

Experimental Approach of Photovoltaic System in Operation for Performance Prediction of Natural Convection

E. Cornils, A. Brasil, and O. Gaidos

Abstract—The main objective this paper is to assess the thermal model of the convective heat transfer from photovoltaic solar modules. Experiments were carried out in laboratory and in-situ conditions. Whereby the convective heat transfer in low wind speed was considered, while evaluating the relation between the classical and natural convective situations. The form as that system change heat with the environment causes impact in efficiency of generation of energy. The energy balance is described by incident irradiation in the photovoltaic modules and the forms that system converts that energy as irradiation, convection, conduction and generation of a potential difference. The classic problem of flat inclined plates was used to understand the behavior of the photovoltaics module. The existing correlations using dimensionless numbers, developed in experimental studies and numerical simulations, have limitations in their use and in many cases do not provide results that approximate a photovoltaic system in operation. In this work, an experimental bench was developed and placed in a natural convection chamber with a data acquisition system for temperature, voltage and current. The small-scale experiments allowed realistic estimation, for the assessment of the thermal performance in a real power plant configuration. The experimental data showed a suitable correlation, of more than 0.9, with the installed system, suggesting its capability to predict the behavior of the system.

Index Terms—Photovoltaic systems, Thermal variables measurement, Fluid flow measurement, Energy conversion, Solar energy.

I. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por energia vem se consolidando como uma característica da sociedade contemporânea. Assim, a geração de eletricidade brasileira baseada em fontes tradicionais (derivados do petróleo, hidroelétricas e termoeletrônicas) deve buscar no aspecto relacionado ao comprometimento com o meio ambiente uma diversificação através do uso de energias renováveis. Sendo assim uma geração de energia alinhada aos compromissos do Brasil, expressos na Contribuição Nacional Determinada (NDC) para

realização dos objetivos da Convenção-Quadro da ONU sobre mudanças no clima, no qual o Brasil se compromete a reduzir os níveis de emissões em 37%, até 2025 e de 43% até 2030 quando comparado a nível registrado em 2005 [1], [2].

Uma das possíveis soluções para essa exigência no Brasil aponta para a geração a partir de fontes alternativas, e dentre as fontes de energia a solar apresentou um crescimento de 316,2% de 2017 para 2018 [3].

O Brasil, com imensa parte do território localizado em zonas tropicais, dispõe de uma situação privilegiada com relação a irradiação solar. O semiárido brasileiro é uma área de grande potencial produtivo para geração de energia a partir de módulos fotovoltaicos, porém nessa região são encontradas situações de altas temperaturas que reduzem a eficiência de conversão de energia [4].

O potencial de amplificação do uso de energia solar fotovoltaica aumenta o interesse na maximização da eficiência de geração [5].

E para obter vantagem estratégica nesse cenário se faz necessário o investimento em inovação tecnológica, assim como as evoluções nessas áreas que impactam diretamente sobre os negócios [6].

Porém, barreiras relativas ao desempenho de geração ainda produzem algumas dúvidas sobre o potencial e retorno econômico. Pesquisas que tem como objetivo melhorar e potencializar a eficiência de geração, levando em consideração diversos fatores do sistema produtivo, vem se consolidando. Entre elas aquelas que têm como objeto o comportamento térmico das células dos módulos fotovoltaicos e a redução na eficiência de conversão de irradiação em energia elétrica [7].

Para conversão da energia fotovoltaica, o painel solar deve ser submetido à irradiação, porém usualmente quando ocorrem os maiores níveis de exposição são aqueles em que são alcançadas as maiores temperaturas no módulo. Assim alguns autores destacam que ao intervir na temperatura de um arranjo fotovoltaico pode haver melhoria na eficiência de geração [8], [9].

Para interferir na eficiência de conversão devem ser avaliados alguns fatores que causam impacto na transferência de calor com o meio como: o ângulo de inclinação do arranjo para melhorar tanto a exposição à irradiação quanto as trocas de calor por convecção natural e forçada com o ambiente nos quais os sistemas se encontram inseridos.

A descrição numérica que caracteriza a transferência de calor dos painéis com suas vizinhanças, foi formulada através do problema clássico de placas planas horizontais, inclinadas e

E. M. Cornils, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, eugeniicornils@yahoo.com.br.

A. P. Brasil, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, brasil@unb.br.

O. F. Gaidos, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, ogaidos@gmail.com.

Corresponding author: Eugênia Cornils.

verticais, porém quando há variações no contexto de montagem e dimensões do sistema ainda apresenta resultados divergentes em alguns estudos [10], [11].

Além disso, existe grande variação das propriedades do fluido na transferência de calor desse fenômeno físico, assim são utilizadas correlações entre grandezas adimensionais como os números de Grashof (Gr), Prandtl (Pr), Rayleigh (Ra) e Nusselt (Nu) para descrever o comportamento do sistema independentemente das configurações da montagem e das dimensões do arranjo.

As correlações entre esses números são objeto de estudo de diversos autores já que encontram divergência de resultados em simulações e experimentos realizados. As simulações, em geral, ocorrem em ambientes ideais e apresentam resultados aproximados, mas dependem principalmente da utilização de softwares de simulação computacional [12].

