones, en dependencia de la localización del panel. Recomiendan que al probar paneles solares en ABLWT se garantice que la proporción entre la altura del modelo y el tamaño de la escala de turbulencia se mantenga constante en relación con el viento natural. La amplia aplicación de arreglos de paneles fotovoltaicos (PV) en la azotea en edificios residenciales ha aumentado la importancia del diseño confiable y eficiente. El seguimiento de unas pautas de diseño adecuadas asegura el correcto funcionamiento del sistema, así como las implicaciones de seguridad en los alrededores durante eventos de viento extremo. En tales eventos, las presiones distribuidas en la superficie de los paneles fotovoltaicos pueden provocar daños estructurales considerables que impliquen la pérdida parcial o total del conjunto fotovoltaico, así como deterioros potenciales de las propiedades cercanas [5]. Naeiji, et al. [5] probaron modelos a gran escala de sistemas fotovoltaicos instalados en estructuras residenciales en el Centro de Investigación *Wall of Wind*. Los coeficientes de fuerza resultantes de todas las configuraciones ensayadas fueron codificados y presentados para diferentes áreas efectivas mientras se hacía una comparación entre los resultados de este estudio y los resultados de investigaciones previas. Sus hallazgos revelaron que la determinación de los coeficientes de fuerza máxima y mínima dependían principalmente del tipo de cubierta (plana, a dos aguas o a cuatro aguas) y del ángulo de inclinación del panel. Las máximas presiones, en el caso de los paneles inclinados, se obtuvieron para ángulos de ataque del viento de 315° en los techos planos y a dos aguas y de $337,5-0^\circ$ en los techos a cuatro aguas. A su vez, las máximas succiones netas ocurrieron para un ángulo de 225° , ya que el flujo generado por la edificación incide en la superficie inferior de los paneles más exteriores, separándose en sus bordes y causando altas succiones en la superficie superior del panel. Debido a esto, los paneles críticos para los tipos de cubierta analizados fueron los ubicados en las esquinas a barlovento. Otro de los resultados de este estudio fue que los coeficientes de fuerza de diseño para áreas efectivas más pequeñas eran significativamente más altos en comparación a estudios anteriores y normas existentes. Los autores atribuyen estas discrepancias a que la mayoría de los estudios previos no pudieron recrear características de flujo precisas debido a las pequeñas dimensiones de los modelos, además de que en estos estudios los paneles se ubicaban a una distancia conservadoramente lejana del borde de la cubierta por lo que no pudieron capturar las altas presiones que se observan principalmente en las zonas cercanas al borde. Chung, et al. [22] determinaron experimentalmente las cargas de viento en un panel solar independiente teniendo en cuenta ángulos de inclinación del panel entre 10° y 80° y ángulos de ataque del viento entre 0° y 180° . Obtuvieron que para grandes ángulos de inclinación ocurrían cargas localizadas significativas cerca del borde frontal del panel. Para ángulos de incidencia de $135^\circ - 150^\circ$ la formación de un fuerte vórtice en la esquina de barlovento da como resultado una mayor fuerza de sustentación en la mitad derecha del panel.

