



Universidad Tecnológica de La Habana
José Antonio Echeverría
Facultad de Ingeniería Civil
Departamento de Estructuras

***DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE PRESIÓN
PARA PANELES FOTOVOLTAICOS DENTRO DE
UN PARQUE BAJO LA ACCIÓN DEL VIENTO***

***TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN DEL GRADO CIENTÍFICO DE DOCTOR EN
CIENCIAS TÉCNICAS***

Aspirante: MSc. Ing. Alejandro López LLanusa

Tutores: Dr. Ing. Vivian Elena Parnás

Dr. Ing. José Cataldo Ottieri

LA HABANA, 2017

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer de forma muy especial a Vivian y Cataldo por su gran paciencia, dedicación y consejos a lo largo de estos años.

Agradezco también a todos los que han contribuido a la realización de este trabajo, A la Asociación Uruguay 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 Alejandro Gutierrez, Pablo Pais, Gabriel Narancio y Rodolfo Pienica, por sus consejos y apoyo durante el estudio y realización de los ensayos en el túnel de viento.

A mis compañeros, amigos y estudiantes de la CUJAE por la dedicación con la que han apoyado esta investigación.

A mi familia, la familia E+ y a mis amigos les agradezco su apoyo incondicional, en especial a Ingrid que de no ser por ella no hubiera podido hacer esto.

SÍNTESIS

En los últimos años se ha registrado en el mundo un incremento de la utilización de las fuentes renovables de energía debido al aumento del costo de los combustibles fósiles, su agotamiento, así como la contaminación atmosférica que tiene asociada su utilización. Cuba no se encuentra exenta de este fenómeno y ha comenzado a instalar centrales de generación de energía eléctrica sobre la base de fuentes renovables de energía como son el biogás, la energía eólica y la energía fotovoltaica, dentro de esta, los módulos fotovoltaicos se suelen disponer en conjuntos sobre una misma estructura de soporte, la cual se denomina “panel solar” que se encuentra apoyada en el suelo a través de columnas.

Este tipo de estructuras tiene un comportamiento aerodinámico complejo, que se modifica de acuerdo a los parámetros geométricos y meteorológicos. Dentro de los parámetros geométricos se encuentran el tamaño e inclinación del panel, el espaciamiento entre filas y columnas de los paneles, en el caso de los parques y la altura sobre el suelo.

El objetivo principal de esta tesis es obtener el campo de presiones producidas por el viento sobre un panel fotovoltaico dentro de un arreglo de paneles en un parque fotovoltaico. Se realizó un estudio experimental en túnel de viento para obtener cómo se modifican las presiones de viento al variar la inclinación del panel para Cuba con inclinaciones de 15° y 23° con respecto a la horizontal y luego para evaluar la influencia en las presiones sobre un panel dentro de un parque fotovoltaico a partir de variar algunos parámetros de la geometría del parque.

Abstract

In recent years there has been world-wide increase in the use of renewable energy sources, due to the increasing cost of fossil fuels, their exhaustion, as well as air pollution associated with their use. Cuba is not exempt from this phenomenon and has begun to install power generation plants based on renewable sources of energy such as biogas, wind energy and photovoltaic energy. In this last one, photovoltaic modules are usually arranged in sets of a certain quantity, on a same support structure called "solar panel", which is supported in the ground by means of columns. This type of structures has a complex aerodynamic behavior, which is modified according to the geometric and meteorological parameters. Within the geometric parameters are the size and inclination of the panel, the spacing between rows and columns of panels in the case of parks and the height above the ground.

The main purpose of this thesis is to obtain the pressure field produced by the wind on a photovoltaic panel within a panel arrangement in a photovoltaic park. An experimental wind tunnel study was performed to analyze how the wind pressure in the panel is modified by changing the horizontal inclination of the panel from 15° to 23° , the established inclinations for Cuban latitudes, and then to evaluate the influence of certain geometrical parameters of the park in the pressures on a panel inside a photovoltaic park. The experimental design allowed to identify the interaction between the direction of the wind and the position between rows as the most significant in the variation of pressures within the park.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I ANTECEDENTES DE LOS ESTUDIOS SOBRE PANELES FOTVOLTAICOS.....	1
1.1. ESTUDIOS DE LAS PRESIONES SOBRE EDIFICACIONES BAJAS Y CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA	1
1.1.1 OBTENCIÓN DE LA CARGA EN EDIFICACIONES BAJAS Y SIMULACIÓN EN TÚNEL DE VIENTO DE LA CAPA LÍMITE	8
1.2. ANÁLISIS DE LA DETERMINACIÓN DEL CAMPO DE PRESIONES SOBRE PANELES Y PARQUES FOTVOLTAICOS UBICADOS SOBRE EL TERRENO	11
1.2.1 TÉCNICAS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN	22
1.3. CONCLUSIONES PARCIALES	27
CAPÍTULO II ESTUDIO EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO.....	31
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DEL PANEL AISLADO Y DEL PARQUE. DISEÑO DE EXPERIMENTACIÓN.....	31
2.1.1 DISEÑO DE EXPERIMENTO PARA EL ANÁLISIS DE LAS SEPARACIONES ENTRE FILAS Y COLUMNAS DEL PARQUE.....	34
2.2. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO A ESCALA REDUCIDA	38
2.2.1 SIMULACIÓN DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA EN EL TÚNEL DE VIENTO.....	42
2.2.2 DISEÑO DE LOS MODELOS A ESCALA Y DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MEDICIÓN.	53

2.3. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN Y DE FORMA	58
2.4. CONCLUSIONES PARCIALES	64
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA EN EL TÚNEL DE VIENTO.....	67
3.1 RESULTADOS DE LAS DISTRIBUCIONES DE PRESIONES PARA 15° Y 23° DE INCLINACIÓN DEL PANEL.....	67
3.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE FORMA PARA LAS DIRECCIONES DE VIENTO.	72
3.1.2 MODELACIÓN CON CARGA DE VIENTO GENERADA CON LOS COEFICIENTES DE FORMA ESTUDIADOS.	74
3.2 RESULTADOS DE LA SEPARACIÓN ENTRE LAS FILAS Y LAS COLUMNAS DEL PARQUE	81
3.2.1 RESULTADO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO	92
3.3 CONCLUSIONES PARCIALES	94
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS.....	108

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha registrado en el mundo un incremento de la utilización de las fuentes renovables de energía debido al aumento del costo de los combustibles fósiles, su agotamiento, así como la contaminación atmosférica asociada a su utilización. Cuba no se encuentra exenta de este fenómeno y ha comenzado a instalar centrales de generación de energía eléctrica sobre la base de fuentes renovables de energía como son el biogás, la energía eólica y la energía fotovoltaica.

En Cuba, desde la década del 80, se comenzaron a instalar paneles fotovoltaicos en zonas aisladas de las ciudades, en lugares donde era difícil y costoso llegar con las líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica. En esa época los paneles fotovoltaicos eran muy caros y sólo se utilizaban para casos excepcionales. 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 2020, aprovechando el gran potencial fotovoltaico que existe gracias a la posición geográfica. Debido a esta misma ubicación, sobre la isla ocurren fenómenos meteorológicos como los huracanes, que dan lugar a eventos extremos de viento, lo cual incide en que los paneles desde el punto de vista estructural tengan que ser robustos.

En el comienzo de la aplicación de esta tecnología, al ser tan elevados los precios de las celdas fotovoltaicas, se despreciaban los costos de instalación, los correspondientes a la estructura, así como los de la cimentación. Asociado a la reducción de los precios de tecnología solar, los costos de las estructuras se han

tornado significativos, lo que ha motivado el desarrollo de estudios en aras de realizar un diseño más ajustado de las mismas.

Los módulos fotovoltaicos se suelen disponer en conjuntos, de cierta cantidad, sobre una misma estructura de soporte, la cual se denomina “panel solar” que se encuentra apoyada en el suelo a través de columnas.

Este tipo de estructuras tiene un comportamiento aerodinámico complejo, que se modifica de acuerdo con los parámetros geométricos y meteorológicos. Dentro de los parámetros geométricos se encuentran el tamaño e inclinación del panel, el espaciamiento entre filas y columnas de los paneles en el caso de los parques y la altura sobre el suelo. Los parámetros meteorológicos intervienen a través de la caracterización del campo de viento, expresado en la velocidad media y la componente fluctuante o turbulencia. Especialmente el estudio de los coeficientes de presión, con el empleo del túnel de viento como herramienta, ha sido una línea importante de investigaciones (Chung et al., 2010, Geurts and Blackmore, 2013, Stathopoulos et al., 2013); sin embargo, estos estudios ponen de manifiesto que aún resulta insuficiente la información existente sobre coeficientes de presión y de forma en las normas o recomendaciones para el diseño de estas estructuras.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo se comportan las presiones de viento sobre un panel fotovoltaico cuando se encuentra dentro de un arreglo de paneles en un parque fotovoltaico?

OBJETO DE INVESTIGACIÓN

Campo de presiones de viento sobre estructuras

CAMPO DE INVESTIGACIÓN

Estudio del campo de presiones producidas por el viento sobre paneles fotovoltaicos con el empleo de un túnel de viento.

HIPÓTESIS

Los valores de presiones de viento sobre un panel fotovoltaico, disminuyen al encontrarse dentro de un arreglo de paneles en un parque fotovoltaico y dependen de la posición relativa del panel dentro del mismo.

ALCANCE DEL TRABAJO

El campo de presiones para paneles fotovoltaicos con inclinaciones de 15° y 23° respecto a la horizontal sobre terrenos llanos y abiertos.

OBJETIVO GENERAL

Obtener las modificaciones del campo de presiones producidas por el viento sobre un panel fotovoltaico dentro de un arreglo de paneles en un parque fotovoltaico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener el campo de presiones producidas por viento sobre un panel fotovoltaico para las inclinaciones de 15° y 23° a través de un ensayo a escala reducida en túnel de viento.
2. Comparar las reacciones de apoyo debidas a la carga de viento sobre un panel, con la aplicación de diferentes distribuciones de coeficientes de forma derivados de los coeficientes de presión obtenidos del ensayo.
3. Evaluar la influencia de la posición relativa de un panel dentro del arreglo del parque, en las variaciones del campo de presiones.

MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Se utilizaron métodos estadísticos y probabilísticos en la selección de los casos de estudio. Los métodos experimentales fueron aplicados para la realización de los ensayos en el túnel de viento. Los métodos de análisis dimensional y síntesis se utilizaron para el diseño de los modelos y el análisis de las presiones. Los métodos de análisis comparativo, análisis bibliográfico, de la modelación y levantamiento de campo, también fueron aplicados. Se utilizó para todos los métodos un enfoque dialéctico materialista para la interpretación y procesamiento de los resultados.

RESULTADOS ESPERADOS

- ✓ Reducir la vulnerabilidad estructural de los parques fotovoltaicos frente a las acciones de vientos extremos.
- ✓ Contribuir a perfeccionar los métodos de determinación de las cargas de viento sobre estructuras planas inclinadas cercanas al terreno a través de los coeficientes de forma.
- ✓ Contribuir a diseños racionales de estructuras de parques fotovoltaicos.

ACTUALIDAD Y NOVEDAD CIENTÍFICA

- ✓ Asimilación tecnológica de los métodos experimentales en túnel de viento para el estudio de la interacción viento-estructura.
- ✓ Obtención de coeficientes de presión aplicables a paneles inclinados aislados y para el conjunto de paneles de un parque fotovoltaico, colocados a poca altura sobre el terreno, condición no existente hasta el momento en las normas de viento más utilizadas incluyendo la cubana.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está estructurada en tres capítulos. En el primer capítulo “Antecedentes de los estudios sobre paneles fotovoltaicos” se presenta la evolución de los estudios experimentales en túnel de viento sobre los coeficientes de presión de las estructuras bajas inmersas en la capa rugosa y dentro de ellas los paneles fotovoltaicos a partir de la revisión bibliográfica realizada. En el segundo capítulo, “Estudio experimental en túnel de viento”, se expone la descripción de los modelos a estudiar en el túnel a partir del diseño de experimentos. Se presenta la simulación de la capa límite en el túnel para obtener el perfil de velocidad media del viento, el perfil de intensidad de turbulencia y el espectro de potencia de la turbulencia, para lograr una correcta modelación en el túnel. También en este capítulo se definen las bases y el alcance del diseño de los experimentos realizados, para evaluar la significación, en el establecimiento del campo de presiones sobre los paneles solares, de variables como son la separación entre filas y columnas de los paneles en un parque, la posición que puede ocupar el panel dentro del parque, es decir la fila y columna donde se ubica, así como la inclinación del panel respecto al plano horizontal. En el tercer capítulo “Análisis de los resultados de la modelación en el túnel de viento” se integran los resultados de los estudios experimentales del panel con las diferentes inclinaciones con respecto a la horizontal y las diferentes direcciones de ataque del viento. Como conclusión de este tema se presenta un análisis de las reacciones de apoyo a partir de la obtención de la carga de viento con los coeficientes de forma obtenidos en el estudio. Se muestran además los resultados del análisis de significación de las variables consideradas en el diseño de experimentos del parque.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

Publicaciones en Revistas

1. **LÓPEZ, A., CATALDO, J. & ELENA, V. (2017).** Modelación de capa límite atmosférica para estudios de paneles solares en túnel de viento. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, VOL. XXXVIII, No. 3, , pp. 52-64.
2. **LÓPEZ, A., LEÓN, E. D., ELENA, V. B. & CATALDO, J. (2016).** “Estudio de coeficientes de presión en paneles solares frente a la acción del viento”. *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 7, pp. 35-44. ISSN 2223 -1781.
3. **LÓPEZ, A., CATALDO, J. & PAIS, P. (2015).** “Confort eólico en zonas urbanas. Edificio a ser construido en la ciudad de Montevideo, Uruguay”. *Arquitectura y Urbanismo*, vol. XXXVI, no 3, pp. 63-74. ISSN 1815-5898.
4. **RODRÍGUEZ, G., HERNÁNDEZ, A., LÓPEZ, A. & RAMÍREZ J.(2016).** "Sistema para la medición de deformación usando galgas extensiométricas metálicas." *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* vol. 37(1): pp. 80-93, ISSN. 1815-5928.

Eventos

1. López, A., Elena, B. & Cataldo, J. **2016.** Determinación de los coeficientes de presión sobre paneles solares en túnel de viento para terrenos abiertos. 17 convención de ingeniería y arquitectura. Palacio de convenciones, La Habana, Cuba.
2. López, A., Elena, V. B. & León, E. D. **2014.** Estudio de coeficientes de forma en paneles solares frente a la acción del viento. 17 Convención de Ingeniería y Arquitectura, 24-28 2014 Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba.
3. Elena, V. B.; Martín, P.; Fernández, I.; López, A. “Towers failures under wind loads in Cuba”, en Meeting of Working Group 4 on Mast and Towers, (IASS), Praga, República Checa, **2015**.
4. Elena, V. B.; Martín, P.; Fernández, I.; López, A. “Analytical–experimental study of self-supporting tower with antennas under wind action”, en en Meeting of Working Group 4 on Mast and Towers, (IASS), Praga, República Checa, **2015**.

5. Elena, V. B.; Martín, P.; Fernández, I.; López, A. “Numerical study of tower reinforcement under extreme wind action”, en Meeting of Working Group 4 on Mast and Towers, (IASS), Praga, República Checa, **2015**.
6. Elena, V. B.; López, A.; Fernández, I. “Estudio de Sección Doble en Columnas de una Torre MAR 2008”, en Simposio de Ingeniería Civil y Estructuras Sismos Resistentes UPADI , La Habana, Cuba, **2012**.
7. Elena, V. B.; Martín, P.; López, A.; Fernández, I.; Carrasco, A. “Studies on telecommunication towers in Cuba”, Meeting of Working Group 4 on Mast and Towers, Dinamarca, **2011**.
8. Elena, V. B.; Martín, P.; López, A.; Fernández, I.; Carrasco, A. “Aplicación de la metodología de análisis y diseño para torres atirantadas de telecomunicaciones”, en V Seminario Internacional de Ingeniería Civil, Hidráulica y Geociencias (SICHGeo), 15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba, **2010**.

**CAPÍTULO I: ANTECEDENTES DE LOS ESTUDIOS
SOBRE PANELES FOTOVOLTAICOS**

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES DE LOS ESTUDIOS SOBRE PANELES FOTOVOLTAICOS

En este capítulo se exponen los conceptos asociados al comportamiento aerodinámico de las estructuras bajas frente a la acción del viento, los cuales representan la fundamentación teórica de esta investigación y demuestran la necesidad de este tipo de estudios. Se introducen los conceptos fundamentales de la temática (coeficiente de presión y de forma) y se realiza el análisis bibliográfico de trabajos precedentes en la temática, con énfasis en los coeficientes de presión para estructuras planas aisladas inclinadas por simulación numérica computacional y por ensayos en túneles de viento.

1.1. ESTUDIOS DE LAS PRESIONES SOBRE EDIFICACIONES BAJAS Y CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA

La interacción del viento con las estructuras es un proceso muy complejo que ha sido expresado de diversas maneras en normas y metodologías para la determinación de la carga de viento de diseño. Esta falta de unidad entre las normas internacionales en la definición de algunos parámetros relativos a la carga como son los criterios aerodinámicos, según Terrés-Nícoli and Mansb (2014), provoca en ocasiones confusión y dificultad para la aplicación de algunos coeficientes en los proyectos de diferentes estructuras, que no se encuentran en las normas nacionales y sí se registran de alguna manera en las normas extranjeras. Un ejemplo representativo es la determinación de los coeficientes de forma en los paneles fotovoltaicos montados sobre los techos o sobre el terreno;

pues estas estructuras no se recogen explícitamente en las normativas y, por lo tanto, en algunos casos se asumen para su diseño coeficientes de estructuras de forma similar. Del análisis de la norma cubana para cargas de viento (NC-285, 2003) y de algunas de las más importantes de la región y a nivel mundial como son la de Australia (AS/NZS1170.2, 2011), Estados Unidos (ASCE7-10, 2010), Argentina (CIRSOC 102, 1992), el Eurocódigo (EN1991-1-4, 2004) y Brasil (NBR6123, 1988) para la determinación de la carga sobre paneles fotovoltaicos sobre el terreno, se evidenció que la estructura más cercana en forma a estos son los techos inclinados de una sola agua con libre circulación de flujo por debajo de los mismos. Sin embargo, estas normas presentan limitantes para su empleo en el caso de los techos planos cercanos al terreno y muestran discrepancias en cuanto a los criterios de restricción de utilización, a la forma de colocación de la carga y a los valores de coeficientes de forma (C_f) a utilizar (López et al., 2016). En la mayoría de los casos, por las dimensiones que presentan los paneles fotovoltaicos, especialmente por su cercanía al terreno, no cumplen con esas restricciones establecidas en las diferentes normas, y en ellas mismas se recomienda realizar estudios más específicos, como aquellos que se implementan con el uso de túneles de viento o de las técnicas de modelación computacional de fluidos (CFD) como herramientas para el análisis de las presiones.

Basados en el montaje, como se había mencionado previamente, los paneles fotovoltaicos se dividen en dos categorías generales: paneles sobre el terreno y paneles sobre edificaciones. Sobre el último grupo se han desarrollado un amplio

número de trabajos auxiliados con el empleo de las técnicas de simulación del flujo (túneles y CFD) (Aly and Bitsuamlak, 2013b, Bronkhorst et al., 2010, Geurts and Steenbergen, 2009, Ginger et al., 2011, Kopp, 2013, Kopp and Banks, 2012, Kopp et al., 2012a, Pratt and Kopp, 2013, Radu and Axinte, 1989, Radu et al., 1986, Stathopoulos et al., 2014, Stenabaugh et al., 2015) que han abordado varias aristas del comportamiento ante la acción del viento, entre ellas: el estudio de la influencia en las presiones que reciben los paneles al variar la altura del edificio, la influencia del ángulo de inclinación del techo, la colocación de los paneles (paralelos a la superficie del techo o sobre techos planos) o de acuerdo con su ubicación en planta sobre el techo (centro o borde) y los diferentes sistemas de protección para disminuir las presiones. Los paneles sobre el terreno presentan varias ventajas que han motivado en los últimos años el desarrollo de los parques fotovoltaicos. Entre las principales ventajas se destaca que: los paneles sobre el terreno son independientes de la inclinación y orientación de la cubierta, su instalación no afecta la integridad de la estructura que los soporta, existe mayor circulación del aire lo que hace que se mantengan las celdas fotovoltaicas a temperaturas más bajas y se pierda menos energía y su ubicación facilita la limpieza y mantenimiento de la tecnología solar. No obstante a estas evidentes superioridades, el número de estudios realizados sobre el campo de presiones en los paneles ubicados en el terreno son limitados en comparación con los estudios sobre edificaciones (Abiola-Ogedengbe et al., 2015, Aly, 2016, Aly and Bitsuamlak, 2013a, Bitsuamlak et al., 2010, Miller and Zimmerman, 1981, Stathopoulos et al., 2014) debido, fundamentalmente, a que el comportamiento

del campo de presiones sobre estructuras cercanas a la sub-capa rugosa, es un tema complejo y difícil de experimentar en túnel de viento.

La sub-capa rugosa es una de las regiones que compone la capa límite atmosférica (CLA) (ver figura 1.1), donde las características del viento dependen de la variación de la temperatura, la topografía del terreno, la distribución y dimensiones de los obstáculos (rugosidad superficial) que pueden ser de origen natural o artificial. Todos los factores antes mencionados generan una turbulencia que rápidamente se dispersa por toda la capa límite atmosférica (Blessmann, 1995). La capa más próxima al terreno es la superficial, en ella se pueden distinguir dos sub-capas. Una de las sub-capas es la rugosa que presenta un espesor del orden de la altura media de los elementos que componen la rugosidad del suelo y en ella, la turbulencia y el perfil de viento dependen directamente de la estructura de los elementos rugosos (z_0).

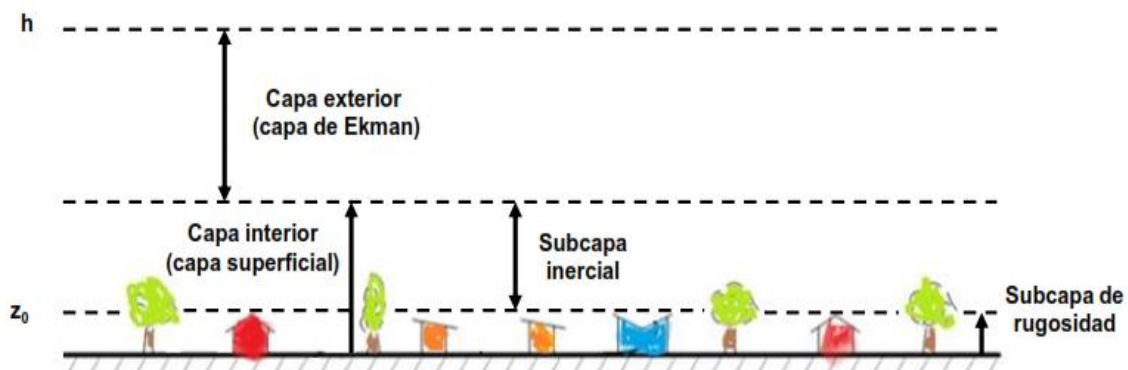


Figura 1.1. Estructura de la capa límite atmosférica.

La mayoría de los daños estructurales frente al viento ocurren en edificaciones bajas que se encuentran en la sub-capa rugosa, especialmente en edificaciones residenciales donde se obvia la experiencia ingenieril por considerarse

estructuras menos importantes (Holmes, 2004). Según Holmes (2004) los primeros estudios que se registran en túnel de viento fueron realizados para la obtención de las presiones en edificaciones bajas. Los primeros trabajos fueron desarrollados por Irminger en 1894 en Copenhagen y Kernot en 1893 en Melbourne, Australia. Irminger demostró la importancia de las succiones en la cubierta de una casa, un concepto no entendido en aquel momento. Kernot midió fuerzas en una gran variedad de formas de edificaciones, teniendo en cuenta el efecto de la pendiente en la cubierta, los pretiles y las modificaciones del viento por edificaciones adyacentes. En los siguientes años, se realizaron estudios donde se encontraron discrepancias que pudieron estar asociadas con que en estos primeros momentos se simulaba el viento como un flujo laminar, es decir, con muy pequeños niveles de turbulencia, otra causa podía estar referida al bloqueo del flujo dentro del túnel. Aunque en el libro de Simiu and Scanlan (1996) se rescatan los intensos trabajos de Flachsbart en el laboratorio Gottingen en Alemania desde 1932, considerados los primeros estudios en utilizar la modelación de la capa límite con bajas velocidades de viento, de forma reconocida, no fue hasta 1943, que se presentó por Bailey y Vincent en el Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido, la importancia de los túneles de viento de capa límite, cuando presentaron algunos progresos en explicar las diferencias entre los estudios en túneles de viento y las mediciones a escala real de las presiones sobre estructuras bajas.

Según Davenport and Isyumov (1968) muchos fueron los trabajos realizados sobre diferentes modelos de edificaciones por Jensen y Franck en la década del

60 en un pequeño túnel de viento de capa límite, lo que llevó a concluir que existían diferencias considerables entre las mediciones en el túnel y las realizadas a escala real, demostrando la importancia de obtener los coeficientes de presiones en edificaciones bajas con una correcta simulación previa de la capa límite atmosférica. Estos trabajos fueron los precursores de una serie de estudios de las cargas de viento sobre edificaciones bajas a partir de los años 70 donde se incluyen los desarrollados en viviendas por Holmes and Best (1983), Meroney (1988) y Holmes (1994).

A la par, se han realizado notables estudios para la determinación de la carga del viento sobre edificaciones bajas a escala real. Estos estudios fueron posibles gracias a las ventajas en el desarrollo de la instrumentación electrónica y de las técnicas computacionales de análisis estadístico, que proporcionaron una base de datos considerable para comparar con los estudios en túneles de viento.

En los primeros años de la década del 70 (1970-1975), el Instituto de Investigaciones sobre Edificaciones del Reino Unido comenzó un programa de mediciones en estructuras construidas para obtener resultados a escala real (ver figura 1.2). Los resultados obtenidos en una edificación en Aylesbury demostraron la alta naturaleza fluctuante de las presiones de viento y los altos picos de presiones en las regiones de separación del flujo cercanas a las esquinas, los aleros y las aristas de las paredes. A partir de los resultados obtenidos a escala real, 17 túneles de viento alrededor del mundo utilizaron idénticos modelos a escala 1/100 del edificio de Aylesbury empleando varias técnicas para modelar el terreno y las condiciones del flujo. Este único

experimento demostró diferencias significativas en la medición de los coeficientes de presión, atribuidas principalmente a la diferencia de técnicas empleadas para obtener las presiones de referencia estáticas y dinámicas y en la modelación reducida de los obstáculos en el terreno previo a la edificación (Sill et al., 1989, Sill et al., 1992). Entre 1987 y 1999 en el campo técnico experimental de Texas en Estados Unidos se continuaron los trabajos de mediciones de las presiones de viento en estructuras bajas a escala real (ver figura 1.3), demostrando que, aunque las fluctuaciones de las velocidades en la capa límite atmosférica se consideran que siguen la ley de distribución gaussiana, este no es el caso para las fluctuaciones de presión en las edificaciones bajas. En estas estructuras, debido a la interacción entre ellas y el flujo atmosférico turbulento, se producen una mezcla entre los vórtices generados por el cuerpo y los del flujo incidente, especialmente en las esquinas de aristas vivas de esas estructuras. Este fenómeno no ocurre en edificaciones altas (mayores de 10 m), lo cual hace el tratamiento de las presiones y de la carga de viento en general en estructuras bajas un campo particular de estudio.

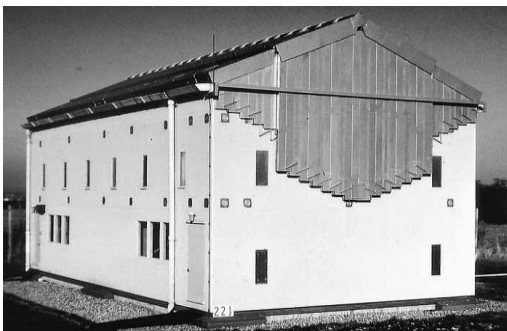


Figura 1.2. Edificio Experimental (Reino Unido 1970-1975) (Holmes 2004).



Figura 1.3. Edificio experimental de Texas Tech Field (Estados Unidos desde 1987 hasta 1999) (Holmes 2004).

1.1.1 OBTENCIÓN DE LA CARGA EN EDIFICACIONES BAJAS Y SIMULACIÓN EN TÚNEL DE VIENTO DE LA CAPA LÍMITE

Según Simiu and Scanlan (1996) el diseño de edificaciones está basado en las estimaciones de los efectos globales del viento, que tienen que tomarse en el diseño de la estructura y en los efectos locales del viento, que gobiernan el diseño de algunos componentes no estructurales. La información aerodinámica para estimar efectos globales o locales del viento generalmente tiene que ser obtenida a través de ensayos en túneles de viento.

Según Tamura and Kareem (2013) las cargas de viento de diseño estáticas se pueden determinar mediante la expresión 1.1, donde F es la carga, q es la presión dinámica, A es el área tributaria, C_e es el coeficiente de exposición, C_p es el coeficiente de presión y C_g es el factor de ráfaga.

$$F = qC_eC_pC_gA$$

Ecuación 1. 1

Según Holmes (2004), algunos investigadores prefieren tratar estas características como parámetros independientes; pero para la determinación de la carga de viento de los componentes no estructurales o de estructuras que se encuentran en la sub-capas rugosa, donde las intensidades de turbulencia son altas y los efectos de interferencia y de protección importantes pero difíciles de cuantificar, como se ha demostrado en disímiles estudios (Banks, 2013, Banks and Meroney, 2001, Banks et al., 2001, Cochran and Cermak, 1992, Geurts et al., 2013, Holmes, 2004, Kopp et al., 2012b, Richards et al., 2007, Stathopoulos, 1984, Surry, 1982, Surry et al., 1994), se aclara (Surry, 1982) que el coeficiente

de presión y el de ráfaga se obtienen como un solo valor ($C_p C_g$) a través de experimentaciones con flujos turbulentos, o sea, con una adecuada simulación de la capa límite atmosférica.

