



ID: XXXVIIIJSIE-07-001

CARGAS AERODINÁMICAS EN PANELES SOLARES: EL CASO DE LA TERRAZA DE LA CASA DE GOBIERNO PROVINCIAL DEL CHACO

AERODYNAMIC LOADS ON SOLAR PANELS: THE CASE OF THE TERRACE OF CHACO GOVERNMENT BUILDING

Adrián R. Wittwer (P) (1); Silvana Tourn (2); Jorge O. Marighetti (1); Mario E. De Bortoli (1); Acir M. Loredo-Souza (3)

(1) Dr. Prof., Docente Investigador, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina.

(2) Dr. Prof., Universidad Tecnológica Nacional, Regional Rcia., Resistencia, Argentina.

(3) Dr. Prof., Docente Investigador, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Dirección para correspondencia: a_wittwer@yahoo.es; (P) Presentador

Area Temática: Análise Estrutural: Métodos Experimentais.

Resumen

El Gobierno de la Provincia del Chaco, a través de la Secretaría de Energía y el Consejo Federal de Inversiones (CFI), desarrolla un proyecto de aprovechamiento de energías alternativas en la sede de la Casa de Gobierno Provincial que incluye un conjunto de paneles fotovoltaicos y un aerogenerador de mediano porte a ser instalados en la terraza del mencionado edificio gubernamental. Su objetivo, además de la generación propia de energía, es la promoción del uso de energías limpias en ámbitos oficiales. A través de un Convenio entre la Secretaría de Energía Provincial, el CFI y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), el Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE ha realizado una serie de ensayos en el túnel de viento con el objeto de determinar las cargas aerodinámicas que deben soportar los paneles solares. El procedimiento establecido en el Reglamento Argentino de Vientos CIRSOC 102 no contempla estos dispositivos de forma específica. En el caso del montaje sobre edificios en altura, la complejidad de los efectos aerodinámicos puede ser mayor que en el caso de paneles distribuidos en la superficie terrestre. El trabajo presenta un análisis de los coeficientes de carga de viento sobre los paneles solares, a través de mediciones con modelos a escala reducida en el túnel de viento de la UNNE.

Palabras-clave: Cargas de viento, túnel de viento, análisis estructural.

Abstract

The Government of the Province of Chaco, through the the Federal Investment Council (CFI), is developing a project for the use of alternative energies at the Provincial Government Building that includes a set of photovoltaic panels and a medium-sized wind turbine to be installed on the terrace of this building. Its objective, in addition to generating its own energy, is to promote the use of clean energy in official areas. Through an agreement between the Provincial Energy Secretariat, the CFI and the of the Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), the Laboratorio de Aerodinámica of the UNNE has carried out wind tunnel tests in order to determine the aerodynamic loads that the solar panels must support. The procedure established in the Argentine Wind Regulation CIRSOC 102 do not specifically contemplate these devices. The complexity of the aerodynamic effects in case of mounting on tall buildings may be greater than in the case of panels distributed on the earth's surface. The work presents an analysis of the wind load coefficients on solar panels, through measurements with reduced-scale models in the UNNE wind tunnel.

Keywords: Wind loads, wind tunnel, structural analysis.



1. INTRODUCCIÓN

El Gobierno de la Provincia del Chaco, a través de la Secretaría de Energía y el Consejo Federal de Inversiones (CFI), decidió realizar un proyecto de aprovechamiento de energías alternativas en la sede de la Casa de Gobierno Provincial. Este Proyecto incluye la instalación de un conjunto de paneles fotovoltaicos y un aerogenerador de mediano porte que será realizada en la terraza del mencionado edificio gubernamental y su objetivo, además de la generación propia de energía, es la promoción del uso de energías limpias en ámbitos oficiales. En el caso específico de los paneles solares, el proyecto prevé el diseño estructural de los soportes que, debido al tipo de estructura y su localización, depende básicamente de las cargas aerodinámicas que se generan sobre los propios paneles.

El Reglamento Argentino de Acción del Viento Sobre las Construcciones (CIRSOC 102, 2001), especifica coeficientes de carga aplicables a estructuras de formas regulares y de pequeño porte. En el caso de módulos fotovoltaicos y paneles solares, el reglamento no establece un tratamiento específico y la forma de calcular las cargas de viento sobre módulos y paneles solares consiste en asimilarlos a cubiertas planas aisladas. De la misma forma, tampoco la Norma Brasileira NBR 6123 (ANBT, 1988) considera los paneles fotovoltaicos de forma específica porque deberían usarse los coeficientes de carga definidos para muros, placas e y cubiertas aisladas.

El Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE, cuenta con un túnel de capa límite y el instrumental necesario para realizar ensayos estructurales con simulación de la capa límite atmosférica. En este trabajo se describe el trabajo experimental desarrollado para evaluar las cargas aerodinámicas sobre el grupo de paneles que se va a montar en la terraza de la Casa de Gobierno de Chaco que incluye ensayos en el túnel de viento sobre dos modelos a escala reducida diferentes. El objetivo final es obtener un diseño estructural de los soportes seguro y acorde a la Ingeniería de vientos actual.

2. ANÁLISIS DE LAS CARGAS DE VIENTO SOBRE PANELES SOLARES

Una revisión bibliográfica referida a la acción del viento en paneles y parques solares permite verificar que recientemente se han incrementado los estudios aplicados a ese tipo de problema. Esto se debe a la falta de información específica para contemplar las cargas de viento sobre paneles fotovoltaicos en general y parques de paneles montados sobre la superficie terrestre en particular. Se suma la falta de tratamiento específico de los reglamentos de vientos para este tipo de estructuras y, en el caso del CIRSOC 102, la limitación que implica considerar los paneles fotovoltaicos como estructuras bajas aisladas.

Como ejemplo reciente en Argentina, es posible mencionar el caso de la Planta de paneles fotovoltaicos Cordillera Solar, que se ubica en el departamento de Iglesia, provincia de San Juan. El análisis estructural de los seguidores solares de eje simple controlados desarrollados por la empresa Convert Italia S.p.A., incluye una evaluación inicial de cargas aerodinámicas basada en el Reglamento CIRSOC 102, implementadas en el cálculo de Sterling and Wilson (2018). Las limitaciones que supone aplicar este reglamento, considerando a los módulos solares como cubiertas planas de baja altura, determinaron que se realizaran ensayos específicos en túnel de viento y verificaciones estructurales computacionales (Wittwer et al., 2019).

En los EEUU, el análisis de cargas de viento sobre instalaciones fotovoltaicas montadas en techos planos de edificios, tampoco está cubierta por los métodos prescriptivos considerados en la norma “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures” (ASCE 7, 2010). Sin



embargo, se han publicado reportes como es el caso del reporte de la SEAOC que describe las características del viento en techos con este tipo de instalación y la aplicación de esos datos para la evaluación de cargas aerodinámicas en forma similar a los códigos de viento. En la bibliografía específica existen diferentes tipos de estudios experimentales de paneles e instalaciones fotovoltaicas desarrollados en túneles de viento. Por un lado, los que se refieren al estudio de módulos y paneles aislados (Samani, 2016). Por otro lado, han tenido un gran desarrollo los paneles montados sobre techos de edificaciones y, por lo tanto, surgieron varios estudios específicos referidos a este tipo de instalación que representa un desafío en términos de las cargas aerodinámicas por la cantidad de factores y variables que entran en juego. Finalmente, aparecen también los estudios sobre instalaciones fotovoltaicas montadas sobre el terreno que, en algunos casos, por su extensión de varios km² constituyen plantas generadoras de potencia (Schellenberg et al., 2013). Aún con la existencia de estos trabajos de investigación, un estudio desarrollado por López et al. (2019) concluye, a partir de la aplicación de las normas de viento vigentes y de una serie de experimentos en túnel de viento, que el Reglamento CIRSOC 102 y la NBR 6123 no son aplicables por no cumplirse los requerimientos de distancia de los modelos con respecto al suelo que se plantean para los coeficientes de presión. Señalan además las limitaciones de las normas que no consideran direcciones de viento incidente oblicuas con respecto a los paneles. Estas conclusiones, sumadas a dificultades que se indican en los artículos revisados y a las limitaciones específicas que señalan Zhang and Stathopoulos (2014) en el caso de la obtención de cargas aerodinámicas sobre paneles montados en techos planos, fundamentan la realización de los ensayos en túnel de viento previos al montaje de paneles en la Casa de Gobierno de Chaco.

3. CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO Y ENTORNO URBANO

La Casa de Gobierno de Chaco está ubicada en el centro de la ciudad de Resistencia, en un área urbana que incluye varios edificios altos influyendo en las características del viento incidente. El edificio tiene dos módulos, pero la terraza en que se localizarán los paneles solares está sobre el módulo principal que tiene 10 pisos, 51,70 m de altura y la fachada hacia la Plaza 25 de Mayo. La Figura 1 ilustra las características edilicias principales de la Casa de Gobierno.



Figura1. Casa de Gobierno de la Provincia del Chaco.



Se realizó una evaluación del entorno edilicio que circunda a la Casa de Gobierno para determinar que estructuras y edificios, en función de su altura, tamaño y ubicación, tendrán relevancia aerodinámica y deben ser considerados en el modelo a escala reducida. Dada la localización del edificio, existen varios edificios importantes en el entorno próximo que deberán reproducirse en el modelo. Para ilustrar parcialmente las características del entorno de la Casa de Gobierno, en la parte inferior de la Figura 1 se observan fotografías tomadas desde la terraza donde se instalarán los paneles; una vista hacia el este donde se puede ver, en un primer plano, la Casa de las Culturas del Chaco, otra hacia el sudeste donde se ubica la Plaza Central y, finalmente, otra vista hacia el noroeste donde están localizados los edificios de mayor altura.

4. TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Los ensayos fueron realizados en el túnel de viento de la UNNE, sobre dos modelos rígidos a escala reducida conforme a los requerimientos de semejanza establecidos para el modelado del edificio y su entorno, así como para la simulación del viento incidente, en este tipo estudio experimental. El análisis de los paneles solares a estudiar y las características de su emplazamiento en la terraza de la Casa de Gobierno, determinaron que sea necesario utilizar dos modelos diferentes; uno completo y otro de mayor tamaño y de tipo parcial. El modelo completo de la casa de Gobierno se construyó en escala 1:200, incluyendo los módulos que se montarán en la terraza, y el modelo seccional, que incluye solo la parte superior del edificio, fue realizado en escala 1:50. Las mediciones de las presiones estáticas medias y fluctuantes originadas por el viento sobre la superficie de los paneles, se realizaron mediante un sistema de medición de 96 canales. Simultáneamente, se midieron los valores de la presión dinámica de referencia, q_z , a barlovento del modelo, en la posición correspondiente a la altura máxima del modelo.

El túnel “Jacek P. Gorecki” de la UNNE es un túnel de capa límite de circuito abierto con una longitud total de 39,65 m. La cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho \times 1,8 m de alto \times 22,8 m de largo y posee dos mesas de ensayos giratorias de 1,2 m de diámetro; una a 3,8 m del inicio de la cámara, y la otra a 19,4 m. Un ventilador axial de 2,25 m de diámetro accionado por un motor trifásico inductivo de 92 kW y 700 RPM genera una velocidad máxima de 25 m/s en la cámara y la velocidad puede regularse mediante un dispositivo mecánico (Wittwer and Möller, 2000). En este trabajo se ensayaron dos modelos diferentes; un modelo completo del edificio, construido en escala 1:200, y un modelo seccional de la parte superior de la casa de gobierno donde se representa la terraza en una escala 1:50. Para el modelo completo, se utilizó una simulación de la capa límite atmosférica neutralmente estable, desarrollada a partir del método de Counihan en correspondencia al tipo de terreno que circunda a la estructura, en este caso de tipo urbano. Esta simulación reproduce la variación en altura de las velocidades medias, la distribución de la intensidad de la turbulencia, la distribución de escalas integrales y el espectro de potencia de la componente fluctuante longitudinal. La técnica de simulación implementada en el túnel de viento se encuentra comprendida dentro de los métodos de rugosidad y dispositivos de mezcla (Cook, 1978) que permiten obtener escalas de simulación adecuadas para su utilización en el área estructural. En el caso del modelo seccional 1:50, los ensayos se realizaron con viento incidente uniforme producto de mantener la cámara de ensayos sin ningún elemento de simulación. En la zona de flujo uniforme, donde se realizarán las mediciones sobre el modelo seccional, las desviaciones máximas de la velocidad media son del 3 %. La distribución vertical de la intensidad de turbulencia en esa zona indica valores próximos al 1%. La velocidad de referencia para el viento



uniforme en el centro del canal es de 27 m/s. El valor del número de Reynolds calculado en base al diámetro hidráulico de la sección transversal es $3,67 \times 10^6$.