Radu, et al. [14] realizaron pruebas de túnel de viento en un conjunto de paneles solares montados en la parte superior de un edificio residencial de cinco pisos y notaron la reducción en los coeficientes medios de fuerza como resultado de los efectos de protección del edificio y de los paneles solares de las primeras filas. Stathopoulos, et al. [17] utilizan un modelo a escala 1:200 para examinar la influencia de factores como la altura de la edificación, la inclinación del panel, su localización y la dirección del viento. Presentando como resultado de que la dirección del viento que produce los mayores valores de los coeficientes de presiones es la de 135°. Con relación a la inclinación del panel concluyen que a medida que esta aumenta, también lo hacen los valores de las presiones. La altura de la edificación no es significativa en la mayoría de las configuraciones. Los paneles con los mayores coeficientes de fuerza neta fueron los más cercanos al borde de la cubierta. Estos autores también proponen un diagrama simplificado de la distribución de los coeficientes de presión para el diseño de paneles solares montados en tierra o en techos planos. Aly and Bitsuamlak [20] en su investigación en un túnel de viento de paneles solares adosados en techos residenciales inclinados, concluye que para estos casos las cargas que establece la ASCE7-10 [23] es mayor hasta un 35 % que la obtenida en los ensayos. Chowdhury et al. [12] estudiaron mediante CFD un modelo a escala 1:20 de un panel sobre un techo inclinado. Probaron varias separaciones entre la cubierta y el panel y llegaron a la conclusión de que con separaciones muy pequeñas se reducía el efecto de enfriamiento debido al viento, lo que derivaba en mayores pérdidas eléctricas. Según Wang, et al. [19] los coeficientes de fuerza pico (tanto negativos como positivos) sobre los paneles se ven significativamente reducidos con un aumento en la altura del parapeto de la cubierta para una dirección del viento de 0°. Con el viento a 180° un parapeto más alto tiende a generar un mayor valor de fuerza pico negativa. No obstante, tanto los coeficientes de presión neta como las presiones pico negativas promediadas en área tienden a ser menores con la presencia del parapeto. Aunque mucho más escasas que las pruebas aerodinámicas en túnel de viento, algunos investigadores han llevado a cabo pruebas de escala real en paneles solares (figura 1). Este tipo de ensayo contribuye a validar los resultados que se obtienen mediante otros métodos (túnel de viento, CFD), a la vez que permite evaluar el desempeño de los paneles ante condiciones climáticas reales.



Figura 1: Paneles montados sobre techo [2, 3].

A pesar de las numerosas investigaciones realizadas sobre paneles solares, dentro de los códigos y normas actuales para la obtención de la carga de viento sobre estructuras no se incluyen disposiciones para el diseño de los paneles solares propiamente. Se realizó una revisión de normas internacionales, incluyendo los códigos NBRS6123, de Brasil, CIRSOC 102, de Argentina, EN1991-1-4, de Europa, ASCE7-10 de Estados Unidos, AS/NZS1170.2, de Australia y Nueva Zelanda y NC-285 de Cuba y se encontró que 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. Además de las indicaciones que proveen estas normas, sirvieron de guía para el diseño y ubicación de los paneles las recomendaciones de los autores listadas anteriormente, adaptando estas sugerencias al presente caso de estudio. Para realizar el diseño de la estructura soporte para los paneles solares a ubicar en el edificio de Mecánica de Suelos se fijó la separación desde el borde de ataque del edificio hasta el borde del panel, ya que este parámetro influye en las presiones, coeficientes de protección y de forma según plantean Warsido, et al. [15]. Esto autores estudiaron tanto paneles sobre el terreno como sobre la cubierta de un edificio con características geométricas similares al del presente estudio. Emplearon varias separaciones (0,61 m, 1,22 m y 1,83 m) de la primera fila de paneles al borde de ataque del techo, lo que les permitió concluir que a medida que aumenta la separación se observa un comportamiento similar en cuanto a las presiones de la matriz montada sobre el terreno. En el presente estudio se trabajó con una separación de dos metros, tomada por facilidades constructivas de acuerdo con las características estructurales del edificio y que se ajusta con los resultados de Warsido, et al. [15]. El comportamiento antes descrito, posibilita que puedan ser empleados los estudios previos de López Llanusa [24] para el cálculo de la carga de viento.

La separación escogida entre en los laterales de la edificación y las estructuras a colocar fue de tres metros, de acuerdo con Warsido, et al. [15] que plantea que de no respetar estas separaciones las turbulencias que se generan de la interacción del viento con el borde de ataque del edificio afectan las presiones sobre los paneles.

2. DESARROLLO

La instalación objeto de estudio para el diseño de las estructuras soporte de paneles solares es el edificio de Mecánica de Suelos (ver figura 2), perteneciente a la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). El edificio tiene características geométricas de 62 m de largo, 12 m de ancho y 7,3 m de altura.



Figura 2: (a) Microlocalización de edificio objeto de estudio, (b) Columnas salientes en la estructura del edificio.

Partiendo del estudio del estado del arte realizado previamente, se determinó la ubicación de los paneles en la cubierta de forma tal que se lograra la optimización del diseño estructural y las afectaciones debido al viento fueran mínimas.