Alguns trabalhos recentes delimitam o uso das correlações para cada estado de inclinação e intervalo de variação dos números adimensionais, e das configurações do escoamento (laminar, de transição e turbulento) [12], [13], [10] e [14].

Assim esse trabalho busca comparar os resultados de desempenho térmico de uma bancada experimental do Laboratório LEA (Laboratório de energia e ambiente) da UnB (Universidade de Brasília) com um sistema de microgeração fotovoltaica conectado à rede (SFCR) [15] em funcionamento na Universidade UniCEUB em Brasília. Monitorando as variáveis físicas de temperatura, assim como variáveis elétricas de tensão e de corrente da bancada experimental foram calculados os números adimensionais (Nu, Ra, Gr e Pr), os quais permitem ter uma estimativa do desempenho térmico convectivo para a usina de microgeração.

Dentre as principais contribuições desse trabalho estão: a capacidade de um experimento fornecer resultados aproximados da transferência de calor convectivo de um SFCR, e desse validar os modelos de correlação existentes na literatura com os resultados experimentais e da instalação fotovoltaica em um centro universitário.

Assim esse estudo pode contribuir na área de sistemas fotovoltaicos através do desenvolvimento de modelos de SFCR em operação, fornecendo estimativas através de métodos experimentais.

Nesse tópico serão apresentados assuntos que dão suporte para o desenvolvimento desse trabalho.

A. Convecção Natural em Placas Planas Inclinadas

O fenômeno de convecção em placas planas inclinadas está relacionado às trocas de calor entre um sólido e um fluido em movimento, dois mecanismos explicam essa troca, o da difusão que está relacionado ao movimento aleatório das moléculas e da advecção que leva em consideração o movimento global do fluido [16].

Entre as primeiras camadas do fluido e o sólido ocorre a difusão que transporta o calor para as camadas seguintes e de acordo com a lei de resfriamento de Newton as perdas convectivas são proporcionais a diferença de temperatura entre a superfície aquecida e o fluido que está escoando, como descrito na (1).

$$\dot{q}_{conv} = h(T_w - T_\infty) \quad (1)$$

em que: \dot{q}_{conv} - é a transferência de calor através da convecção, h - coeficiente de transferência térmica por convecção local, T_w - temperatura na superfície do corpo aquecido e T_∞ - temperatura do fluido fora da camada limite superficial.

Esse fenômeno depende da situação física do escoamento, como a montagem e geometria da placa e as propriedades do fluido, assim surgem as dificuldades em determinar o h , já que a convecção natural ocorre em função do equilíbrio das forças gravitacionais e de empuxo por causa da dilatação do fluido em função dos gradientes de temperatura. Para calcular as variáveis do sistema é necessário estudar as propriedades da camada limite próxima a superfície aquecida. Diversos estudos foram realizados e modelados em função dos números como: Nu (Nusselt), Gr (Grashof), Ra (Rayleigh), Re (Reynolds) e Ri (de Richardson) para estabelecer correlações empíricas para condições específicas [13], [17], [18] e [19].

Para avaliar o comportamento do sistema são analisadas as equações que governam o escoamento e a transferência de calor. Para a descrição do escoamento num plano bidimensional utilizamos a equação da continuidade, do momento com o fator que leva em consideração a ação da gravidade nas placas planas inclinadas e de conservação de energia, para um escoamento laminar, incompressível e em duas dimensões. Utilizando o ar como fluido newtoniano e considerando a força de flutuação de Boussinesq [13] e [20].

A partir dessas equações é desenvolvido o referencial teórico de placas planas horizontais, verticais e inclinadas.

O sistema das placas planas inclinadas pode ser elucidado pelo fato do fluxo ser induzido pela flutuação de temperatura próxima a placa cuja temperatura T_w é mantida constante e num valor superior ao da temperatura ambiente T_{amb} [18]. As velocidades desenvolvidas nesse sistema são pequenas quando comparadas a velocidade do som e o fluido é considerado como incompressível.

O desenvolvimento do comportamento de placas planas foi elaborado e revisado por diversos estudos [21], [22], [20].

Dentre eles, pesquisadores desenvolveram equações empíricas baseadas em dados experimentais com uma única correlação capaz de abranger os regimes laminares e turbulentos. Foi constatado que existe uma série de discrepâncias entre expressões propostas e resultados experimentais para esses problemas. As diferenças de resultados são usualmente descritas pela variação de propriedades físicas e variações indefinidas do ambiente [23].

Assim se tornou viável para autores relacionar parâmetros adimensionais, como faixas do número de Rayleigh, provenientes da teoria de camada limite, com resultados teóricos.