El modelo completo del edificio de Casa de Gobierno y su entorno fueron construidos con una escala geométrica de 1:200, reproduciéndose los detalles de relevancia aerodinámica. En la Figura 2 se pueden ver, a la izquierda, un esquema en perspectiva del edificio y un detalle del montaje de los paneles sobre la terraza del modelo, mientras que a la derecha se puede observar el modelo completo y su entorno urbano instalados en la cámara de ensayos del túnel viento. La cara externa del panel de mayor tamaño, da hacia el noroeste por lo que se designa Panel 1. El panel más pequeño tiene la superficie externa orientada hacia el noreste y es designado Panel 2. El diseño y construcción del modelo fueron realizados en los Laboratorios de Impresión 3D y de Aerodinámica, ambos de la Facultad de Ingeniería de la UNNE.

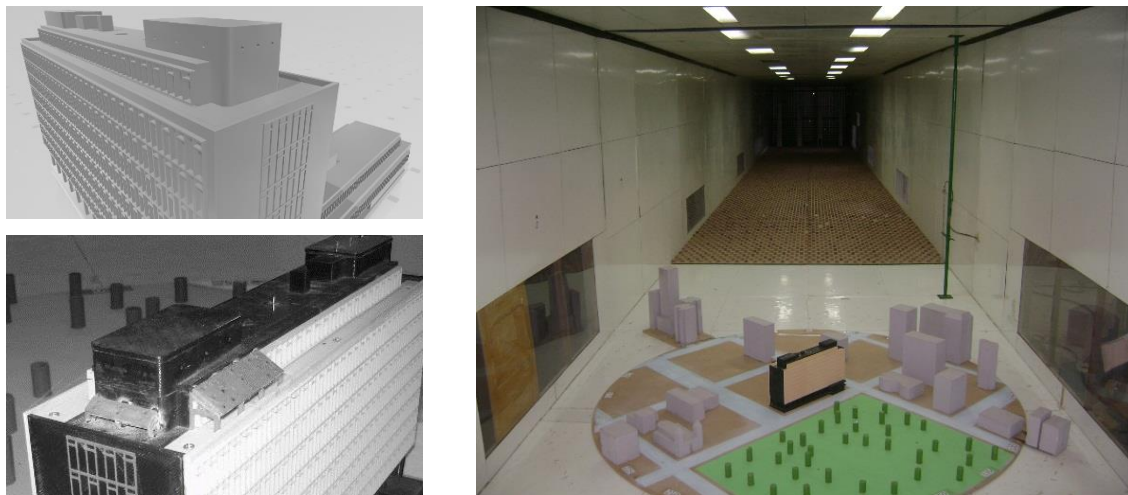


Figura 2. Detalles del modelo completo de Casa de Gobierno y montaje en la cámara de ensayos del túnel de viento.

El modelo seccional del edificio de Casa de Gobierno fue construido con una escala geométrica de 1:50, reproduciéndose los detalles de relevancia aerodinámica. Este tipo de modelo, a diferencia del modelo completo, privilegia los detalles del elemento a evaluar aerodinámicamente frente al criterio de semejanza completa. Esto es, se reproducen con mayor nivel de detalle los paneles solares, mientras que, para el entorno constituido por el edificio, se consideran las partes más próximas a estos elementos. En la Figura 3, a la izquierda, se puede ver una perspectiva del modelo seccional (parcial del edificio) y algunos detalles de los paneles 1 y 2 con la distribución de las tomas de presión. En la misma Figura, a la derecha, se puede ver el montaje del modelo seccional en la cámara de ensayos del túnel viento.

Las direcciones de viento evaluadas en los ensayos fueron $16; 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 285^\circ, 300^\circ, 315^\circ, 330^\circ$ y 345° . Los registros de presiones fluctuantes de las tomas de presión ubicadas sobre la superficie de los modelos de los paneles, fueron obtenidos mediante un sistema de medición Scanivalve de 96 canales y transductores electrónicos Honeywell PC 163. Para el modelo 1:200, se localizaron 15 tomas sobre la superficie externa del panel 1 (mayor) y solamente 6 tomas sobre el panel 2 (más pequeño). En una primera etapa se midieron las presiones externas, y luego, invirtiendo las tomas, se midieron las presiones internas. Para el



modelo 1:50, se utilizaron 35 tomas sobre la superficie externa para el panel 1 y 13 tomas para el panel 2.

