

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE TÉCNICA DE RESFRIAMENTO PASSIVO PARA REGULAÇÃO TÉRMICA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Vinicius Marson, vinicius.marson@unesp.br¹

Domisley Dutra Silva, domisleydutra@gmail.com¹

João Batista Campos Silva, campos.silva@unesp.br¹

Elaine Maria Cardoso, elaine.cardoso@unesp.br^{1,2}

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira.

²UNESP - Universidade Estadual Paulista/Câmpus de São João da Boa Vista, Av. Profa. Isette Correa Fontão, 505 - Jardim das Flores, São João da Boa Vista - SP, 13876-750

Resumo. Os sistemas fotovoltaicos (PV) são amplamente utilizados para geração de energia; no entanto, a maioria dos módulos comerciais tem uma baixa eficiência de conversão da radiação solar incidente em eletricidade sob condições operacionais ideais. O restante é transformado em energia térmica, provocando um aumento da temperatura do módulo que, consequentemente, afeta a produção de energia e diminui a vida útil do equipamento. Uma forma de evitar a degradação térmica de um módulo fotovoltaico é reduzindo sua temperatura de superfície; através de resfriamento do sistema (ou evitando que ele aqueça) durante a operação. No presente trabalho realizou-se um estudo teórico e experimental do comportamento térmico de um sistema PV acoplado a um dissipador de calor segmentado comparando a redução de temperatura em relação à temperatura de operação de um sistema PV convencional. O sistema de resfriamento passivo consistiu em aletas de alumínio segmentadas dispostas na região central da superfície posterior do módulo fotovoltaico. A presença das aletas acarretou em uma diminuição da temperatura do módulo (de até 5,6 °C) e, portanto, a eficiência de conversão e a produção de energia aumentaram em média 2,3% e 2%, respectivamente, em comparação com o módulo convencional. Pelo modelo teórico de predição da temperatura do módulo fotovoltaico se obteve resultados satisfatórios em comparação com os valores obtidos experimentalmente, para ambos os sistemas PV analisados, com um desvio médio de aproximadamente 3%. O dissipador de calor proposto melhora a troca de calor convectiva e resfria o sistema fotovoltaico satisfatoriamente; tal redução na temperatura pode evitar perdas na eficiência de conversão elétrica sob condições de alta irradiância e prolongar a vida útil dos painéis fotovoltaicos.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, sistema de resfriamento, eficiência energética, simulação numérica.

1 INTRODUÇÃO

Dentre as vantagens do uso da energia solar fotovoltaica tem-se que: é livre de emissão de poluentes durante a operação auxiliando na diminuição de problemas relacionados ao aquecimento global, apresenta reduzido custo operacional e baixo valor de manutenção oferecendo mais possibilidades de geração de energia (em pequena e larga escala) em comparação a outras fontes renováveis de energia (Parida e Iniyani, 2011; Wang; Zhou e Huo, 2014).

Observando os dados apresentados no Balanço Energético Nacional de 2021 (BEN, 2021), produzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) vinculada ao Ministério de Minas e Energia, a geração de energia elétrica de origem solar teve um expressivo crescimento de 61,5% e, apesar de contribuir com apenas 0,32% da oferta interna de energia elétrica em 2020, apresentou um aumento de 32,9% na capacidade instalada em 2020.

Diante do exposto, fica evidente a grande expansão do setor fotovoltaico no Brasil, nas mais variadas faixas de potência instalada. No entanto, muitas instalações de micro e minigeração distribuídas não são tão eficientes devido, principalmente, ao desconhecimento de fatores que comprometem a eficiência do sistema fotovoltaico, citando, por exemplo, que incrementos acima de 25 °C nas temperaturas de módulos em condições normais de operação têm efeito negativo na

eficiência elétrica, levando a perdas térmicas de até 0,9 h/dia da capacidade de produção de energia (Santiago et al., 2018).