La estructura está compuesta por un reticulado que consta de dos vigas articuladas a las columnas existentes (figura 3a) que sobresalen del techo y sobre estas se apoyan cuatro vigas las cuales hacen función de soporte para los paneles solares. La primera fila de paneles solares se ubica a 2200 mm del borde de ataque del techo y 3000 mm de los bordes laterales (figura 3b). La separación entre las vigas secundarias (de eje a eje) es de 2350 mm para 15° y de 2700 mm para 23°. La cubierta presenta un área total de sol de 291 m² que representan unos 180 paneles solares. El peso de la estructura en acero es de 109 kN para las inclinaciones estudiadas.

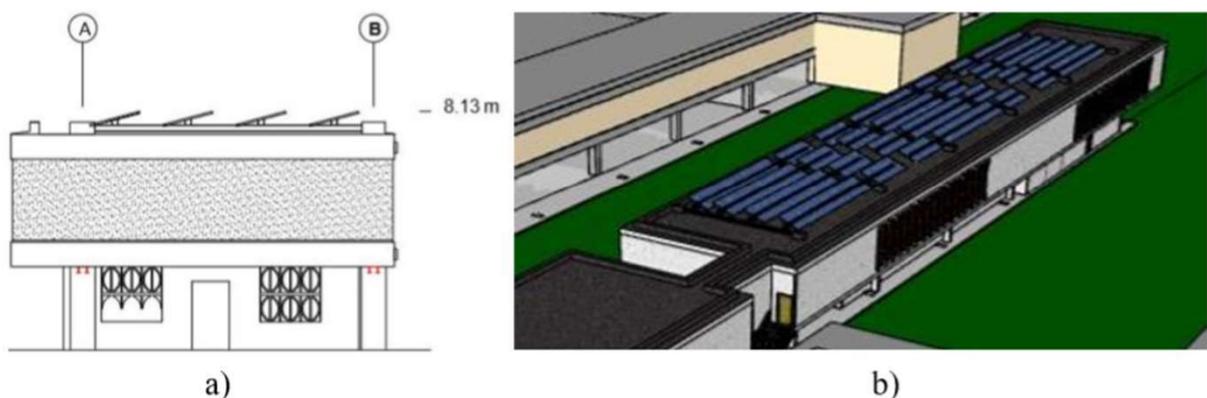


Figura 3: a) Esquema de la sección transversal y b) Distribución sobre la cubierta.

Un parámetro fundamental para lograr una mayor eficiencia energética es la inclinación del panel. Cuba se encuentra entre los 22° y 24° de latitud, por lo que la mayor captación solar se registra en estructuras de paneles que se encuentren en este rango de inclinación; sin embargo, la mayoría de los parques solares explotados hasta la actualidad en el país tienen estructuras con inclinación de 15°, por lo que a instancias de este estudio se trabajó con las dos inclinaciones: 15° por ser la más empleada y 23° por ser la recomendada [18]. La altura de las estructuras que se coloquen en el techo no debe ser menor de 25 cm, medida desde el nivel de cubierta hasta el borde bajo del panel, para evitar pérdidas eléctricas y garantizar ventilación de acuerdo a estudios realizados por la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad [25].

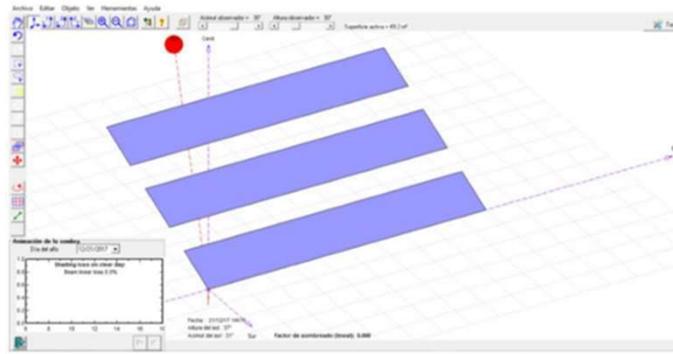


Figura 4: Determinación de la sombra que producen unos paneles sobre otros mediante el software PVSIT.

La separación entre filas de paneles es otros de los aspectos prefijados. Se obtiene mediante una modelación en el software PVSIT (ver figura 4), el cual ofrece la distancia mínima recomendada para evitar las pérdidas de captación eléctrica debido a la sombra; teniendo en cuenta que se desea aprovechar al máximo la superficie de la cubierta para tener la mayor generación eléctrica posible.

