

XIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia

Testes de módulos fotovoltaicos em túnel de vento: efeitos de escala e interação aerodinâmica

Tests of photovoltaic modules in a wind tunnel: scale effects and aerodynamic interactions

Adrián Roberto Wittwer¹ , Juan Manuel Podestá¹ , Jorge Omar Marighetti¹ ,
Javier Mroginski¹ , Gisela Marina Alvarez y Alvarez¹ , Hugo Guillermo Castro^{II} ,
Mario Eduardo de Bortoli^I , Marcelo Italo Adotti^{III} , Fernando Gabriel Mateo^{III} 

¹Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina

^{II}Instituto de Modelado e Innovación Tecnológica, Corrientes, Argentina

^{III}Jinko International Power Division, Las Flores, Argentina

RESUMO

São apresentados resultados de um estudo realizado no túnel de vento da UNNE com o objetivo de avaliar as cargas aerodinâmicas que ocorrem nos painéis de um parque solar. O estudo permite analisar os efeitos de escala do modelo que ocorrem quando dois modelos com características diferentes são usados. Da mesma forma, são analisados os efeitos da interação aerodinâmica resultantes da localização relativa dos painéis dentro do parque. Primeiramente, é realizada uma avaliação dinâmica/numérica preliminar e, em seguida, são determinados experimentalmente os coeficientes aerodinâmicos que permitirão a análise quase estática da estrutura do sistema painel-rastreador.

Palavras-chave: Painéis solares; Efeitos do vento; Pressões aerodinâmicas

ABSTRACT

Results of a study carried out in the UNNE wind tunnel to evaluate the aerodynamic loads on panels of a solar park are presented. The experimental study analyzes the model scale effects that occur when two models with different characteristics are used. Likewise, the effects of aerodynamic interaction resulting from the relative location of the panels within the park are analyzed. Firstly, a preliminary dynamic/numerical evaluation is carried out, and then aerodynamic coefficients are experimentally determined, which will allow the quasi-static analysis of the structure of the panel-tracker system.

Keywords: Solar panels; Wind effects; Aerodynamic pressures

1 INTRODUÇÃO

Este estudo experimental foi realizado no Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería da Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). O trabalho consistiu em determinar as ações causadas pelo vento atmosférico nos módulos fotovoltaicos de um parque de geração solar. A avaliação das cargas foi realizada através de ensaios em túnel de vento, utilizando dois modelos em escala reduzida.

A Norma Argentina de ação do vento em construções (Cirsoc 102, 2001) especifica coeficientes de carga aplicáveis a estruturas com formas regulares e de tipo geral. No caso de módulos fotovoltaicos e painéis solares, a norma não estabelece um tratamento particular como fazem outras normas internacionais. Os ensaios em túnel de vento permitem antecipar a interação aerodinâmica entre módulos, efeitos de vizinhança ou aspectos topográficos e ter um projeto mais seguro do ponto de vista da ação do vento (Warsido *et al.*, 2014).

Para a análise das cargas do vento, considera-se primeiro o caso de um módulo isolado e, em seguida, o caso de um conjunto de módulos do tipo rastreadores (trackers), onde são determinados os coeficientes de pressão locais para as situações mais desfavoráveis.

2 EQUIPAMENTO USADO E DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

O túnel de vento "Jacek P. Gorecki" da UNNE é um túnel de camada limite de circuito aberto e seu comprimento total é de 39,65 m. A câmara de testes tem 2,4 m de largura × 1,8 m de altura × 22,8 m de comprimento e possui duas mesas de teste giratórias de 1,2 m de diâmetro; uma a 3,8 m do início da câmara (mesa I) e outra a 19,4 m (mesa II). Detalhes específicos deste túnel de vento podem ser encontrados no artigo publicado por Wittwer & Möller (2000).

Os testes foram realizados usando dois modelos rígidos em escala reduzida. O primeiro desses modelos, chamado de isolado, foi construído com escala 1:10, sem considerar a espessura na escala geométrica (Figura 1). O segundo modelo representa um setor de aproximadamente 115 m × 115 m (escala natural) do parque Iglesia-Guañizuil PV e foi construído com escala geométrica de 1/75 (Figura 1, direita). Esta escala é compatível com a escala do vento atmosférico simulado no túnel de vento que é utilizado como vento incidente. O parque fotovoltaico Iglesia-Guañizuil, localizado na província de San Juan, foi utilizado como referência e modelo neste estudo.