As equações (2), (3), (4) e (5) são utilizadas para cálculo das grandezas adimensionais que caracterizam o escoamento em uma placa plana inclinada [12].

$$Ra_y = Gr \cdot Pr \quad (2)$$

$$Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \cos \theta \Delta T \beta}{\mu^2} \quad (3)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\kappa} \quad (4)$$

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\kappa} \quad (5)$$

em que: Ra_y - número de Rayleigh, Gr - número de Grashof, Pr - número de Prandtl, Nu - número de Nusselt, L - comprimento característico de uma placa aquecida, ρ - massa específica, g - campo gravitacional, θ – ângulo de inclinação da placa com relação à vertical, ΔT - diferença de temperatura entre a placa e o fluido fora da camada limite superficial à placa, β - coeficiente de expansão volumétrica, μ - viscosidade dinâmica molecular, C_p - calor específico a pressão constante, κ - condutividade térmica, h - coeficiente de transferência térmica por convecção local.

Em (3) a gravidade g é substituída por $g \cdot \cos\theta$, que representa a aceleração da gravidade transversal à placa inclinada. Esse estudo foi reproduzido e continua sendo utilizado mesmo que tenha suas limitações como ser utilizado apenas para ângulos que variam entre 0° e 60° [16], [11].

O número de Nu determinado na equação 5 pode ser interpretado como o coeficiente de transferência térmica por convecção adimensional. Como a temperatura tem impactos na eficiência de geração do sistema fotovoltaico, esse coeficiente representa como ocorrerão as trocas de calor por convecção necessárias para o resfriamento do módulo, e são utilizados em vários artigos para descrever e comparar com resultados por não depender das dimensões do sistema solar [7], [23], [24],[10].

B. Correlações Empíricas para Placas Planas Inclinadas

No desenvolvimento das correlações desses números adimensionais [23] sugeriram uma equação válida para a maioria dos números de Rayleigh e de Prandtl (6), que é válida para o número de Rayleigh de 10^{-1} a 10^{12} , e os números adimensionais utilizam a temperatura de filme como referência que é uma média entre a temperatura do módulo e do meio [17].

$$\overline{Nu}_y = \left(0,825 + \frac{0,387 Ra_y^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,437}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2 \quad (6)$$

A partir de autores clássicos surgiram uma série de trabalhos que procuram desenvolver correlações entre os números adimensionais para descrever melhor os escoamentos [21], [24].

Após o desenvolvimento de diversas correlações foi necessário analisar quais condições que cada uma delas melhor se adequava [12], [13], [14] e [10]. Para as condições do experimento desse trabalho podem ser utilizadas as correlações apresentadas na Fig. 1, por atenderem aos valores do número de Grashof e o tipo de escoamento para a superfície superior da placa.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse tópico serão apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento desse trabalho

A. Relação entre a Temperatura dos Módulos e a Irradiação

Para modelar e analisar os impactos da temperatura nos arranjos de módulos fotovoltaicos é necessário estabelecer relações entre as variáveis que tem impacto na troca de calor

das células com o meio.

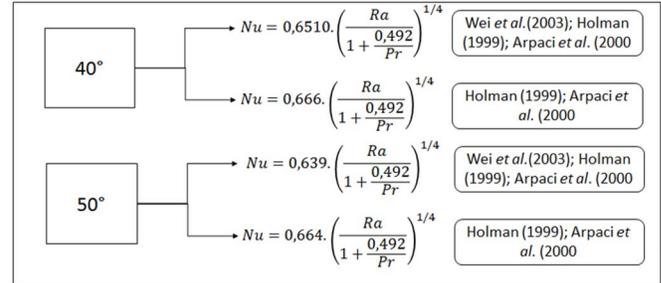


Fig. 1. Algumas correlações utilizadas para as condições do escoamento do experimento desse trabalho, adaptada de [12].

Em [5] foi desenvolvido um método numérico para estimar a variação da temperatura dos módulos fotovoltaicos no tempo. Os resultados desse método foram comparados a resultados de um sistema instalado em Northumberland (UK). Para descrever o comportamento da temperatura foi desenvolvido um balanço energético.

O método numérico de Euler foi utilizado para resolução da equação diferencial do problema em questão. O erro pôde ser comparado com [25] com uma média de 2K de erro. Assim o trabalho foi classificado como adequado principalmente para prever geração de potência em pequenos intervalos em dias nublados.

Houve um ajuste adequado entre os resultados do método numérico e as medições realizadas no local [5], porém em momentos de grande variação de temperatura seria necessário um modelo específico.

Para comparar as variações de temperatura, em [26] foi desenvolvido um novo modelo termal que incorporou as condições atmosféricas. Em seu estudo a temperatura do painel para condições de operação teve maior relação com a variação da temperatura ambiente, a velocidade e direção do vento.

Trabalhos atuais como o de [27] procuraram determinar a temperatura das células solares fotovoltaicas de forma tridimensional comparando as informações de sensores infravermelhos e observando a sensibilidade da temperatura com relação a irradiação. No trabalho pôde ser observado que o erro de medição diminuía à medida que crescia a irradiação incidente do módulo solar.

B. Descrição da Bancada

A bancada foi desenvolvida para analisar isoladamente o aspecto de troca de calor com o meio através de um balanço de energia.

A bancada experimental desenvolvida (Fig. 2) é composta por duas placas planas de aço inoxidável unidas utilizando pasta térmica e uma película flexível que gerava calor distribuído homoganeamente pela superfície.