3. MODELACIÓN Y ANÁLISIS

Para la modelación, análisis y diseño de las variantes antes mencionadas se utilizó el software SAP2000v.20. Fue realizado un proceso de optimización a la estructura en cuanto a las dimensiones de los elementos, para reducir al mínimo posible el peso de acero. Fue necesario tener en cuenta las cuatro invariantes del proceso de modelación: forma, material, condiciones de apoyo y carga. Los elementos de la estructura fueron nombrados: Viga Principal (VP), Viga soporte panel (VSP) y Columna, ver figura 5. La viga principal se consideró articulada a las columnas que sobresalen de la cubierta. La unión viga principal - columna se analizó como empotrada y la unión viga principal con las vigas de soporte del panel se consideraron articuladas. El material utilizado fue A992Fy50.

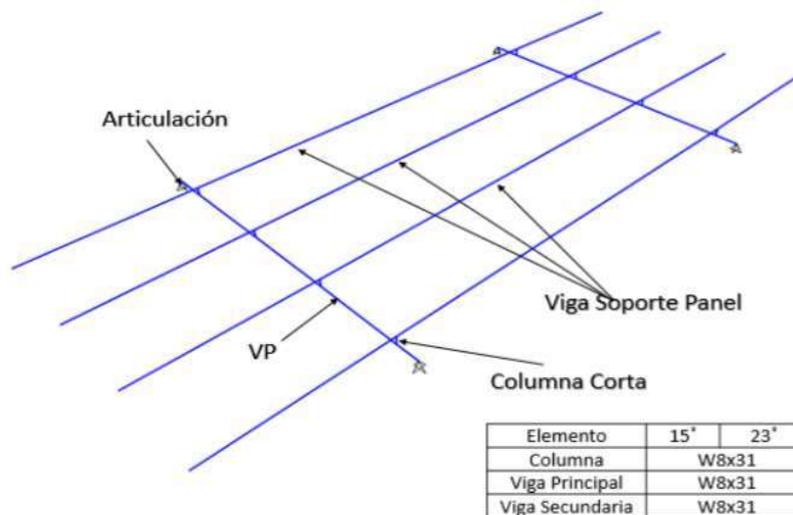


Figura 5: Esquema de los elementos estructurales con una tabla resumen de las secciones empleadas en el diseño.

Se consideraron: las cargas de peso propio de los elementos de las estructuras a partir del software empleado para el análisis, el peso de los paneles fotovoltaicos (20 kg cada panel) y la carga de viento actuante sobre la estructura según lo establecido en la norma cubana de viento [26]. Se utilizaron los coeficientes de forma propuestos por López Llanusa [24] en su tesis doctoral para paneles solares ubicados sobre el terreno; los cuales se pueden aplicar para paneles sobre edificios según Warsido, et al. [15], como se planteó previamente en la introducción del trabajo. Para el cálculo de las cargas de viento se tuvieron en cuenta las direcciones de 0°, 45°, 180°, 135° como se muestra en la figura 6 ya que según Stathopoulos, et al. [17] y López, et al. [27] son las más críticas para este tipo de estructuras.

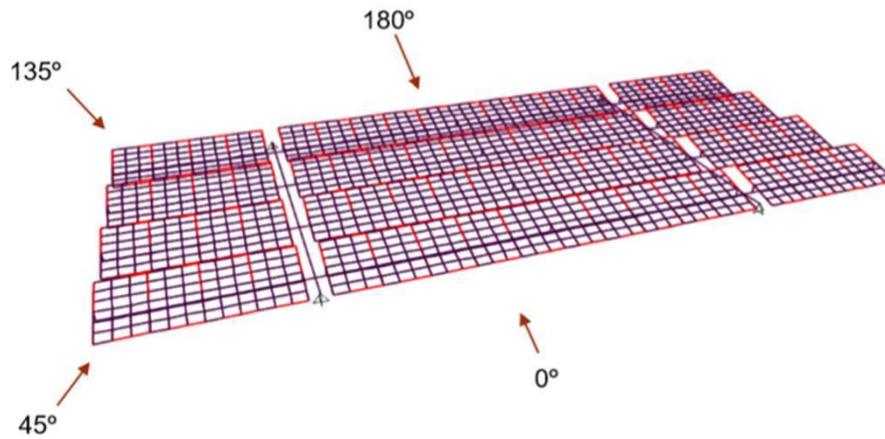


Figura 6: Direcciones de viento analizadas para la determinación de la estructura soporte de los paneles solares.