As pressões médias e flutuantes nas superfícies superior e inferior dos módulos foram medidas por meio de tomadas de pressão estática, usando um sistema de medição Scanivalve de 96 canais. Foram determinados os coeficientes de pressão locais correspondentes às tomadas de pressão. Os testes foram realizados com vento de 0° a 180°, pois o modelo é simétrico, em intervalos de 15°. Antes das medições no túnel de vento, foi realizada uma análise numérica da estrutura do sistema. O objetivo desta análise dinâmica é verificar se as frequências modais da estrutura permitirão a aplicação da aproximação quase-estática (Wittwer *et al.*, 2022).

Figura 1 – Modelo do painel isolado (escala 1/10) e modelo do setor do parque (escala 1/75)



Fonte: Autores/as (2019)

3 RESULTADOS

Nesta seção, um estudo numérico preliminar é focado na análise dinâmica do sistema estrutural-mecânico do rastreador solar. A seguir, os coeficientes de pressão experimentais obtidos no Laboratório de Aerodinâmica são avaliados. Os efeitos de escala e da interferência aerodinâmica nas situações de carga mais críticas são discutidos.

3.1 Análise estrutural dinâmico

Os módulos PV são modelados e estudados com o Método dos Elementos Finitos (Zienkiewicz; Taylor, 2005). A linearidade física (elasticidade) e a não linearidade geométrica (grande deformação) foram as hipóteses fundamentais assumidas. A Figura 2 mostra um esboço do módulo PV. A discretização dos elementos finitos (EF) adotada para a simulação 3D completa foi a isoparamétrica EF hexaédrica de 8 nós com 8 pontos de integração em quadratura (DI Rado *et al.*, 2008). A simulação dinâmica no-amortecida é realizada com a seguinte expressão (Vaja *et al.*, 2018).

$$\det(K_{ij} - M_{ij}\omega_l^2) = 0 \quad (1)$$

onde: K e M são as matrizes de rigidez e massa do sistema estrutural.

A solução da Eq. (1) leva à determinação de autovalores, ω_l , com seu autovetor correspondente, para os graus de liberdade. Para determinar com precisão as primeiras frequências naturais, um estudo de convergência de malha foi realizado. Na Figura 2, direita, são mostradas as formas modais correspondentes aos quatro primeiros modos de vibração cujas frequências são 7.651, 8.157, 8.913 e 9.345 Hz, respectivamente. Esses valores das primeiras frequências de vibração, relativamente altos, justificam que o posterior análise e cálculo estrutural possa ser realizado a partir da aproximação quase-estática, utilizando os coeficientes de pressão média.

3.2 Análise dos efeitos de escala do modelo e da interação aerodinâmica

A análise é feita com base nos coeficientes de pressão locais. Os coeficientes foram determinados em 96 pontos distribuídos em cada superfície (superior ou externa, inferior ou interna). Conceitualmente, os coeficientes são cargas adimensionais por meio de parâmetros de referência e, em particular, coeficiente de pressão média local é definido pela expressão (2):

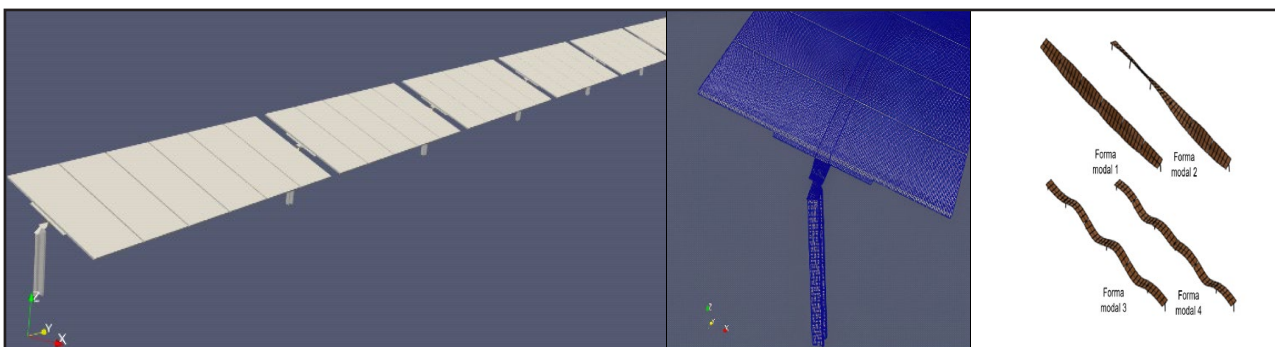
$$c_p = \frac{1}{n} \left(\sum_k \Delta p_k \right) / q \quad (2)$$

onde: Δp_k é a diferença de pressão estática entre o ponto de medição (tomada de pressão na superfície) e a pressão estática de referência;

$q = 0.5 \rho V_{ref}^2$ é a pressão dinâmica e V_{ref} a velocidade de referência;

k é a numeração das tomadas que vai da tomada 1 à n .