Para lograr una representación adecuada del flujo de la capa límite atmosférica en un túnel de viento, existen dos grupos de simulaciones (Loredo-Souza et al., 2004). El primer grupo, denominado “métodos naturales”, se corresponde con las simulaciones que estimulan el crecimiento de la capa límite; se utiliza para esto una rugosidad en el piso del túnel para lograr los perfiles de velocidades medias y los parámetros de la turbulencia. Los trabajos realizados en túnel de viento por Jensen y Franck en 1963, Davenport en 1966 y Cermak en ese mismo año, según De Bortoli et al. (1997), obtuvieron la capa límite de esta manera. El principal inconveniente de estas simulaciones es que el desarrollo de la capa límite es muy lento y son necesarias grandes longitudes de túnel, del orden de 30 veces la altura de la capa límite a modelar, para lograr las escalas de simulación convenientes para aplicarlas a modelos estructurales.

El segundo grupo, los “métodos artificiales”, se corresponde con las simulaciones que aceleran el crecimiento de la capa límite sobre la superficie rugosa. Este grupo se divide en dos subgrupos: los métodos activos y los pasivos. Los primeros utilizan chorros de aire (ver figura 1.4) o piezas móviles en el inicio de la cámara de ensayos para controlar el número de Reynolds y la intensidad de la turbulencia en la altura (Blessmann, 1982).



Figura 1.4. Dispositivo emisor de chorros de aire del túnel Prof. Joaquim Blessmann (Loredo-Souza et al., 2004)

Los pasivos utilizan grillas de generadores de turbulencia que modifican el flujo medio, como pueden ser elementos de cuña elíptica (Counihan) (figura 1.5) o puntiagudos (Standem) (figura 1.6) junto con barreras que pueden ser uniformes, dentadas o bien con elementos trapezoidales en la parte superior. Estos son conocidos como “métodos de rugosidad, barreras y dispositivos de mezcla” (Cataldo, 1992).



Figura 1.5. Simuladores de Counihan (túnel de viento Prof. Jacek P. Gorecki) (Loredo-Souza et al., 2004)



Figura 1.6. Simuladores de Standem (túnel de viento Prof. Jacek P. Gorecki) (Loredo-Souza et al., 2004)

La rugosidad se logra con obstáculos colocados en forma distribuida en el piso del túnel que permiten simular el efecto que tiene la rugosidad superficial natural del terreno sobre el flujo atmosférico. El efecto deseado es reducir la cantidad de movimiento en la parte del flujo próximo al suelo y producir turbulencia. La grilla de generadores de turbulencia tiene por objeto producir turbulencia de gran escala y un déficit de cantidad de movimiento variable en la altura. Finalmente, las barreras, si bien producen un déficit de cantidad de movimiento como si existiera una gran longitud de rugosidad aguas arriba de la zona de ensayos, tienen como principal objetivo producir una mezcla entre la región del flujo próxima al suelo y la alejada del mismo. Estos últimos tipos de simulación han sido estudiados por investigadores como Counihan (1969), Cook (1975) y empleados en trabajos realizados para la determinación del campo de presiones sobre los paneles fotovoltaicos por Abiola-Ogedengbe et al. (2015), Guha et al. (2015), Kopp (2013) y Stenabaugh et al. (2015). Las especificaciones sobre la determinación del campo de presiones sobre paneles fotovoltaicos ubicados en el terreno, se describen en el siguiente epígrafe.

1.2. ANÁLISIS DE LA DETERMINACIÓN DEL CAMPO DE PRESIONES SOBRE PANELES Y PARQUES FOTOVOLTAICOS UBICADOS SOBRE EL TERRENO

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 del 80 se registra el trabajo pionero de

Miller and Zimmerman (1981). Estos autores analizaron el campo de presiones sobre un panel y en un parque fotovoltaico a través de ensayos en túnel de viento y encontraron considerables diferencias entre los resultados obtenidos con simulaciones de flujo uniforme y no uniforme, lo que coincide con lo reportado en los estudios sobre edificaciones bajas.

Los estudios más recientes (Abiola-Ogedengbe et al., 2015, Aly, 2016, Aly and Bitsuamlak, 2013a, Banks, 2013, Bienkiewicz and Endo, 2009, Bitsuamlak et al., 2010, Bronkhorst et al., 2010, Geurts and Blackmore, 2013, Jubayer and Hangan, 2014a, Jubayer and Hangan, 2014b, Shademan et al., 2014, Stathopoulos et al., 2014, Warsido et al., 2014) desarrollados en túnel de viento con flujo no uniforme (turbulento) mediante la correcta simulación de la capa límite o a través de la técnica computacional de fluidos, han centrado su interés en la influencia de determinados aspectos en la determinación del campo de presiones sobre los paneles, entre estos aspectos se destacan: las direcciones de incidencia del viento sobre las estructuras, los ángulos de inclinación de los paneles con el terreno, las escalas geométricas de ensayo y la influencia del efecto de bloqueo de las estructuras en la sección de ensayo del túnel sobre estas escalas, la separación entre filas y columnas en el caso de los parques y las diferentes técnicas para la obtención de los coeficientes de presión, principalmente.

En cuanto a las direcciones de incidencia del viento sobre los paneles individuales y parques, varios estudios han llegado a conclusiones importantes. Stathopoulos et al. (2014) por ejemplo, que desarrollaron su investigación sobre paneles individuales, estudiaron un intervalo de direcciones de viento de 0°

(viento atacando por el borde inferior del panel) a 180° (viento atacando por el borde superior 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 la esquina superior del panel).

Los resultados de Abiola-Ogedengbe et al. (2015) mostraron que la distribución de presión sobre la superficie de un panel es simétrica con respecto al plano medio del modelo para las direcciones del viento 0° y 180° y asimétrica para 30° y 150° . Estos fueron los únicos ángulos de ataque que analizaron en su artículo ya que en la tesis de maestría de Abiola-Ogedengbe (2013) donde analizó los resultados del mismo panel ensayado cada 10° , se había obtenido que para las restantes direcciones entre 30° y 150° , debido a las técnicas de medición empleadas, se generaron efectos de interferencia en las presiones como consecuencia de los instrumentos de medición, aspecto que recomienda tener en cuenta en el desarrollo del modelo a escala reducida.

Bitsuamlak et al. (2010) investigaron tres ángulos de ataque del viento (0° , 30° y 180°) empleando la dinámica computacional de fluidos y utilizaron mediciones experimentales a escala real para validar sus resultados. Como conclusiones, los autores informan que los valores más altos de cargas generales corresponden a 180° como ángulo de ataque del viento.

Shademan et al. (2014) quienes también realizaron simulaciones CFD para predecir las cargas de viento en paneles fotovoltaicos estudiaron las incidencias de ataque del viento para un intervalo de 0° a 180° con variaciones cada 30° . Sus resultados mostraron que las cargas aerodinámicas máximas para el panel se

encontraron para las direcciones de viento de 0° y 180° , en correspondencia con el trabajo de Bitsuamlak et al. (2010).

Miller and Zimmerman (1981), estudiaron 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 viento, resultaron iguales para las direcciones de 0° y 180° .

Jubayer and Hangan (2014a), 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 and Zimmerman (1981). 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, lo cual indica 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 directas de 0° y 180° .

Los ángulos de inclinación del panel con el terreno dependen de la ubicación geográfica del sitio de instalación, ya que se busca que permanezcan, el mayor

tiempo, expuestos a los rayos del sol para lograr la máxima captación de energía. Esta condición está relacionada con la latitud y el hemisferio de ubicación. Diferentes autores refieren que existe un intervalo óptimo para la inclinación de los paneles que depende directamente de la latitud ($latitud - 15^\circ \leq Inclinación\ del\ panel \leq latitud + 15^\circ$) (Abiola-Ogedengbe et al., 2015, Yorukoglu and Celik, 2006) donde las pérdidas energéticas son menores del 5%. Precisamente, como las inclinaciones dependen de la ubicación geográfica, debe tenerse especial atención al extrapolar los valores de las presiones obtenidos sobre paneles fotovoltaicos en regiones que tienen latitudes diferentes a las que se pretenden estudiar; sin embargo, existen patrones de comportamiento general que pueden ser analizados. Especialmente, el hecho que refieren todos los autores que han desarrollado modelos con inclinaciones variables desde 20° hasta 45° , relativo al aumento de las presiones a medida que aumenta la inclinación (Abiola-Ogedengbe et al., 2015, Aly and Bitsuamlak, 2013a, Stathopoulos et al., 2014).

El tema de las escalas geométricas de los modelos de los paneles fotovoltaicos construidos 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. Un factor que ha sido planteado con énfasis es que la mayoría de los túneles de viento construidos para el estudio aerodinámico de las construcciones, han sido concebidos para ensayar grandes estructuras civiles con escalas geométricas entre 1/500 y 1/100; escalas que producen modelos muy pequeños

en el caso de los paneles fotovoltaicos y provocan algunos inconvenientes como: efectos significativos de la viscosidad, baja resolución de los datos de presión, problemas en la ubicación del modelo dentro de la capa límite, problemas al producirse interferencia significativa en el flujo producto de la instrumentación empleada, principalmente. Un ejemplo de este último caso puede apreciarse en la figura 1.7, donde se percibe que los conductos de las tomas de presión obstruyen algunas regiones del panel lo que ocasiona mediciones incorrectas producto de la interferencia.

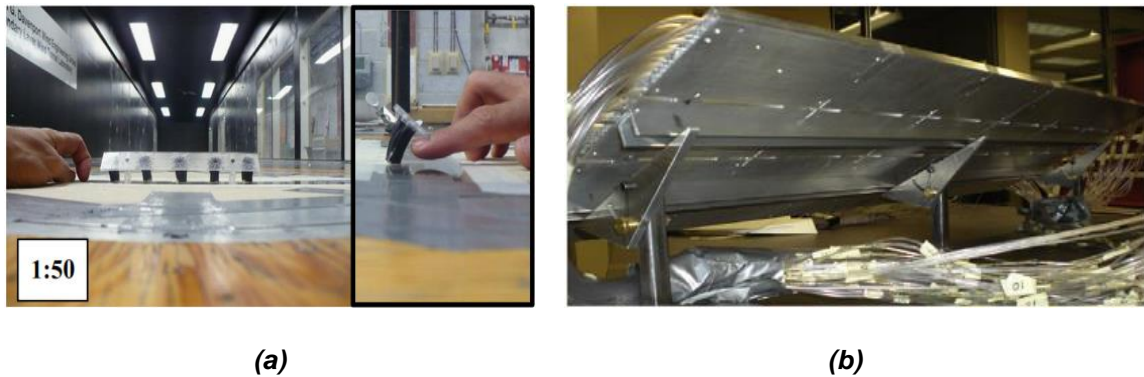


Figura 1.7. Modelos escala donde se presentan problemas de instrumentación debido a la escala utilizada (a) Aly and Bitsuamlak (2013a), (b) Abiola-Ogedengbe et al (2015).

Para disminuir estos problemas, es importante diseñar modelos apropiados para los estudios en túnel de viento y validar estos resultados con ensayos a escala real; sin embargo, al carecerse de estos experimentos los efectos de la escala no están aún bien cuantificados según criterio de Aly and Bitsuamlak (2013a), es por esto que existen variaciones en cuanto a las escalas escogidas por los investigadores que han realizado estudios sobre las presiones en los paneles fotovoltaicos. Ejemplo de esto se evidencia en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Escalas utilizadas por distintos autores en sus trabajos.

Autores	Escalas geométricas utilizadas	Tipo de estudio
Miller and Zimmerman (1981)	1/12	Panel
	1/24	Parque
Radu et al. (1986)	1/50	Parque
Radu and Axinte (1989)	1/50	Parque
Wood et al. (2001)	1/100	Parque
Kopp et al. (2012)	1/30	Parque
Pratt and Kopp (2013)	1/30	Panel y Parque
Cao et al. (2013)	1/50	Parque
Warsido et al. (2014)	1/30	Panel y Parque
Stathopoulos et al. (2014)	1/200	Panel
Abiola-Ogedengbe et al. (2015)	1/10	Panel

El trabajo desarrollado por Aly and Bitsuamlak (2013a) 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, de esta misma forma se evidenciaron modificaciones considerables en el contenido espectral de la turbulencia del flujo del ensayo. Los autores señalaron que las escalas de 1/10 y 1/5 aunque permiten alcanzar números de Reynolds mayores, lo que es favorable para lograr una semejanza cinemática entre el modelo y la estructura real, no cumplieron con los criterios de bloqueo (porcentaje del área

utilizada de la sección transversal del túnel), lo cual pudo incidir en los elevados valores de presiones detectados en estos modelos en relación con los más pequeños y que el modelo de 1/50 presentó resultados erróneos por ser pequeño, encontrarse muy próximo a la capa rugosa del túnel y presentar interferencias debido a los instrumentos de medición, como se muestra en la figura 1.7 a.

El número de Reynolds y el efecto de bloqueo son algunos de los factores más importantes que inciden en la determinación de las escalas geométricas como quedó evidenciado del estudio de Aly and Bitsuamlak (2013a).

En el estudio realizado por Miller and Zimmerman (1981) 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 et al. (2012a) y Pratt and Kopp (2013) utilizaron un número de Reynolds de 1.9×10^5 para 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 and Bitsuamlak (2013a) para edificaciones bajas no hay tanta dependencia del número de Reynolds, como para las edificaciones altas modeladas en túnel de viento.

Desde 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% (Cook, 1990, Holmes, 2004, Simiu and Scanlan, 1996), 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% como se puede evidenciar en la tabla 1.2, aunque por ejemplo, Banks (2013), acepta en sus estudios hasta un 7% sin hacer correcciones.

Tabla 1.2 Porcentajes de bloque obtenidos por distintos autores en sus trabajos.

Artículos	Escalas	% de bloqueo	Tipo de estudio	Técnica
Aly and Bitsuamlak (2013a)	1/5	7,88%	Panel	Túnel de viento
	1/10	1,97%		
	1/20	0,49%		
	1/50	0,03%		
Warsido et al. (2014)	1/30	4,2%	Panel y Parque	Túnel de viento
Aly (2016)	1/1	3%	Panel	CFD

En los trabajos de Bitsuamlak et al. (2010), Jubayer and Hangan (2014a) y Shademan et al. (2014) que emplean la técnica del túnel virtual también se plantea que el espacio correspondiente a la sección transversal del túnel simulado debe garantizar una relación de bloqueo inferior al 5%.

En el caso de los parques fotovoltaicos otro aspecto importante de estudio ha sido el efecto de la separación entre filas y columnas en el campo de presiones de los paneles. Como se había mencionado, el primer trabajo desarrollado en este campo fue el de Miller and Zimmerman (1981). En esta investigación se

estudió la separación entre las filas del parque en tres niveles: 1,5; 2,0 y 3,0 C, donde C es la distancia inclinada del panel como se puede ver en la figura 1.8 para la dirección de ataque del viento de 0° . Entre las principales conclusiones del estudio los autores plantean que la primera fila a barlovento protege a las otras filas lo que genera que las presiones sobre estas sean inferiores. Exponen que los paneles de la primera fila tienen una distribución de presiones típicas de una placa plana y que la segunda fila se ve afectada considerablemente por la caída de flujo y la turbulencia de la primera, lo que puede resultar en una distribución de presiones que varía entre succión y presión. Otro aspecto importante es que los paneles que se encuentran en el borde del arreglo espacial del parque presentan presiones diferentes al resto de los paneles, debido a que los vórtices que se producen en las esquinas pueden producir cargas de viento muy altas en dependencia de la dirección del viento y que los que se encuentran hacia el centro presentan poca variación de los valores de la presión en toda la superficie.

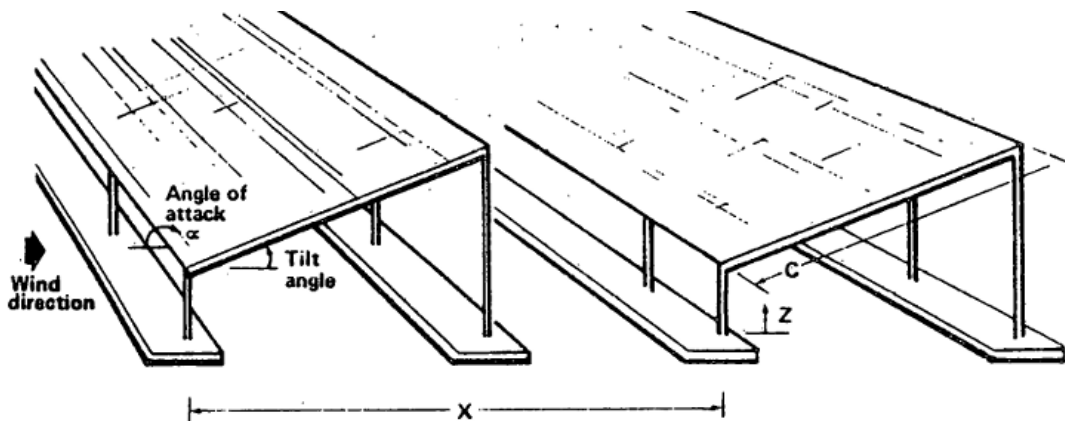


Figura 1.8. Esquema utilizado para representar las variables del estudio. (X) distancia entre filas del parque, (C) ancho del panel fotovoltaico y (α) ángulo del panel con respecto al suelo (Miller and Zimmerman, 1981).

Warsido et al. (2014) también realizaron ensayos en túnel de viento de capa límite para investigar entre otros parámetros, los efectos de la separación longitudinal y transversal, en la carga de viento sobre los paneles montados en el terreno y sobre techos. El parque montado en el terreno se estudió para tres separaciones transversales 0; 0,91 y 1,83m y tres distancias longitudinales 0,61; 1,22 y 1,83m entre los paneles. Los autores, al igual que los anteriores, concluyeron que existe un efecto de protección en los paneles que no se encuentran directamente frente a la dirección de ataque del viento y que la mayor reducción de la carga se produce en la segunda fila; pero que el efecto de protección disminuye rápidamente haciéndose menos significativo más allá de la cuarta fila. También determinaron que los paneles situados en las columnas externas del arreglo espacial se ven sometidos a cargas de viento relativamente mayores que los que se encuentran situados en las columnas interiores y que el efecto de la separación lateral entre paneles tuvo una mínima influencia, excepto la ligera reducción de los coeficientes de fuerza y momento observados en las tres primeras filas de paneles, para el caso de espaciamiento lateral cero. Otro resultado interesante de este trabajo fue que la fuerza del viento aumentó con el aumento de la separación longitudinal entre los paneles; por otra parte, cuando los paneles se colocaron lo suficientemente cerca como para estar fuertemente influenciados por el flujo de estela desde el panel vecino contra el viento, se observó una carga inusual, o sea, el efecto de presiones y succiones actuando de forma simultánea sobre los paneles, de forma similar a los resultados de Miller and Zimmerman (1981).

Jubayer and Hangan (2014a) también estudiaron la carga aerodinámica y el flujo de viento en un parque de paneles fotovoltaicos montados en el terreno dentro de la capa límite atmosférica (CLA) pero utilizando el enfoque *Reynolds Averaged de Navier-Stokes* (RANS) y sus resultados, aunque con una técnica diferente al túnel de viento, fueron similares que los obtenidos por Warsido et al. (2014).

Guha et al. (2015) estudiaron también el espaciamiento entre filas, pero en este caso no midieron presiones sino las reacciones de apoyo en los paneles (tipo mono apoyo). Del análisis de sus resultados concluyeron que existió un ligero aumento en el momento de la base cuando aumenta el espacio entre las filas del parque y que en la fila dos se obtuvieron los valores más altos. Este comportamiento lo explican debido al reacomodo del flujo de viento producto de la interacción con la primera fila, efecto que también plantean que sucede Miller and Zimmerman (1981) y Warsido et al. (2014) en sus estudios.

El último aspecto identificado dentro de las líneas de investigación sobre los paneles fotovoltaicos es la variabilidad de técnicas para la obtención de los coeficientes de presión, por ser un aspecto importante y objetivo de este trabajo se decide profundizar a continuación.

1.2.1 TÉCNICAS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN

La acción del viento sobre una estructura se expresa a través de la definición de una fuerza de viento que está determinada por parámetros asociados con el flujo y con la forma estructural. El aspecto relacionado con la forma, se expresa mediante los coeficientes aerodinámicos o de forma, que son números adimensionales utilizados para la caracterización de un cuerpo frente a un fluido

(Çengel and Cimbala, 2006). Esta adimensionalización se realiza para aprovechar las simplificaciones que el análisis dimensional aporta al estudio experimental y teórico de los fenómenos físicos.

En la interacción fluido-estructura aparecen fuerzas de presión, normales a la superficie y fuerzas paralelas a la superficie del objeto. La componente de la fuerza resultante paralela a la velocidad del viento se denomina fuerza de arrastre; mientras que la componente normal a la velocidad del viento se denomina fuerza de sustentación (Çengel and Cimbala, 2006). Los coeficientes que registran el comportamiento de estas fuerzas pueden ser obtenidos por diferentes técnicas instrumentales lo cual determina que sean llamados coeficientes de arrastre o de presión. En dependencia de la estructura, para determinar su comportamiento específico se suelen preferir los coeficientes de presión, puesto que estos dan una caracterización más detallada, punto a punto, de las presiones que ejerce el flujo al cuerpo inmerso en él.

El coeficiente de presión (C_P) es un número adimensional que se define como el cociente entre la presión establecida en un punto dado sobre el objeto y la carga cinética del flujo incidente, de acuerdo con la ecuación 1.2.

$$C_P = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2}$$

Ecuación 1. 2

Donde p es la presión estática del fluido en el punto en el que el coeficiente de presión es evaluado, p_∞ es la presión del flujo libre, es decir, que se encuentra fuera de cualquier perturbación creada por el cuerpo, ρ_∞ es la densidad del fluido y V_∞ es la velocidad del flujo.

Cualquier punto inmerso en el flujo tiene su propio y único coeficiente de presión (White, 2011); sin embargo, para una misma medición pueden ser obtenidos coeficientes medios y picos, e incluso si se cambia el intervalo de tiempo del procesamiento, o sea, si se obtienen coeficientes representativos de la medición de un proceso a escala real en 10 min, 1 hr o 3 s (Cook, 1990), que son los intervalos frecuentes de procesamiento de las presiones del viento; los resultados que se obtienen son totalmente diferentes, por lo que es un aspecto importante a considerar.

Para una correcta interpretación de las presiones se presenta la figura 1.9, donde se pueden ver los diferentes tipos de representación para los coeficientes de presión.

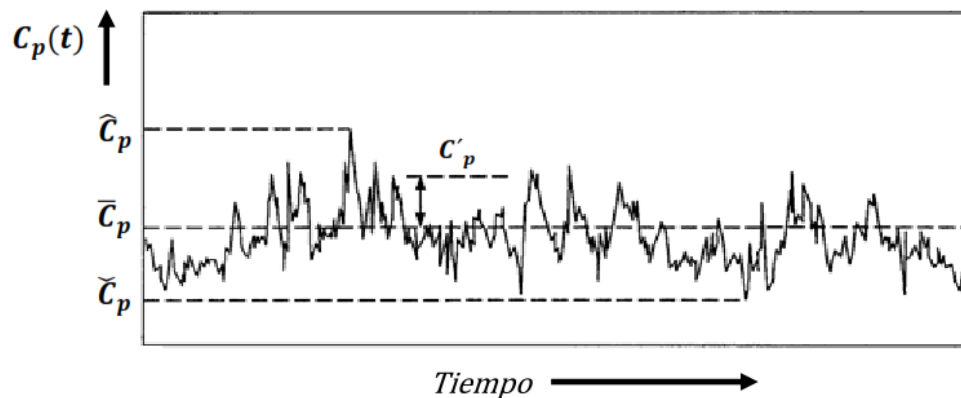


Figura 1.9. Tipos de coeficientes de presión: medio, pico máximo, pico mínimo y de desviación estándar (rms) (Cook, 1990).

En estas mediciones de coeficiente de presión (C_p) se pueden representar los coeficientes de presión medios (\bar{C}_p), los coeficientes de presión picos máximos (\hat{C}_p), coeficientes de presión picos mínimos (\check{C}_p) y la desviación estándar de la

media (C'_p) para los diferentes intervalos de medición ya sea en 3 s, 10 min o 1 hr.

En los estudios de las presiones sobre los paneles fotovoltaicos se encuentran diferentes formas de procesamiento relacionadas con los intervalos de medición y tipos de coeficientes de presión. Abiola-Ogedengbe (2013), Jubayer and Hangan (2014a), Jubayer and Hangan (2014b) y Miller and Zimmerman (1981) por ejemplo, emplearon en sus trabajos los valores de coeficientes medios (\bar{C}_p) totales de la medición para intervalos distintos a 3s, aunque en estos casos no formaba parte de los estudios la obtención de las cargas de diseño para los paneles, sino únicamente observar las variaciones de los valores de \bar{C}_p al cambiar los parámetros: inclinación, ángulo de ataque del viento y separación entre filas. Otro es el enfoque de Aly and Bitsuamlak (2013a), Aly and Bitsuamlak (2013b), Stathopoulos et al. (2014) y Banks (2013), que basados en el comportamiento no gaussiano de las presiones del viento en edificaciones bajas de forma general y en particular de los paneles fotovoltaicos ubicados en el terreno, trabajan con intervalos de tiempo de 3s para el procesamiento de los datos y así obtener un coeficiente de presión ($C_p C_g$), afectado por las distintas estructuras turbulentas que se generan dentro de la capa rugosa, que contempla de forma conjunta el efecto del coeficiente de presión y del coeficiente de ráfaga. Los autores trabajan tanto con los valores de coeficientes de presión medios como con los picos.

El método para obtener el valor extremo o pico de las presiones de viento cuando estas no siguen un comportamiento gaussiano, no ha sido completamente desarrollado, aunque se han realizado varios trabajos en este sentido. La teoría

de valores extremos es uno de los métodos que ha sido adoptado por algunos trabajos (Holmes and Cochran, 2003, Kasperski, 2009, Simiu et al., 2001) pero para su uso se necesita un número grande de muestras independientes, o sea, repeticiones de los ensayos en túneles de viento (más de 100 usualmente) y como se selecciona el valor máximo de cada muestra, un número considerable de información es descartado. Por esta razón Sadek and Simiu (2002) desarrollaron un procedimiento automatizado fundamentado en el principio de la transformación de una muestra no gaussiana en gaussiana como vía posible para la determinación de los coeficientes de presiones picos. Para su implementación también es necesario obtener varias muestras, en su estudio emplearon nueve. Estas estimaciones emplean la información completa contenida en la serie temporal de presiones, por lo que es un procedimiento más estable (Sadek and Simiu, 2002). Tuan-Chun Fu et al. (2012), quienes emplearon el procedimiento propuesto por Sadek and Simiu (2002) demostraron, a través de procesamientos estadísticos, que cinco muestras son suficientes para obtener los coeficientes de presión.

Otro procedimiento empleado para obtener los coeficientes de picos de presión, denominado el método de los 3 s, fue empleado por Banks (2013). Este autor aplica un tratamiento de señales para quedarse con un valor de cada intervalo de 3 s (figura 1.10), y promedia finalmente los valores de presión obtenidos en cada intervalo. Los coeficientes de presión hallados con esos valores medios de presión se denominan valores de pico en 3 s ($Cp_{pico\ 3s}$). Además, como valores de referencia suelen tomarse los valores extremos, máximo y mínimo, que adopta

el pico de presión en 3 s. Este procedimiento ha sido utilizado en varios trabajos para la determinación de los coeficientes de presión de diseño en paneles fotovoltaicos (Aly, 2016, Aly and Bitsuamlak, 2013a, Aly and Bitsuamlak, 2013b).

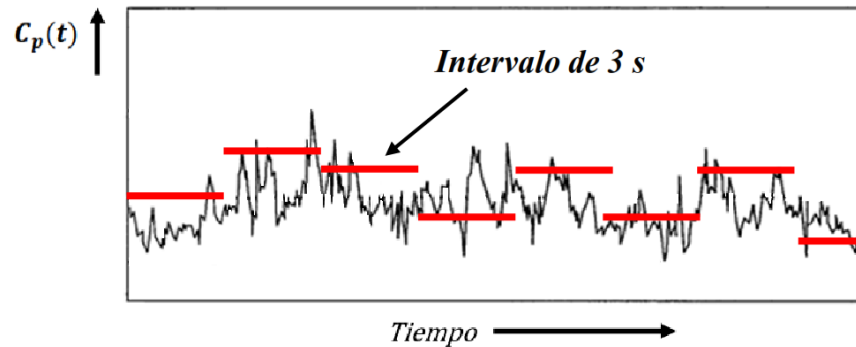


Figura 1.10. División de la serie de presión en intervalos de 3 s

Otra forma de procesamiento que ha sido implementada para la determinación de los coeficientes de presión en paneles fotovoltaicos (Ginger et al., 2011, Stathopoulos et al., 2015, Stathopoulos et al., 2014, Stenabaugh et al., 2015) propone la misma división de la serie de presiones en intervalos de 3 s (figura 1.10), luego la obtención del valor promedio de cada intervalo y la posterior selección del máximo valor entre todos como coeficiente final.

1.3. CONCLUSIONES PARCIALES

De los antecedentes de los estudios en túnel de viento se llegaron a las siguientes conclusiones.

- 1- Para la determinación de la carga de viento de las estructuras que se encuentran en la sub-capa rugosa, donde las presiones no muestran una distribución gaussiana, como es el caso de los paneles fotovoltaicos, se

ha demostrado que el coeficiente de presión y el de ráfaga se obtienen como un solo valor ($C_p C_g$) a través de experimentaciones con una adecuada simulación de la capa límite atmosférica.

2- Las investigaciones experimentales realizadas en túneles de viento sobre la determinación de los coeficientes de presión en paneles fotovoltaicos permiten identificar que:

- a. Todos los estudios, tanto para los paneles aislados como para los parques, coinciden en que los mayores valores globales de presión se obtienen para las direcciones de 0° y 180° ; sin embargo, algunos plantean que los máximos locales de las presiones se obtienen para las direcciones de 45° y 135° , por lo que no deben ser despreciadas en los análisis.
- b. Para el caso de los parques el estudio bibliográfico demostró que los mayores efectos de protección se encuentran para las direcciones de 0° y 180° , mientras que para las direcciones de 45° y 135° todos los paneles localizados en los extremos presentan un comportamiento igual al del panel aislado para esas direcciones.
- c. Para el caso de los parques fotovoltaicos la primera fila es la que presenta mayores valores de presión y produce un efecto de protección para las filas que se encuentran detrás de ella. Según los estudios de las presiones sobre la tercera y la cuarta filas del parque, estos presentan los mismos valores.