La presión de viento sobre la estructura se obtuvo empleando la ecuación (1) según lo que establece la norma [26]

$$q = q_{10} * Ct * Ch * Cs * (Cr * Cf * Cra) \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (1)$$

Dónde: q_{10} es la presión básica característica del viento para una recurrencia de 50 años y en zona 1 = 1,3 kN/m², C_t es el coeficiente de recurrencia para 50 años es 1, C_s es el coeficiente de sitio se tomó como 1, C_h es el coeficiente de altura para tipo de terreno B y con una altura de 7,5 m es igual a 0,65.

Los coeficientes de ráfaga (C_r), de reducción de área (C_{ra}) y de forma (C_f) se tomaron como un único valor de acuerdo con los ensayos realizados en el túnel de viento por López Llanusa [24]; para los ángulos de inclinación de 15° y 23°, la distribución resultante se muestra en la figura 7. En la tabla 1 y 2 se muestran los valores de coeficiente de protección por posición que se adoptaron para los casos de las direcciones de 0° y 180° por presentar cuatro filas de paneles.

| Inclinación de 15° | | | | Inclinación de 23° | | | |
|--------------------|-------|------|------|--------------------|-------|------|------|
| 180° | | 0° | | 180° | | 0° | |
| -2,70 | -1,66 | 0,34 | 0,55 | -3,15 | -2,84 | 0,61 | 1,00 |
| -1,09 | -1,03 | 0,74 | 1,26 | -2,20 | -1,77 | 1,45 | 1,84 |
| -0,74 | -0,60 | 1,39 | 1,56 | -1,21 | -0,98 | 1,96 | 2,25 |
| -0,60 | | 1,56 | | -0,98 | | 2,25 | |
| 135° | | 45° | | 135° | | 45° | |
| -2,41 | -2,11 | 1,30 | 0,82 | -4,10 | -2,93 | 1,79 | 1,38 |
| -2,58 | -0,85 | 1,36 | 0,90 | -3,71 | -1,26 | 2,30 | 1,52 |
| | | 1,36 | 0,90 | | | 2,30 | 1,52 |

Figura 7: Distribución de las cargas de vientos para las cuatro direcciones analizadas (15° izquierda y 23° derecha).

Tabla 1: Coeficientes de reducción por posición para las direcciones de 0°

| Coeficientes de reducción de la carga de viento para 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 |

Tabla 2: Coeficientes de reducción por posición para las direcciones 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 |

Para el diseño de los elementos que componen la estructura se utilizaron las combinaciones de carga establecidas en la NC 450 [28], con el objetivo de que el diseño cuente con factores que consideren incertidumbres en los valores reales de las cargas, la duración, la simultaneidad de acción de las mismas y sus combinaciones más desfavorables. Las combinaciones de carga analizadas fueron

- 1.4 D
- 0.9 D + 1.4 CV 0°
- 0.9 D + 1.4 CV 45°
- 0.9 D + 1.4 CV 135°
- 0.9 D + 1.4 CV 180°
- 1.2 D + 1.4 CV 0°
- 1.2 D + 1.4 CV 45°
- 1.2 D + 1.4 CV 135°
- 1.2 D + 1.4 CV 180°

Donde (D) es la carga de peso propio de elementos estructurales y los paneles, y (CV) carga de viento según la dirección analizada.

Las direcciones de 0° y 45° son las que originan las mayores compresiones en los apoyos (tabla 3), mientras que en el caso de las tracciones son las direcciones 135° y 180° (tabla 4). Como se puede observar, al aumentar el grado de inclinación aumentan los valores de tracción y compresión respectivamente coincidiendo con las mismas direcciones de viento, excepto para el apoyo 1, que varía la dirección más desfavorable al cambiar la inclinación con respecto a la horizontal de 15° a 23°. Esto sucede porque cuando el panel se encuentra a 23° la carga de viento con dirección de 180° es predominante aun cuando existe efecto de protección de la primera fila sobre las restantes, tiene un valor muy elevado y genera en ese apoyo succiones mayores que la dirección de 135°.