Figura 2 – Esquema geral do modelo 3D, discretização dos elementos finitos e formas modais



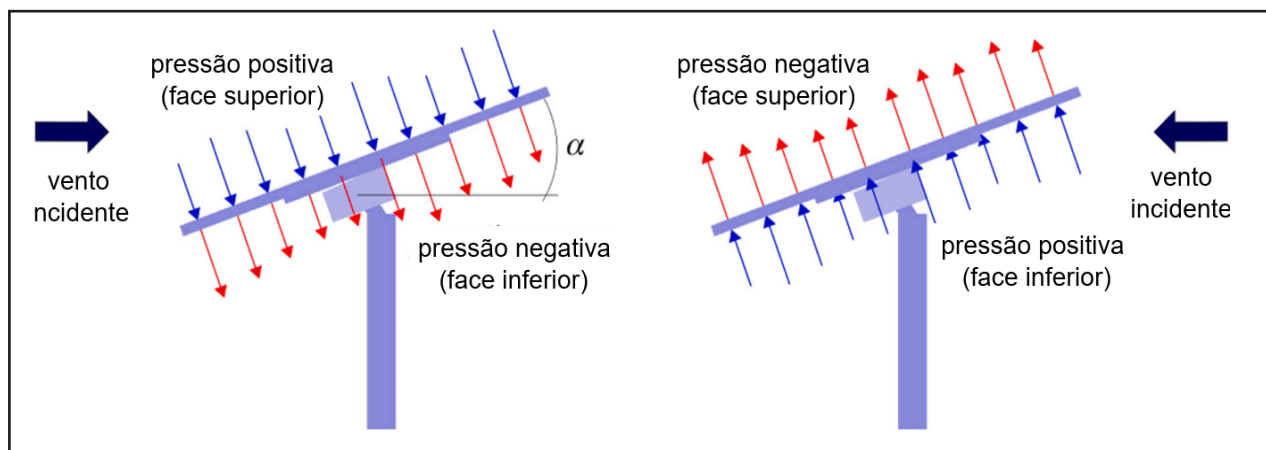
Fonte: Autores/as (2023)

A avaliação experimental foi realizada para diferentes ângulos de inclinação (0°, 5°, 10°, 20°, 30° e 50°) do painel e 24 direções de vento incidente (a cada 15°), porém, a análise aqui apresentada restringe-se às situações mais críticas, ou seja, a inclinação do painel é avaliada apenas para = 20° e as direções do vento incidente que causam as situações de carga aerodinâmica local mais severas são 0°, 150° e 180°. A Figura 3 ilustra esquematicamente como os valores de pressão positiva e negativa (sucção)

devem ser considerados para o cálculo do coeficiente de pressão resultante que ocorre nas direções do vento de 0° e 180° . Nas Figuras 4 a 9, MI identifica o modelo do módulo fotovoltaico isolado, enquanto MS identifica o modelo do setor do parque solar (array).

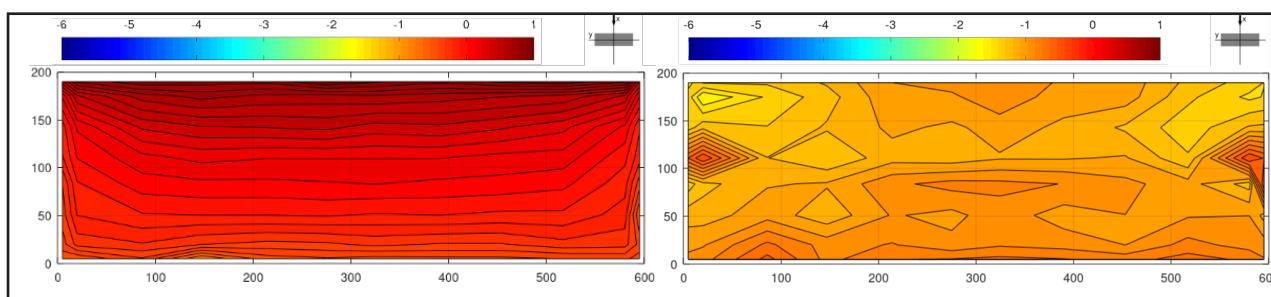
A Figura 4 mostra os valores dos correspondentes ao modelo isolado (MI) para o vento incidente a 0° . Na face superior, os valores positivos próximos de +1 ocorrem na zona de barlavento do módulo (zona de estagnação) e vão diminuindo até se tornarem negativos e atingirem valores próximos de -0,5 a sotavento. Na face inferior, a distribuição é mais uniforme e todos os pontos apresentam valores de sucção, desde -0,7 até valores localizados de -1,35 (vórtice nos cantos).