- d. Para el estudio de las presiones producidas por el viento en los paneles fotovoltaicos, se recomienda realizar modelos con escalas superiores a 1/50, siempre que se cumpla con los criterios de semejanzas, con el efecto de bloqueo y se logre una correcta instrumentación para que no ocurra interferencia en las mediciones.
- 3- Del estudio de los métodos para el procesamiento de los coeficientes de presiones de viento sobre los paneles fotovoltaicos se denota que existe dispersión de criterios y por lo tanto la selección depende fundamentalmente, de las condiciones del ensayo: instrumentación, y posibilidad de repetición de ensayos.

**CAPÍTULO II: ESTUDIO EXPERIMENTAL EN
TÚNEL DE VIENTO**

CAPÍTULO II: ESTUDIO EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

En este capítulo se expone una descripción detallada de los modelos construidos con el fin de obtener las presiones que ejerce el viento sobre ellos: panel aislado y parque de paneles. La selección estuvo basada en un estudio de campo de los parques construidos en Cuba que se expone en el primer epígrafe. Se definen las bases y el alcance del diseño de experimentos realizado para evaluar la significación de un conjunto de variables asociadas con la posición del panel dentro del parque y con las direcciones de viento principalmente, en los valores de los coeficientes de presión. Se presentan los criterios empleados para desarrollar los modelos a escala reducida, así como los detalles para la simulación de la capa límite en el túnel de viento. Por último, se presentan las expresiones para la determinación de las presiones sobre el panel y los coeficientes de forma.

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DEL PANEL AISLADO Y DEL PARQUE. DISEÑO DE EXPERIMENTACIÓN

A partir del año 2012 se decidió emplear en Cuba parques fotovoltaicos como fuente de generación eléctrica con el objetivo de llegar en el año 2030 al 3% de la matriz energética nacional. Hasta la fecha se han construido siete parques y se encuentran en fase de terminación otros seis. Todos los parques que fueron concebidos hasta el año 2015 presentan una inclinación de sus paneles de 15° con respecto a la horizontal como se puede ver en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Resumen de parques solares construidos en Cuba hasta febrero de 2016.

Año	Nombre	Inclinación	Separación entre filas	Separación entre columnas	Cantidad de módulos por panel	Cantidad de paneles	MWp
feb-12	PSFV- GENERAL Guantánamo	15°	5	0	4x5	520	2,5
ene-13	PSFV- CIES Santiago de Cuba	15°	3,5	0	4x5	464	2,2
feb-13	PSFV- GUAIMARO Granma	15°	2,5	0	4x5	430	1,6
feb-13	PSFV-SIERPE Sancti Spíritus	15°	3	0	4x5	120	0,45
jun-13	PSFV- CANTARRANA 1 y 2	15°	2	0 -1	4x5	416	2
jul-13	PSFV- GENERAL Santa Clara	15°	2,5	0	4x5	260	0,9
abr-14	PSFV- LA FE La Isla	15°	3	0	4x5	225	0,8
sep-15	PSFV-CITA Camagüey	15°	1,67	0	2x5	480	1,2
sep-15	PSFV-PALMIRA Cienfuegos	15°	1,67	0	2x5	1440	3,6
sep-15	PSFV-UNIVERSIDAD La Isla	15°	1,67	0	2x5	960	2,4
sep-15	PSFV-TRONCOSO Pinar del Rio	15°	1,67	0	2x5	520	1,3
sep-15	PSFV-SIERPE VIEJA Sancti Spíritus	15°	1,67	0	2x5	520	1,3
feb-16	PSFV- EL YAREY Granma	15°	1,67	0 – 3	2x5	960	2,4

En esta tabla se aprecia un cambio con los años en la proyección de las separaciones entre filas, con tendencia a disminuir la distancia hasta 2 m para los parques de paneles de 4x5 módulos fotovoltaicos y hasta 1,67 m para los paneles de 2x5 módulos. Estas disminuciones han permitido un mejor aprovechamiento del suelo mediante la colocación de un mayor número de paneles dentro de las áreas destinadas para este fin. En cuanto a las separaciones entre columnas se puede apreciar que la mayor tendencia es a colocar juntos los paneles, aunque se encuentran otras soluciones como en el caso del parque de Cantarrana 1 que se utiliza una separación de 1 m y el de Yarey en Granma que presenta separaciones de 3 m.

La información de la tabla 2.1 se empleó como base para seleccionar los modelos a ensayar en el túnel de viento, un panel aislado y un parque de paneles. Luego del

análisis de los parques existentes, para el estudio del campo de presiones se decidió emplear como prototipo el panel compuesto por 20 módulos fotovoltaicos (arreglo de 4x5) rectangulares de 0,982 m de ancho por 1,324 m de largo, con un peso unitario de 16 kg cada módulo.

El panel soporte de los módulos fotovoltaicos seleccionado tiene dimensiones generales de 5,1 por 5,3 m y se encuentra elevado sobre el nivel de terreno a 0,83 m en la parte frontal y 2,2 m en la parte posterior. La estructura soporte de los módulos se encuentra diseñada con columnas canales 80x8 mm y elementos diagonales angulares de alas iguales de 63x6 mm de perfiles metálicos (ver en la figura 2.1).



Figura 2.1 Geometría de los paneles utilizados en Cuba (prototipo).

La inclinación de los paneles fotovoltaicos, como se dijo en el capítulo I, depende de la ubicación geográfica, condición que está relacionada con la latitud y el hemisferio de ubicación, es por esto que en Cuba se deben colocar con una inclinación de 23° con respecto a la horizontal y hacia el Sur (Berriz and Álvarez, 2008, Sifontes and Mavilio, 2013). Según el estudio de campo realizado que se resume en la tabla 2.1 se aprecia, sin embargo, que la inclinación que se ha

empleado en el país hasta la fecha es la de 15° ; es por esta razón que se decidió realizar modelos con las dos inclinaciones anteriores (15° y 23°). Además de las inclinaciones del panel con la horizontal, del capítulo anterior quedó evidenciado que las variaciones en las direcciones de ataque del viento sobre la estructura generan modificaciones en el resultado del campo de presiones, por esta razón, para el caso del panel aislado, se decidió estudiar la influencia de los ángulos de ataque del viento con intervalos de 45° . Como resultado quedaron cinco direcciones de ataque del viento 0° , 45° , 90° , 135° y 180° , al ser el panel simétrico, el análisis de las otras direcciones (225° , 270° , 315°) está contemplado dentro de estas.

Los paneles son diseñados como estructuras independientes, lo que conlleva a una única solución de estructura y cimiento para todos los paneles del parque que no contempla las modificaciones del viento al incidir de forma desigual en las distintas estructuras, dependiendo de la ubicación del panel dentro del parque. En el presente trabajo, atendiendo al comportamiento detectado en el estado del arte relativo a los efectos de protección de las primeras filas de paneles sobre las restantes de un parque, se decidió determinar las modificaciones en las presiones de los paneles a partir de variar las distancias entre filas y columnas del parque. Este estudio se detalla en el siguiente epígrafe.

2.1.1 DISEÑO DE EXPERIMENTO PARA EL ANÁLISIS DE LAS SEPARACIONES ENTRE FILAS Y COLUMNAS DEL PARQUE

Con bases en el estudio de campo realizado en la tabla 2.1 y considerando las posibilidades que brinda la sección transversal del túnel de viento disponible, para estudiar la separación entre las filas de los paneles del parque se tomaron las

distancias de 1 m, 2 m y 3 m, representativas de los parques construidos en Cuba. Menos de 1 m no es apropiado debido a que la sombra que se crea, ocasiona grandes pérdidas de generación eléctrica y más de 3 m produce gastos adicionales en cuanto al área de terreno necesaria para la ubicación. En cuanto a la distancia entre las columnas del parque, se seleccionó 0 m que es la separación más repetitiva de acuerdo con el estudio de campo y se adicionaron además las separaciones de 1 m y 2 m para evaluar el comportamiento de las presiones en los paneles a medida que aumenta la separación entre las columnas del parque, tal como se propone en los trabajos de Bitsuamlak et al. (2010) y de Warsido et al. (2014).

De forma análoga al estudio planteado para el panel aislado, en el parque se evaluaron las modificaciones en los coeficientes de presión al variar el ángulo de ataque del viento. Se seleccionaron, para este caso, los ángulos 0° y 180° ya que en trabajos estudiados en el capítulo I (Bitsuamlak et al., 2010, Warsido et al., 2014) fueron detectadas de forma coincidente estas direcciones como las que presentaron los mayores valores globales de coeficientes de presión, así como los efectos más importantes de protección de las primeras filas sobre las posteriores.

Otro aspecto considerado en el estudio fue la posición de los paneles dentro del parque, con este fin los paneles se dividieron de acuerdo con su ubicación en las columnas en: interiores o exteriores, y en cuanto a la posición en las filas fueron nombrados como uno, dos y tres como se puede apreciar en la figura 2.2.

Como resultado de los planteamientos anteriores, quedaron cinco variables independientes a estudiar en los ensayos en túnel de viento del parque, para evaluar

la influencia de cada una en las modificaciones de las presiones (coeficiente de presión como variable dependiente). Este análisis dio a lugar a un diseño de experimentos $2 \times 2 \times 3 \times 3 \times 3$ 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). La inclinación del panel respecto a la horizontal para este estudio se definió en 15° por ser la empleada en los parques construidos en Cuba. En la figura 2.2 se puede apreciar la nomenclatura asignada a cada una de las variables dentro del estudio.

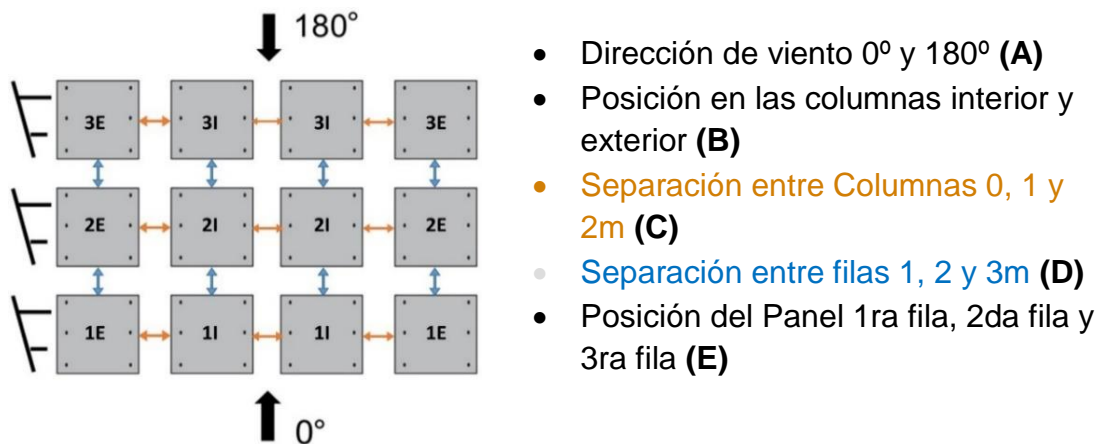


Figura 2.2 Esquema del experimento con las variables independientes y los niveles evaluados en cada una.

En el diseño de experimentos descrito se plantearon dos objetivos fundamentales: identificar la influencia de las variables y la interacción entre ellas en el valor de la variable dependiente y determinar el peso de las variables y de sus interacciones en el valor de la variable dependiente.

En la definición de los niveles de la variable independiente separación entre filas se seleccionó como nivel mínimo 1 m y el valor representativo del nivel máximo 3 m. Para los niveles de la variable independiente de separación entre columnas se

escogió como nivel mínimo una distancia de 0 m y como nivel máximo una distancia de 2 m. En cuanto a la variable de posición en las columnas se escogió como nivel máximo cuando la fila se encuentra frente al viento y como nivel mínimo cuando se analiza la fila tres del parque. Para el caso de la variable posición en la columna se definió como nivel máximo la ubicación en el interior del parque y como nivel mínimo la posición en el exterior. Por último, para la variable dirección de viento se tomó como nivel mínimo 0° y como nivel máximo 180°. Todo el diseño se resume en la tabla 2.2, donde la nomenclatura para el nivel mínimo es (-1), para el máximo (1) y en las variables que tienen tres niveles existe un nivel intermedio identificado con (0).

Tabla 2. 2 Indicadores de las variables independientes.

INDICADORES				
Dir-Viento (A)	Variable	0	180	
	Indicador	1	-1	
Posición (B)	Variable	Interior	Exterior	
	Indicador	1	-1	
S/Columna (C)	Variable	0	1	2
	Indicador	1	0	-1
S/Fila (D)	Variable	1	2	3
	Indicador	1	0	-1
Fila (E)	Variable	1	2	3
	Indicador	1	0	-1

Al combinar los niveles de cada una de las variables independientes surgen 108 experimentos a realizar en el túnel de viento. La matriz de experimentación se presenta en el Anexo A.

Para lograr el primer objetivo se plantearon las siguientes hipótesis para la variable dependiente (coeficiente de presión):

H_0 : La variable independiente (A, B, C, D o E) o la interacción de las variables (AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE o DE) (según corresponda en cada caso) *no* influye en el valor del coeficiente de presión.

H_1 : La variable independiente (A, B, C, D o E) o la interacción de las variables (AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE o DE) (según corresponda en cada caso) influye en el valor del coeficiente de presión.

La regla de decisión seleccionada expone que si los p-valor son menores que 0,05 se plantea que hay suficiente evidencia estadística para rechazar H_0 con un nivel de significación del 5% (ver ecuación 2.1), es decir, que no influyen en el valor del coeficiente de presión las variables independientes (A, B, C, D o E) o la interacción de las variables (AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE o DE).

$$P - \text{valor} = P(\text{rechazar } H_0 / H_0 \text{ es cierta}) \qquad \text{Ecuación 2.1}$$

Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó como herramienta el software Statgraphics (2006).

2.2. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO A ESCALA REDUCIDA

Para lograr la similitud entre modelo y prototipo se identificaron los parámetros no dimensionales que deben ser iguales en el modelo y en el prototipo, para afirmar que los sistemas operan en condiciones homólogas. Para obtener los parámetros adimensionales que intervienen en el estudio se empleó el método propuesto por Simiu and Scanlan (1996) y Çengel and Cimbala (2006). El objetivo es obtener las leyes de escala que garanticen que el comportamiento del prototipo pueda ser conocido a través del comportamiento del modelo (Simiu and Scanlan, 1996).

Este análisis dimensional está basado en el principio de similitud que plantea que existen tres condiciones necesarias para que se cumpla la semejanza entre el modelo y el prototipo. La primera condición es la semejanza geométrica, relacionada con la forma entre el modelo y el prototipo. La segunda es la similitud cinemática, relacionada con el flujo, que implica que la velocidad del flujo en un punto cualquiera del modelo se pueda obtener multiplicando la velocidad homóloga en el prototipo por un factor constante y la tercera es la similitud dinámica, que se logra si el campo de fuerzas en el flujo del modelo resulta semejante al campo de fuerzas en el flujo del prototipo. Esta última condición de similitud es necesaria para modelos aeroelásticos donde se pretendan medir esfuerzos sobre la estructura, pero este no es el caso de estudio de la presente investigación.

Las condiciones de similitud están directamente relacionadas, ya que para lograr una similitud cinemática es necesario, aunque no suficiente, que se cumpla la condición de semejanza geométrica. De igual manera, para que dos objetos sean similares dinámicamente es necesario que se cumplan las condiciones de semejanza geométrica y similitud cinemática.

Para el estudio se determinaron las variables involucradas, entre las cuales pueden ser mencionadas las variables del flujo como son la velocidad media (v), las componentes turbulentas (u' , v' y w'), la escala integral de la turbulencia (L_u) y las pequeñas escalas de la turbulencia (λ); las variables del fluido como son la densidad (ρ) y la viscosidad absoluta (ν) y las variables de la geometría como son la forma, las dimensiones (H , W), las coordenadas del sitio sobre el obstáculo (X , Y , Z) y la rugosidad de la superficie (ϵ). Luego con la aplicación del Teorema de Pi-

Buckingham se obtuvieron los grupos adimensionales, para lo cual se definen como magnitudes fundamentales la velocidad media del flujo en un sitio de referencia, la densidad del fluido y una dimensión significativa del objeto. A partir de este planteamiento los coeficientes de presión se expresan como función de la intensidad de la turbulencia (I_u), las escalas del flujo y del número de Reynolds (Re) (ecuación 2.2).

$$C_p = f(I_u, L_u/H, \lambda/H, W/H, X/H, Y/H, Z/H, Re) \quad \text{Ecuación 2. 2}$$

Según las leyes de semejanza, las variables independientes en el prototipo deben coincidir con las del modelo. Por ejemplo, las ecuaciones 2.3 y 2.4 muestran la semejanza para el caso del Reynolds.

$$Re_m = Re_p \quad \text{Ecuación 2. 3}$$

$$1 = \frac{Re_m}{Re_p} = \frac{\frac{\rho L_m V_m}{\mu}}{\frac{\rho L_p V_p}{\mu}} = \lambda_L \lambda_V \quad \text{Ecuación 2. 4}$$

Del análisis resultó que la escala de velocidad es inversamente proporcional a la de longitud, como se plantea en la ecuación 2.5.

$$\lambda_v = \frac{1}{\lambda_L} \quad \text{Ecuación 2. 5}$$

Como se observa en la ecuación 2.5, mientras más pequeño es el modelo, este debe someterse a mayor velocidad del flujo para cumplir con las leyes de semejanza, lo que es complicado de lograr en la mayoría de los túneles de viento, por lo cual han surgido una serie de soluciones (Fox and McDonald's, 2011) que se pueden aplicar en el caso de que la semejanza no sea completa.

De acuerdo con los criterios reflejados en el estado del arte si fijo el número de Reynolds en 5×10^4 (Miller and Zimmerman, 1981), para calcular la longitud mínima

que debe tener el modelo para lograr la independencia del número de Reynolds, a partir de la ecuación 2.6. Los datos de la densidad y la viscosidad del aire fueron tomados para la temperatura promedio de Cuba de 25°C (Sifontes and Mavilio, 2013).

$$L_{min} = \frac{Re \times \nu}{V} = \frac{5 * 10^4 \times 15 * 10^{-6}}{10} = 0,075 \text{ m} = 75 \text{ mm}$$

Ecuación 2. 6

$$L_{modelo} \geq L_{min} = 75 \text{ mm}$$

Donde V es la velocidad del viento dentro del túnel $V = 10 \text{ m/s}$ y ν es la viscosidad cinemática del aire ($\mu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

La escala geométrica más pequeña con la que se puede trabajar se obtiene de dividir la dimensión mínima del modelo antes estimado (75 mm) entre la longitud homóloga en prototipo, que fue tomada 5 m. Como resultado se obtuvo una escala geométrica mínima de 1/67.

A partir de este elemento y basado en el estado del arte, se adoptó la escala geométrica de 1/10 para el panel individual y de 1/20 para el estudio del parque. En los dos casos se cumplió con las recomendaciones establecidas para este tipo de estudios sobre la relación de bloqueo, ya que para el panel fue de 2% y para el parque de 4%, ambas menores del 5%.

Todos los aspectos relacionados con anterioridad están vinculados principalmente con la semejanza geométrica, la semejanza cinemática se consigue a partir de una correcta simulación en el túnel de los regímenes de viento a escala real, con ese objetivo se desarrolla el siguiente sub-epígrafe.

2.2.1 SIMULACIÓN DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA EN EL TÚNEL DE VIENTO

La localización geográfica de los parques en Cuba es muy variable, sin embargo, todos tienen en común que se encuentran en terrenos llanos, de poca vegetación y alejados de las ciudades, todo esto con el objetivo de evitar que se generen sombras sobre la superficie expuesta al sol de los paneles, como se puede ver en la figura 2.3.



Figura 2.3 Ejemplo de parques fotovoltaicos construidos en Cuba.

La simulación en el túnel de viento del terreno debe garantizar que las características del viento a escala real sean correctamente establecidas a escala de modelo y esto se logra mediante el establecimiento de: la ley de variación vertical de las velocidades medias, la distribución espacial de la turbulencia y el espectro de potencia de la turbulencia, fundamentalmente. Estas propiedades del viento han sido estudiadas y existen varias formulaciones teóricas establecidas que describen su comportamiento. La elección de una formulación u otra va a estar condicionada por las características meteorológicas del sitio que se quiera modelar. En el caso de Cuba, un factor que tiene alta incidencia en la elección es la ocurrencia de los

huracanes, es por esto que como paso previo al proceso de simulación en el túnel se describe a continuación un estudio realizado de las principales formulaciones.

La descripción del terreno donde se ubican los paneles se corresponde, aproximadamente, con la categoría A que plantea la norma cubana para el cálculo de estructuras frente a la acción del viento NC-285 (NC-285, 2003). Esta norma propone el perfil exponencial para describir la variación de la velocidad media con la altura; sin embargo, de acuerdo con estudios realizados (Tamura and Kareem, 2013), para regímenes de fuertes vientos similares a los que se ve sometida Cuba por la ocurrencia de huracanes, la representación más adecuada para simular la variación de la velocidad media con la altura es el perfil logarítmico, ecuación 2.7; por lo que fue el seleccionado en este trabajo para simular en el túnel de viento.

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \qquad \text{Ecuación 2. 7}$$

En (2.7), $\bar{U}(z)$ representa la velocidad media del viento a la altura z , u^* es la velocidad de fricción que se puede determinar a partir de dos enfoques frecuentemente empleados: el primero es la extrapolación a partir del perfil logarítmico y el segundo mediante la expresión 2.8 que está basada en el intercambio turbulento de cantidad de movimiento, siendo u, v, w las componentes longitudinal, lateral y vertical, respectivamente de la fluctuación del viento (Li et al., 2015). Este segundo método puede ser empleado cuando se cuenta con mediciones de anemómetros que registren en las tres direcciones.

$$u^{*2} = \sqrt{\overline{u'v'^2} + \overline{w'u'^2}} \qquad \text{Ecuación 2. 8}$$

K es el coeficiente de von Kármán que es aproximadamente 0,4 y Z_0 es la longitud de rugosidad. Para un terreno con las características de los emplazamientos donde se encuentran los parques fotovoltaicos, esta longitud de rugosidad (Z_0) tiene diferentes valores en función de las normativas (ver tabla 2.3).

Tabla 2. 3 Valores de Z_0 por las diferentes normativas.

Norma	País	Categoría	Descripción	Z_0 (m)
(WMO, 2010)	Organización Meteorológica Mundial	Abierto	Terreno cerca de las costas con velocidades de viento mayores de 30 m/s, cercano a los aeropuertos de baja vegetación y pocos árboles.	0,03-0,1
(AS/NZS1170.2, 2011)	Australia y Nueva Zelanda	2	Terrenos abierto con césped bajo y edificios de poca altura menor de 10 m.	0,02
(ASCE7-10, 2010)	Estados Unidos	C	Aeropuertos similar a terrenos abiertos	0,02

La turbulencia atmosférica es un campo estocástico, tri-dimensional (u, v, w) y no estacionario. El análisis de la turbulencia suele ser realizado en un intervalo de tiempo durante el cual se asume que resulta estadísticamente estacionaria. Entre las componentes de la turbulencia es posible establecer correlaciones las cuales, debido a que el flujo es estadísticamente estacionario, resultan independientes del tiempo. La relación entre las diferentes componentes turbulentas es diferente de acuerdo al tipo de flujo turbulento que se analice. En el caso de los flujos limitados por una pared, como lo es una capa límite, es usual que los estudios se limiten a caracterizar la componente longitudinal (u) que es la más simple de medir. Las

diferentes componentes turbulentas tienen más o menos relevancia en función del problema que se analice. Los parámetros habituales que se utilizan para caracterizar la turbulencia son la intensidad de turbulencia, que es una medida de la potencia contenida en la turbulencia, y el espectro de potencia, que describe la forma en la cual dicha potencia se distribuye entre componentes de diferente frecuencia.

La intensidad de turbulencia se obtiene a partir de la ecuación 2.9, y se define como el cociente entre la desviación estándar de las fluctuaciones de la velocidad y la velocidad media en un punto determinado.

$$I = \sigma_u / \bar{U}$$

Ecuación 2. 9

Durante el paso de ciclones tropicales la mezcla turbulenta es fuerte, lo que conduce a mayores valores de intensidad de turbulencia que los que se encuentran frecuentemente descritos en las normas técnicas. Por este motivo es que varios autores (Fu et al., 2012, Ishizaki, 1983) han desarrollado mediciones a escala real para lograr una determinación más certera de este parámetro. Estos trabajos, sin embargo, solo muestran registros para alturas superiores a los 5 m desde el nivel del terreno, y los paneles fotovoltaicos cubanos se encuentran por debajo de esa altura.

Un trabajo publicado recientemente (Li et al., 2015) llevado a cabo en China, obtuvo para un terreno con características similares al del presente estudio, para una altura de 5 m un valor de intensidad de turbulencia de 0,23; mientras que Ishizaki (1983) en Japón, para un terreno similar obtuvo 0,188 lo que evidencia que hay una dispersión considerable. En estas diferencias, tienen una alta incidencia las

particularidades de los terrenos en los que se realizaron las mediciones, así como las características meteorológicas del fenómeno atmosférico registrado.

El espectro de frecuencia es una medida de la energía contenida en las ráfagas del viento y describe la relación entre las frecuencias presentes en el proceso real que generan la fluctuación de la velocidad.

En cuanto al espectro de frecuencia, se adoptó en este trabajo la formulación propuesta por von Kármán (1948), ver ecuación 2.10, expresada específicamente para la componente longitudinal de las fluctuaciones.

$$\frac{f \cdot S(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4X}{[1 + 70.8(X)^2]^{5/6}} \quad \text{Ecuación 2. 10}$$

Esta expresión, resulta una representación adecuada de la turbulencia del viento durante el paso de huracanes, de acuerdo con el criterio de Tamura y Kareem en bibliografía de referencia en esta temática (Tamura and Kareem, 2013) y ese criterio está avalado por un grupo de trabajos basados en resultados de monitorear estructuras sometidas a la acción de huracanes (Fu et al., 2012, Li et al., 2015).

En la ecuación 2.10, σ_u^2 es la varianza de la componente (u) y X es una variable definida por la ecuación 2.11.

$$X = \frac{fL_u}{\bar{U}} \quad \text{Ecuación 2. 11}$$

En la ecuación 2.11 f son las frecuencias lineales, \bar{U} es la velocidad media en un determinado punto y L_u es la escala integral de la componente (u) de la turbulencia.

La escala integral o longitud de turbulencia, L_u , es una medida del tamaño promedio de los vórtices del viento con mayor contenido de energía dentro de la capa límite atmosférica y depende fundamentalmente de la longitud de rugosidad, Z_o , de la

altura desde el terreno z , de la velocidad media, \bar{U} y de los parámetros de Coriolis que son dependientes de la latitud del sitio de observación (Tamura and Kareem, 2013). Es por esto que las mediciones experimentales en condiciones de huracanes no son concluyentes y que existe una discrepancia en normas y artículos con relación a la elección de la mejor formulación.

La tabla 2.4, resume algunas de las formulaciones que han sido recogidas en las normativas estudiadas. La formulación que fue adoptada en esta investigación es la que recoge el Eurocódigo (EN1991-1-4, 2004) pues fue obtenida a partir de más de 20 estudios realizados bajo condiciones climáticas diferentes que incluyen zonas de huracanes.

Tabla 2. 4 Formulaciones de L_u en las diferentes normativas.

Norma	País	Formulación
(AS/NZS1170.2, 2011)	Australia y Nueva Zelanda	$L_u = 85(z/10)^{0.25}$
(ASCE7-10, 2010)	Estados Unidos	$L_u = l(z/10)\bar{\varepsilon}$ donde $l = 152,4$, y $\bar{\varepsilon} = 1/5$ para la categoría de exposición de terreno C.
Eurocódigo 1. WindActions(EN1991-1-4, 2004)	Europa	$L_u = 300 (z/200)^{(0.67 + 0.05\ln(z_o))}$

Una vez determinadas las características del viento a lograr con la simulación, el trabajo experimental fue realizado 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 (ver figura 2.4).



Figura 2.4 Túnel de viento del IMFIA de la Universidad de la República (UDELAR).

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 que presenta 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 le permite desarrollar una velocidad de trabajo regulable de hasta 30 m/s. Además, tiene un difusor tronco-cónico de 4,1 m de diámetro en la salida, para incrementar el rendimiento de la instalación.

Para lograr simular la capa límite atmosférica descrita anteriormente, se crearon en el túnel las características de rugosidad necesarias mediante la técnica pasiva denominada como “métodos de rugosidad, barreras y dispositivos de mezcla”. Específicamente para este trabajo, se utilizaron bloques de rugosidad, una barrera dentada y como dispositivo de mezcla se emplearon las espiras de Standen (ver figura 2.5).

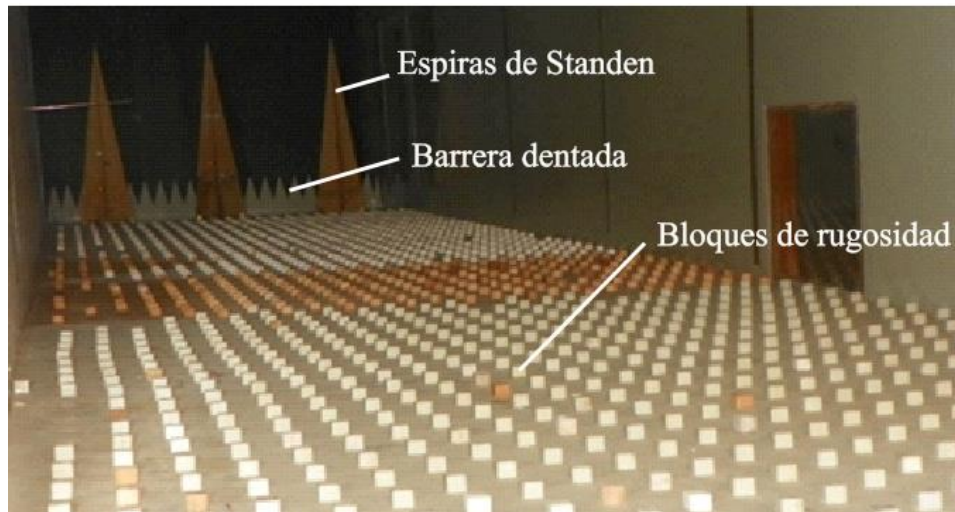


Figura 2.5 Arreglo de los dispositivos de simulación para generación del flujo turbulento en el túnel de viento.

El instrumento utilizado para las mediciones de velocidad del aire dentro del túnel de viento fue un anemómetro de hilo caliente de tres canales modelo IFA100 marca TSI Company U.S. La condición de trabajo en el túnel de viento se caracterizó con la medición de un tubo pitot ubicado a una altura de 1,5 m sobre el suelo de la zona de trabajo y a 30 cm de la pared, posición en la cual el flujo ya no está influenciado por los dispositivos de rugosidad. Fueron medidas también, con un termómetro, las variaciones de temperatura durante el ensayo, para realizar correcciones en los valores obtenidos pues estos sufren alteraciones producto de los cambios en la densidad del aire.