Assim, tem-se como interesse científico e tecnológico validar se sistemas de resfriamento passivos aplicados a módulos fotovoltaicos comerciais são capazes de diminuir a temperatura de operação, aumentando assim a conversão energética e prolongando a vida útil do sistema. No presente projeto estuda-se analítico-numérica e experimentalmente (em condições reais de aplicação) dois módulos fotovoltaicos de p-Si com 350 Wp nas condições de montagem livre e acoplado a um sistema de resfriamento passivo, ambos inclinados segundo a latitude local, para melhor aproveitamento da radiação solar direta e difusa.

2 METODOLOGIA

2.1 Aparato experimental

Neste estudo, os dados experimentais são coletados diariamente no período entre o nascer e pôr do sol a cada 30 segundos para dois módulos fotovoltaicos idênticos (PV1 e PV2, Figura 1), de p-Si com 350 Wp, contemplando valores de: temperatura ambiente (T_a); temperatura do solo frontal (T_{solof}); temperatura do solo posterior (T_{solop}); umidade relativa (U_r); velocidade do vento (v) medida a 3 m do solo; irradiância global no plano inclinado do módulo (G_i), na latitude local de 20° e em direção ao Norte geográfico; temperatura na parte posterior central dos módulos PV (T_p), utilizando oito sensores em cada módulo; e, tensão (V) e corrente (I) geradas em cada módulo.



Figura 1. Montagem de PV1 e PV2, ambos sem a presença do sistema de resfriamento passivo.

Os módulos PV1 e PV2 utilizados para os experimentos são do fabricante Canadian Solar modelo CS3U-350P, dimensões 2000 x 992 x 40 mm, composto por 144 células de p-Si (156,75 x 78,38 mm) com potência nominal máxima STC de 350 Wp e eficiência de 17,64% em STC.

O acoplamento do sistema de resfriamento passivo (Figura 2), consistindo de 4 aletas segmentadas de alumínio em formato de L (150 mm de comprimento, 2 mm de espessura, 100 mm de altura e 25 mm de base), é feito por meio de fita dupla face com propriedade superior de condução térmica e adesão (Série TR Modelo 5320F), na região central e posterior do módulo PV2; enquanto, o módulo PV1 é mantido sem sistema de resfriamento acoplado para fins de comparação. O sistema de resfriamento passivo está posicionado na região central do PV2, devido esta ser a região de maior temperatura (Silva, 2021).

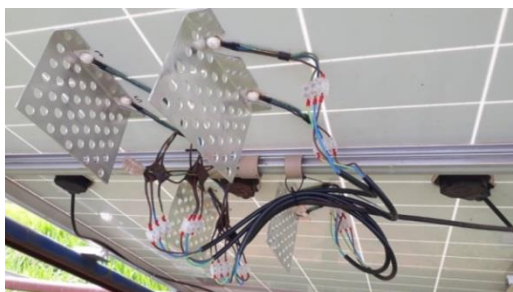


Figura 2. Sistema de resfriamento passivo acoplado na parte posterior do PV2.

Os dados de temperatura de PV1 e PV2 são medidos na parte posterior em oito células da região central de cada módulo (Standard, 2017), por ser a área mais representativa da temperatura média dos módulos PV (Silva, 2021), conforme Figura 3a. O sensor digital de temperatura utilizado é o DS18B20 da Dallas Semiconductor Corp. e a montagem é feita com uma fina camada de pasta térmica entre o sensor e a parte posterior dos módulos, sem remoção do EVA. A parte

exposta do sensor está isolada do ambiente externo com poliestireno expandido e os sensores estão fixados com adesivo instantâneo a base de cianoacrilato. Para leitura das medições é utilizada a plataforma Arduino Mega 2560.