Um imã foi utilizado para conectar a placa da superfície inferior à bancada de acrílico, para reduzir as perdas de energia térmica por condução de calor na placa entre o imã e a placa inferior. Foi inserido um isolante de Neoprene de dimensões bastante reduzidas entre o imã e a placa inferior para evitar que houvesse uma grande área isolada, com pouca troca de calor com o meio e que assim houvesse menos troca por condução e mais trocas por convecção natural dentro da câmara.

Um dos objetivos da bancada foi posicionar as placas com o

controle adequado do ângulo ocorrendo o mínimo possível de intervenção no fluxo do fluido, que seria gerado na superfície da placa para a ocorrência de troca de calor com o meio, já que em estudos realizados foi constatada para placas aquecidas a presença de uma pluma de ar quente percorrendo a placa e fluindo para cima [28].

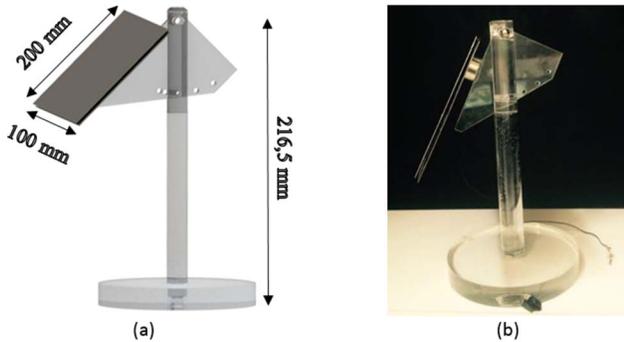


Fig. 2. Suporte para controle do ângulo da bancada experimental composta de aquecedor flexível e placa de aço inoxidável que foi inserido na câmara de convecção natural junto ao sistema de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados foi realizado com um Arduino, 2 termopares do tipo K, 1 sensor de corrente, 1 sensor de tensão (divisor resistivo), 1 giroscópio e 1 sensor do tipo DS18B20 para medir temperatura ambiente.

Os sensores de temperatura foram calibrados em um banho térmico e com tabelas dos sistemas de calibração do laboratório LEA/UnB.

Para isolar o funcionamento do sistema e ter controle das outras variáveis que pudessem afetar os resultados, foi utilizada uma câmara de convecção natural com o intuito de evitar a incidência de vento durante a realização dos experimentos (Fig. 3).

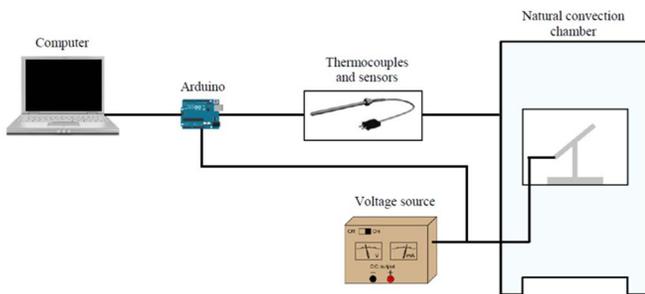


Fig. 3. Esquema dos experimentos realizados, com a câmara de convecção natural, a bancada experimental, ligada a fonte de tensão e um sistema de aquisição de dados.

A Câmara de convecção natural possui uma cabine com as seguintes dimensões: 2,32 m de altura, 1 m de comprimento e 1,15 m de profundidade, e é isolada pelas paredes, e possui um visor de vidro refratário.

Antes de dar início as medições de temperatura do módulo, esperava-se sua estabilização com a variação máxima de 1 °C referente à temperatura ambiente. O tempo de estabilização da temperatura do módulo era em torno de 30 minutos e após a estabilização os valores eram utilizados para calcular o valor do $h_{\text{experimental}}$ e os valores do h_{Chu} .

Para calcular o h_{conv} foi considerado que dentro da câmara de

convecção natural um balanço de energia instantâneo, de forma que a única energia cedida para o meio era da fonte de tensão para um determinado tempo (Pot– Potência) para o módulo, que poderia ser comparada ao aquecimento causado pela irradiação solar nos módulos fotovoltaicos.

Enquanto que Q_{conv} (Calor por convecção natural) e Q_{irr} (calor irradiado pelo módulo aquecido) seriam as duas formas principais de trocar a energia com o meio dentro da câmara.

Assim como está exibido nas (7) e (8); e a partir dessa definição é montada a equação para determinar o valor experimental do coeficiente de convecção natural h .

$$Pot = Q_{\text{conv}} + Q_{\text{irr}} \quad (7)$$

$$V \cdot i = h_{\text{conv}} 2A(T_w - T_{\text{amb}}) + \sigma \varepsilon 2A(T_w^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (8)$$

A partir dos valores do coeficiente de convecção (h_{conv}), os números de Nu e Ra do problema eram calculados e comparados para verificar a sua aderência aos valores teóricos.