Para la determinación de la capa límite se midieron 29 puntos en la vertical del túnel. Los primeros puntos se midieron cada 5 mm hasta los 50 mm, pues la intensidad de turbulencia es mayor mientras más cerca se está de la superficie rugosa y luego se fue aumentando el espaciamiento hasta llegar a una altura de 700 mm. La altura máxima de medición fue fijada a partir de evidenciar que los perfiles de velocidad

media e intensidad de turbulencia comenzaban a presentar un comportamiento constante.

En cada altura la señal emitida por el anemómetro de hilo caliente se midió con una frecuencia de muestreo de 1000 Hz y se tomaron 65536 datos, es decir, que el tiempo de muestreo fue de 65 s. El esquema de la instrumentación realizada en el túnel se presenta en la figura 2.6.

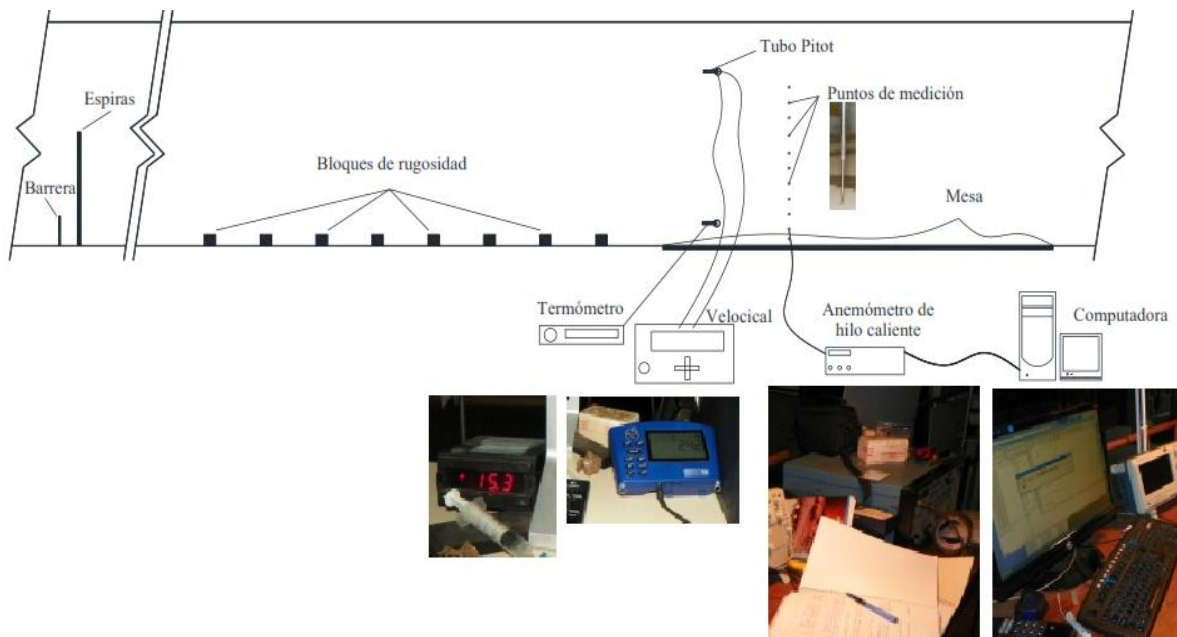


Figura 2.6 Esquema de medición para la obtención de la capa límite dentro del túnel.

De las mediciones se obtuvo una longitud de rugosidad ($Z_0 = 0.006 \text{ m}$) a escala de modelo, equivalente a una ($Z_0 = 0.06 \text{ m}$) a escala de prototipo. La longitud de rugosidad fue determinada del despeje de la relación existente entre dos puntos consecutivos medidos en el perfil vertical de velocidad media, ecuación 2.12. Este proceso fue realizado para varios puntos consecutivos y se obtuvo Z_0 mediante un ajuste lineal. El valor obtenido se encuentra dentro de los valores que se plantean

en las normas consultadas en la tabla 2.4 del capítulo, lo que indica que fueron logradas de una forma correcta las condiciones de rugosidad del terreno real.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\ln(Z_2/Z_0)}{\ln(Z_1/Z_0)}$$

Ecuación 2. 12

En la figura 2.7 se muestra el perfil de velocidades obtenido en el túnel y el perfil logarítmico asumido como patrón comparativo.

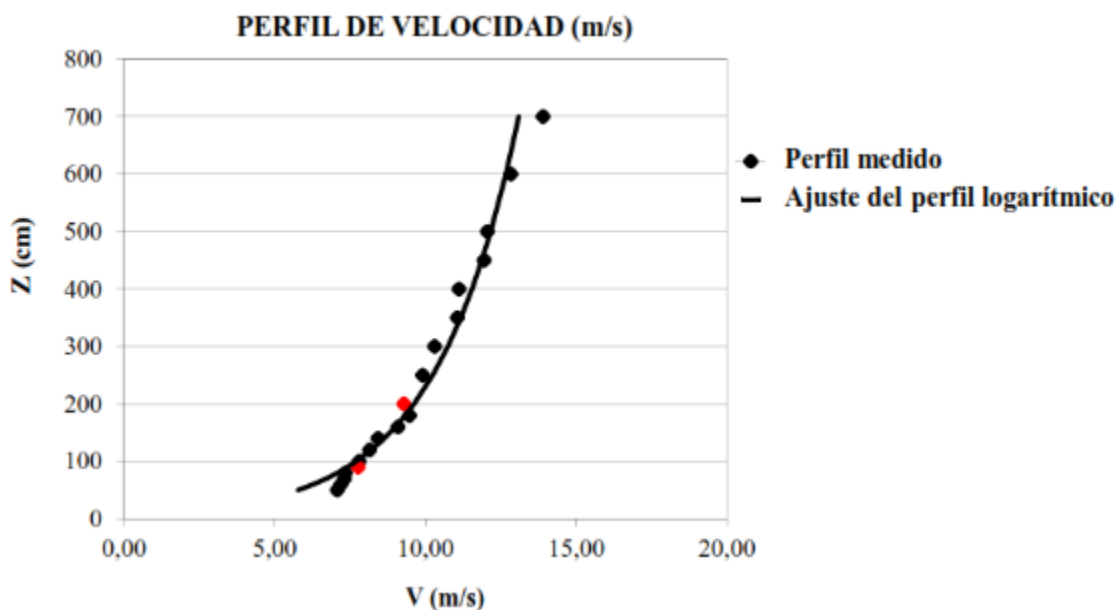


Figura 2.7 Perfil de velocidad media y ajuste con el perfil logarítmico.

En esta figura se aprecia que existe una adecuada simulación del perfil de velocidad representado por los puntos, pues estos se ajustan en gran medida al perfil patrón representado por la línea continua. En el perfil medido, los puntos rojos representan la altura del borde inferior y superior del panel que se pretende estudiar dentro de la capa límite simulada.

La intensidad de turbulencia (I) se obtuvo a partir de la ecuación 2.9 para cada punto en los que fueron realizadas las mediciones. La figura 2.8 muestra el perfil de intensidad de turbulencia simulado en el túnel.

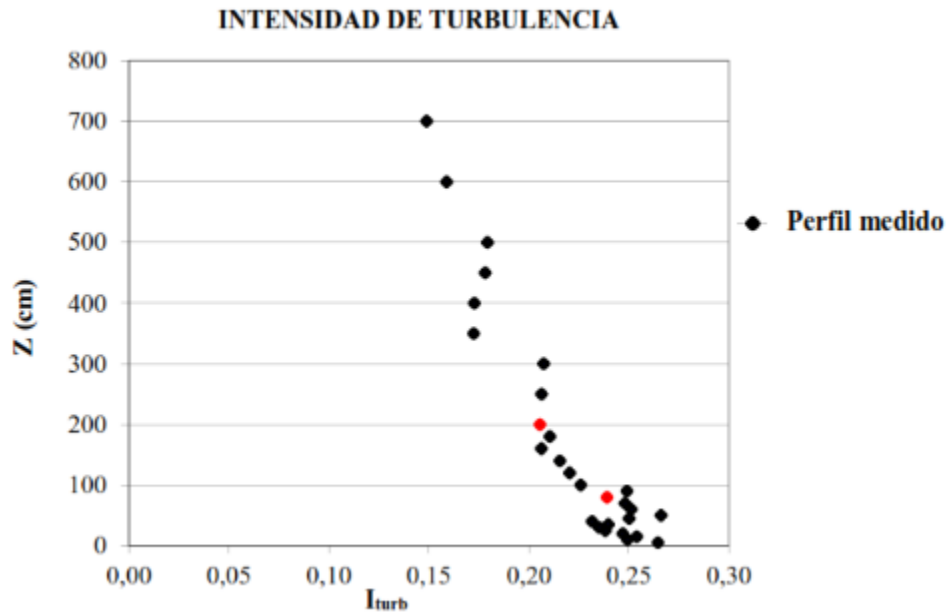


Figura 2.8 Perfil de intensidad de turbulencia.

Para 5 m de altura, a escala de prototipo, la intensidad de turbulencia medida fue aproximadamente de 0,18, este valor es inferior al obtenido experimentalmente a escala real por Li et al. (2015) pero tiene una adecuada concordancia con los resultados de Ishizaki (1983).

El espectro de frecuencia se obtuvo para cada altura de medición; a 140 mm, que se corresponde con la mitad de la altura a la que se colocará el panel en el túnel de viento, se comparó el espectro de frecuencias medido con el propuesto por von Kármán (von Kármán, 1948). La figura 2.9 muestra que existe un ajuste adecuado entre el espectro simulado y el patrón, especialmente para las altas frecuencias.

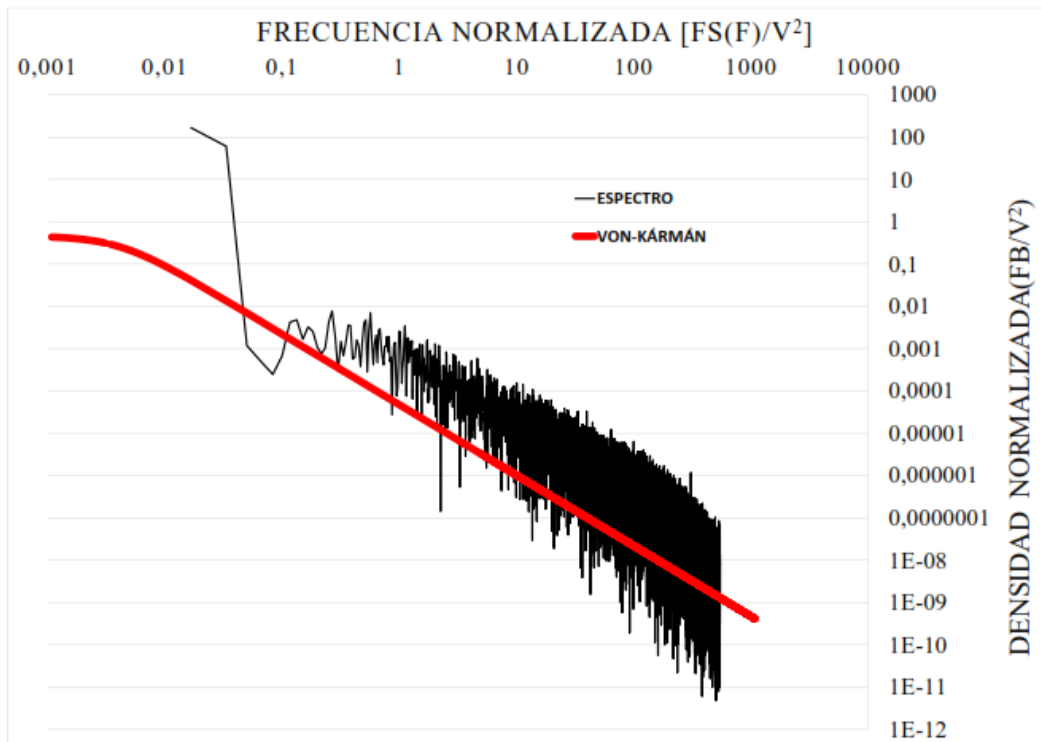


Figura 2.9 Espectro de frecuencia.

2.2.2 DISEÑO DE LOS MODELOS A ESCALA Y DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MEDICIÓN

La escala geométrica seleccionada para el panel permitió colocar por dentro de este todos los conductos del sistema de tomas de presiones, tanto para medir en la parte superior, como en la inferior, sin interferir con el flujo generado, problema que se reporta en los estudios de Abiola-Ogedengbe et al. (2015) y Aly and Bitsuamlak (2013). Fueron colocadas un total de 112 tomas de presión, 56 en la cara inferior y 56 en la cara superior. En la figura 2.10 se ven las medidas del modelo a escala.

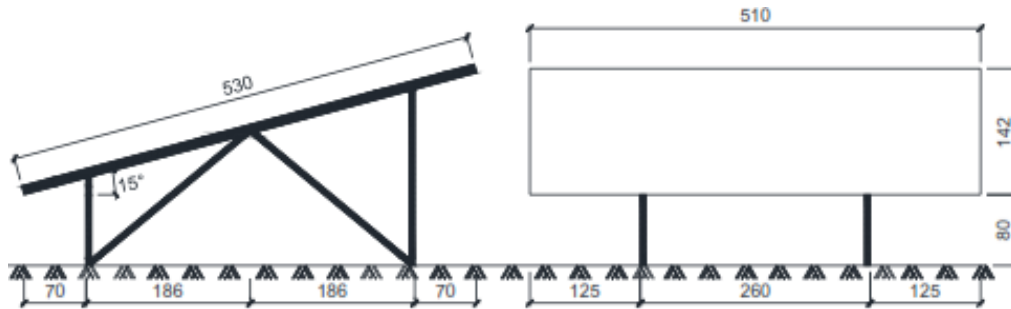


Figura 2.10 Geometría del modelo a 15° escala 1/10 (dimensiones en mm).

El panel fotovoltaico se construyó con material acrílico y la estructura de soporte con perfiles de aluminio. El panel se conformó por cuatro placas de acrílico en forma de sándwich, la superior y la inferior de 3 mm de espesor y dos interiores de 2 mm, que fueron las encargadas de conducir las tomas de presión, para garantizar que estas no se desprendieran durante el ensayo (ver figura 2.11a).

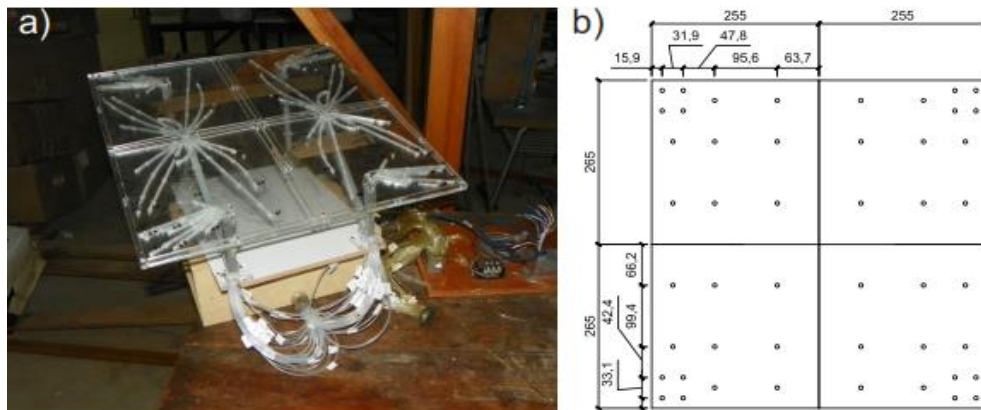


Figura 2.11 a) Tomas de presión que pasan por dentro de la estructura soporte del panel, b) Esquema de colocación de las tomas de presión para ambas caras del panel (Dimensiones en mm).

El área del panel se fraccionó en cuatro regiones y cada una se instrumentó con 28 tomas de presión de 1 mm de diámetro interior, como se muestra en la figura 2.11b. En el caso de las esquinas se colocaron cuatro tomas para poder obtener más detalles del comportamiento de las presiones, ya que es en esa regiones donde

aparecen los mayores valores de presión en las estructuras bajas que se encuentran en la capa rugosa (Geurts et al., 2013). Esta instrumentación fue similar a la presentada en los trabajos de Pfahl et al. (2011) y Samani (2016).

La figura 2.12 muestra las características del ensayo, las cinco direcciones de estudio y la ubicación en el túnel del panel.

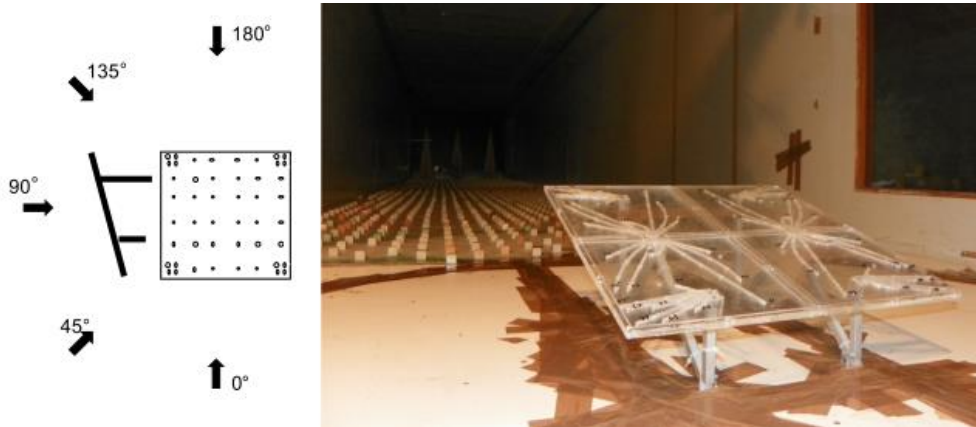


Figura 2.12 Panel fotovoltaico en el túnel de viento con una representación de las cinco direcciones de viento a analizar.

Para el caso del parque, la escala geométrica de 1/20 permitió colocar 12 paneles distribuidos en cuatro columnas y tres filas dentro de la sección de trabajo del túnel de viento como se ve en la figura 2.13.

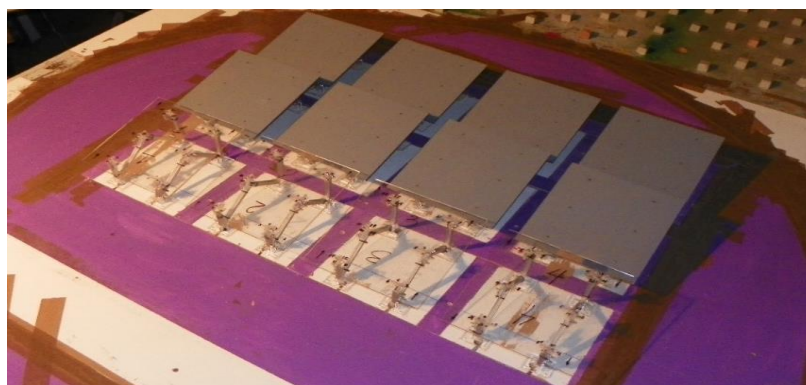


Figura 2.13 Modelos para el estudio del parque a 15° en escala 1/20, cuatro de los paneles son los instrumentados (los de acrílico) y los restantes son los de madera.

Para el estudio del parque se instrumentaron los cuatro paneles de una misma fila y se colocaron por dentro de cada una de las estructuras las tomas de presiones, 12 en la cara superior y 12 en la parte inferior, para un total de 96 tomas de presión. Para este modelo como era tan fina la plancha de acrílico se instrumentaron los paneles en los elementos de apoyo de forma tal que no perturbaran el flujo de aire, quedando ubicadas las tomas de la forma que se muestra en la figura 2.14a. Se empleó acrílico de 5 mm para los paneles instrumentados y planchas de madera de igual espesor para los paneles restantes que no fueron instrumentados (ver figura 2.14b). La posición de los paneles instrumentados fue variada de acuerdo con la matriz de experimentación del diseño de experimentos planteado en el epígrafe 2.1.1.

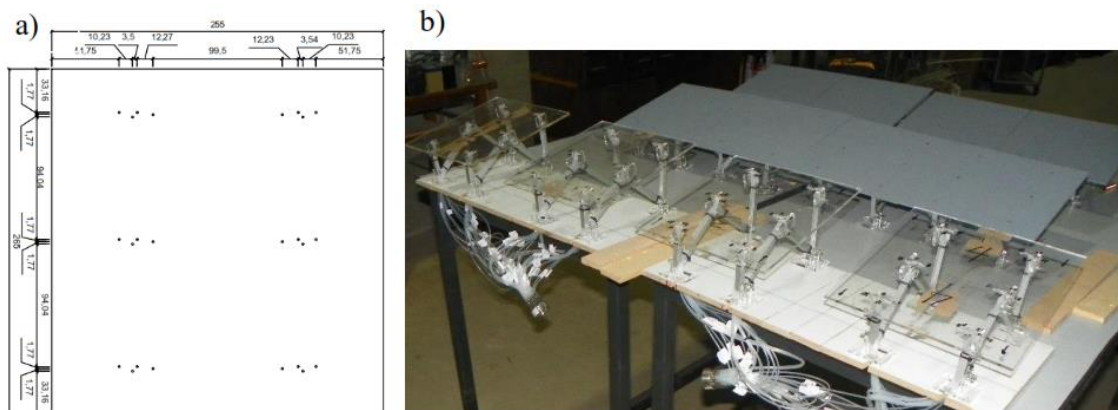


Figura 2.14 a) Esquema de colocación de las tomas de presión del panel (Dimensiones en mm) y b) las cuatro mesas instrumentadas.

Para la obtención de las presiones en los modelos se utilizó un transductor de presiones (SCANIVALVE ZOC33/64 Px) como se puede ver en la figura 2.15. El instrumento permitió trabajar a una frecuencia de muestreo de 120 Hz y tomar 27000 datos por cada toma de presión ubicada en el modelo.



Figura 2.15 Transductor de presión SCANIVALVE ZOC33/64.

Para completar la semejanza cinemática, además de la correcta determinación de los parámetros de la capa límite fue necesario establecer la escala de velocidades entre el modelo y el prototipo y luego la escala de tiempo (ecuación 2.13) de medición necesaria en el túnel de viento.

$$e_T = \frac{e_l}{e_v}$$

Ecuación 2. 13

De la ecuación, e_l es la escala geométrica determinada para el ensayo del panel y del parque. La escala de velocidad se obtiene a partir de dividir la velocidad media obtenida en el túnel a una altura de referencia a escala de modelo, en este caso tomada a 1 m (altura a la que se toma la presión de referencia con el pitot), entre la velocidad conocida a esa misma altura a escala de prototipo.

La velocidad obtenida de las mediciones experimentales en el túnel de viento a escala de modelo fue de 16 m/s. A escala de prototipo, la velocidad conocida se determina a partir de las velocidades básicas que plantea la norma cubana (NC-285, 2003) para 10 m de altura sobre el nivel de terreno, y mediante el perfil logarítmico se despeja la velocidad de viento esperada para la altura de referencia en el panel. La norma cubana plantea tres velocidades básicas en función de las

regiones en las que divide al territorio nacional. Para el estudio se seleccionó la zona 1, ya que es la que tiene mayores velocidades básicas y por lo tanto es la que mayor tiempo de medición requerirá de acuerdo con la ecuación 2.13. Para la altura de referencia en el prototipo, la velocidad media determinada fue de 60 m/s, valor que proporciona una escala de velocidad (e_v) de 0,27 y una escala de tiempo (e_T) de 0,37.

Como el tiempo de medición a escala real son 10 min, que responde al intervalo de promediación de la velocidad básica en Cuba, el tiempo de medición del ensayo (T_m) debe cumplir con la relación $T_m > 600 s \times e_T$, con lo cual para el panel aislado $T_m = 222s = 3,7 min$ y para el parque escala 1/20 se estableció el mismo tiempo de medición, ya que como la escala es más pequeña, el tiempo que se necesitaba era la mitad del tiempo calculado para el modelo escala 1/10.

En este tiempo de medición del ensayo se tomaron 27000 datos para cada una de las 64 tomas que presenta el equipo, lo que arrojó un intervalo de tiempo (Δ_t) de medición entre tomas de 8,22 ms para una frecuencia de muestreo de 120 Hz. Esto da lugar a un tiempo de muestreo de 3,75 min, el cual es algo superior al tiempo determinado a partir del intervalo de 10 min establecido en la norma cubana.

2.3. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN Y DE FORMA

Con la instrumentación realizada, se tienen presiones medidas en la cara superior e inferior del panel que fueron restadas en el tiempo, como se puede apreciar en la ecuación 2.14, para obtener una serie temporal que se le llamó coeficiente de presión neto para cada instante de tiempo ($C_{pi(net)}(t)$). Este coeficiente fue

determinado en cada uno de los puntos instrumentados en el panel aislado y en los paneles del parque.

$$C_{pi(net)}(t) = \frac{P_i^S(t) - P_i^I(t)}{\frac{1}{2}\rho V_{ref}^2} \quad \text{Ecuación 2. 14}$$

De la ecuación 2.14, $P_i^S(t)$ y $P_i^I(t)$ son las mediciones en la cara superior e inferior del panel para cada toma i , ρ es la densidad del aire, V_{ref} es la velocidad media del viento en la cota de referencia, que fue tomada a la mitad de la altura del panel. El coeficiente de presión neto fue definido negativo si actúa hacia arriba (succión) y positivo si actúa hacia abajo (presión).

De la serie temporal de presiones netas obtenidas se determinaron los coeficientes de presión picos $C_{p(pico\ 3s)}$. Estos se determinaron a partir de dividir la medición completa representativa de 10 min, a escala de prototipo, en intervalos corridos de 3 s (siendo un total de N intervalos corridos) y calculando para cada uno de esos intervalos el valor medio (ecuación 2.15). Este intervalo de 3 s se fue corriendo a los efectos de poder evaluar todos los casos posibles de intervalos que se pudieran presentar en la medición, como se puede ver en el Anexo B, donde se incluyó el programa empleado desarrollado en un ambiente MATLAB para seleccionar el valor máximo.

$$C_{p(max)3s} = \frac{p(max\ o\ min)3\ s}{\frac{1}{2}\rho V_{ref}^2} \quad \text{Ecuación 2. 15}$$

$$p(max)3s = \max\ o\ \min \{ \{p(neto)\}_{3\ s, i} \}_{i=1\ a\ N}$$

La forma más habitual de mostrar estos coeficientes de presiones en las normas es a través de los coeficientes de forma locales (C_f), los cuales permiten evaluar la

fuerza que se realiza sobre la estructura. Estos coeficientes se calculan mediante la ecuación 2.16 (Aly, 2013, Samani, 2016).

$$C_f = \frac{\sum_i^n C_p * A_i}{\sum_i^n A_i} \quad \text{Ecuación 2. 16}$$

Donde C_f es el coeficiente de forma para cada área local, C_p es el coeficiente de presión neto (medio o pico) para cada toma i , n es el número total de tomas de presión de cada área local y A_i es área tributaria para cada toma i . En los cálculos de carga de viento para estructuras, el área tributaria se puede definir como la zona que rodea a una toma de presión, donde se supone que la presión es constante. Sin embargo, la literatura presenta poca orientación de una metodología de cálculo para la determinación de las áreas que tributan a tomas de presión. Aly (2013) expone que no existe ninguna ecuación matemática genérica que puede calcular las áreas tributarias para tomas de presiones dispersas sobre una superficie y presenta un método numérico para el cálculo de superficies tributarias sobre superficies rectangulares. El enfoque hace uso de las coordenadas disponibles de las tomas de presión y las dimensiones de la superficie. La técnica propuesta se presenta con dos ejemplos de aplicación: el primero con tomas de presión distribuida, cuasi-regular y el segundo con tomas de presión dispersas sobre una superficie rectangular. Del estudio se concluye que, para los dos ejemplos, el cálculo de las áreas tributarias se convierte en una tarea compleja y requiere de un proceso que consume tiempo y recursos.

La forma tradicional de abordar el problema es imaginar líneas en las barreras de las áreas tributarias (estas líneas se designan a media distancia entre cada dos

tomas adyacentes) y las áreas para cada toma se calculan por separado. Para las tomas dispersas, el cálculo de las áreas tributarias se convierte en una tarea compleja y requiere mucho tiempo.

La forma tradicional ha sido empleada por varios investigadores en estudios de paneles fotovoltaicos (Abiola-Ogedengbe, 2013, Abiola-Ogedengbe et al., 2015, Aly and Bitsuamlak, 2013a, Aly and Bitsuamlak, 2013b, Miller and Zimmerman, 1981, Stathopoulos et al., 2014). Es importante mencionar que el enfoque propuesto Aly (2013) es básicamente ventajoso cuando hay tomas de presión con distribución dispersa.

Por la distribución de tomas simétricas de este trabajo se decidió emplear la forma tradicional. La figura 2.16 muestra las áreas tributarias seleccionadas para el modelo de panel fotovoltaico y la figura 2.17 las de los paneles del parque.

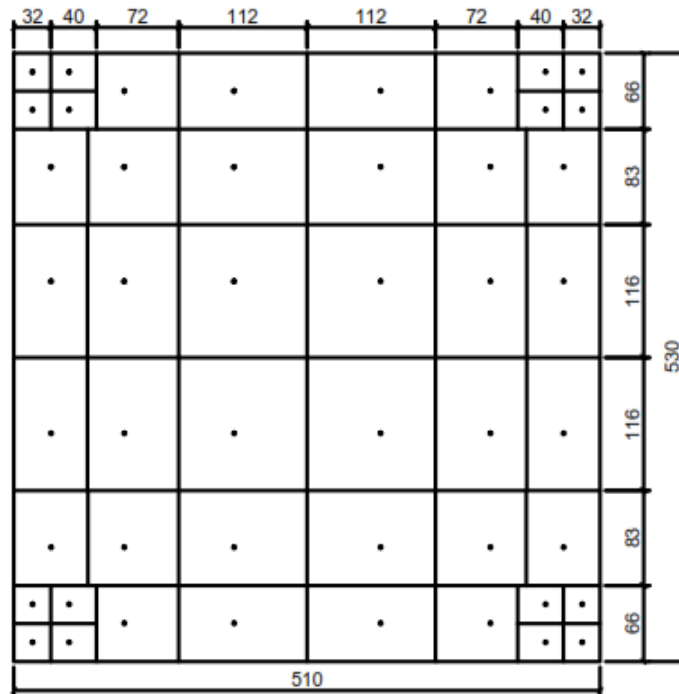


Figura 2.16 Áreas tributarias sobre el panel. Las líneas dividen las áreas tributarias alrededor de las tomas de presión representadas como círculos (dimensiones en mm).