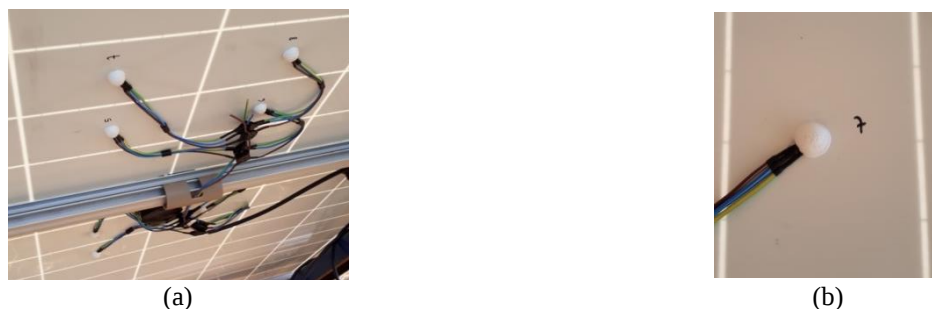


Figura 3. Montagem dos sensores digitais de temperatura. (a) Sensores instalados; (b) Posição do sensor na célula.

Para dissipar a potência elétrica gerada pelos módulos PV1 e PV2, está conectado a cada um deles um circuito de carga puramente resistivo de 300 W com seis lâmpadas halógenas de 50 W e 12 V. A capacidade de 300 W do circuito de carga tem potência superior à gerada pelos módulos em condições NOCT. A tensão e corrente são medidas em circuitos independentes para cada um dos módulos, com precisão de $\pm 1\%$. Os valores de temperatura ambiente e umidade relativa são obtidos com um sensor AM2302-DHT22 montado em abrigo próprio (Figura 4a) e a velocidade local do vento por um anemômetro (Figura 4b). Por fim, a irradiância global no plano dos módulos é registrada pelo equipamento da Instrutherm modelo MES-200, como indicado na Figura 4c.

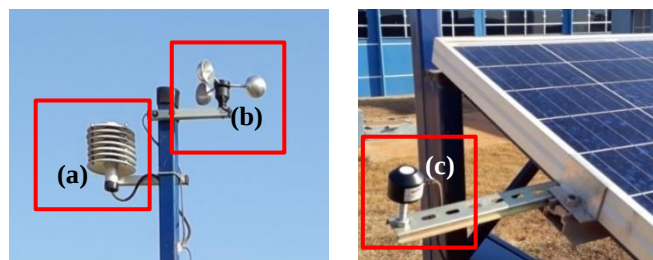


Figura 4. (a) Sensor de temperatura ambiente e umidade, (b) Anemômetro e (c) Irradiância global (Silva, 2021).

Para alimentação do sistema de aquisição tem-se um sistema solar autônomo com módulo PV de 22 W, um controlador de carga PWM de 10 A e uma bateria de 7 Ah. Todos os instrumentos de medição do aparato experimental estão ligados a um sistema de aquisição de dados composto por uma placa Arduino Mega 2560 R3, um relógio digital RTC-DS3231 e uma placa de Micro SD card. Os dados de incerteza e faixa de operação foram fornecidos pelos fabricantes dos instrumentos utilizados e seguem na Tabela 1.

Tabela 1. Dados dos instrumentos de medição utilizados no aparato experimental.

Modelo	Quantidade	Leitura	Unidade de medida	Incerteza	Faixa de operação
DS18B20	18	Temperatura	$^{\circ}C$	$\pm 0,5$	-10 a 85
DHT22-AM2302	1	Temperatura Umidade relativa	$^{\circ}C$ %	$\pm 0,5$ ± 2	-40 a 80 0 a 99,9
Anemômetro	1	Velocidade	m/s	$\pm 0,5$	0 a 33,33
MES-200	1	Irradiância global	W/m^2	± 10	0 a 2.000
Sensor de tensão	2	Tensão contínua	V	± 1	0 a 50
Sensor de corrente ACS712ELC	2	Corrente contínua	A	$\pm 1,5\%$	0 a 30

2.2 Metodologia para análise térmica sem a presença de sistema de resfriamento passivo

Foi realizada uma análise teórica para o painel fotovoltaico, com a intenção de prever sua temperatura em função da irradiação solar (G), temperatura ambiente e velocidade do vento. Para isso foram consideradas as seguintes hipóteses: regime transiente; propriedades termofísicas constantes; e distribuição de temperatura uniforme sobre o painel. A Figura 5 é uma representação do modelo para formulação das equações para determinação da temperatura do painel.