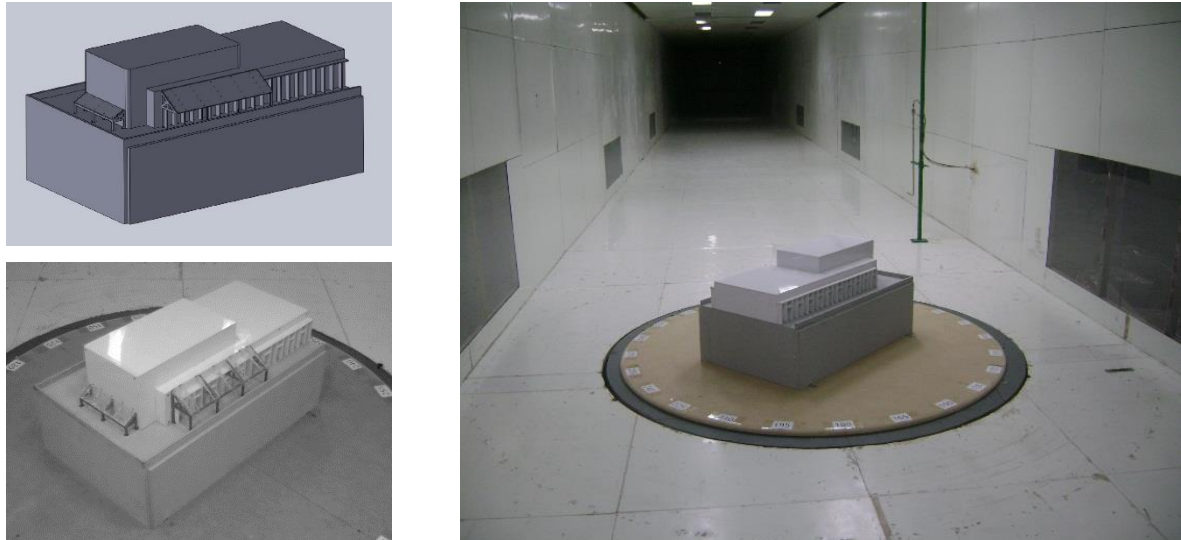


Figura 3. Detalles del modelo seccional de Casa de Gobierno y montaje en la cámara de ensayos del túnel de viento.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de los ensayos en túnel de viento correspondientes al modelo completo escala 1:200 y al modelo seccional 1:50. Se indica la distribución de los coeficientes de presión media, correspondientes a la cara externa e interna de los dos paneles a ser montados en la terraza de la Casa de Gobierno. La distribución de los coeficientes de presión fue obtenida para cada una de las 16 direcciones de viento incidente consideradas en los ensayos, sin embargo, solamente se presentan los valores obtenidos para las situaciones más desfavorables para cada panel.

Los coeficientes de presión media fueron analizados considerándose cada una de las direcciones de viento incidente y, de esta forma, se determinó que para el panel 1 (mayor) la situación de carga más desfavorable se origina con viento incidente en dirección 285° . En la Figura 4 se indican los coeficientes de presión media exterior (izquierda) e interior (derecha) obtenidos para esta dirección de viento con el modelo completo en escala 1:200.

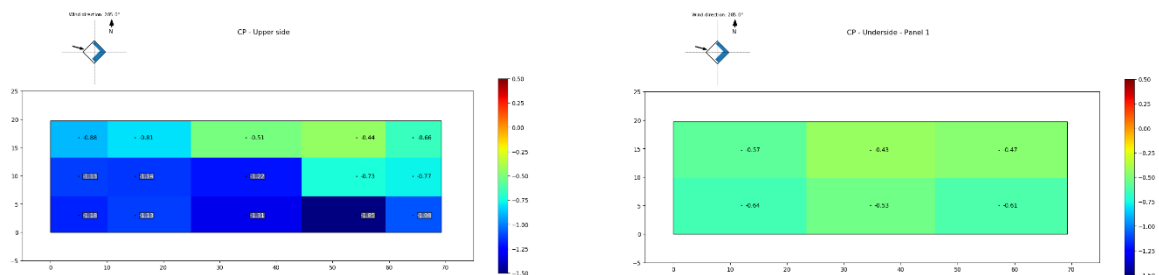


Figura 4. Coeficientes de presión externa e interna obtenidos en el panel 1 para la dirección de viento 285° - Modelo completo en escala 1:200.