C. Descrição do Sistema Fotovoltaico do UniCEUB

Os resultados da bancada experimental foram comparados com um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) instalado e em operação no UniCEUB localizado na capital federal Brasília, no Distrito Federal localizado na latitude de 15,77° Sul e 47,89° Oeste com a altitude de 1.130 m apresentando clima tropical com estação seca [29], exibido na Fig. 4.



Fig. 4. Sistema fotovoltaico em operação localizado no telhado do bloco 8 do Uniceub.

O sistema possui 152 painéis fotovoltaicos instalados cada um de 265 W, 2 inversores de frequência e com uma potência instalada de 38,76 kWp. A usina consegue abastecer completamente o bloco 5 da universidade e parcialmente o bloco 8.

Foram feitos registros fotográficos para documentar as imagens da disposição do sistema solar fotovoltaico. Os dados de temperatura foram colhidos dos painéis que abastecem o bloco 8 (indicados pelas setas na Fig. 4), eles estão dispostos em duas partes, uma na esquerda e outro na direita. A inclinação dos dois conjuntos é aproximadamente de 3°.

Foram realizadas visitas a esse sistema em dias de pouco vento, para aquisição de imagens termográficas e valores de temperatura foram utilizados o termovisor FLIR I3 e a câmara

FLIR A325 com a leitura do software ThermoCAMResearcher Professional 2.10.

Nas visitas foram registrados valores de temperatura ambiente (registrada no sistema), potência imediata gerada (no inversor), temperatura dos módulos (média de 10 medições em cada um dos lados) e irradiação (utilizando o piranômetro - Hukseflux LP02).

Os painéis eram da *Canadian Solar* do modelo CS6P-265 P, com uma eficiência em condições de laboratório de 16,47% em condições de laboratório e dimensões conforme Fig.5.

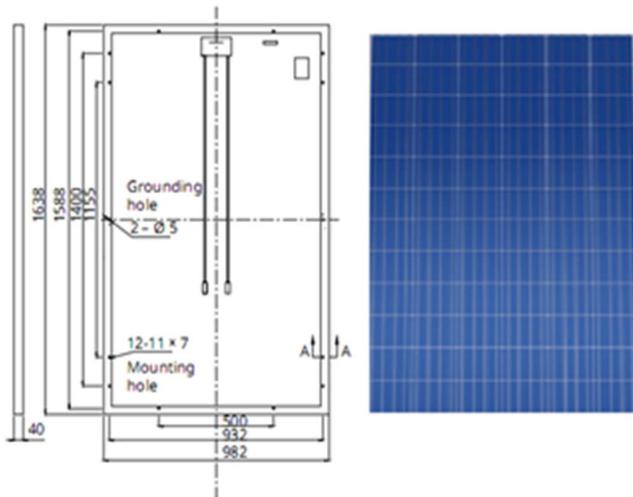


Fig. 5. Informações sobre a placa Canadian Solar CS6P-265P, utilizada no sistema fotovoltaico do UniCEUB, com dimensões de 1,63 x 0,98 m. adaptada de [30].

Pode ser constatado que o grupo do lado direito está menos quente quando comparado ao do lado esquerdo, já que a posição do sol no momento da imagem estava com seus raios incidindo perpendicularmente a superfície do grupo esquerdo de painéis (Fig. 6).

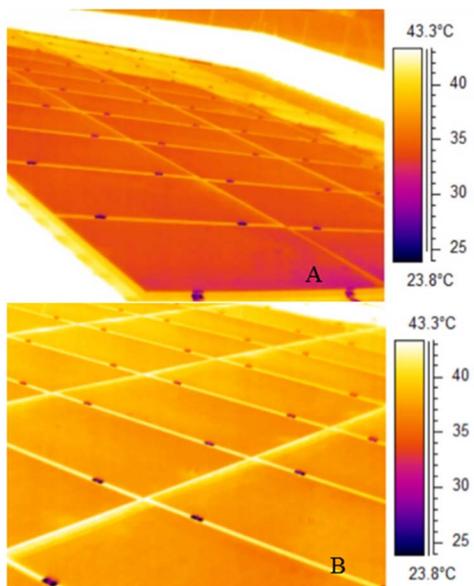


Fig. 6. Foto termográfica do sistema em operação do UniCEUB do lado direito (A) e esquerdo (B). Pode ser observado que o gradiente de temperatura é pequeno sobre os módulos, isso permite validar as medições das amostras de temperatura.

Porém na imagem termográfica não houve variação relevante de temperatura sobre os painéis, assim a técnica de captar de forma aleatória medições e gerar uma média pode ser utilizada para gerar uma estimativa adequada de resultados de temperatura média.

Para comparar os resultados desses dois sistemas houve a necessidade de utilizar os valores de Nu , Ra , Gr e Pr , já que as dimensões entre os sistemas eram bem diferentes.

Os valores do coeficiente de convecção (h_{conv}) foram calculados para o SFCR conforme a metodologia apresentada em [5] por se tratar de um outro sistema em operação, utilizando a diferença entre a temperatura do ambiente e do módulo fotovoltaico nos momentos das medições. E também para calcular os adimensionais foram utilizadas interpolação dos valores das propriedades do fluido para temperatura ambiente local.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medições realizadas no sistema instalado e em funcionamento do UniCEUB foram comparadas com resultados empíricos clássicos [23] para validar as medições.