Figura 3 – Sinais dos valores de pressão na face superior e inferior do painel



Fonte: Autores/as (2023)

Figura 4 – Coeficientes de pressão na face superior do módulo (esquerda) e na face inferior (direita) para o modelo isolado na direção de vento 0° (MI - 0°)

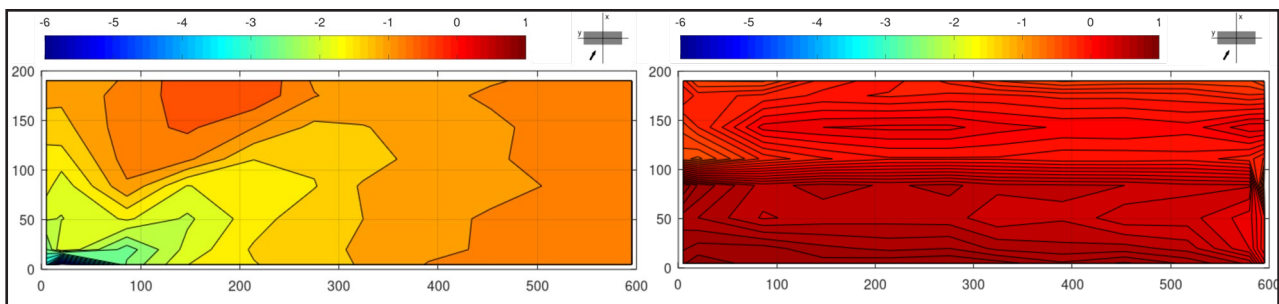


Fonte: Autores/as (2023)

Na Figura 5 é indicada a distribuição de c_p correspondente a MI - 150°. Na face superior, embora todos os valores sejam negativos, no canto esquerdo estão claramente definidas as duas linhas de vórtice que causam sucções localizadas muito altas (da ordem de -6,0). Os valores que ocorrem na face inferior atingem c_p máximos de 0,9.

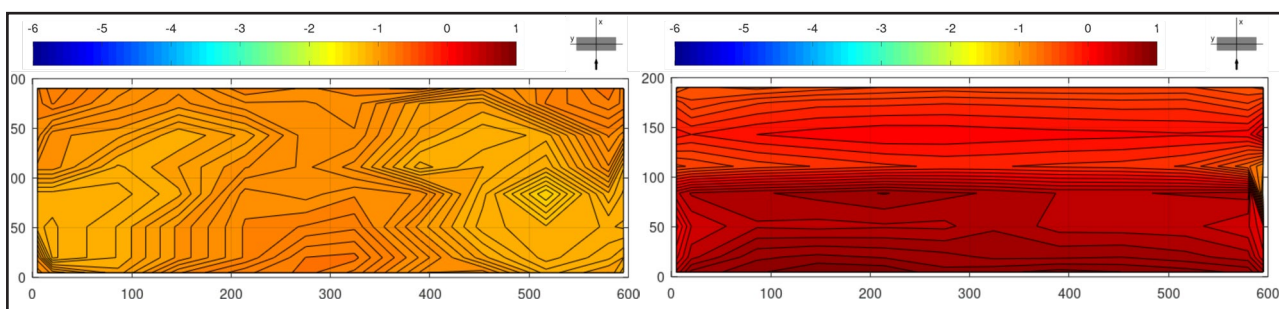
No caso do MI - 180°, a Figura 6 indica que ocorre uma situação semelhante ao MI - 0°. No entanto, neste caso, as pressões positivas ocorrem na parte inferior e se estendem um pouco mais para sotavento do que no caso anterior. Isso se deve ao fato de que a virada de 180° na direção do vento causa uma configuração aerodinâmica diferente da situação de vento incidente a 0°.