En la Figura 5, para esta misma dirección de viento, también se indican los valores de coeficientes de presión media externa e interna, pero en estos casos correspondientes al modelo seccional 1:50.

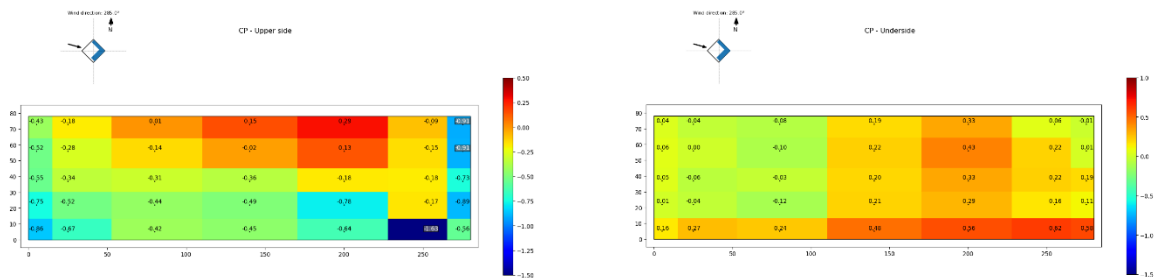


Figura 5. Coeficientes de presión externa e interna obtenidos en el panel 1 para la dirección de viento 285° - Modelo seccional en escala 1:50.

Luego del análisis de la distribución de presiones para las 16 direcciones de viento para el panel 2, semejante al realizado en el panel 1, se determinó que la situación de carga más desfavorable se origina con viento incidente en dirección 45° . En la Figura 6 se indican los coeficientes de presión media exterior e interior obtenidos con el modelo completo en escala 1:200. Los valores de los respectivos coeficientes de presión externa e interna medidos sobre el panel 2, utilizando con el modelo seccional 1:50, son indicados en la Figura 7.

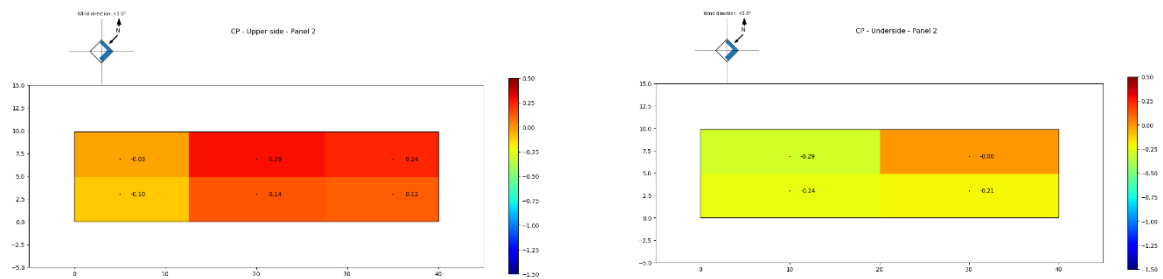


Figura 6. Coeficientes de presión externa e interna obtenidos en el panel 2 para la dirección de viento 45° - Modelo completo en escala 1:200.