No sistema em operação foram feitos registros fotográficos para documentar as imagens da disposição do sistema solar fotovoltaico. Os painéis foram dispostos em duas partes, uma na esquerda e outra na direita. No telhado da direita a inclinação do telhado encontrada foi de 3,5° e da esquerda de 3,3°. As inclinações foram analisadas com referência ao plano horizontal (vide Fig.4). Para obter dados foram escolhidos os dias com situação de baixa velocidade de vento para avaliar a convecção natural.

Na banca experimental dentro da câmara de convecção foram realizados 14 experimentos com os ângulos variando entre 15° e 80°, os valores foram comparados a [23].

O método experimental para avaliar as características do escoamento foi validado através dos resultados dos experimentos melhorias foram obtidos resultados mais aproximados da literatura [23].

Através da Tabela I podem ser observadas as médias e os desvios padrões dos valores de Nusselt para o sistema instalado e para o resultado experimental.

TABELA I
RESUMO DOS DADOS DOS SISTEMAS

Sistema	$Nu_{médio}$	Desvio padrão
<i>Instalado</i>	15,55	2,96
<i>Experimental</i>	18,91	1,55

Na Fig. 7 são apresentados os dados dos experimentos realizados, as correlações [23] e os resultados do sistema em operação, esses ficaram dentro de uma faixa de 10% de erro.

O sistema instalado apresentou resultados de um número de Nusselt inferior aos empíricos da literatura [23] e ao da banca experimental na maioria dos casos. Isso pode ser atribuído as simplificações que foram utilizadas no modelo e as condições ideais dentro do laboratório. A existência de pouco vento e trocas por condução com o frame dos módulos além das perdas no inversor e nos sistemas elétricos.

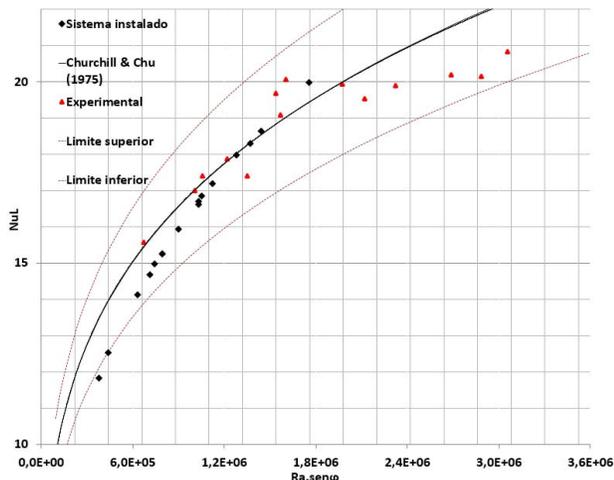


Fig. 7. Gráfico do número de Nu do sistema instalado, do empírico [23] e de valores experimentais.

Para desenvolver o estudo os resultados foram comparados com outros estudos [12] como pode ser visualizado na Fig. 8.

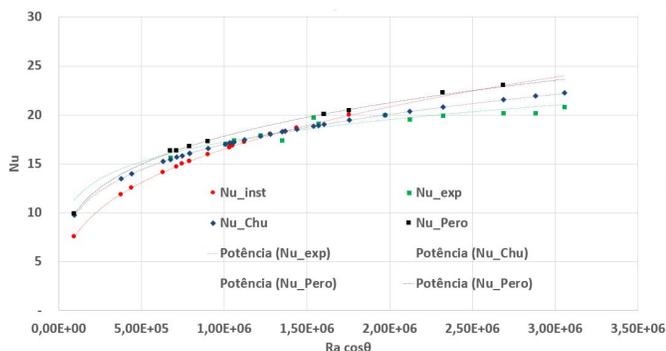


Fig. 8. Gráfico dos números de Nu do sistema em operação, dos resultados experimentais e das correlações desenvolvidas e classificadas por [12] e [23].

Para retornar a valores que não estavam presentes nas medições foi utilizada a regressão de potência, pois em comparação com as outras apresentou o menor erro quadrático de 0,092, enquanto a linear apresentou um erro quadrático de 10,50 e a logarítmica de 3,95. A equação (9) foi a regressão de potência que relacionou o Nu do sistema instalado com o $Ra.cos\theta$, e obteve um R^2 de 0,99.

$$Nu = 0,158.(Ra_y cos\theta)^{0,3362} \tag{9}$$

Além de que na literatura é comum observar as correlações entre Ra e Nu como no formato de uma expressão de potência [12], [31].

A correlação entre os valores do sistema instalado com [12] e [23] foi a maior de 0,99, validando as correlações empíricas existentes e com o experimento foi 0,97. Esse valor indica uma certa capacidade de previsão de dados do método experimental utilizado nesse trabalho.

O fato do Experimento 2 ter reduzido o valor da correlação com o sistema instalado pode ser atribuído as características do escoamento no experimento, já que houve redução de perdas na bancada experimental como inserção de um isolante de Neoprene entre a placa de aço inoxidável e o suporte além de um controle mais adequado do ângulo de inclinação.