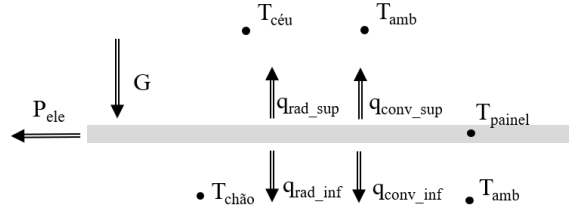


Figura 5. Representação da análise teórica (Reis, 2020).

As variáveis apresentadas na Figura 5 são: temperatura do céu ($T_{céu}$); temperatura do chão ($T_{chão}$); temperatura ambiente (T_{amb}); transferência de calor por convecção a partir da face superior do painel (q_{conv_sup}); transferência de calor por radiação a partir da face superior do painel (q_{rad_sup}); transferência de calor por convecção a partir da face inferior do painel (q_{conv_inf}); transferência de calor por radiação a partir da face inferior do painel (q_{rad_inf}); radiação solar incidente (G).

A variação de temperatura do painel foi determinada, analiticamente, por:

$$C_{PV} \frac{dT_{painel}}{dt} = q_G - (q_{rad_sup} + q_{conv_sup} + q_{rad_inf} + q_{conv_inf} + P_{ele}) \quad (5)$$

na qual C_{PV} é a capacidade térmica do módulo fotovoltaico que é determinada considerando as 6 camadas de materiais que compõem o painel e é calculado de acordo com a Equação 6.

$$C_{PV} = A_{PV} \sum_{i=1}^6 e_i \cdot \rho_i \cdot c_i \quad (6)$$

na qual e_i é a espessura, ρ_i a densidade e c_i o calor específico do material de cada camada (Armstrong e Hurley, 2010).

A taxa de radiação de ondas curtas incidente no plano do módulo PV (q_G) da Equação 5 foi obtida pela Equação 7.

$$q_G = \alpha \cdot \tau \cdot G \cdot A_{PV} \quad (7)$$

na qual G é a irradiância local no plano do módulo, A_{PV} é a área do módulo PV e, α e τ correspondem a absorvidade da célula PV e a transmitância do vidro temperado, respectivamente.

A taxa de transferência de calor por radiação na parte frontal do módulo (q_{rad_sup}) da Equação 5 foi separada em dois termos para calcular a radiação de ondas longas emitida para o céu (q_{rads_ceu}) e para o solo (q_{rads_solo}), conforme as Equações 8, 9 e 10.

$$q_{rad_sup} = q_{rads_ceu} + q_{rads_solo} \quad (8)$$

$$q_{rads_ceu} = \varepsilon_{sup} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot F_{ceuf} (T_{painel}^4 - T_{ceu}^4) \quad (9)$$

$$q_{rads_solo} = \varepsilon_{sup} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot F_{solof} (T_{painel}^4 - T_{solof}^4) \quad (10)$$

nas quais ε_{sup} é a emissividade da face superior do PV, A_{PV} , T_{supf} , T_{ceu} e T_{solof} correspondem à área, à temperatura da superfície frontal do módulo PV, à temperatura do céu e solo frontal, respectivamente, e σ é a constante de Stefan-Boltzmann. A temperatura do céu foi determinada pelas Equações 11, 12 e 13 (Gliha, 2011; Monteith, 2013).

$$T_{ceu} = \sqrt[4]{\varepsilon_{ceu} \cdot (T_a + 273,15)^4} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{ceu} = 0,736 + 0,00577 \cdot (T_{po} + 273,15) \quad (12)$$

$$T_{po} = \frac{b \cdot \left[\ln \left(\frac{U_r}{100} \right) + \frac{a \cdot T_a}{b + T_a} \right]}{a - \left[\ln \left(\frac{U_r}{100} \right) + \frac{a \cdot T_a}{b + T_a} \right]} \quad (13)$$

nas quais ε_{ceu} é emissividade do céu, T_a e T_{po} correspondem à temperatura ambiente e do ponto de orvalho, respectivamente, U_r é a umidade relativa e os valores das constantes a e b recomendados pela literatura para maior precisão são 17,27 e 237,15, respectivamente (Monteith, 2013).