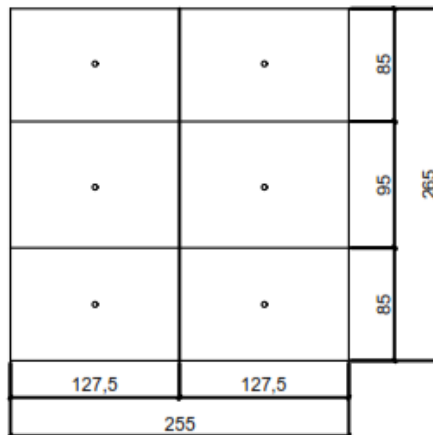


Figura 2.17 Áreas tributarias sobre los paneles del parque. Las líneas dividen las áreas tributarias alrededor de las tomas de presión representadas como círculos (dimensiones en mm).

Con el objetivo de verificar si los coeficientes de presión y forma resultantes se encontraban en concordancia con el fenómeno físico de interacción fluido-estructura, se realizó un ensayo de visualización (figura 2.18). Este ensayo permite visualizar el flujo turbulento y en especial las estructuras vorticosas que se generan al incidir el viento en el panel y verificar que las zonas de succión o presión que se registran en el campo de presiones sobre el panel se deban a esta turbulencia.

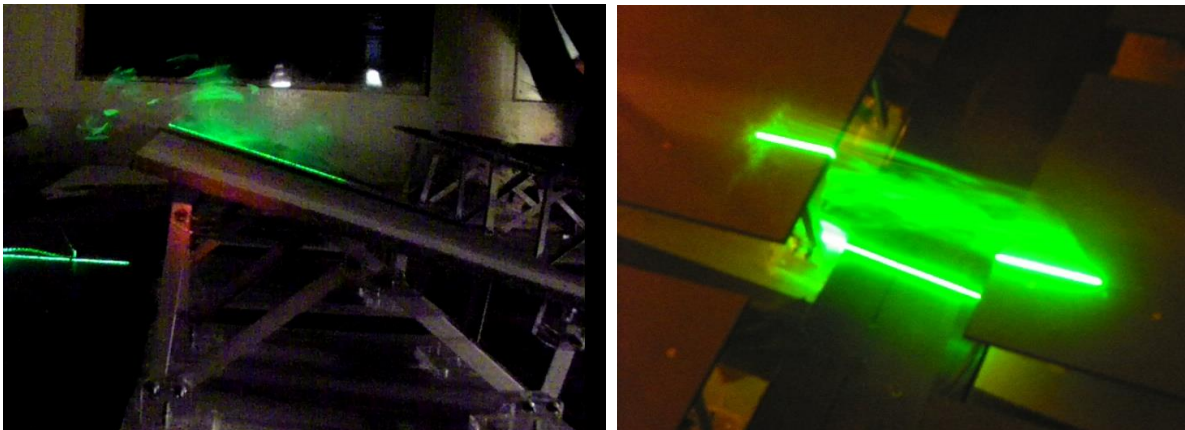


Figura 2.18 Interacción fluid-estructura. Ensayo de visualización.

El ensayo de visualización se realizó a partir de la inyección de vapor de propilenglicol corriente arriba del modelo que se ubica en el túnel (López et al., 2015). Este vapor, que resulta neutro en el aire, actúa como trazador del flujo en el entorno del objeto y mediante un plano de luz generado por un láser, se pudo apreciar visualmente el comportamiento. Otra técnica que se utilizó fue colocar una presión constante sobre las tomas de presión con un manómetro de aceite (ver figura 2.19) y medir con el transductor de presiones (SCANIVALVE ZOC33/64 Px) para verificar que no hubiese ocurrido alguna obstrucción o estrechamiento de las tomas en el modelo.

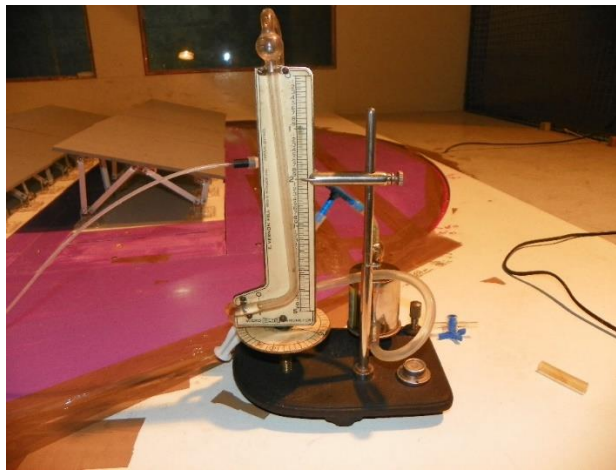


Figura 2.19 Comprobación de las tomas de presión.

Con la técnica de colocar presión en las tomas se pudo comprobar que existía continuidad y plena correspondencia con las mediciones en todas las tomas tanto del panel aislado como para los cuatro paneles instrumentados del parque.

El ensayo de visualización por su parte, permitió verificar que existió una correcta medición del fenómeno físico a través de las mediciones de presiones, ya que se pudo observar al graficar los coeficientes de presiones en la parte superior del panel

para la dirección de 180° , que aparecieron presiones positivas generadas por un vórtice que se puede ver en la figura 2.18. Estos comportamientos se detallan en el próximo capítulo.

2.4. CONCLUSIONES PARCIALES

1. Los paneles típicos construidos en Cuba hasta 2015 fueron de 4x5 módulos, con una variación de la distancia entre filas entre 1,67 m y 5 m y una separación entre columnas entre 0 y 1 m. Estas características fueron utilizadas para conformar el diseño de experimentos factorial que permite estudiar la influencia de esas variables en los valores de los coeficientes de presión.
2. La escala geométrica mínima obtenida para realizar los modelos a escala en el túnel fue de 1/67. Esta escala fue modificada en función de las referencias internacionales para cumplir con que no se produjeran interferencias en el flujo por la instrumentación, con lo cual fue establecida una escala 1/10 para el panel solo y una escala 1/20 para el parque, cumpliendo con las leyes de semejanza, para lo cual fue necesario lograr la independencia del número de Reynolds. Los números de Reynolds que garantizan la independencia de los valores del coeficiente de presión fueron obtenidos a partir de la consulta bibliográfica para estudios similares. En ambos casos (panel y parque) se logró que la relación de bloqueo de los modelos en el túnel fuera menor de 5%.
3. El proceso para simular en un túnel de viento la capa límite atmosférica de un emplazamiento determinado, parte de establecer de forma adecuada las

características de rugosidad del terreno, así como las particularidades climáticas que rigen el comportamiento de los perfiles verticales de velocidad media y de las fluctuaciones caracterizadas por la intensidad y el espectro de turbulencia.

4. En el caso de los regímenes de vientos dominados por fenómenos atmosféricos como los huracanes, el perfil logarítmico y el espectro de von Kármán son las representaciones más adecuadas para simular la variación de la velocidad media con la altura y la energía de la turbulencia.
5. En cuanto a las intensidades de turbulencia no se encontraron trabajos que registren valores a las alturas sobre el terreno a las que se encuentran colocados los paneles fotovoltaicos que se construyen en Cuba. La menor altura para la que se encontró mediciones fue 5 m y existe una dispersión considerable en los valores en las referencias internacionales.
6. La simulación realizada en el túnel de viento logró reproducir adecuadamente las características planteadas para el viento en los emplazamientos de los parques fotovoltaicos en Cuba, demostrándose por el ajuste que presentaron el espectro y el perfil vertical simulados, con los patrones. La intensidad de turbulencia que se registró para 5 m de altura, presentó una adecuada relación con los estudios de Ishizaki (1983).

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA EN EL TÚNEL DEVIENTO

**CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN
FÍSICA EN EL TÚNEL DE VIENTO**

En este capítulo se resumen los resultados del estudio en el túnel de viento del panel aislado escala 1/10 y del parque de paneles escala 1/20, en términos de los coeficientes de presión y de forma sobre las superficies de los paneles. Se realiza una comparación entre los patrones de presiones para el panel a 15° y 23° con los diferentes ángulos de ataque del viento definidos en el Capítulo II y se obtienen los coeficientes de forma para cada caso. Se presenta los resultados del cálculo de las reacciones de apoyo a partir de la comparación entre diferentes coeficientes de forma obtenidos mediante el ensayo en túnel de viento y otras formas de colocación propuestas en estudios y normas internaciones. Por último, se presenta el estudio del comportamiento de las presiones en el parque para las diferentes variables estudiadas, con el propósito de cuantificar las reducciones de las presiones en los paneles que se encuentran protegidos por otras filas y se muestran los resultados para determinar las variables significativas en los cambios de presión en el diseño de experimento factorial general 2x2x3x3x3.

**3.1 RESULTADOS DE LAS DISTRIBUCIONES DE PRESIONES PARA 15° Y 23°
DE INCLINACIÓN DEL PANEL**

A partir del procedimiento descrito en el Capítulo II se obtuvieron los coeficientes de presión pico en 3 s ($C_{p_{picos\ 3s}}$) para los 56 puntos donde se determinaron los coeficientes de presiones netas sobre el panel. Estos valores se determinaron para las dos inclinaciones de panel y las cinco direcciones de viento estudiadas.

Los gráficos en la figura 3.1 muestran las distribuciones de los $C_{p_{picos\ 3s}}$ para las dos inclinaciones del panel 15° y 23° en las direcciones de viento que presentaron resultados de presión sobre la superficie del panel.

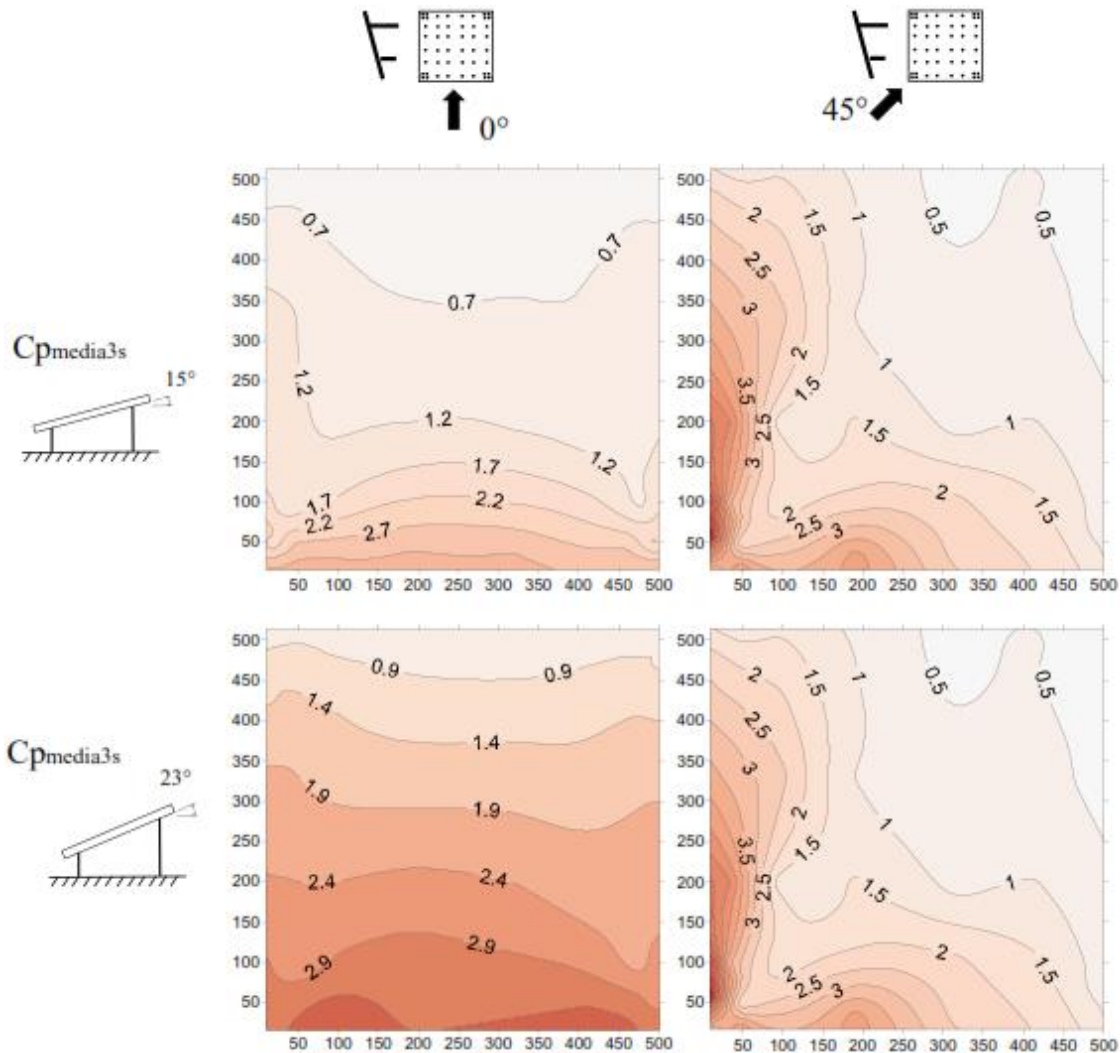


Figura 3.1 Distribución de presiones netas picos en 3 s para la inclinación de 15° y 23° , para las direcciones de 0° y 45° que corresponde al panel trabajando a compresión.

En la figura 3.1 se evidencia que las distribuciones de presión son similares para ambas inclinaciones del panel, para las direcciones de ataque del viento 0° y 45° , condiciones para las cuales el panel se encuentra totalmente sometido a acciones de presión, observándose los valores más altos en la zona baja del panel para la

inclinación de 23°. Estos resultados están en total correspondencia con lo planteado en estudios desarrollados por Stathopoulos et al. (2014) y Abiola-Ogedengbe et al. (2015) que llegaron a la conclusión, que con el aumento de la inclinación del panel aumentan los valores de los coeficientes de presión. Para las direcciones en que el panel se encuentra en succión, 135° y 180°, como se aprecia en la figura 3.2, en este caso el panel se encuentra sometido a succión en toda su superficie, los mayores valores también aparecen para la inclinación de 23° pero en el borde superior del panel.

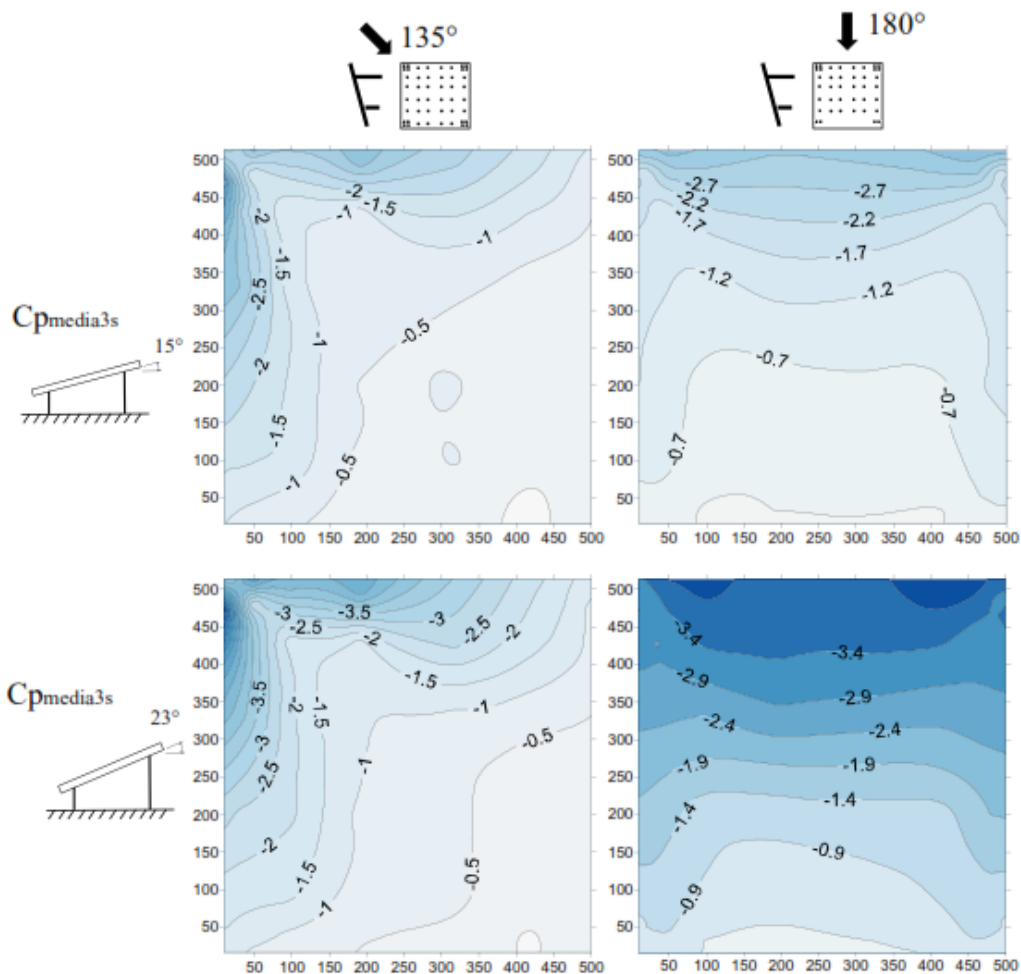


Figura 3.2 Distribución de presiones netas picos en 3 s para la inclinación de 15° y 23°, para las direcciones de 135° y 180° que corresponde al panel trabajando a succión.

Las figuras 3.1 y 3.2 muestran cierta simetría con respecto a la dirección de viento analizada (si se divide el panel con una línea imaginaria en la dirección del viento se puede observar que tanto los valores de un lado como del otro son similares), estos resultados son coincidentes con los estudios desarrollados por Abiola-Ogedengbe et al. (2015) y Shademan et al. (2014). El mayor valor local de $Cp_{picos\ 3s}$ se presenta en la dirección de 135° , tal como se describe en los resultados de Stathopoulos et al. (2013). Para esta dirección, se puede apreciar en la figura 3.2, que esos valores máximos están bien localizados en la esquina de ataque del viento, lo que no sucede así para la dirección de 180° donde, aunque los valores de $Cp_{picos\ 3s}$ son inferiores a los de 135° , el área que involucran, abarca casi la totalidad de la superficie del panel. Para las direcciones de 45° y 0° , aunque los valores son menores que los registrados en las direcciones de succión, hay un comportamiento similar.

En la dirección de 90° los valores son muy cercanos a cero, tal como se observa en la figura 3.3, comportamiento esperado ya que en este caso el panel experimenta la misma distribución de presiones en la cara superior y en la inferior. Los valores que aparecen en el borde de ataque del viento pueden atribuirse a las modificaciones del flujo local debido a las columnas y a las diagonales laterales que soportan el panel fotovoltaico por la cara inferior.

Los mayores valores obtenidos para los diferentes ángulos de ataque del viento se muestran en la tabla 3.1. Estos valores siempre se obtuvieron en el borde de ataque del viento sobre el panel, en la parte inferior para las direcciones de 0° y 45° y en el borde superior para las direcciones de 135° y 180° .

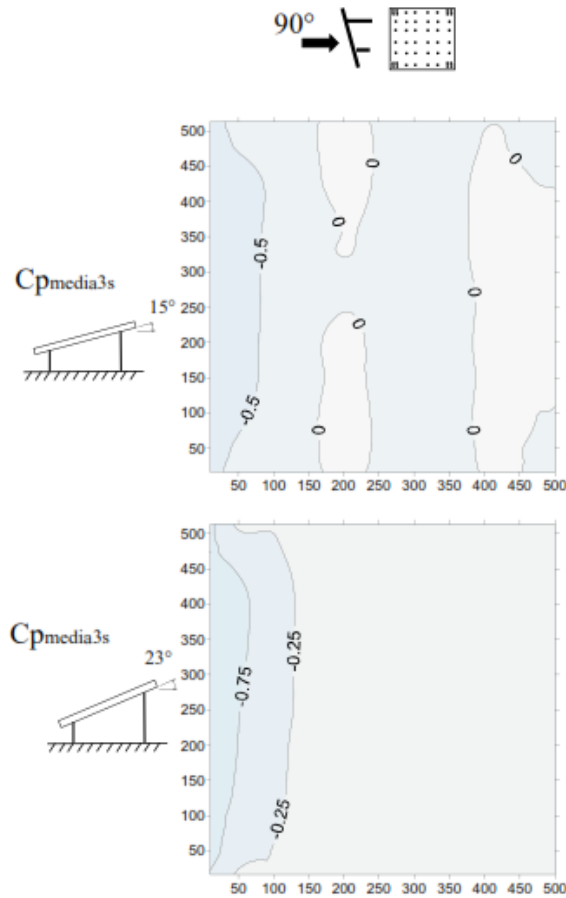


Figura 3.3 Distribución de presiones medias para la inclinación de 15° y 23° para la dirección 90°.

Tabla 3. 1 Valores máximos de presión pico en 3 s para las cinco direcciones de viento.

MAYORES VALORES DE COEFICIENTES DE PRESIÓN					
Inclinación	Direcciones de ataque del viento				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	3,47	3,87	0,13	-5,96	-4,15
23°	3,70	5,92	0,13	-8,76	-4,20

Para las direcciones de viento 0° y 180° los incrementos en la presión al variar el ángulo de inclinación de 15° a 23° son de 6,3% y 1,1% respectivamente; mientras

que para las direcciones de 45° y 135° dichos incrementos se encuentran entre un 34,6% y un 31,9%. Estos aumentos se deben a que se produce un bloqueo mayor del flujo al aumentar la inclinación del panel lo que representa un aumento del área frontal expuesta al flujo. Para la dirección de ataque de viento de 0° el flujo se aproxima sobre la superficie superior del panel y se produce una separación de capa límite en la parte inferior, región que se encuentra acotada por el suelo. Para la dirección de 180° se produce una incidencia frontal del flujo sobre la parte inferior del panel y se produce una separación de capa límite en la parte superior, región que en este caso no se encuentra acotada, por lo que para esta segunda incidencia (separación de capa límite) se tienen mayores valores de coeficiente de presión.

3.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE FORMA PARA LAS DIRECCIONES DE VIENTO

A partir del procesamiento del comportamiento de las presiones que se establecen sobre el panel, se determinaron las zonas que presentaron valores de presiones cercanos y así se determinaron las áreas tributarias para obtener los coeficientes de forma en todas las direcciones de viento analizadas en cada una de las inclinaciones del panel estudiadas. Se trató que las divisiones en áreas propuestas se asemejaran, en lo posible, a las distribuciones de presiones observadas sobre los paneles para cada dirección. En el caso de la dirección de ataque de 90° no se determinaron los coeficientes de forma ya que la distribución de presiones en su generalidad fue 0.

En la figura 3.4 se muestran los coeficientes de forma pico en 3 s para cada zona del panel, para las direcciones de viento 0° , 45° , 135° y 180° . Estos valores se

calcularon a partir de las áreas tributarias a las tomas de presión como se expresó en el Capítulo II, teniendo en cuenta la distribución de presión pico en 3 s.

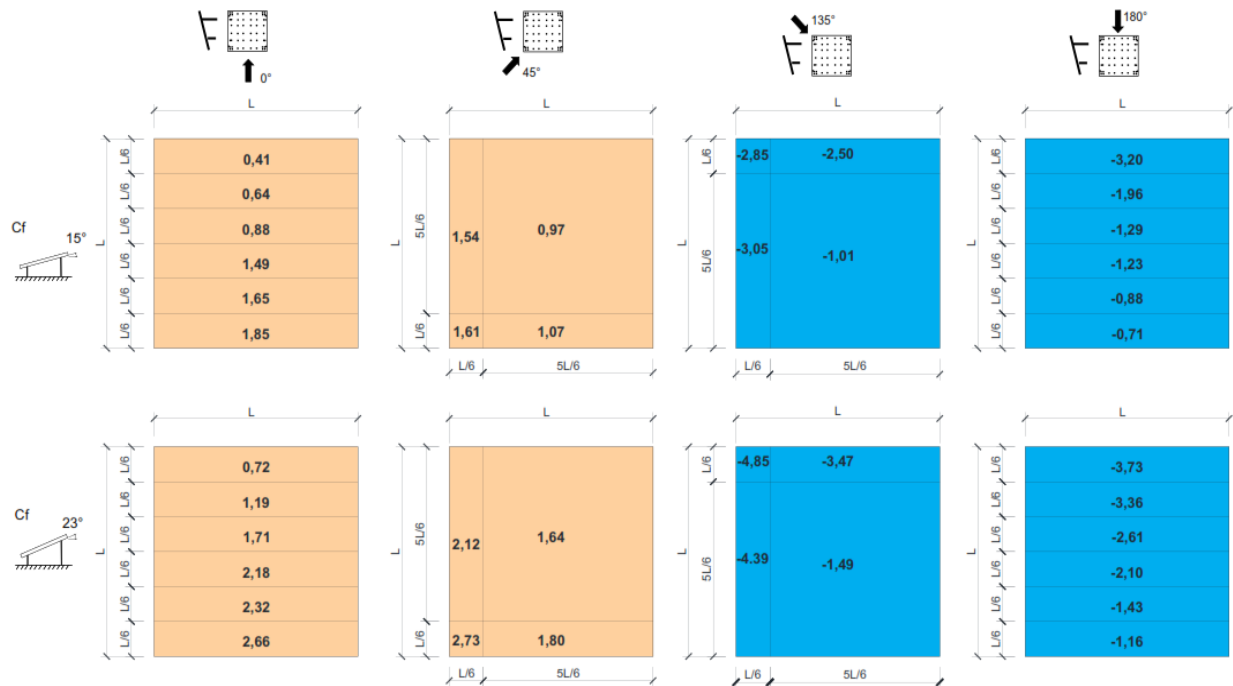


Figura 3.4 Coeficientes de forma locales para las direcciones de viento 0°, 45°, 135° y 180°.

Como se puede apreciar en la figura 3.4, el máximo valor de $Cp_{picos\ 3s}$ positivo (hacia abajo, presión) es 1,85 para la inclinación de 15° y 2,66 para la de 23° en la dirección de ataque de 0°; mientras que para la dirección de 45° el mayor valor es 1,61 para 15° y 2,73 para 23°. En el caso de los valores de $Cp_{picos\ 3s}$ negativos (hacia arriba, succión) fueron de -2,85 y -4,85 para las inclinaciones de 15° y 23° respectivamente, correspondiendo en este caso con la dirección de ataque del viento de 135°.

3.1.2 MODELACIÓN CON CARGA DE VIENTO GENERADA CON LOS COEFICIENTES DE FORMA ESTUDIADOS

Para determinar las presiones de viento a considerar en los cálculos de las reacciones de apoyo, se empleó la ecuación 3.1 que refiere la norma cubana NC-285 (2003).

$$q = q_{10} * C_t * C_s * C_H * C_r * C_{ra} * C_f [kN/m^2] \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde q_{10} es la presión básica de viento para la región occidental de Cuba ($1,3 \text{ kN/m}^2$), C_t es el coeficiente de recurrencia (0,9) por estar determinada la vida útil de los parques en 25 años, C_s coeficiente de topografía o sitio (1), C_H coeficiente de altura (0,8) mientras que para los coeficientes de ráfaga (C_r), de reducción de área (C_{ra}) y de forma (C_f) se tomaron los valores calculados a partir de los resultados obtenidos en el ensayo desarrollado en el túnel de viento pues, como quedó explicado en el Capítulo I, estos tres coeficientes, en el caso de los paneles solares, son un único valor para cada punto analizado que tiene intrínsecas las características turbulentas del flujo que fueron impuestas para el ensayo.

Las diferentes configuraciones de los coeficientes de forma sobre el panel se muestran en la figura 3.5. La primera (Caso (a)) es la que se propone a partir de la distribución de presiones observada en el ensayo en el túnel desarrollado en esta investigación, la segunda (Caso (b)) es la configuración utilizada en las normas ASCE7-10 (2010) y AS/NZS1170.2 (2011) que fueron seleccionadas porque de las estudiadas pudieron ser aplicadas a la estructura analizada, donde se divide la superficie en dos partes iguales y se determina un coeficiente para la parte superior y otro para la inferior en dependencia de la dirección de ataque del viento y la tercera

(Caso (c)) es la recomendada por los estudios de Ginger et al. (2011) y Stathopoulos et al. (2014) donde establecen que se debe emplear un valor único de presión sobre la superficie.

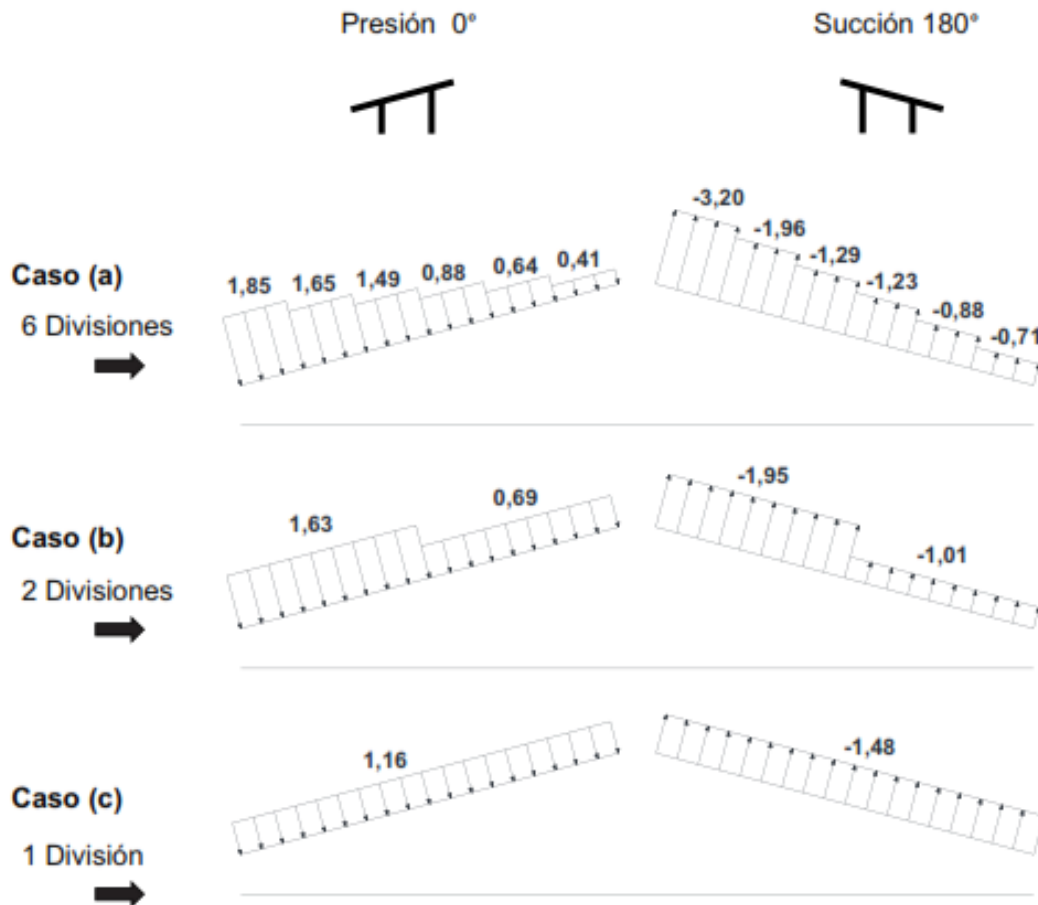


Figura 3.5 Colocación de la carga de viento en el panel según los coeficientes de forma propuestos por los estudios internacionales y los estudios realizados en túnel de viento para las direcciones de 0° y 180°.