Já que os números adimensionais que caracterizam o

escoamento são definidos a partir da configuração do escoamento, de suas características geométricas e condições de temperatura [12].

A correlação entre os valores foi sempre superior a 0,90 mostrando uma aderência entre os resultados (Tabela II).

Assim fica sugerido que o escoamento do Experimento 2 teve uma variação bem próxima ao do sistema instalado e em funcionamento (Tabela II).

TABELA II
CORRELAÇÕES ENTRE DADOS DO SISTEMA INSTALADO, DO EXPERIMENTO E CORRELAÇÕES EMPÍRICAS

Sistemas	Instalado	Experimental	Churchil[23]	Bojan[12]
Instalado	1	-	-	-
Experimental	0,97	1	-	-
Churchil[23]	0,99	0,97	1	-
Bojan[12]	0,99	0,97	1	1

Outro fator que pode ter contribuído para isso seriam as perdas do sistema instalado, julgadas como desprezíveis como a transferência de energia por condução com o frame e as perdas no cabeamento terem sido reduzidas no experimento 2, após a melhoria do isolamento do contato entre o imã e a placa de aço inoxidável.

IV. CONCLUSÃO

As modelagens matemáticas e realização de experimentos geram resultados para estimativas de conversão de energia em usinas solares.

Nesse estudo os resultados para a bancada experimental e o sistema instalado foram próximos entre si e entre os resultados empíricos existentes na literatura. As correlações entre os valores experimentais, do sistema instalados e das correlações empíricas clássicas foram todas superiores a 0,90.

Assim os experimentos produziram estimativas adequadas para descrever o desempenho térmico por convecção natural do SFCR, principalmente para valores similares do número de Ra, esse altamente dependente das condições do escoamento como características geométricas e ambientais.

Portanto análises futuras relativas ao posicionamento do módulo com relação a sua inclinação podem ser utilizadas para estimar as trocas de calor por convecção natural, reduzindo a temperatura do módulo e melhorando sua eficiência de conversão de energia.

Experimentos realizados localmente podem oferecer estimativas mais adequadas que simulações computacionais realizadas para esse estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UnB, ao UniCEUB e ao laboratório LEA por fornecer o material necessário para realização da pesquisa, ao auxílio dos professores e os colegas do PMEC da UnB, por todas orientações e trocas científicas.

Agradecemos aos colegas de pesquisa e pelo suporte no laboratório.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível

Superior (CAPES) pelo benefício da bolsa de estudo durante o Doutorado.