Os fatores de forma da superfície superior do módulo PV para céu e solo F_{ceus} e F_{solos} foram obtidos pelas Equações 14 e 15 em que β é o ângulo de inclinação do módulo PV em relação ao plano horizontal.

$$F_{ceus} = \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad (14)$$

$$F_{solos} = \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (15)$$

A taxa de transferência de calor por radiação na parte inferior do módulo (q_{rad_inf}) da Equação 5, de modo análogo a da Equação 8, foi separada em dois termos para calcular a radiação de ondas longas emitida para o céu ($q_{rad_inf_ceu}$) e para o solo ($q_{rad_inf_solo}$), conforme as Equações 16, 17 e 18.

$$q_{rad_inf} = q_{rad_inf_ceu} + q_{rad_inf_solo} \quad (16)$$

$$q_{rad_inf_ceu} = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot F_{ceui} (T_{painel}^4 - T_{ceu}^4) \quad (17)$$

$$q_{rad_inf_solo} = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot F_{soloi} (T_{painel}^4 - T_{soloi}^4) \quad (18)$$

nas quais ε_i é a emissividade da face inferior do PV e T_{painel} corresponde à temperatura da superfície inferior do módulo PV. F_{ceui} e F_{soloi} são os fatores de visão da superfície inferior do módulo PV para céu e solo, respectivamente, os quais foram obtidos pelas Equações 19 e 20.

$$F_{ceui} = \frac{[1 + \cos(\pi - \beta)]}{2} \quad (19)$$

$$F_{soloi} = \frac{[1 - \cos(\pi - \beta)]}{2} \quad (20)$$

A taxa de transferência de calor por convecção natural e forçada da parte superior do módulo PV (q_{conv_sup}) da Equação 5 foi determinada por meio da Equação 21.

$$q_{conv_sup} = \sqrt[3]{h_{fors}^3 + h_{nats}^3} \cdot A_{PV} (T_{painel} - T_a) \quad (21)$$

na qual T_a é a temperatura ambiente, h_{fors} e h_{nats} correspondem aos coeficientes de transferência de calor por convecção forçada e natural do módulo PV, respectivamente.

Os coeficientes h_{fors} e h_{nats} foram obtidos pelas Equações 22, 23, 24 e 25 (Bejan, 2003).

$$h_{fors} = \frac{\overline{Nu}_{fors} \cdot \kappa_{ar}}{L_{fors}} \quad (22)$$

$$L_{fors} = L_{PV}$$

$$\overline{Nu}_{fors} = \begin{cases} 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}, & \text{para: } Re < 5 \cdot 10^5 \\ 0,037 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}, & \text{para: } Re \geq 5 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (23)$$

$$h_{nats} = \frac{\overline{Nu}_{nats} \cdot \kappa_{ar}}{L_{nats}} \quad (24)$$

$$L_{nats} = \frac{A_{PV}}{2 \cdot (L_{PV} + W_{PV})}$$

$$\overline{Nu}_{nats} = 0,14 \left[(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} - (Gr_{CR} \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \right] + 0,56 \cdot (Gr_{CR} \cdot Pr \cdot \cos \theta)^{\frac{1}{4}}$$

Para: $\begin{cases} 10^5 < Gr \cdot Pr \cdot \cos \theta < 10^{11} \\ 15^\circ < \theta < 75^\circ \end{cases}$ (25)

O ângulo θ corresponde ao complementar do ângulo β de inclinação do módulo PV, e define qual o valor deve ser utilizado para estimativa do número de Grashof crítico, Gr_{CR} (Bejan e Kraus, 2003).