Tabla 3. Compresión en reacciones de apoyo más desfavorables para 15° y 23°

| Compresión en las reacciones de apoyo (kN) | | | | |
|--|--------|--------------------|--------|--------------------|
| Reacción | 15° | Combinación | 23° | Combinación |
| 1 | 44,609 | 1,2 D + 1,4 CV 0° | 58,271 | 1,2 D + 1,4 CV 0° |
| 2 | 37,94 | 1,2 D + 1,4 CV 45° | 49,967 | 1,2 D + 1,4 CV 45° |

Tabla 4: Tracción en reacciones de apoyo más desfavorables para 15° y 23°

| Tracción en las reacciones de apoyo (kN) | | | | |
|--|---------|---------------------|---------|---------------------|
| Reacción | 15° | Combinación | 23° | Combinación |
| 1 | -17,812 | 0,9 D + 1,4 CV 180° | -40,329 | 0,9 D + 1,4 CV 180° |
| 2 | -26,816 | 0,9 D + 1,4 CV 135° | -58,755 | 0,9 D + 1,4 CV 180° |

4. CONCLUSIONES

Aunque en las normas de cálculo de cargas de viento (tanto nacionales como internacionales) no se consideran los paneles solares colocados sobre cubiertas, en la bibliografía analizada se encontraron diversos criterios a tener en cuenta para el diseño y ubicación de este tipo de estructuras. Estas recomendaciones fueron aplicadas en el presente caso de estudio con el objetivo de usarlo como referente en futuros proyectos que impliquen la instalación de paneles solares.

En el acápite de las condicionantes del proyecto se fijaron, a partir del estado del arte, las distancias mínimas de separación entre los bordes del techo y la primera fila de paneles, en aras de lograr un comportamiento similar al de estructuras de paneles solares colocadas a nivel de terreno. Estas separaciones pueden ser empleadas en todas las edificaciones bajas que cumplan con las características del objeto de estudio si se quisiera realizar un trabajo similar a este en el futuro (Ejemplo: los edificios de beca).

Partiendo del análisis realizado en este trabajo, se pueden brindar las siguientes recomendaciones para la instalación y diseño de paneles en cubierta:

Al ubicar los paneles se debe tener en cuenta una separación mínima entre estos y los bordes de la cubierta. Se aconsejan por lo menos dos metros al borde de ataque de la cubierta y tres metros a los laterales de la edificación. De esta forma se evitan los efectos de las turbulencias que se generan en el borde de la edificación. Debe existir además una distancia de al menos 25 cm entre el borde inferior del panel y la cubierta que permita la circulación del aire, lo que ayuda a evitar las pérdidas eléctricas por falta de enfriamiento del panel. La separación entre filas de paneles debe tener una distancia tal que minimice las pérdidas de captación debido a la sombra.

Debe prestarse especial atención a los paneles ubicados en las primeras filas, siendo el caso crítico las esquinas a barlovento, ya que en estos se generan mayores presiones debido a la formación de vorticidades. En caso de existir parapetos en la cubierta, estos deben considerarse al determinar la carga de viento ya que su presencia reduce significativamente los coeficientes de fuerza sobre los paneles

Los resultados demuestran la necesidad de tener en cuenta en el análisis la dirección de incidencia del viento desde ángulos de 0° , 45° , 135° y 180° para llegar a las condiciones críticas de diseño en este tipo de estructura; corroborando los resultados obtenidos por López et al. [27].

Para el área superficial analizada, las pérdidas de captación con respecto al ángulo de inclinación no son representativas por lo que no constituyen un aspecto decisivo para la selección de variantes, centrándose el papel principal en los criterios estructurales.