Figura 5 – Coeficientes de pressão na face superior do módulo (esquerda) e na face inferior (direita) para o modelo isolado na direção de vento 150° (MI – 150°)



Fonte: Autores/as (2023)

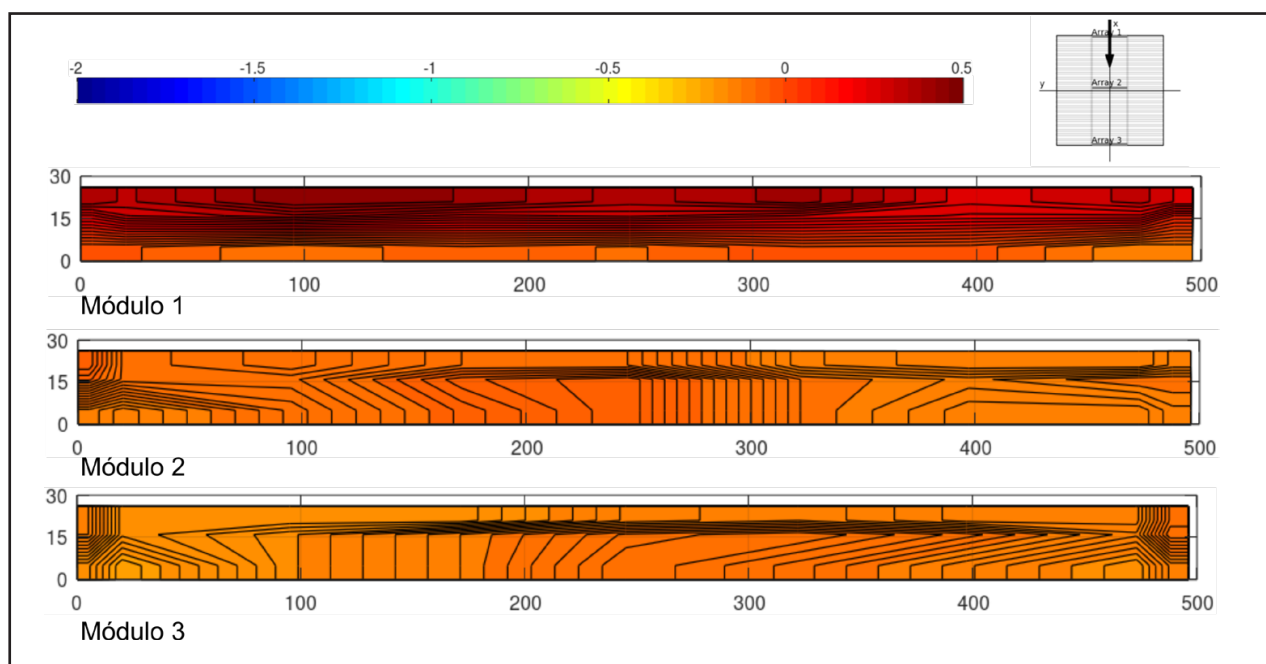
Figura 6 – Coeficientes de pressão na face superior do módulo (esquerda) e na face inferior (direita) para o modelo isolado na direção de vento 180° (MI – 180°)



Fonte: Autores/as (2023)

A Figura 7 indica os valores do C_p para MS - 0° e, em comparação com a Figura 4 correspondente ao MI - 0°, mostra consistência com aquela situação, pelo menos para o módulo-painel localizado na posição mais a barlavento. A grande diferença ocorre em relação aos valores máximos de pressão que mal atingem o valor +0,5 enquanto no MI - 0° chegaram a +1,0. Claramente isso se deve à impossibilidade física de localizar linhas de tomadas mais próximas da borda no caso do MS - 0° e isso determina um efeito de escala. Nos dois módulos localizados na posição mais a sotavento dentro do conjunto, os valores de C_p são de sucções bastante baixas (na ordem de -0,1 a -0,3). Neste caso, em relação ao MI - 0°, isso indica um efeito de proteção decorrente do conjunto de módulos do entorno, em relação aos módulos que foram instrumentados.

Figura 7 - Coeficientes de pressão na face superior do módulo para o modelo do conjunto (array) na direção de vento 0° (MS - 0°)