REFERÊNCIAS

- [1] COP21, UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement, Decision 1/CP.21, 2016.
- [2] E. L. La Rovere, "Low-carbon development pathways in Brazil and 'Climate Clubs'," Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, vol. 8, no. 1, pp.439, Nov. 2016.
- [3] E. P. E. (Empresa Brasileira de Pesquisa Energética) Balanço Energético Nacional, Ano base 2018, Relatório Síntese. Rio de Janeiro, 2019.
- [4] B. O. Busson, B., P. H. F. Dias, I. M Dupont, P. H. M. Campos, P. C. M. de Carvalho and E. A. Q. Barroso, "Validação de Modelos de comportamento térmico de painéis fotovoltaicos para o semiárido brasileiro," Cong. Brasileiro de Energia Solar, Gramado -RS, 2018.
- [5] A. D. Jones and C. P. Underwood, "A thermal model for photovoltaic systems," Solar energy, vol. 70, no. 4, pp. 349-359, 2001.
- [6] C.B. Rosa, J.C.M. Siluk, L. Michels, "Proposal of the Instrument for Measuring Innovation in the Generation Photovoltaics," IEEE Lat. Am. Trans. 2016.
- [7] A. C. P Brasil, "Dynamical modeling and simulation of PV-solar panels," Revista Brasileira de Energia Solar, vol. 7, no. 1, pp. 16-23, 2016.
- [8] T. N. Anderson, M. Duke, G. L. Morrison, and J. K. Carson, "Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) solar collector," Solar Energy, vol. 83, no. 4, pp. 445-455, Apr. 2009.
- [9] D. L. Evans, "Simplified method for predicting photovoltaic array output," Solar energy, vol. 27, no. 6, pp. 555-560, 1981.
- [10] C. K. Lim, J. H. Heo, and B. J. Chung, "Natural convection heat transfer on inclined plates," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, vol. 35, no. 7, pp. 701-708, 2011.
- [11] B. R. Rich, "An investigation of heat transfer from an inclined flat plate in free convection," Trans. ASME, vol. 75, pp. 489-499, 1953.
- [12] D. P. Bojan, J. L. Klimenta, D. S. TASI, J. L. Peuteman, O. K. Dardan, and N. A. Ljiljana, "Modeling the effect of the inclination angle on natural convection from a flat plate: The Case of a Photovoltaic Module," Thermal Science, vol. 21, no. 2, pp. 925-938, 2017.
- [13] W. Z. Black, and J. K. Norris, "The Thermal Structure of Free Convection Turbulence from Inclined Iso thermal Sur faces and its Influence on Heat Transfer", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 18, no. 1, pp. 43-50, Jan. 1975.
- [14] S. J. Mccoll, P. Rodgers and V. Eveloy, "Thermal management of solar photovoltaics modules for enhanced power generation," Renewable Energy, vol. 82, pp. 14-20, Oct. 2015.
- [15] Resolução Normativa, Nº. "482, de 17 de abril de 2012. "Estabelece condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências", 2012.
- [16] F. P. Incropera, D. P. DeWitt and T. L. Bergman, "Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa," Sexta Edição, Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2008.
- [17] A. Bejan, E. J. G. De Jesus Zerbini and R. S. E. Simões, Transferência de calor, Edgard Blucher, 1996.
- [18] T. Schott, "Operation temperatures of PV modules-A theoretical and experimental approach," in K860065 6th EC Photovoltaic Sol. Energy Conf., 1985.
- [19] M. J. Wilson, and M. C. Paul, "Effect of mounting geometry on convection occurring under a photovoltaic panel and the corresponding efficiency using CFD," Solar Energy, vol. 85, no. 10, 2011.
- [20] G. C. Vliet, "Natural convection local heat transfer on constant-heat-flux inclined surfaces," ASME, 1969.
- [21] T. Fuji and H. Imura, "Natural Convection Heat Transfer from a Plate with Arbitrary Inclination," Heat Mass Transfer, vol.15, no. 4, pp.755-776, Apr. 1972.
- [22] J. P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill, Singapura, 1999.
- [23] S. W. Churchill and H. H. S. Chu, "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate," International Journal of Heat Mass Transfer, vol. 18, no. 11, pp. 1323-1329, Nov. 1975.
- [24] C. M. Jubayer, K. Siddiqui, and H. Hangan, "CFD analysis of convective heat transfer from ground mounted solar panels," Solar Energy, vol. 133, pp. 556-566, Aug. 2016.
- [25] M. K. Fuentes, "Thermal model of residential photovoltaic arrays," in Proc. of 17th IEEE PV Spec. Conf., pp. 1341-1346, 1984.
- [26] S. Armstrong, W. G. Hurley, "A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions," Applied Thermal Engineering, vol. 30, no. 11, pp. 1488-1495, Aug. 2010.
- [27] G. Mangeni, et al, "Photovoltaic module cell temperature measurements using linear interpolation technique," in Proc. I2MTC, Turin, Italy, pp. 1-6, IEEE, 2017.
- [28] L. A. Pinheiro, A. C. P. Brasil, E. C. M. Silva, "Convecção natural em painéis fotovoltaicos," em Cong. Nac. de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.
- [29] E. Nimer, "Climatologia do Brasil", Rio de Janeiro: IBGE 2ed., 1989.
- [30] Solar C. User Manual of CS6P-260/265P-SD. March 2016.
- [31] W. T. Kierkus, "An analysis of laminar free convection flow and heat transfer about an inclined isothermal plate," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 11, no. 2, pp. 241-252, Feb. 1968.



Eugênia Cornils Monteiro Possui mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Pernambuco, está cursando doutorado em Ciências Mecânicas na UnB e realizou especialização pelo PROMINP na Universidade Federal de Pernambuco. Tem experiência profissional na área de Engenharia de Produção atuando principalmente nos seguintes temas: meio ambiente, energias renováveis, competitividade, produtividade, sistemas de gestão da qualidade e planejamento estratégico. É professora de Engenharia da UniCEUB.



Antonio Cesar Pinho Brasil Júnior Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (1982) com mestrado em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro (1985). Seu Doutorado na área de Thermique Energetique foi obtido na Ecole Centrale de Lyon - França em 1992. Atualmente é professor associado da Universidade de Brasília. As atividades Acadêmicas do professor estão associadas ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao Centro de Desenvolvimento Sustentável da UnB. Na área de Ciências Mecânicas os principais temas de interesse são: termociências e energias renováveis. Alternativamente o docente atua na área de desenvolvimento sustentável, com interesse nos modelos para o desenvolvimento nos biomas Amazônia e pantanal, explorando temáticas de pesquisa que envolvam de maneira interdisciplinar a sustentabilidade de opções tecnológicas.



Oscar Fernando Gaidos Possui Ensino Médio, do Colégio Marista Champagnat, Pasto, Colômbia. Possui graduação em Engenharia Física - Universidade do Cauca, Popayán, Colômbia (2008), Mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e Automação na Universidade de Brasília (2012). Doutor em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e Automação na Universidade de Brasília (2018). Fez curso de formação de Projetista de Circuitos Integrados (2012). Tem experiência na área de Microeletrônica, Instrumentação, Sistemas embarcados (Microcontroladores (NXP, PIC, AVR e Arduino), FPGA, Sistemas Híbridos Reconfiguráveis), com ênfase em integração de sistemas hardware e software, Circuitos integrados, PCB (Printer Circuit Board - Altium, Eagle), Aplicativos para Smartphones com Android, Equipamentos Eletromédicos, Compatibilidade Eletromagnética e Processamento Digital de Imagens.