1. Alrawashdeh and T. Stathopoulos, "Wind loads on solar panels mounted on flat roofs: Effect of geometric scale," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 206, p. 104339, 2020/11/01/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104339>
2. G. S. Wood, R. O. Denoon, and K. Kwok, "Wind loads on industrial solar panel arrays and supporting roof structure," *Wind and Structures*, vol. 4, no. 6, pp. 481-494, 2001.
3. C. P. W. Geurts and R. D. J. M. Steenbergen, "Full scale measurements of wind loads on stand-off photovoltaic systems," in *Proceedings of the Fifth European and African Conference on Wind Engineering Florence, Italy, 2009*.
4. G. T. Bitsuamlak, A. K. Dagnew, and J. Erwin, "Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD," in *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE)*, Chapel Hill, North Carolina, USA, 2010. <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0537>.
5. Naeiji, F. Raji, and I. Zisis, "Wind loads on residential scale rooftop photovoltaic panels," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 168, pp. 228-246, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.06.006>
6. R. Braun et al., "Peak Wind Effects on Low-Rise Building Roofs and Rooftop PV Arrays," in *6th American Association for Wind Engineering Workshop (online)*, Clemson University, Clemson, SC, USA, 2021.
7. M. Shademan and A. Naghib-Lahouti, "Effects of aspect ratio and inclination angle on aerodynamic loads of a flat plate," *Advances in Aerodynamics*, vol. 2, no. 1, p. 14, 2020. <http://dx.doi.org/10.1186/s42774-020-00038-7>
8. M. Shademan, R. Barron, R. Balachandar, and H. Hangan, "Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 41, no. 8, pp.728-738, 2014. <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0537>
9. Y.-Y. Wu, S.-Y. Wu, and L. Xiao, "Numerical study on convection heat transfer from inclined PV panel under windy environment," *Solar Energy*, vol. 149, pp. 1-12, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.084>
10. J. Wang, P. Van Phuc, Q. Yang, and Y. Tamura, "LES study of wind pressure and flow characteristics of flat-roof-mounted solar arrays," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 198, p. 104096, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104096>
11. G. P. Reina and G. De Stefano, "Computational evaluation of wind loads on sun-tracking ground-mounted photovoltaic panel arrays," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 170, pp. 283-293, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.002>
12. M. G. Chowdhury, D. Goossens, H. Goverde, and F. Catthoor, "Experimentally validated CFD simulations predicting wind effects on photovoltaic modules mounted on inclined surfaces," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 30, pp. 201-208, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.10.005>
13. Agarwal, H. Irtaza, and K. Shahab, "Aerodynamic Wind Pressure on Solar PV Arrays Mounted on Industrial Pitched Roof Building," in *International Conference on Recent Advances in Engineering & Science (ICRAES-2020)*, 2020: Innovations in Engineering & Science.
14. Radu, E. Axinte, and C. Theohari, "Steady wind pressures on solar collectors on flat-roofed buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 23, pp. 249-258, 1986. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(86\)90046-2](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(86)90046-2)
15. W. P. Warsido, G. T. Bitsuamlak, J. Barata, and A. G. Chowdhury, "Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 48, pp. 295-315, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.03.005>
16. J. Cao, A. Yoshida, P. K. Saha, and Y. Tamura, "Wind loading characteristics of solar arrays mounted on flat roofs," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 123, Part A, pp. 214-225, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.014>
17. T. Stathopoulos, I. Zisis, and E. Xypnitou, "Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.125, pp.195-206, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.007>
18. E. López, V. ; Cataldo, J., "Wind Tunnel Experiments on Ground-Mounted Photovoltaic Solar Panels," *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, vol. 34, no 1, pp. 15-24, 2019. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732019000100015>

19. J. Wang, Q. Yang, and Y. Tamura, "Effects of building parameters on wind loads on flat-roof-mounted solar arrays," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 174, pp. 210-224, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.12.023>
20. M. Aly and G. Bitsuamlak, "Wind-induced pressures on solar panels mounted on residential homes" *Journal of Architectural Engineering*, vol. 20, no. 1, p. 04013003, 2013. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000132](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000132).
21. C.-C. Chou, P.-H. Chung, and R.-Y. Yang, "Wind loads on a solar panel at high tilt angles," *applied sciences*, vol. 9, no. 8, p. 1594, 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/app9081594>
22. P.-H. Chung, C.-C. Chou, R.-Y. Yang, and C.-Y. Chung, "Wind loads on a PV array," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 12, p. 2466, 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/app9122466>
23. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ISBN 978-0-7844-1085-1, 2010.
24. López Llanusa, "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), Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría (CUJAE), 2017.
25. R. Díaz Santos, M. Castro Fernández, A. Santos Fuentefría, and M. J. I. E. Vilaragut Llanes, "Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica," *Ingeniería Energética*, vol. 39, no. 3, pp. 146-156, 2018.
26. *Norma Cubana: Carga de viento. Método de cálculo*, 2003.
27. López, E. D. León, V. B. Elena, and J. Cataldo, "Estudio de coeficientes de presión en paneles solares frente a la acción del viento," *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 7, pp. 35-44, 2016.
28. *Edificaciones-Factores de Carga o Ponderación-Combinaciones*, 2006.