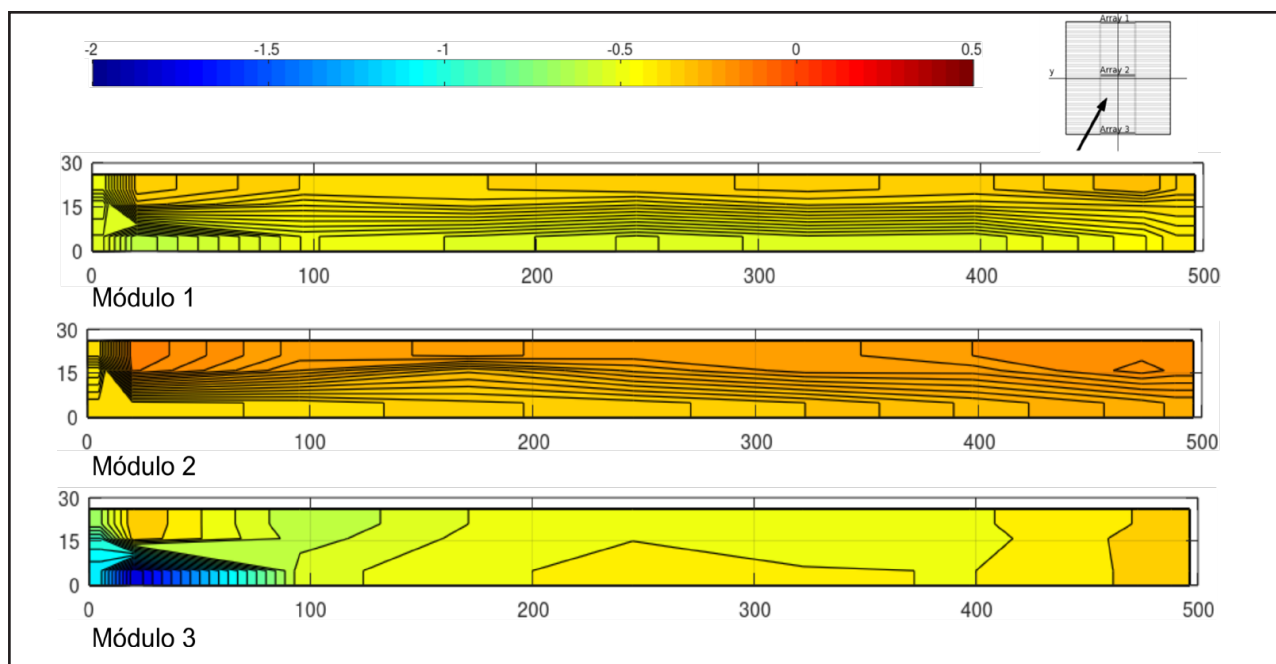
Fonte: Autores/as (2023)

A comparação dos valores obtidos para MS -150° (Figura 8) em relação ao MI -150° também mostra consistência. Para o módulo-painel localizado na posição mais à barlavento, as linhas de vórtice de canto são claramente percebidas, apenas que os valores de sucção são atenuados pelo efeito de escala. No módulo-painel localizado

na posição central do conjunto, este efeito local é bastante atenuado, porém, no módulo na posição mais a sotavento ele se manifesta novamente, embora não com tanta intensidade quanto no módulo na posição mais a barlavento.

As Figuras 7 a 9 destinam-se a avaliar os efeitos de escala do modelo e os efeitos de interação aerodinâmica (efeitos de vizinhança). Embora indiquem os valores das distribuições de C_p para as mesmas três direções de vento como no caso do modelo isolado, os valores de C_p apresentados para o modelo de um setor do parque solar se restringem à face superior. Os valores de C_p na face inferior também foram obtidos, mas considera-se que não são tão ilustrativos para avaliar esses efeitos quanto os da face superior.

Figura 8 – Coeficientes de pressão na face superior do módulo para o modelo do conjunto (array) na direção de vento 150° (MS – 150°)