Se realizó la modelación de la estructura bajo condiciones de carga de peso propio y carga de viento en el software basado en el método de los elementos finitos, SAP2000v19.0.0 (2016), con el fin de obtener las reacciones de apoyo (figura 3.6) a partir de cambiar la distribución de los coeficientes de forma como se muestran en la figura 3.5.

Los números 1, 2, 3 y 4 hacen referencia a las reacciones de apoyo en cada columna. La unión entre los elementos vigas secundarias y la viga principal, se consideró articulada al igual que entre las vigas principales y las columnas y entre las diagonales y las columnas, debido a que en todos los casos estas se realiza mediante un solo perno.

Las características geométricas de los elementos que conforman la estructura son calculadas automáticamente por el programa al haber declarado previamente las secciones de dichos elementos.

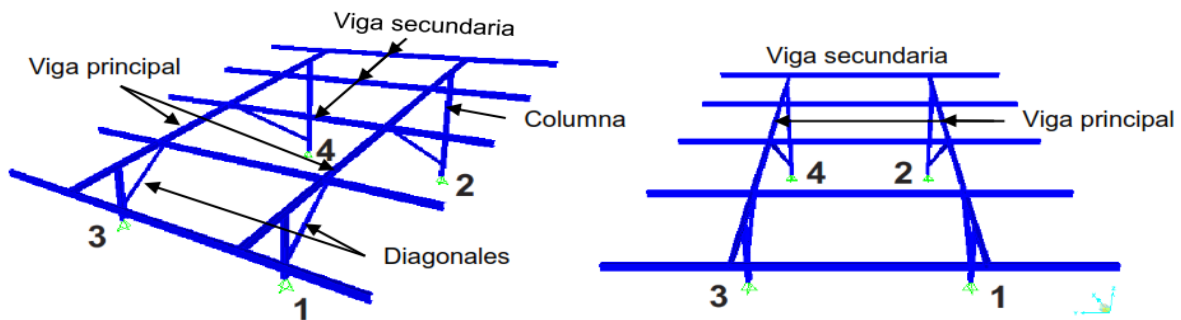


Figura 3.6 Estructura de soporte modelada en SAP2000v19.0.0 (2016).

En la figura 3.7 se muestra como queda colocada la superficie de los módulos fotovoltaicos sobre la estructura soporte.

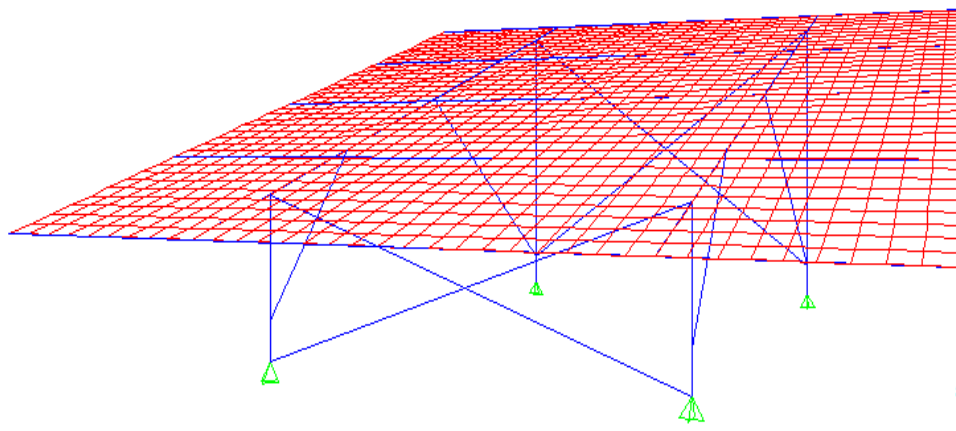


Figura 3.7 Módulos fotovoltaicos modelados en SAP2000v19.0.0 (2016).

En las figuras 3.8 y 3.9 se muestran las reacciones de apoyo en las cuatro columnas del panel, escogidas como variables comparativas, para evaluar cómo repercuten los cambios en la forma de colocación de la carga de viento, regida por las distribuciones de los coeficientes de forma, que fueron planteadas en la figura 3.5. En estas dos figuras se grafican los resultados para las direcciones de viento que producen presiones simétricas sobre la superficie del panel, o sea, 0° (presión) y 180° (succión). En las figuras se representa el caso de análisis y entre paréntesis las divisiones en las que se colocó la carga y la dirección que se está analizando.

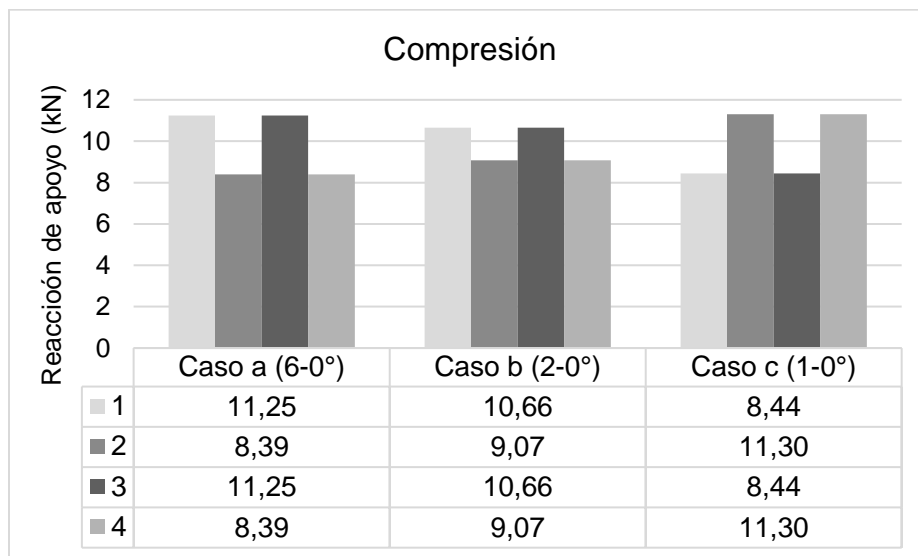


Figura 3.8 Gráfico comparativo de las reacciones de apoyo en compresión, para los diferentes coeficientes de forma para la dirección de 0°.

Se observa de la figura que existen diferencias cualitativas en las reacciones de apoyo cuando se modifica la forma de colocación de la carga. Esas diferencias consisten principalmente en cambios en la columna más cargada, por ejemplo, para los casos (a) y (b) las columnas delanteras del panel son las que reciben las mayores sollicitaciones mientras que en el Caso (c) son las traseras las más cargadas. El Caso (a) es el que produce los mayores valores de compresión en las

columnas delanteras siendo superiores estos valores en un 5% respecto al Caso (b) y en un 25% respecto al (c). Para las columnas traseras es el Caso (c) el que proporciona las mayores reacciones siendo superiores en un 25% respecto al Caso (a) y en un 20% con relación al (b).

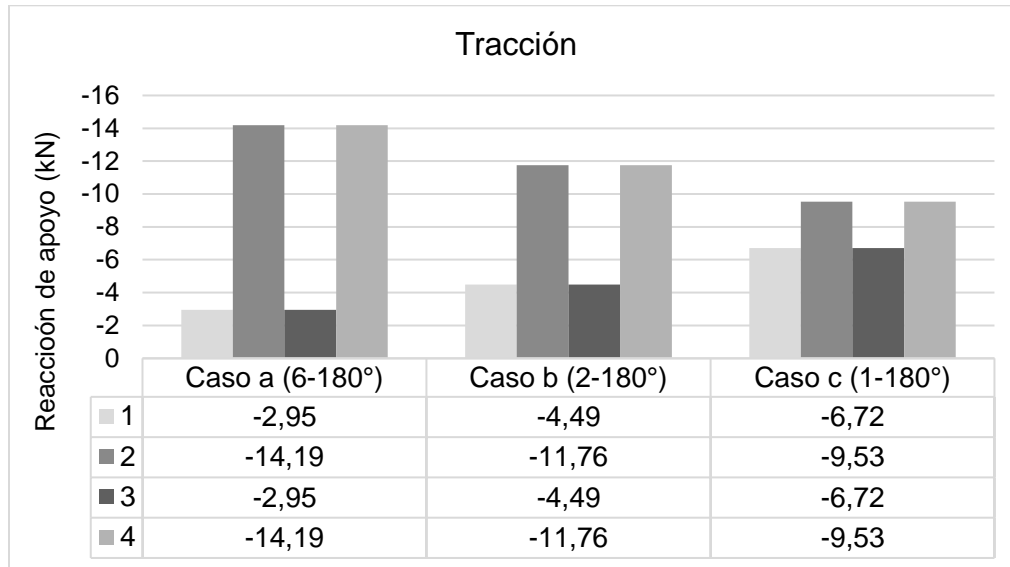


Figura 3.9 Gráfico comparativo de las reacciones de apoyo en tracción, para los diferentes coeficientes de forma para la dirección de 180°.

En el caso de los valores obtenidos para la dirección de 180° los tres casos de estudio mostraron un comportamiento similar en cuanto a la posición de las columnas más cargadas, en este caso, las traseras, a diferencia de lo que ocurre para la dirección de 0°. El Caso (a) es el que proporciona los mayores valores de tracción en las columnas traseras y los menores en las delanteras de los tres analizados. Las diferencias de las tracciones en las columnas traseras del Caso (a) con relación al Caso (b) son de 17% y al (c) de 33%. Las mayores reacciones de apoyo en las columnas delanteras ocurren en el Caso (c) y son superiores al (a) en un 56% y al (b) en un 33%.

Se presentan también los coeficientes obtenidos para las direcciones de 45° y 135° ya que fueron los que presentaron los mayores valores locales en presión y succión. Para la comparación se estableció un Caso (d) y un Caso (e) como se puede apreciar en la figura 3.10, donde el Caso (d) es el propuesto por este trabajo para las direcciones de 45° y 135° y el Caso (e) es tomando un valor unitario para toda la superficie de acuerdo con los planteamientos de Ginger et al. (2011) y Stathopoulos et al. (2014). No se compara respecto a las normas en esta ocasión, ya que en las mismas no aparecen reflejadas estas direcciones de ataque del viento.

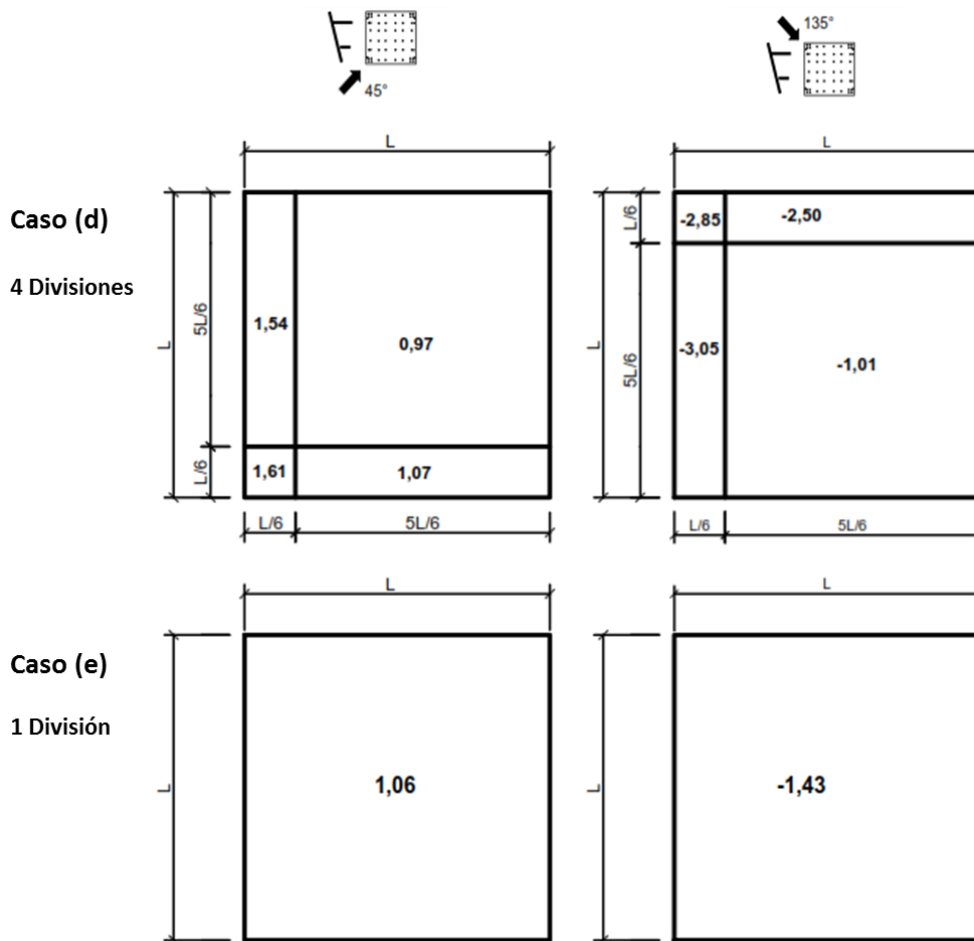


Figura 3.10 Colocación de la carga de viento en el panel según los coeficientes de forma propuestos por los estudios internacionales y los estudios realizados en túnel de viento para las direcciones de 45° y 135° .

Los valores de reacciones de apoyo obtenidos se muestran en la figura 3.11 para la dirección de 45° y en la figura 3.12 para 135°.

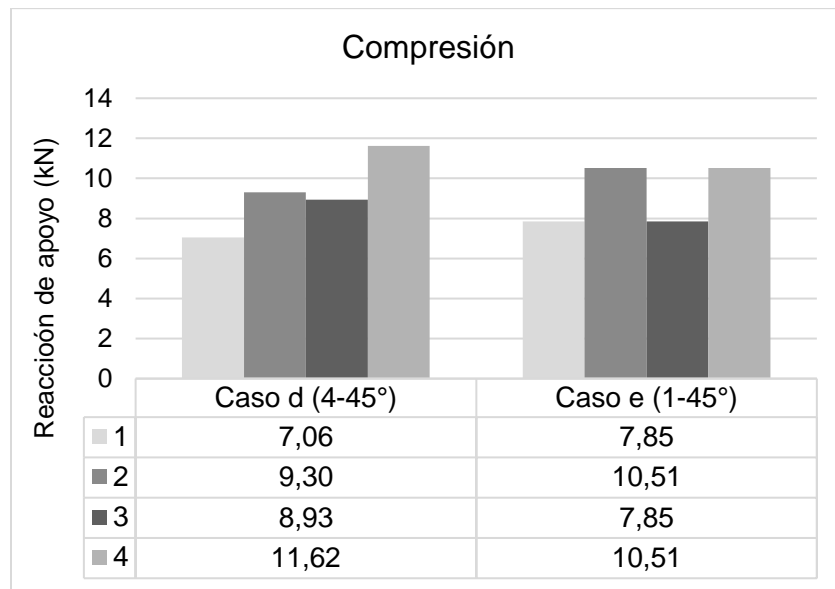


Figura 3.11 Gráfico comparativo de las reacciones de apoyo en compresión, para los diferentes coeficientes de forma para la dirección 45°.

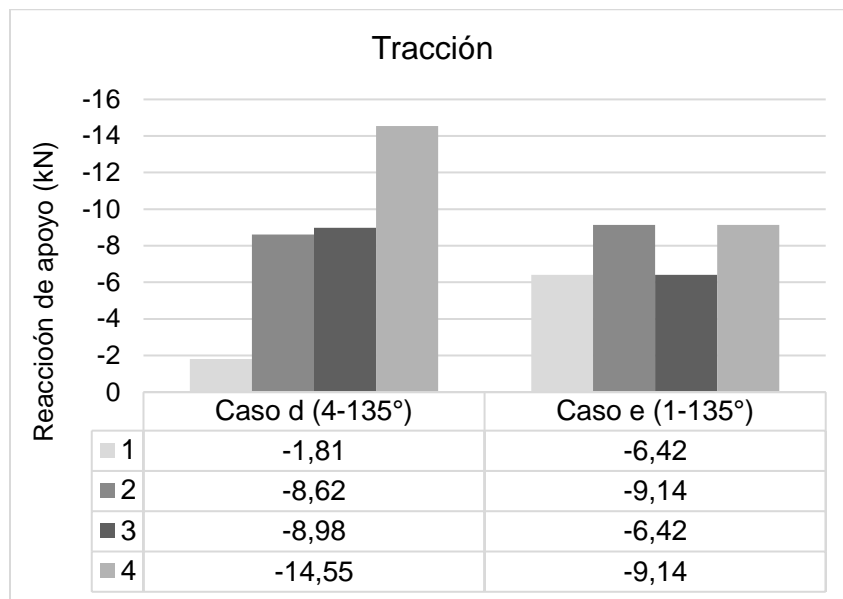


Figura 3.12 Gráfico comparativo de las reacciones de apoyo en tracción, para los diferentes coeficientes de forma para la dirección 135°.

Al igual que con las direcciones anteriores, se observa una divergencia de los valores de las reacciones de apoyo entre las columnas delanteras y traseras al

cambiar la forma de colocación de la carga, especialmente para la tracción. Los mayores valores de presión y succión en una columna, se experimentan con la división propuesta en esta investigación, y difieren en el caso de la presión en 10% y en el caso de la succión en 37% con relación al Caso (e). Puede apreciarse que el comportamiento más lógico de acuerdo con la forma de ataque del viento lo ofrece la división del Caso (d), ya que los mayores valores de tracción se registraron en la zona donde se encuentra la columna 4, en concordancia con las zonas donde se apreciaron los máximos en los gráficos de presiones (ver figura 3.2). En el Caso (d), a diferencia de todos los demás casos, no son simétricas las reacciones de apoyo respecto a las columnas.

De forma general, la distribución de los coeficientes de forma que se proponen en este trabajo, que surgen de los gráficos de las presiones sobre el panel, permiten hacer una descripción más ajustada de las reacciones que se establecen sobre los apoyos. Se evidencia que existen diferencias marcadas entre las reacciones de las columnas delanteras y traseras, lo que puede aprovecharse para diseñar soluciones de cimentaciones diferenciadas por panel, pudiendo repercutir, para el caso de un parque, en menores consumos de material y soluciones más racionales de forma general.

La tabla 3.2 muestra los valores máximos globales de tracción y compresión obtenidos con los coeficientes de forma propuestos por esta investigación para cada columna del panel y se identifica cuál fue la dirección de viento que los ocasionó. Puede evidenciarse que, independientemente de que las direcciones de ataque del viento de 0° y 180° son las que presentan los mayores valores de coeficientes de

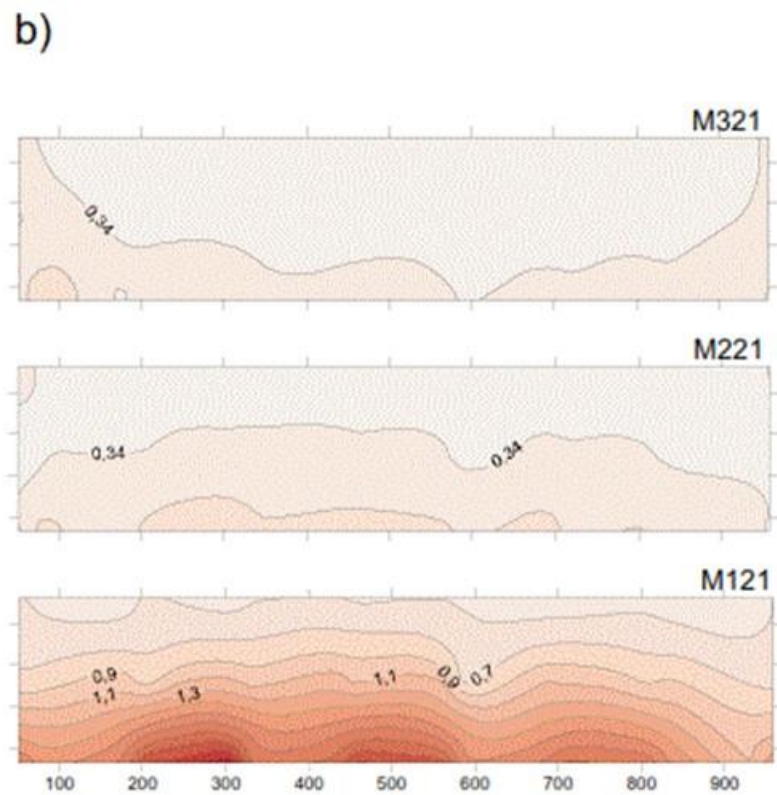
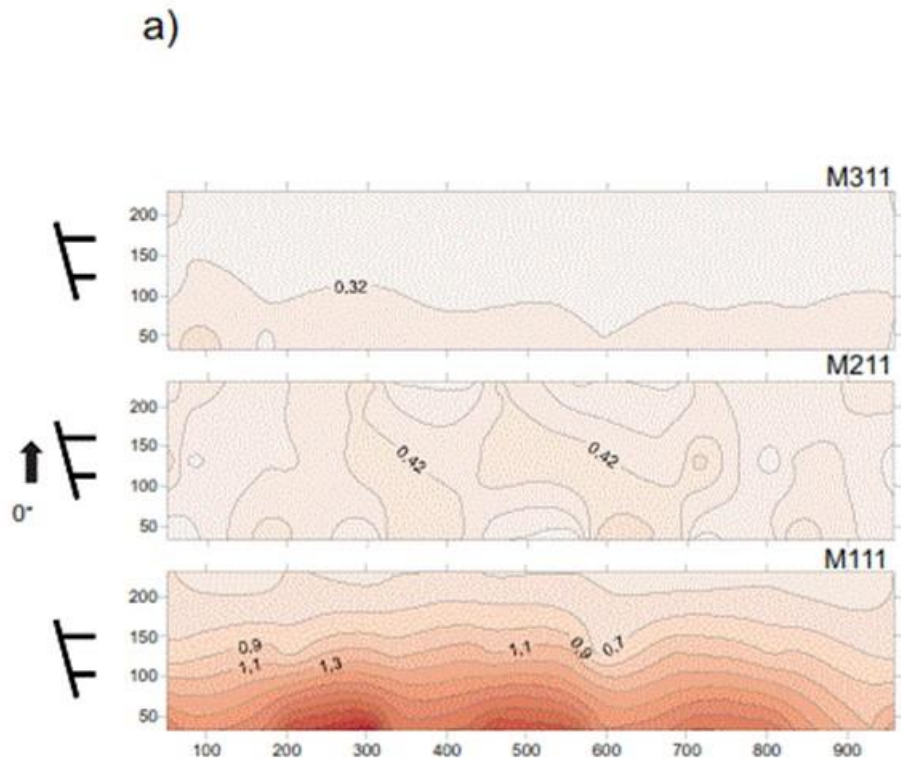
presión y forma, son las direcciones de 45° y 135° las que resultan más desfavorables para el análisis de las cimentaciones.

Tabla 3. 2 Valores máximos de reacciones de apoyo en función de la dirección de viento.

	Reacciones de apoyo (kN)			
Columnas	1	2	3	4
Compresión	11,25 (0°)	9,30 (45°)	11,25 (0°)	11,62 (45°)
Tracción	2,95 (180°)	14,19 (180°)	8,98 (135°)	14,55 (135°)

3.2 RESULTADOS DE LA SEPARACIÓN ENTRE LAS FILAS Y LAS COLUMNAS DEL PARQUE

Para el análisis de los paneles que conforman el parque estudiado, se realizaron los gráficos de las presiones con el objetivo de evaluar sobre las estructuras las modificaciones que se experimentan en el flujo por la presencia de otros paneles. En la figura 3.13 se observa el primer caso de estudio donde se analizaron las tres separaciones entre filas propuestas: 1 m (3.13a), 2 m (3.13b) y 3 m (3.13c) para la dirección de ataque del viento de 0°, contemplando que no existe separación entre las columnas del parque, es decir, los cuatro paneles de la fila están unidos. Se realizó una numeración para cada experimento que quedó de la siguiente manera: en la nomenclatura (M111), *M* 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. De igual manera se realizaron para las otras dos separaciones entre columnas (figura 3.14 y 3.15) y para la dirección del viento de 180°.



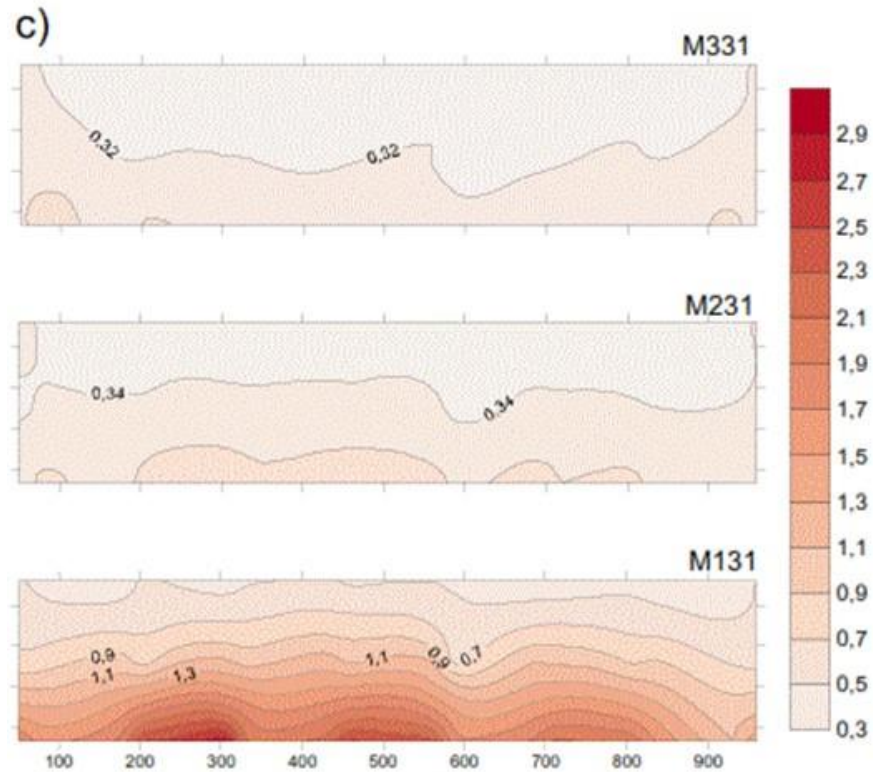


Figura 3.13 Distribución de presiones para la dirección de 0° sin separación entre columnas a) separación entre filas 1 m, b) separación 2 m y c) separación 3 m.

Se percibe que la primera fila de paneles presenta los mayores valores de presión y ofrece protección a la segunda y tercera filas para los tres casos de separación estudiados. Para el caso de la separación de 1 m (figura 3.13a) 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 3.13b y 3.13c, donde las filas dos y tres presentan un comportamiento similar al de la primera en cuanto al comportamiento 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 fila dos 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.

Para el caso de las variaciones en cuanto a la separación entre columnas, solamente se graficaron los resultados de las presiones para dos de los cuatro paneles por fila que existen en el parque, uno interior y otro exterior, debido a que el campo de presiones presenta un comportamiento simétrico.

En la figura 3.14 se puede observar el campo de presiones que se obtiene cuando se varía la separación entre filas, en los tres niveles establecidos dejando fija la separación entre columnas (1 m). Se puede apreciar que aparecen diferencias considerables entre las presiones de los paneles interiores y los exteriores para las tres filas.

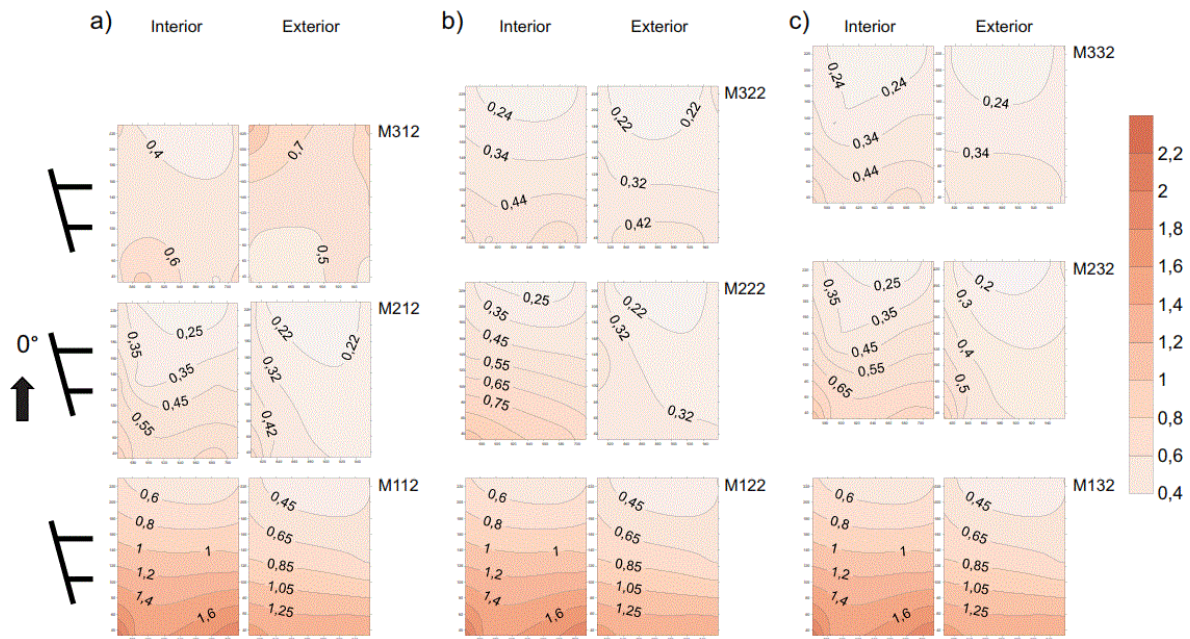


Figura 3.14 Distribución de presiones netas para la dirección de 0° con separación de 1 m entre columnas a) separación entre filas 1 m, b) separación 2 m y c) separación 3 m.