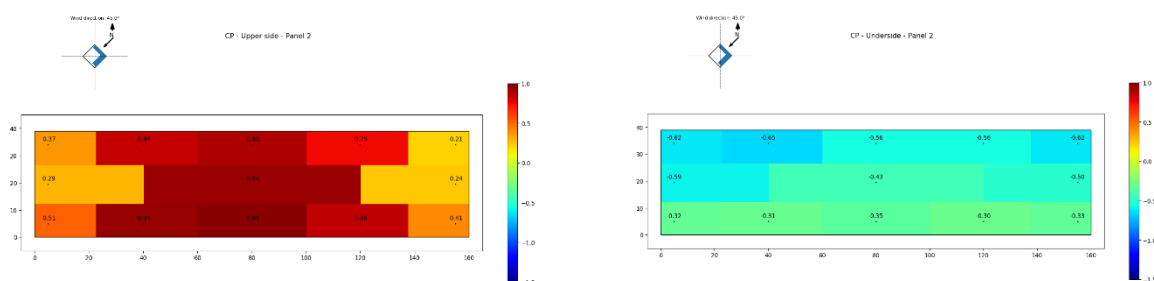
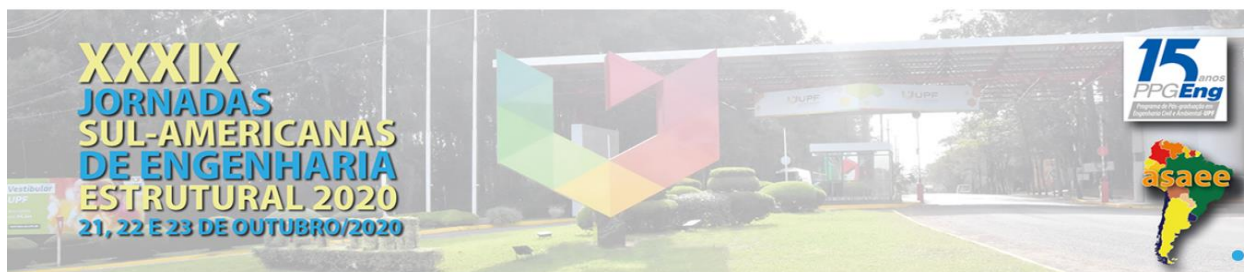


Figura 7. Coeficientes de presión externa e interna obtenidos en el panel 2 para la dirección de viento 45° - Modelo seccional en escala 1:50.

El análisis preliminar realizado hasta aquí permite determinar las direcciones de viento incidente más desfavorables en relación a los paneles 1 y 2. Además, analizando los valores, es posible justificar las diferencias de los coeficientes que se obtienen en ambos modelos, incluyendo



los efectos de escala y considerando las características del viento incidente en cada caso. Para continuar con el estudio, se realizará una comparación de los valores que se obtienen a partir de la aplicación del CIRSOC 102 y de los resultados experimentales, así como también, se evaluará la optimización del diseño estructural en función de distribución local de las cargas de viento que se obtienen.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Civil Engineers. ASCE 7-10 (2010). Minimum design loads for buildings and other structures.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT (1988). Forças devidas ao vento em edificações, NBR 6123. Rio de Janeiro, Brasil.
- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (2001). Reglamento CIRSOC 102: Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones. INTI, Buenos Aires.
- Cook, N. (1978). Wind-Tunnel Simulation of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer by Roughness, Barrier and Mixing-Device Methods. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 3, pp. 157-176.
- López, A., Parnás, V. E., Cataldo, J. (2019). Experimentos en túnel de viento sobre paneles fotovoltaicos montados en el suelo. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34(1), 15-24.
- Samani, Z. (2016) Wind Loading on Full-scale Solar Panels. Master Thesis. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 3529 (<https://ir.lib.uwo.ca/etd/3529>). The University of Western Ontario.
- Schellenberg, A., Maffei, J., Telleen, K., Ward, R. (2013). Structural analysis and application of wind loads to solar arrays. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 123, pp. 261-272.
- Sterling and Wilson (2018). Model fixing justification – Cordillera Solar Power PV Plant. Doc No: COR_OCL_ModelFixingJustification_V01.
- Wittwer, A., Möller, S. (2000). Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 84 (3), pp. 307-320, 2000.
- Wittwer, A., Marighetti J., De Bortoli, M., Castro, H., Mroginski, J., Podestá, J., Adotti, M., Rodríguez A., J., Iturri, B., Udrizar L., S., Alvarez y Alvarez, G., Ortiz, J. (2019). Technical Report: Wind loads over photovoltaic panels – Cordillera Solar Plant - Part I: Wind tunnel tests. Report prepared for: Fernando Mateo, Senior Project Director, Jinko IPP International.
- Zhang, Z., Stathopoulos, T. (2014). Wind loads on solar panels mounted on flat rooftops: Progress and limitations. The 2014 World Congress on Advances on Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM14). Busan, Korea.