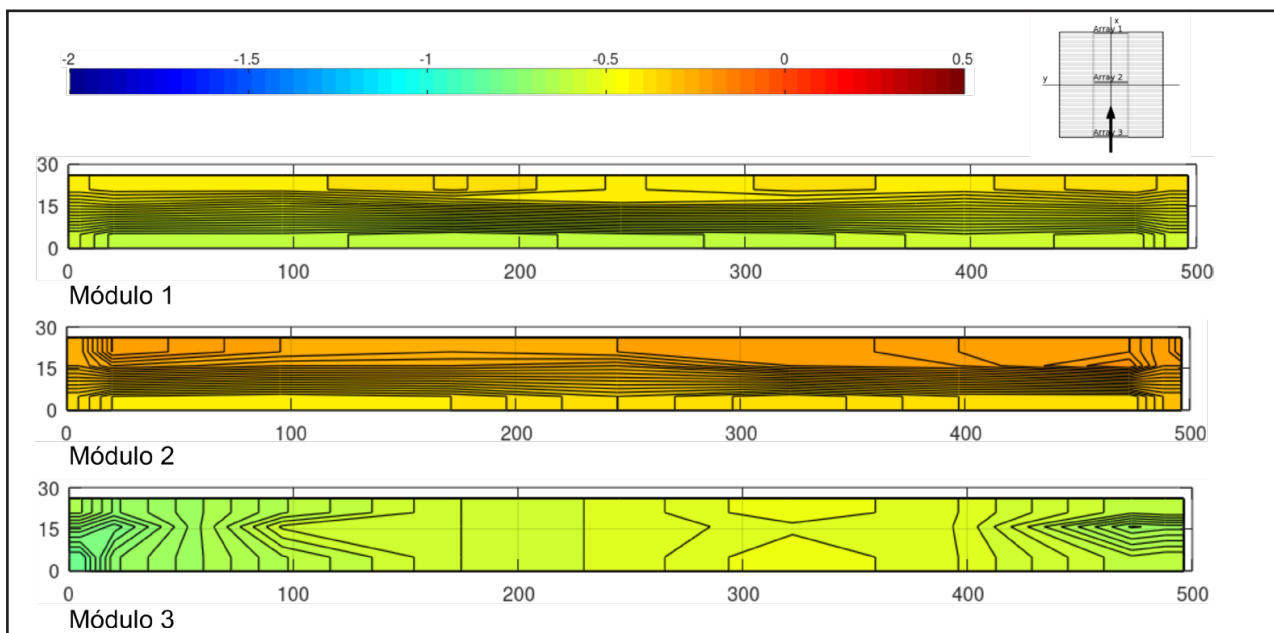


Fonte: Autores/as (2023)

No caso do MS - 180° , da Figura 9, ocorre algo semelhante ao caso do MS - 150° . Ou seja, há coerência geral nos valores obtidos. Para o painel-módulo mais a barlavento, a distribuição dos valores de sucção é comparável com MI - 180° , apenas que os valores de sucção são atenuados pelo efeito escala. No módulo-painel localizado na posição

central do conjunto, os valores são bastante atenuados, mas no módulo localizado mais a sotavento, as sucções voltam a aumentar. Claramente, isso indica que ocorre um rearranjo do fluxo na parte do modelo localizada mais a jusante e o efeito de proteção é mais forte na parte central do setor modelado.

Figura 9 – Coeficientes de pressão na face superior do módulo para o modelo do conjunto (array) na direção de vento 180° (MS – 180°)



Fonte: Autores/as (2023)

3.3 Análise dos coeficientes de força resultante

O coeficiente de força global é definido pela expressão (3), onde A_k representa a área tributária correspondente à tomada e A_T é a área total do painel.

$$C_F = \left(\sum_k A_k \Delta p_k \right) / q A_T \quad (3)$$

A Tabela 1 resume os coeficientes de força resultante (soma algébrica das pressões na face superior e inferior) para uma inclinação do painel de 20°, no caso do modelo isolado. É possível constatar que, de fato, as situações mais críticas ocorrem para

as direções de vento de 150° e 180°. A direção de 0° também foi incluída porque é interessante verificar seus valores em relação a 180°.

Tabela 1 – Coeficientes de força neta com uma inclinação do painel de 20°

0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
1.13	1.07	1.01	0.83	0.39	0.04	-0.09	-0.27	-0.65	-1.12	-1.26	-1.24	-1.24

Fonte: Autores/as (2023)

4 CONCLUSÃO

A análise experimental das cargas aerodinâmicas geradas pelo vento atmosférico em painéis fotovoltaicos é realizada através de um estudo com dois modelos em escala diferentes. Uma avaliação dinâmica preliminar justifica o uso da análise quase-estática baseada em coeficientes de pressão média. A comparação dos valores obtidos no modelo isolado e no modelo do setor do parque solar permite analisar os efeitos de escala e os efeitos de interação aerodinâmica.

Os maiores valores de sucção localizada ocorrem na direção oblíqua para o modelo isolado. Devido a efeitos de escala, esses valores localizados são menores no modelo de conjunto de painéis, porém, em ambos os casos, as linhas de vórtice de canto são definidas. Os maiores valores de força global resultante também são verificados para essa direção oblíqua do vento. O modelo do conjunto de painéis permite também verificar que os módulos localizados na zona central do parque solar têm um efeito de proteção acentuado nas cargas de vento em relação aos módulos localizados na posição frontal (barlavento). O estudo também permite determinar qual configuração geométrica em relação ao vento frontal incidente causa a pior situação de carga aerodinâmica.

Para dar continuidade a esta investigação, sempre dentro da aplicação da aproximação quase estática, serão avaliados os coeficientes de valores RMS e valores

de pico de pressões flutuantes a fim de verificar qual diferença quantitativa existe com relação à aplicação de os coeficientes de valor médio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Beatriz Iturri, Juan Manuel Rodríguez Aguirre, Julián Ortiz e Cesar Gustavo Veroli.

REFERÊNCIAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES. **Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones**. CIRSOC 102, INTI, Bs. As., 2001.

DI RADO, H.; MROGINSKI, J.; BENEYTO, P.; AWRUCH, A. A symmetric constitutive matrix for the nonlinear analysis of hypoelastic solids based on a formulation leading to a non-symmetric stiffness matrix. **Commun. Numer. Methods Eng.** 24 (11), 1079–1092, 2008.

VAJA, N. K.; BARRY, O. R.; TANBOUR, E. Y. On the modeling and analysis of a vibration absorber for overhead powerlines with multiple resonant frequencies. **Engineering Structures**, 175: 711-720, 2018.

WARSIDO, W.P.; BITSUAMLAK, G.T.; BARATA, J.; CHOWDHURY, A.G. Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array. **J. Fluids Struct.** 48, 295–315, 2014.

WITTWER, A. R.; PODESTÁ, J. M.; CASTRO, H. G.; MROGINSKI, J. L.; MARIGHETTI, J. O.; DE BORTOLI, M. E.; PAZ, R. R.; MATEO, F. Wind loading and its effects on photovoltaic modules: An experimental - computational study to assess the stress on structures. **Solar Energy**, 240, 315-328, 2022.

WITTWER, A.R.; MÖLLER, S.V. Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE. **J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.** 84 (3), 307–320, 2000.

ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L. **The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics**. Elsevier, 2005.

Contribuições de Autoria

1 – Adrián Roberto Wittwer

Engenheiro mecânico, doutor em engenharia pela Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional do Nordeste - UNNE

<https://orcid.org/0000-0001-9716-4375> • a_wittwer@yahoo.es

Contribuição: conceituação, metodologia, validação, curadoria de dados, análise formal, investigação, escrita – primeira redação, supervisão, software

2 – Juan Manuel Podestá

Engenheiro civil, doutor em engenharia com menção em mecânica computacional pela Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional do Nordeste - UNNE
<https://orcid.org/0000-0002-2021-9486> • jmapodesta@gmail.com
Contribuição: conceituação, metodologia, software, análise formal, investigação

3 – Jorge Omar Marighetti

Engenheiro mecânico, mestre em ciências da engenharia pela Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional do Nordeste - UNNE
<https://orcid.org/0009-0000-5179-7775> • jomaringha@gmail.com
Contribuição: conceituação, metodologia, curadoria de dados, investigação

4 – Javier Mroginski

Engenheiro civil, doutor em engenharia pela Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional do Nordeste - UNNE
<https://orcid.org/0000-0001-7495-7735> • javiermro@gmail.com
Contribuição: metodologia, investigação, software

5 – Gisela Marina Alvarez y Alvarez

Engenheira civil, mestre em engenharia ambiental pela Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional do Nordeste - UNNE
<https://orcid.org/0009-0009-3944-6767> • giselaalvarezyalvarez@yahoo.com.ar
Contribuição: supervisão, validação, visualização, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição

6 – Hugo Guillermo Castro

Engenheiro civil, doutor em engenharia com menção em mecânica computacional pela Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional do Nordeste - UNNE
<https://orcid.org/0000-0003-1715-1238> • hugo.castro@ing.unne.edu.ar
Contribuição: software, análise formal, recursos

7 – Mario Eduardo de Bortoli

Engenheiro civil, doutor em engenharia pela Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional do Nordeste - UNNE
<https://orcid.org/0009-0004-0438-6278> • m_debortoli@yahoo.com
Contribuição: recursos, administração do projeto

8 – Marcelo Italo Adotti

Engenheiro eletricitista e mecânico, mestre em ciências da engenharia pela Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional do Nordeste - UNNE
<https://orcid.org/0009-0005-8271-9207> • italoadotti@gmail.com
Contribuição: escrita – revisão e edição, validação, visualização

9 – Fernando Gabriel Mateo

Gerente de projeto sênior - Divisão de Energia da Jinko International
<https://orcid.org/0009-0006-9933-3316> • fernando.mateo@jinkopower.com
Contribuição: recursos, aquisição de financiamento, administração do projeto

Como citar este artigo

WITTWER, A. R.; PODESTÁ, J. M.; MARIGHETTI, J. O.; MROGINSKI, J.; ALVAREZ Y ALVAREZ, G. M.; CASTRO, H. G.; BORTOLI, M. E. de; ADOTTI, M. I.; MATEO, F. G. Testes de módulos fotovoltaicos em túnel de vento: efeitos de escala e interação aerodinâmica. **Ciência e Natura**, v. 46, esp. 2, e87757, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X87757>.