En el caso de la separación de 2 m entre columnas, como se puede apreciar en la figura 3.15, los valores de presión muestran un comportamiento similar a los que se experimentan cuando la separación entre columnas es de 1 m. Las mayores protecciones se aprecian para la separación entre filas de 1 m. Con las separaciones de 2 m y 3 m la protección sobre las filas dos y tres disminuye y apenas se evidencian diferencias en los coeficientes de presión entre ellas.

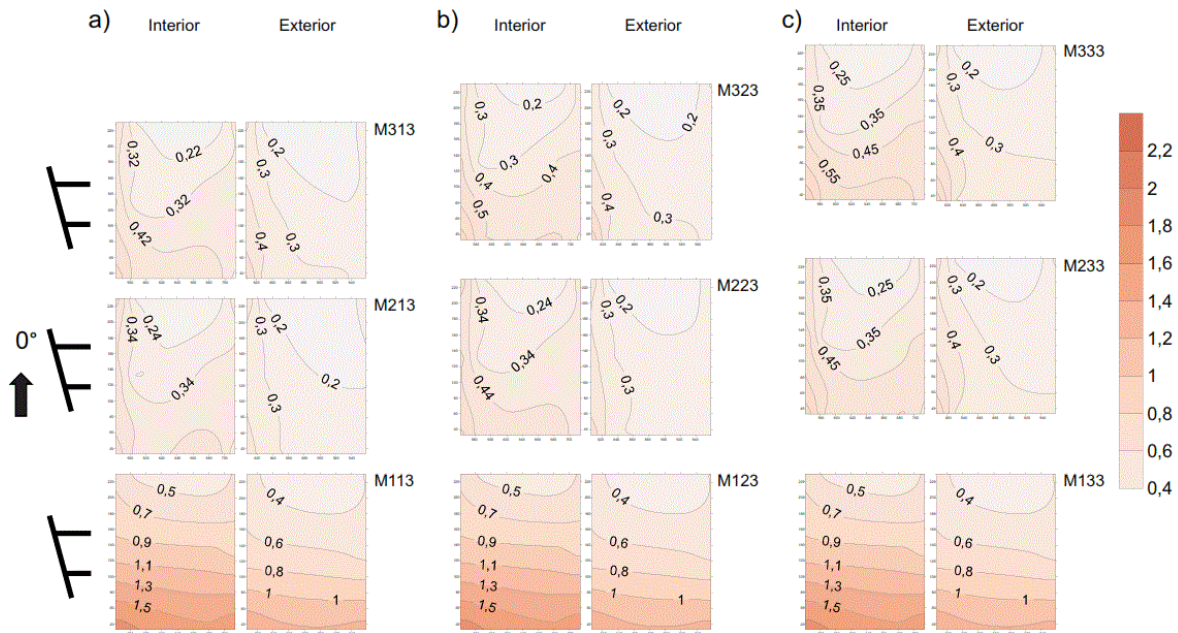


Figura 3.15 Distribución de presiones netas para la dirección de 0° con separación de 2 m entre columnas a) separación entre filas 1 m, b) separación 2 m y c) separación 3 m.

Para determinar cuánto se reduce la presión sobre los paneles que no se encuentran en la primera línea de ataque del viento, se determinó un único valor de coeficiente de presión, obtenido como el promedio de los resultados de todos los puntos instrumentados de la estructura, con el objetivo de establecer coeficientes de protección de la primera fila sobre la segunda y la tercera. La tabla 3.3 resume los valores de los coeficientes de protección, obtenidos a partir de la ecuación 3.2.

$$\text{Coeficiente de reducción por protección} = \left(\frac{\text{Fila protegida}}{\text{Fila expuesta}} \right) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Tabla 3. 3 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 0°.

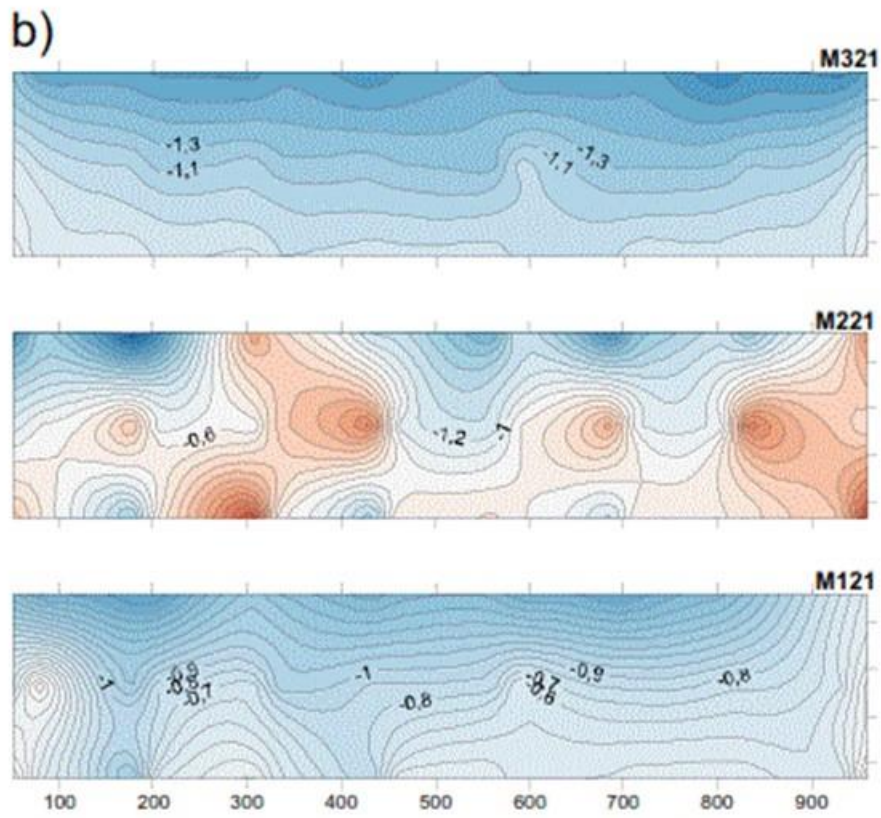
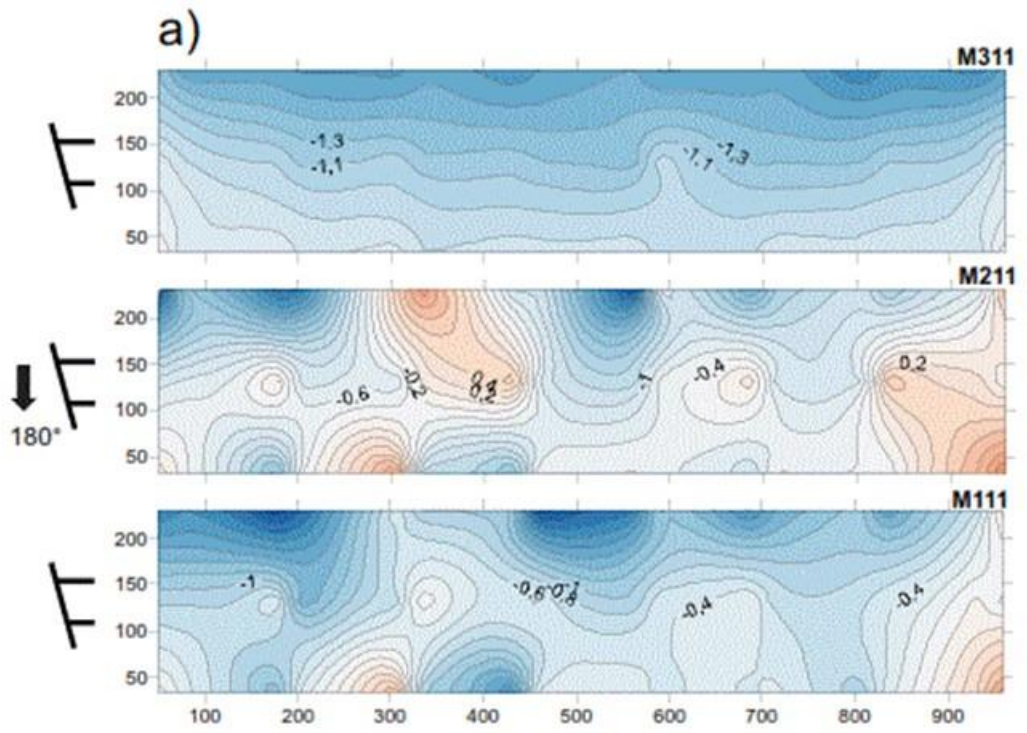
Coeficientes de reducción de la carga de viento para 0 m de separación entre columnas (0°)			
Fila	Separación entre filas		
	1 m	2 m	3 m
2	0,30	0,33	0,34
3	0,26	0,28	0,29

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

Con el análisis de la tabla 3.3 se puede determinar que, para la separación de 1 m, los valores de presión disminuyen 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 igual manera que para la dirección de 0° se procedió con la dirección de 180°. En la figura 3.16 se muestran las distribuciones de presiones para las tres separaciones estudiadas sin distancia entre las columnas de paneles.



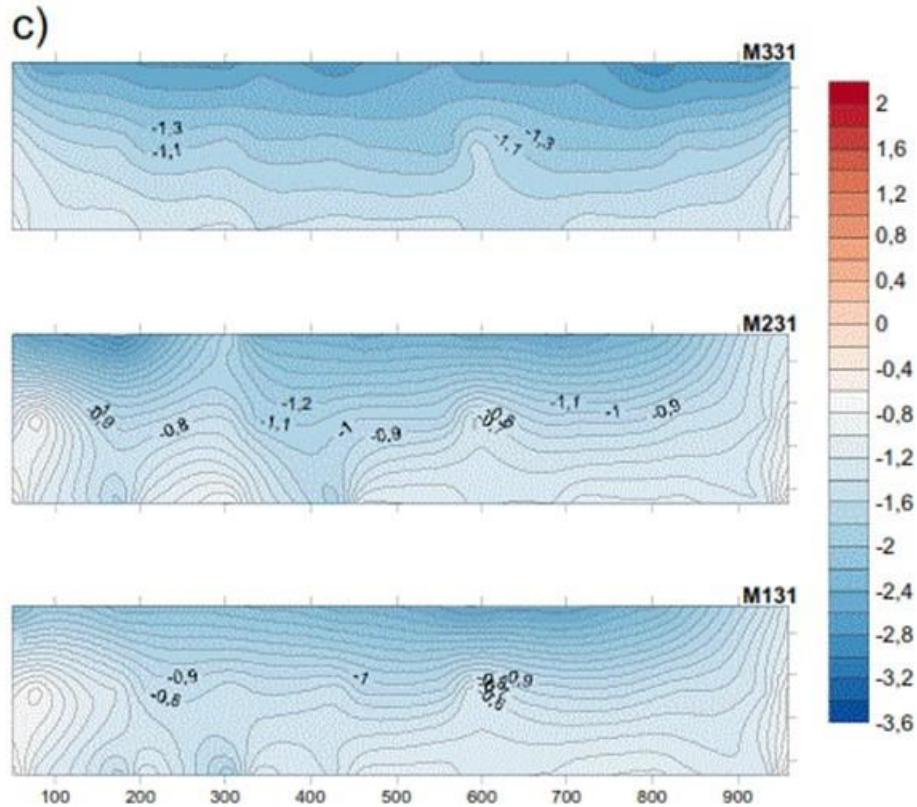


Figura 3.16 Distribución de presiones netas para la dirección de 180° sin separación entre columnas a) separación entre filas 1 m, b) separación 2 m y c) separación 3 m.

En la figura 3.16 se puede apreciar que la turbulencia que se genera al interactuar el viento con la primera fila de paneles cuando la separación es de 1 m se capta en la segunda y tercera filas, a diferencia de lo que ocurre con 0° , donde solo la segunda fila es afectada. Para 2 m de separación entre filas los paneles de la segunda línea recogen todavía la turbulencia que reciben de la primera; pero en los de la tercera se evidencia una normalización del flujo. Cuando la separación entre filas es de 3 m, en ninguno de los paneles se captan turbulencias asociadas a la interacción con las primeras estructuras.

Para el caso de la separación de 1 m entre columnas se puede observar que la distribución de presiones de los paneles de las filas dos y tres tienen un

comportamiento que refleja menos la turbulencia que cuando no existe separación entre columnas (figura 3.17).

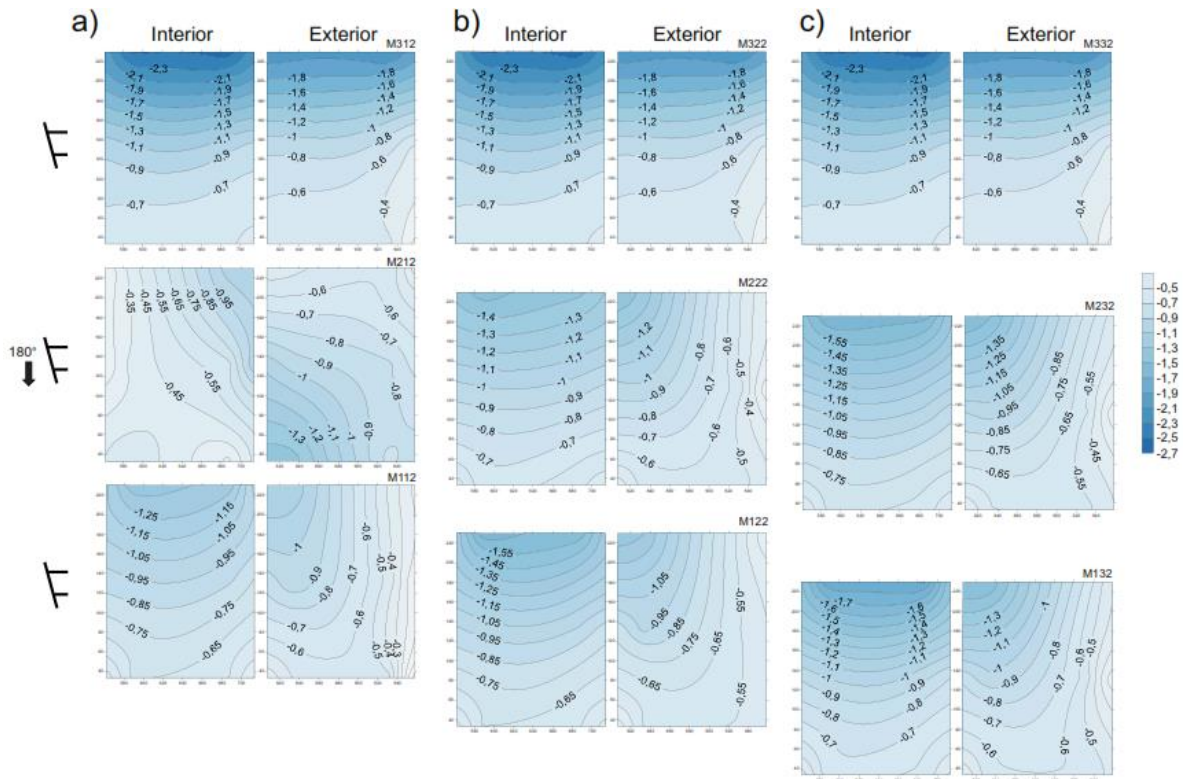


Figura 3.17 Distribución de presiones netas para la dirección de 180° con separación de 1 m entre columnas a) separación entre filas 1 m, b) separación 2 m y c) separación 3 m.

La separación de 2 m entre columnas (figura 3.18) muestra un comportamiento similar al descrito en la separación de 1 m solo que al ser mayor la distancia entre las columnas el flujo que circula entre los paneles se acelera menos y trae consigo una disminución de los valores de presión con respecto a los obtenidos para la separación de 1 m.

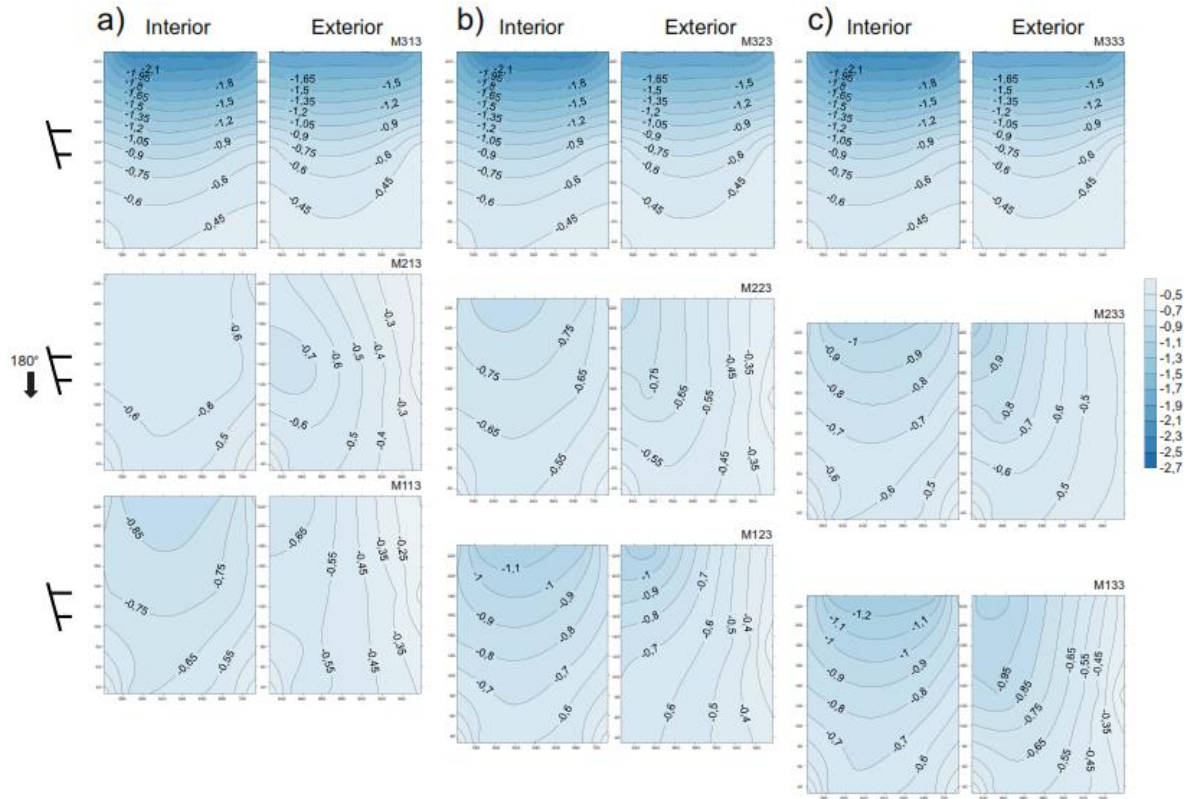


Figura 3.18 Distribución de presiones netas para la dirección de 180° con separación de 2 m entre columnas a) separación entre filas 1 m, b) separación 2 m y c) separación 3 m.

En cuanto a la separación entre filas, se detecta de las figuras 3.17 y 3.18, que las mayores protecciones que genera la primera fila del parque sobre las restantes estudiadas, se reportan para la separación de 1 m entre filas y van disminuyendo según aumenta la distancia entre ellas.

Al igual que para la dirección de 0°, se determinaron los porcentajes de disminución de la carga para la dirección de 180°. La tabla 3.4 resume los valores de los coeficientes de protección de la carga de viento para las filas dos y tres del parque.

Tabla 3. 4 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

3.2.1 RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

A partir del diseño de experimentos se pudieron determinar las relaciones entre las variables: 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 y posición del panel: primera fila, segunda fila y tercera fila.

En la tabla 3.5 que se muestra a continuación, se presentan las cinco variables estudiadas y la interacción entre ellas con el nivel de significación correspondiente. Se puede apreciar que tres de las cinco variables estudiadas presentan un valor mayor que el 95% de significación, como se puede ver en los números en rojo, lo que representa que hay suficiente evidencia estadística para poder decir que las dirección del viento, y la posición del panel ya sea en columnas o en filas influyen en las variaciones de los coeficientes de presión dentro del parque; aunque las más

significativas son la dirección de viento y la posición del panel dentro del parque en cuanto a las columnas.

En el caso de las interacciones entre las variables estudiadas, la que mayor valor arrojó fue la interacción entre las direcciones del viento con la posición de las filas, como se puede apreciar en el diagrama de Pareto estandarizado de la figura 3.19, donde se presenta el orden de significación de las variables y las interacciones dobles estudiadas. La variable que más se repite dentro de todas las combinaciones es la dirección del viento. De las dos direcciones de viento analizadas se obtuvo que la más desfavorable es la de 180°.

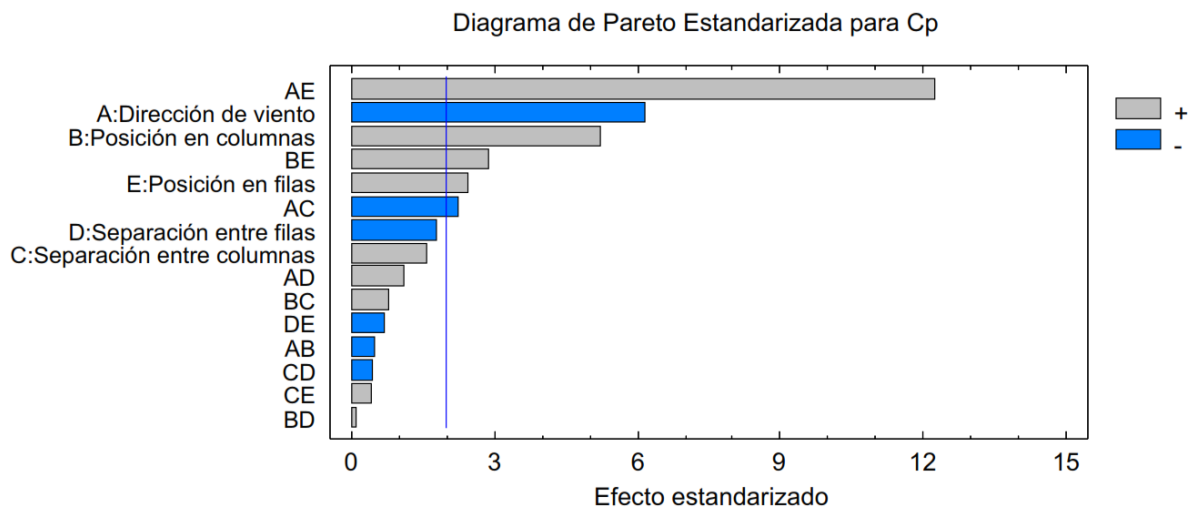


Figura 3.19 Diagrama de Pareto para el coeficiente de presión.

Tabla 3. 5 Nivel de significación de las variables y sus interacciones de ellas.

Análisis de Varianza para coeficientes de presión			
Fuente	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Dirección de viento (0° y 180°)	1,1493	37,46	0,0000
B: Posición en columnas (Interior o exterior)	0,8278	26,98	0,0000
C: Separación entre filas (1 m, 2 m y 3 m)	0,0742	2,42	0,1232
D: Separación entre columnas (0 m, 1 m y 2 m)	0,0939	3,06	0,0836
E: Posición en filas (1ra, 2da y 3ra)	0,1800	5,87	0,0174
AB	0,0062	0,2	0,6530
AC	0,1492	4,86	0,0299
AD	0,0349	1,14	0,2887
AE	4,5743	149,1	0,0000
BC	0,0181	0,59	0,4450
BD	0,0002	0,01	0,9358
BE	0,2478	8,08	0,0055
CD	0,0055	0,18	0,6723
CE	0,0045	0,15	0,7019
DE	0,0134	0,44	0,5103
Error total	0,0307		

3.3 CONCLUSIONES PARCIALES

Luego del análisis de los resultados se concluye:

1. El patrón de distribución de presión es similar para las dos inclinaciones de panel estudiadas 15° y 23°. Los mayores valores se obtienen para la inclinación de 23°, observándose las máximas diferencias para las direcciones de viento de 45° y 135° que se encuentran entre un 34,6% y un 31,9%.
2. Se corroboró, tal como se plantea en el trabajo Stathopoulos et al. (2014), que la dirección de viento de 135° es la que mayores valores locales de coeficiente de presión proporciona.

3. A partir de la distribución de presiones sobre el panel para las distintas direcciones de viento estudiadas, fueron establecidos coeficientes de forma regionales que fueron los que proporcionaron las mayores reacciones de apoyo sobre el panel.
4. Las mayores reacciones de apoyo en las columnas traseras en compresión fueron de 11,62 kN para la dirección de 45° y en tracción de 14,55 kN para la dirección de 135° . Para las columnas delanteras las mayores compresiones fueron de 11,25 kN para la dirección de 0° y las tracciones de 8,98 kN para la dirección de 135° .
5. La dirección de 0° fue la que mayores índices de protección ofreció a los paneles que se encontraron aguas abajo en las filas dos y tres del parque.
6. La separación entre filas que mayores valores de reducción de la carga de viento arrojó fue la de 1 m.
7. El diseño de experimentos factorial $2 \times 2 \times 3 \times 3 \times 3$ arrojó que tres de las cinco variables estudiadas (dirección de viento, posición en columnas y posición en filas) resultaron significativas en la modificación del campo de presiones sobre los paneles de un parque. De este estudio se obtuvo que de las interacciones entre las variables que solamente la posición en las columnas y la posición entre filas (BE) y la dirección de viento y la posición entre filas (AE) de las 12 analizadas, tuvieron un p-valor menor del 5%. La interacción entre la dirección de viento y la posición entre filas (AE) fue la más significativa según el diagrama de Pareto estandarizado.

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Los resultados de la tesis permiten corroborar la hipótesis de partida de que los valores de presiones de viento sobre un panel fotovoltaico disminuyen al encontrarse dentro de un arreglo de paneles en un parque y dependen de la posición relativa del panel dentro del mismo.
 - Se constató, que 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.
 - Las presiones de viento obtenidas sobre los paneles presentaron mayores valores sobre los paneles ubicados en la región interior que en las exteriores.
2. Del estudio de la inclinación de los paneles se constató que la variación del ángulo de inclinación del panel con respecto a la horizontal de 15° a 23° produjo un aumento de las presiones para 0° , 45° , 135° y 180° en correspondencia con varios estudios internacionales. Las mayores variaciones se obtuvieron para las direcciones de 45° y 135° .

3. Las variaciones estudiadas en el modo de colocación de los coeficientes de forma sobre el panel a partir de los coeficientes de presión obtenidos, proporcionaron notables diferencias (superiores al 20%) en las reacciones de apoyo.
4. En este trabajo se proponen unas distribuciones de coeficientes de forma que garantizan los mayores valores de las reacciones de apoyo.
5. Los resultados de las reacciones de apoyo obtenidos para el panel arrojaron, que a diferencia de lo expresado en las normas donde se analizan solamente las direcciones de 0° y 180° , e incluso en algunos de los estudios internacionales donde se asevera que estas son las direcciones más críticas; las direcciones de 45° y 135° resultaron ser las condiciones de análisis más desfavorables en algunas columnas.
6. El diseño de experimentos realizado permitió identificar la interacción entre la dirección del viento y la posición entre filas como la más significativa en la variación de las presiones dentro del parque.

RECOMENDACIONES

Se recomienda:

1. Tomar en consideración este trabajo para incorporar a la norma cubana de viento NC-285:2003 los valores de coeficientes de forma para paneles fotovoltaicos obtenidos.
2. Evaluar la influencia en el diseño de las cimentaciones de un panel fotovoltaico, del empleo de las reacciones de apoyo, diferenciadas por columnas, que fueron obtenidas con la aplicación de los coeficientes de forma derivados del estudio.
3. Evaluar en el diseño global de las cimentaciones de un parque fotovoltaico, la influencia de los coeficientes de protección por filas que fueron obtenidos.
4. Extender el estudio del campo de presiones en paneles fotovoltaicos a otras estructuras bajas y elementos no estructurales que no están contenidos en la actual norma cubana de viento, así como revisar los coeficientes que se recogen en la misma.
5. Ampliar el estudio sobre los paneles fotovoltaicos en el túnel de viento, realizando instrumentaciones con extensómetros para obtener las reacciones de apoyo en las columnas y calibrar el modelo numérico realizado.
6. Realizar un estudio a escala real de un panel fotovoltaico sometido a los efectos del viento que permitan validar los resultados obtenidos en túnel de viento.

7. Por estudios internacionales se encuentra definido que el intervalo del viento donde se considera $(C_p C_g)$ es el de 3 s. Sin embargo, en dependencia de las dimensiones de la estructura que se esté analizando, el vórtice que produciría los mayores valores de presiones podría ser de menor escala que el vórtice de escala temporal 3 s. Por tal motivo, podría ser necesario analizar el uso de valores medios de presión en menores tiempos a los efectos de calcular las cargas sobre los módulos solares.
8. La definición de la dimensión y distribución de las áreas tributarias podría ser analizada de manera que su definición pudiera vincularse a las características del campo de presiones que se establece sobre la estructura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIOLA-OGEDENGBE, A.** (2013). "Experimental investigation of wind effect on solar panels". The University of Western Ontario. Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 1177.
- ABIOLA-OGEDENGBE, A., HANGAN, H. & SIDDIQUI, K.** (2015). "Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module". *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 657-665. ISSN. 0960-1481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.037>, Network, Brighton, UK.
- ALY, A. M.** (2013). "Proposed approach for determination of tributary areas for scattered pressure taps". *Wind and Structures*, vol. 16, pp. 617-627. <http://dx.doi.org/10.12989/was.2013.16.6.617>.
- ALY, A. M.** (2016). "On the evaluation of wind loads on solar panels: The scale issue". *Solar Energy*, vol. 135, pp. 423-434. ISSN. 0038-092X. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.018>
- ALY, A. M. & BITSUAMLAK, G.** (2013a). "Aerodynamics of ground-mounted solar panels: test model scale effects". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 123, pp. 250-260. ISSN: 0167-6105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.07.007>.
- ALY, A. M. & BITSUAMLAK, G.** (2013b). "Wind-induced pressures on solar panels mounted on residential homes ". *Journal of Architectural Engineering*, vol. 20, pp. 04013003. ISSN. 1076-0431. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000132](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000132). .
- AS/NZS1170.2** (2011). "Standart: Structural Design actions, Part 2: Wind Actions". Australian/New Zeland.
- ASCE7-10** (2010). "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures". American Society of Civil Engineers, USA.
- 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*, vol. 123, Part A, pp. 192-201. ISSN. 0167-6105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.015>.
- BANKS, D. & MERONEY, R.** (2001). "A model of roof-top surface pressures produced by conical vortices: Evaluation and implications". *Wind and Structures*, 4, 279-298. 1226-6116.
- BANKS, D., SARKAR, P. P., WU, F. & MERONEY, R. N.** (2001). "A device to mitigate vortex induced rooftop suction". *Americas*, 1.
- BERRIZ, L. & ÁLVAREZ, M.** (2008). "Influencia del ángulo de inclinación de una superficie captadora solar sobre la radiación incidente". *Articluo03*. htm.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIENKIEWICZ, B. & ENDO, M.**(2009), "Wind considerations for loose-laid and photovoltaic roofing systems". Structures Congress, Austin, Texas, pp. 2578-2587, [http://dx.doi.org/10.1061/41031\(341\)282](http://dx.doi.org/10.1061/41031(341)282)
- BITSUAMLAK, G. T., DAGNEW, A. K. & ERWIN, J.**(2010), "Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD". The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering, Chapel Hill, North Carolina, USA, May, <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0537>.
- BLESSMANN, J.** (1982). "The boundary layer tv-2 wind tunnel of the UFRGS". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 10, 231-248. 0167-6105. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(82\)90066-6](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(82)90066-6).
- BLESSMANN, J.** (1995). "O vento na engenharia estrutural", Ed. Universidade UFRGS.
- BRONKHORST, A., FRANKE, J., GEURTS, C., BENTUM, C. & GREPINET, F.**(2010), "Wind tunnel and CFD modelling of wind pressures on solar energy systems on flat roofs". 5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina, USA, 23th-27th:
- CAO, J., YOSHIDA, A., SAHA, P. K. & TAMURA, Y.** (2013). "Wind loading characteristics of solar arrays mounted on flat roofs". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 123, Part A, pp. 214-225. ISSN. 0167-6105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.014>.
- CATALDO, J.** (1992). "Simulación física de flujos tipo Capa Límite Atmosférica". Magister en Ingeniería (Mecánica de los Fluidos Aplicada) Universidad de la República, Uruguay.
- ÇENGEL, Y. & CIMBALA, J. M.** (2006). "Fluid Mechanics, Fundamentals and Applications", ISBN. 0073380326. New York, McGraw-Hill.
- CIRSOC 102** (1992). " Acción del viento sobre las construcciones. Código de Argentina".
- COCHRAN, L. S. & CERMAK, J. E.** (1992). "Full-and model-scale cladding pressures on the Texas Tech University experimental building". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 43, pp. 1589-1600. ISSN. 0167-6105. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90374-J](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(92)90374-J).
- COOK, N. J.** (1975). "A boundary layer wind tunnel for building aerodynamics". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 1, pp. 3-12. ISSN. 0167-6105. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(75\)90003-3](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(75)90003-3).
- COOK, N. J.** (1990). "The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static structures.", ISBN. 0-408-00870-9.
- COUNIHAN, J.** (1969). "An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel". Atmospheric Environment (1967), vol. 3, pp. 197-214. ISSN: 0004-6981. [http://dx.doi.org/10.1016/0004-6981\(69\)90008-0](http://dx.doi.org/10.1016/0004-6981(69)90008-0).
- CHUNG, K.-M., CHANG, K.-C. & CHOU, C.-C.** (2010). "Wind loads on residential and large-scale solar collector models". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99, 59–64.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DAVENPORT, A. G. & ISYUMOV, N.**(1968), "The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading ". International Research Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures Ottawa, Canada, September 1967: University of Toronto Press.
- DE BORTOLI, M. E., NATALINI, B. & PALUCH, M. J.** (1997). "Simulaciones de espesor total de capa límite atmosférica neutralmente estable por los metodos de Counihan y Standen". Memorias de las XXVIII Jornadas Sul-Americanas de Ingenieria Estructural, vol. 1, pp. 1615-1624. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.
- EN1991-1-4** (2004). "Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions".
- FOX & MCDONALD'S** (2011). "Introduccion to Fluid Mechanics, 8th Edition", ISBN. 9780470547557. (<http://www.trackersoftware.com/product/pdf-xchange-viewer>).USA, John Wiley & Sons, Inc.
- FU, J. Y., WU, J. R., XU, A., LI, Q. S. & XIAO, Y. Q.** (2012). "Full-scale measurements of wind effects on Guangzhou West Tower". Engineering Structures, ScienceDirect® is a registered trademark of Elsevier B.V., vol. 35, pp. 120-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.10.022>.
- GEURTS, C. & BLACKMORE, P.** (2013). "Wind loads on stand-off photovoltaic systems on pitched roofs". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 123, Part A, pp. 239-249. ISSN. 0167-6105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.016>.
- GEURTS, C. P. W., KOPP, G. A. & MORRISON, M. J.**(2013), "A review of the wind loading zones for flat roofs in code provisions". Proceedings of the 6th European and African Conference on Wind Engineering, Cambridge, July 2013, 1-6:
- GEURTS, C. P. W. & STEENBERGEN, R. D. J. M.**(2009), "Full scale measurements of wind loads on stand-off photovoltaic systems". Proceedings of the Fifth European and African Conference on Wind Engineering Florence, Italy:
- GINGER, J., PAYNE, M., STARK, G., SUMANT, B. & LEITCH, C.** (2011). "Investigation on Wind Loads Applied to Solar Panels Mounted on Roofs".
- GUHA, T. K., FEWLESS, Y. & BANKS, D.**(2015), "Effect of panel tilt, row spacing, ground clearance and post-offset distance on the vortex induced dynamic loads on fixed tilt ground mount photovoltaic arrays". ISBN. 978-85-66094-07-7: 14th International Conference on Wind Engineering – Porto Alegre, Brazil.
- HOLMES, J. D.** (1994). "Wind pressures on tropical housing". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 53, 105-123. 0167-6105. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)90021-3](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(94)90021-3).
- HOLMES, J. D.** (2004). "Wind loading of structures, ed. T.F. e-Library. ", ISBN 0-203-30164-1 Master e-book.
- HOLMES, J. D. & BEST, R. J.** (1983). "Use of eigenvalues in the covariance integration method for determination of wind load effects". Journal of Wind Engineering and

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Industrial Aerodynamics, vol. 13, pp. 359-370. ISSN: 0167-6105.
[http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(83\)90156-3](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(83)90156-3).

HOLMES, J. D. & COCHRAN, L. S. (2003). "Probability distributions of extreme pressure coefficients". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, 893-901.

ISHIZAKI, H. (1983). "Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone regions". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier Science Publishers B.V., vol. 13, pp. 55-66. ISSN. 0167-6105.
[http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(83\)90128-9](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(83)90128-9).

JUBAYER, C. & HANGAN, H. (2014a). "Effect of atmospheric wind on a ground mounted solar panel array". <https://www.researchgate.net/publication/281781741>.

JUBAYER, C. M. & HANGAN, H. (2014b). "Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system.". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.134, pp.56-64. ISSN: 0167-6105.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.008>.

KASPERSKI, M. (2009). "Specification of the design wind load—A critical review of code concepts". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 97, pp. 335-357. ISSN: 0167-6105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2009.05.002>.

KOPP, G. A. (2013). "Wind loads on low-profile, tilted, solar arrays placed on large, flat, low-rise building roofs". *Journal of Structural Engineering*, 140, 04013057. 0733-9445. 10.1061/(ASCE)ST.1943541X.0000825.

KOPP, G. A. & BANKS, D. (2012). "Use of the wind tunnel test method for obtaining design wind loads on roof-mounted solar arrays". *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, pp. 284-287. ISSN. 0733-9445. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000654](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000654)

KOPP, G. A., FARQUHAR, S. & MORRISON, M. J. (2012a). "Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted, solar arrays". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 111, pp. 40-52. ISSN. 0167-6105.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2012.08.004>.

KOPP, G. A., MORRISON, M. J. & HENDERSON, D. J. (2012b). "Full-scale testing of low-rise, residential buildings with realistic wind loads". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 104, pp. 25-39. 0167-6105.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2012.01.004>.

LI, L., KAREEM, A., XIAO, Y., SONG, L. & ZHOU, C. (2015). "A comparative study of field measurements of the turbulence characteristics of typhoon and hurricane winds". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier B.V., vol. 140, pp. 49-66. ISSN: 0167-6105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2014.12.008>.

LÓPEZ, A., CATALDO, J. & PAIS, P. (2015). "Confort eólico en zonas urbanas. Edificio a ser construido en la ciudad de Montevideo, Uruguay". *Arquitectura y Urbanismo*, vol. XXXVI, no 3, pp. 63-74. ISSN 1815-5898.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LÓPEZ, A., LEÓN, E. D., ELENA, V. B. & CATALDO, J.** (2016). "Estudio de coeficientes de presión en paneles solares frente a la acción del viento". *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 7, pp. 35-44. ISSN 2223 -1781.
- LOREDO-SOUZA, A. M., SCHETTINI, E. B. C. & PALUCH, M. J.** (2004). "Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. ". In: MOLLER, V. S. & SILVESTRINI, J. H. (eds.) *Turbulência. 4ta Escola de Primavera de Transição e Turbulência*. ISBN. 85-85769-19-X. Porto Alegre, Brasil.
- MERONEY, R. N.** (1988). "Wind-tunnel modeling of the flow about bluff bodies". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 29, pp. 203-223. ISSN: 0167-6105. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(88\)90159-6](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(88)90159-6).
- MILLER, R. D. & ZIMMERMAN, D. K.** (1981). "Wind Loads on Flat Plate Photovoltaic Array Fields". Boeing Engineering and Construction Company, Phase III pp. 393DOE/JPL/954833-81/3, .
- NBR6123** (1988). " ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas : Forças devidas ao vento em edificações."
- NC-285** (2003). "Norma Cubana: Carga de viento. Método de cálculo". Cuba.
- PFAHL, A., BUSELMEIER, M. & ZASCHKE, M.** (2011). "Wind loads on heliostats and photovoltaic trackers of various aspect ratios". *Solar Energy*, vol. 85, pp. 2185-2201. ISSN. 0038-092X. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.006>.
- PRATT, R. N. & 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*, vol. 123, pp. 226-238. ISSN. 01676105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.09.001>.
- RADU, A. & AXINTE, E.** (1989). "Wind forces on structures supporting solar collectors". *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, vol. 32, pp. 93-100. ISSN: 0167-6105. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(89\)90020-2](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(89)90020-2).
- RADU, A., AXINTE, E. & THEOHARI, C.** (1986). "Steady wind pressures on solar collectors on flat-roofed buildings". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 23, pp. 249-258. ISSN. 0167-6105. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(86\)90046-2](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(86)90046-2).
- RICHARDS, P. J., HOXEY, R. P., CONNELL, B. D. & LANDER, D. P.** (2007). "Wind-tunnel modelling of the Silsoe Cube". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 95, pp. 1384-1399. ISSN. 0167-6105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2007.02.005>.
- SADEK, F. & SIMIU, E.** (2002). "Peak non-Gaussian wind effects for database-assisted low-rise building design". *Journal of Engineering Mechanics*, 128, 530-539. ISSN: 0733-9399. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399-(2002)128:5(530).
- SAMANI, Z.** (2016). "Wind Loading on Full-scale Solar Panels". The University of Western Ontario.
- SAP2000V19.0.0** (2016). "Structural Analysis Program". Version 19.0.0 Build 1296 ed.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SHADEMAN, M., BARRON, R., BALACHANDAR, R. & HANGAN, H.** (2014). "Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations". Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 41, pp.728-738. ISSN: 0315-1468. <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0537>.
- SIFONTES, M. & MAVILIO, L.** (2013). "Influencia del ángulo de inclinación en la productividad de una central fotovoltaica de 1 MW en el tiempo de vida útil.". Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- SILL, B., COOK, N. & BLACKMORE, P.** (1989). "IAWE Aylesbury comparative experiment—Preliminary results of wind tunnel comparisons". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 32, pp. 285-302. ISSN. 0167-6105. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(89\)90004-4](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(89)90004-4).
- SILL, B., COOK, N. & FANG, C.** (1992). "The Aylesbury comparative experiment: a final report". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 43, pp. 1553-1564. ISSN. 0167-6105. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90371-G](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(92)90371-G).
- SIMIU, E., HECKERT, N. A., FILLIBEN, J. J. & JOHNSON, S. K.** (2001). "Extreme wind load estimates based on the Gumbel distribution of dynamic pressures: an assessment ". Structural Safety, 23, 221-229.
- SIMIU, E. & SCANLAN, R. H.** (1996). "Wind effects on structures: fundamentals and applications to design. Third Edition", ISBN. 9780471021759. Canada, John Wiley & Sons, Inc.
- STATGRAPHICS** (2006). "Statgraphics Centurion XV".
- STATHOPOULOS, T.** (1984). "Wind loads on low-rise buildings: a review of the state of the art". Engineering Structures, vol. 6, pp. 119-135. ISBN 0141-0296. [http://dx.doi.org/10.1016/0141-0296\(84\)90005-1](http://dx.doi.org/10.1016/0141-0296(84)90005-1).
- STATHOPOULOS, T., XYPNITOU, E. & ZISIS, I.** (2013). "Wind Loads on Solar Collectors and PV Panels on Roofs". Structures Congress 2013, pp. 1545-1554.
- STATHOPOULOS, T., XYPNITOU, E. & ZISIS, I.** (2015). "Wind Loads on Rooftop Solar Panel Systems: A Contribution to NBCC ".
- STATHOPOULOS, T., ZISIS, I. & XYPNITOU, E.** (2014). "Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.125, pp.195-206. ISSN. 0167-6105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.007>.
- STENABAUGH, S. E., IIDA, Y., KOPP, G. A. & KARAVA, P.** (2015). "Wind loads on photovoltaic arrays mounted parallel to sloped roofs on low-rise buildings". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 139, pp. 16-26. ISSN. 0167-6105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.007>.
- SURRY, D.**(1982), "Cosequences of distortion in the flow including mismatching scales and intensities of turbulence". Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications Gaithersburg, Maryland, USA,, pp. 137-185: Cambridge University Press.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SURRY, D., INCULET, D. R., SKERLJ, P. F., LIN, J. X. & DAVENPORT, A. G.** (1994). "Wind, rain and the building envelope: a status report of ongoing research at the University of Western Ontario". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 53, pp. 19-36. ISSN. 0167-6105. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)90016-7](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(94)90016-7).
- TAMURA, Y. & KAREEM, A.** (2013). "Advanced Structural Wind Engineering", ISBN: 978-4-431-54337-4 (eBook). <http://dx.doi.org/10.1007/978-4-431-54337-4>. Japan, Springer Tokyo Heidelberg New York Dordrecht London.
- TERRÉS-NÍCOLI, J. M. & MANSB, C.** (2014). "Estudio comparativo de aplicación de la norma EN1991-1-4 para el cálculo de la acción del viento en estructuras singulares". *Hormigón y acero*, vol. 65, pp. 151-161.
- TUAN-CHUN FU, ALY MOUSAAD ALY, ARINDAM GAN CHOWDHURY, GIRMA BITSUAMLAK, DONGHUN YEO & EMIL SIMIU** (2012). "A proposed technique for determining aerodynamic pressures on residential homes". *Wind and Structures*, 15, 27. 1226-6116.
- VON KÁRMÁN, T.** (1948), "Progress in the statistical theory of turbulence". In: *SCIENCES*, N. A. O., ed., vol. 34, pp. 530-539: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.
- WARSIDO, W. P., BITSUAMLAK, G. T., BARATA, J. & CHOWDHURY, A. G.** (2014). "Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array". *Journal of Fluids and Structures*, vol. 48, pp. 295-315. ISSN. 0889-9746. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.03.005>.
- WHITE, F. M.** (2011). "Mecânica dos Fluidos (Sexta Edição)". Porto Alegre
- WMO** (2010). "Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions". WMO/TD-No.1555. Geneva, Switzerland World Meteorological Organization.
- WOOD, G. S., DENOON, R. O. & KWOK, K.** (2001). "Wind loads on industrial solar panel arrays and supporting roof structure". *Wind and Structures*, vol. 4, pp. 481-494. ISSN: 1226-6116.
- YORUKOGLU, M. & CELIK, A. N.** (2006). "A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration". *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 2441-2450. ISSN. 0196-8904. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2005.11.002>.

ANEXOS

Anexo A La matriz de experimentación para el parque de paneles fotovoltaicos.

No.	D-Viento	Posición	S/C	S/F	Fila
1	-1	-1	0	-1	1
2	-1	1	1	-1	1
3	-1	1	0	-1	-1
4	-1	-1	-1	1	0
5	1	1	-1	-1	1
6	1	1	0	0	0
7	1	-1	0	-1	0
8	1	1	0	0	-1
9	-1	-1	-1	-1	-1
10	1	1	0	1	0
11	1	-1	-1	-1	-1
12	-1	1	1	1	0
13	1	-1	-1	1	1
14	1	1	0	-1	-1
15	1	1	0	1	1
16	-1	-1	-1	0	0
17	1	-1	-1	1	0
18	-1	-1	0	1	1
19	1	-1	1	1	0
20	1	1	0	-1	1
21	-1	1	-1	0	1
22	-1	1	-1	1	-1
23	-1	-1	-1	1	1
24	1	1	-1	0	1
25	-1	-1	0	-1	-1
26	-1	-1	1	1	0
27	1	-1	0	1	1
28	-1	-1	1	-1	-1
29	-1	-1	1	0	1
30	1	-1	0	-1	1
31	-1	1	-1	-1	1
32	1	1	1	-1	0
33	1	-1	1	0	-1
34	-1	1	1	1	1
35	1	-1	0	1	0
36	-1	1	-1	1	0
37	1	-1	-1	0	-1
38	-1	-1	1	-1	0
39	-1	1	0	1	1
40	1	1	1	0	-1
41	-1	-1	1	0	-1
42	-1	-1	-1	0	-1
43	-1	-1	0	1	-1
44	1	1	-1	1	1
45	-1	1	-1	-1	-1
46	-1	1	0	0	-1
47	-1	1	0	-1	0
48	1	1	-1	0	-1
49	-1	1	1	0	0
50	1	-1	-1	-1	1
51	1	-1	1	-1	1
52	1	1	1	1	1
53	-1	1	-1	0	-1
54	-1	-1	1	1	-1

No.	D-Viento	Posición	S/C	S/F	Fila
55	1	-1	-1	-1	0
56	1	-1	-1	0	0
57	-1	1	0	1	-1
58	-1	1	0	1	0
59	-1	-1	1	0	0
60	-1	1	-1	1	1
61	1	-1	0	1	-1
62	-1	1	1	0	1
63	1	1	-1	1	0
64	1	1	1	0	1
65	-1	1	1	0	-1
66	-1	-1	1	1	1
67	-1	-1	0	-1	0
68	1	1	0	1	-1
69	1	1	1	0	0
70	1	1	1	-1	-1
71	1	1	0	0	1
72	-1	-1	-1	0	1
73	-1	1	1	-1	-1
74	1	-1	0	-1	-1
75	1	-1	0	0	1
76	1	-1	0	0	-1
77	-1	1	-1	0	0
78	1	-1	1	1	1
79	-1	1	1	-1	0
80	1	1	1	1	0
81	-1	1	0	-1	1
82	-1	-1	-1	-1	0
83	-1	1	1	1	-1
84	1	-1	1	1	-1
85	-1	-1	0	1	0
86	1	-1	1	0	1
87	-1	-1	0	0	1
88	1	1	1	1	-1
89	-1	-1	-1	1	-1
90	-1	1	-1	-1	0
91	-1	1	0	0	1
92	1	1	1	-1	1
93	1	1	-1	0	0
94	1	1	0	-1	0
95	1	1	-1	1	-1
96	1	-1	1	0	0
97	-1	-1	-1	-1	1
98	-1	-1	0	0	-1
99	1	-1	-1	1	-1
100	1	-1	1	-1	0
101	1	1	-1	-1	-1
102	1	-1	-1	0	1
103	-1	-1	1	-1	1
104	-1	-1	0	0	0
105	1	1	-1	-1	0
106	1	-1	0	0	0
107	1	-1	1	-1	-1
108	-1	1	0	0	0

Anexo B Programación en MATLAB para la obtención de los valores de presión.

```
function Modelo3segMin

% El directorio carpeta es, a menos de la dirección, el directorio donde
% están los archivos obtenidos durante la medición

carpeta='C:\ALE\01 Superación ALE\Doctorado\Mediciones\direccion\';
%Directorio
direccion='D_180';

% Los archivos CERO_INI.DAT y CERO_FIN.DAT contienen las medidas
% correspondientes a los ceros, tomados al comienzo y al final de cada
% medición

Mediciones=[carpeta direccion'\''CERO_INI.DAT'];
fid=fopen(Mediciones, 'r+');
fori=1:27000
    G=fread(fid,4, 'ubit 8');
    F=fread(fid,66, 'float32');
    for j=1:64
        CEROM1(i,j)=F(j+2);
    end
end
fclose(fid);
CEROM1 = mean (CEROM1);

Mediciones=[carpeta direccion'\''CERO_FIN.DAT'];
fid=fopen(Mediciones, 'r+');
fori=1:27000
    G=fread(fid,4, 'ubit 8');
    F=fread(fid,66, 'float32');
    for j=1:64
        CEROM2(i,j)=F(j+2);
    end
end
fclose(fid);
CEROM2 = mean (CEROM2);

CERO = 0.5*(CEROM1 + CEROM2);

% El archivo Vínculo establece la relación entre la toma de cada conector
% y la toma sobre el modelo
Vinculo=dlmread ('C:\Ale\01 Superación
ALE\Doctorado\Mediciones\VinculoPG.txt', '\t');

%Los archivos PF1, CC, BB, Pl2, Techo e INT tiene la identificación de
cada toma y sus coordenadas
%sobre la cara en la que se encuentra

PF1 = dlmread ('C:\ALE\01 Superación
ALE\Doctorado\Mediciones\Coordenadas_Tomas_P.txt', '\t');
% CC = dlmread ('C:\Users\jcataldo\Documentos\Ingeniería del
Viento\Galpón_Zorrilla\Medida de Presión\Resultados\CC.txt', '\t');
```

ANEXOS

```
% El programa lee los datos de presión desde los archivos binarios
% generados en la scanivalve. Los datos están ordenados según el conector
% la toma del mismo.
Pcara = zeros(2,64,27000);
P = zeros(2,64,27000);
row = 1;
forconector=1:2
c = int2str(conector);
archivo=[carpeta direccion\'\'PLATINA\' c \'.DAT'];

fid=fopen(archivo, 'r+');
for k=1:27000
    G=fread(fid,4, 'ubit 8');
    F=fread(fid,66, 'float32');
ifconector == 1
column = 1;
else
column = 33;
end
for j=1:2:64
P(conector, j, k)=F(j+2)-CERO(j);
    P(conector, j+1, k)=F(j+3)-CERO(j+1);
Pcara(row, column, k) = F(j+2)-CERO(j);
Pcara(row+1, column, k) = F(j+3)-CERO(j+1);
column = column + 1;
end
end
fclose(fid);
end

% Se calcula para cada conector la energía dinámica media, la cual se
% obtiene en la toma 64 de cada conector.
Dinam =mean(P(1,64,:)).*0.2035;

% Se calculan los parámetros requeridos para el análisis del campo de
% presiones sobre el panel. Estos parámetros son valor medio, valor
% mínimo, valor máximo, la media cuadrática y el mínimo valor de la media
% tomada sobre un periodo de 3 segundos a escala de prototipo
% cálculo media, mínimo y máximo
% por platina, fila 1 platina 1, fila 2 platina 2
Pmed=mean(P,3);
Pmin=min(P,[],3);
Pmax=max(P,[],3);
% por caras, fila 1 cara de arriba, fila 2 cara abajo
Pcarmed=mean(Pcara,3);
Pcarmin=min(Pcara,[],3);
Pcarmax=max(Pcara,[],3);

% análisis 3 segundos
Pcomp(1:2,1:64,1:26889)=0;
Pcara3s(1:2,1:64,1:26889)=0;

for k=1:26889
for m = 1:111
Pcomp(:, :, k)=Pcomp(:, :, k) + (1/111) *P(:, :, k+m-1);
```

ANEXOS

```
Pcara3s(:, :, k) = Pcara3s(:, :, k) + (1/111) * Pcara(:, :, k+m-1);
end
end

Pmed3s = mean(Pcomp, 3);
Pmin3s = min(Pcomp, [], 3);
Pmax3s = max(Pcomp, [], 3);

% caras a los 3s
Pmedcar3s = mean(Pcara3s, 3);
Pmincar3s = min(Pcara3s, [], 3);
Pmaxcar3s = max(Pcara3s, [], 3);

% calculando P neto al restar cara de arriba menos cara de abajo
Pneto = zeros(1, 64, 27000);
Pneto3s = zeros(1, 64, 26889);

for i = 1:1:64
for k = 1:1:27000
Pneto(1, i, k) = Pcara(1, i, k) - Pcara(2, i, k);
if k <= 26889
Pneto3s(1, i, k) = Pcara3s(1, i, k) - Pcara3s(2, i, k);
end
end
end
% neto
Pnetmed = mean(Pneto, 3);
Pnetmin = min(Pneto, [], 3);
Pnetmax = max(Pneto, [], 3);

Pnetmed3s = mean(Pneto3s, 3);
Pnetmin3s = min(Pneto3s, [], 3);
Pnetmax3s = max(Pneto3s, [], 3);

% analisisrms
for i = 1:2
for j = 1:63
for k = 1:1:27000
Pc(i, j, k) = (P(i, j, k) - Pmed(i, j)).^2;
PcaraRms(i, j, k) = (Pcara(i, j, k) - Pcarmed(i, j)).^2;
if k <= 26889
Pc3s(i, j, k) = (Pcomp(i, j, k) - Pmed3s(i, j)).^2;
PcaraRms3s(i, j, k) = (Pcara3s(i, j, k) - Pmedcar3s(i, j)).^2;
end
ifi == 1
PnetoRms(1, j, k) = (Pneto(1, j, k) - Pnetmed(1, j)).^2;
if k <= 26889
PnetoRms3s(1, j, k) = (Pneto3s(1, j, k) -
Pnetmed3s(1, j)).^2;
end
end
end
end
end
Prms_platina = (mean(Pc, 3)).^0.5;
Prms_cara = (mean(PcaraRms, 3)).^0.5;
```

ANEXOS

```
Prms_neto=(mean(PnetoRms,3)).^.5;
% analisis 3s rms
Prms_platina3s=(mean(Pc3s,3)).^.5;
Prms_cara3s=(mean(PcaraRms3s,3)).^.5;
Prms_neto3s=(mean(PnetoRms3s,3)).^.5;

% Para cada parámetro de análisis se calcula el coeficiente de presión.
fori=1:2
CPmed (i,:)=Pmed(i,:)/Dinam;
CPmin (i,:)=Pmin(i,:)/Dinam;
CPmax (i,:)=Pmax(i,:)/Dinam;
CPrms (i,:)=Prms_platina(i,:)/Dinam;

CPmedcar (i,:)=Pcarmed(i,:)/Dinam;
CPmincar (i,:)=Pcarmin(i,:)/Dinam;
CPmaxcar (i,:)=Pcarmax(i,:)/Dinam;
CPrmscar (i,:)=Prms_cara(i,:)/Dinam;

CPmed3s (i,:)=Pmed3s(i,:)/Dinam;
CPmin3s (i,:)=Pmin3s(i,:)/Dinam;
    CPmax3s (i,:)=Pmax3s(i,:)/Dinam;
    CPrms3s (i,:)=Prms_platina3s(i,:)/Dinam;

    CPmedcar3s (i,:)=Pmedcar3s(i,:)/Dinam;
    CPmincar3s (i,:)=Pmincar3s(i,:)/Dinam;
    CPmaxcar3s (i,:)=Pmaxcar3s(i,:)/Dinam;
    CPrmscar3s (i,:)=Prms_cara3s(i,:)/Dinam;

ifi == 1
CPmed_neto (i,:)=Pnetmed(i,:)/Dinam;
CPmin_neto (i,:)=Pnetmin(i,:)/Dinam;
CPmax_neto (i,:)=Pnetmax(i,:)/Dinam;
CPrms_neto (i,:)=Prms_neto(i,:)/Dinam;

    CPmed_neto3s (i,:)=Pnetmed3s(i,:)/Dinam;
    CPmin_neto3s (i,:)=Pnetmin3s(i,:)/Dinam;
    CPmax_neto3s (i,:)=Pnetmax3s(i,:)/Dinam;
    CPrms_neto3s (i,:)=Prms_neto3s(i,:)/Dinam;

end
end
%salvar resultados
CP = zeros(128,8);
CP_cara = zeros(128,8);
CP_neto = zeros(64,8);

row = 1;
fori=1:2
for j=1:64
%platina
CP(row,1)=CPmed(i,j);
CP(row,2)=CPmin(i,j);
CP(row,3)=CPmax(i,j);

CP(row,5)=CPmed3s(i,j);
CP(row,6)=CPmin3s(i,j);
```

ANEXOS

```
CP(row,7)=CPmax3s(i,j);

%caras
CP_cara(row,1)=CPmedcar(i,j);
CP_cara(row,2)=CPmincar(i,j);
CP_cara(row,3)=CPmaxcar(i,j);

CP_cara(row,5)=CPmedcar3s(i,j);
CP_cara(row,6)=CPmincar3s(i,j);
CP_cara(row,7)=CPmaxcar3s(i,j);

if j < 64
%platina
CP(row,4)=CPrms(i,j);
CP(row,8)=CPrms3s(i,j);
%caras
CP_cara(row,4)=CPrmscar(i,j);
CP_cara(row,8)=CPrmscar3s(i,j);
end

ifi == 1
CP_neto(row,1)=CPmed_neto(i,j);
CP_neto(row,2)=CPmin_neto(i,j);
CP_neto(row,3)=CPmax_neto(i,j);

CP_neto(row,5)=CPmed_neto3s(i,j);
CP_neto(row,6)=CPmin_neto3s(i,j);
CP_neto(row,7)=CPmax_neto3s(i,j);

if j < 64
CP_neto(row,4)=CPrms_neto(i,j);
CP_neto(row,8)=CPrms_neto3s(i,j);
end
end
row = row + 1;
end
end

% Se guardan los coeficientes de presión en un archivo correspondiente a
la dirección que se analiza

archivo=[carpeta direccion'\CP_'direccion'.txt'];
dlmwrite(archivo, CP, 'delimiter', '\t', 'precision', 6)

archivo=[carpeta direccion'\CP_cara_'direccion'.txt'];
dlmwrite(archivo, CP_cara, 'delimiter', '\t', 'precision', 6)

archivo=[carpeta direccion'\CP_neto_'direccion'.txt'];
dlmwrite(archivo, CP_neto, 'delimiter', '\t', 'precision', 6)
```