Para as demais variáveis tem-se que κ_{ar} é a condutividade térmica do ar na temperatura de filme; L_{fors} , L_{nats} , A_{PV} , L_{PV} e W_{PV} correspondem aos comprimentos característicos para estimar a convecção da face superior do PV, área, comprimento e largura do módulo PV; já, Gr , Nu , Re e Pr são os números adimensionais de Grashof, Nusselt, Reynolds e Prandtl, respectivamente.

A taxa de transferência de calor por convecção natural da parte inferior do módulo PV (q_{convi}) da Equação 5 foi determinada por meio da Equação 26.

$$q_{convi} = h_{nati} \cdot A_{PV} (T_{painel} - T_a) \quad (26)$$

na qual T_a é a temperatura ambiente e h_{nati} corresponde ao coeficiente de transferência de calor por convecção natural.

O h_{nati} foi obtido pelas Equações 27 e 28 (Bejan, 2003).

$$h_{nati} = \frac{\overline{Nu}_{nati} \cdot \kappa_{ar}}{L_{nati}}$$

$$L_{nati} = L_{PV} \quad (27)$$

$$\overline{Nu} = 0,56 \cdot (Gr \cdot Pr \cdot \cos \theta)^{\frac{1}{4}}$$

Para: $\begin{cases} 10^5 < Gr \cdot Pr \cdot \cos \theta < 10^{11} \\ \theta < 88^\circ \end{cases}$ (28)

O ângulo θ corresponde ao complementar do ângulo β de inclinação do módulo PV, κ_{ar} é a condutividade térmica do ar na temperatura de filme, L_{nati} e L_{PV} correspondem ao comprimento característico na face posterior do PV e ao comprimento do módulo PV, já Gr e Pr são os números adimensionais de Grashof e Prandtl, respectivamente.

Resolveram-se as Equações de 5 a 28 a partir de um valor inicial para temperatura do módulo PV e dos dados ambientais de irradiância no plano inclinado, temperatura ambiente, temperatura do solo frontal e posterior, velocidade do vento e umidade relativa, além dos dados de geração de tensão e corrente fotovoltaica, e as propriedades e dimensões físicas do módulo PV que constam na Tabela 3.

Tabela 3. Valores dimensionais e parâmetros físicos do módulo PV.

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Largura do módulo PV CS3U-350P [58]	W_{PV}	0,992	<i>m</i>
Comprimento do módulo PV CS3U-350P [58]	L_{PV}	2	<i>m</i>
Área do módulo PV CS3U-350P [58]	A_{PV}	1,984	<i>m</i> ²
Absortividade (α) da célula PV [45]	α	0,7	-
Transmitância (τ) do vidro temperado [45]	τ	0,91	-
Emissividade frontal do módulo PV [59]	ε_f	0,85	-
Emissividade posterior do módulo PV [59]	ε_p	-	-

Fonte: Adaptado de Jones e Underwood (2001), Canadian Solar e Armstrong e Hurley (2010).

No instante inicial, no nascer do Sol, considerou-se que o módulo PV está em equilíbrio térmico com o meio e, conseqüentemente, a temperatura ambiente torna-se a condição inicial, possibilitando a aplicação de um método iterativo com o passo igual ao intervalo de coleta dos dados de entrada, a fim de determinar o próximo valor da temperatura do módulo PV até a temperatura no instante final, no caso, a do pôr do Sol.

2.3 Metodologia para análise térmica com a presença de sistema de resfriamento passivo

Uma vez realizada a validação do modelo teórico sem a presença de aletas, uma análise similar foi realizada para o módulo fotovoltaico considerando um conjunto de aletas acopladas em sua face posterior. Considerou-se 4 aletas de alumínio em formato de L, com 150 mm de comprimento, 2 mm de espessura, 100 mm de altura e 25 mm de base. As aletas estão dispostas na região central, distantes das molduras vertical e horizontal. Tal escolha deve-se a resultados anteriores (Silva, 2021), que evidenciaram que para monitoramento da temperatura de operação de módulos fotovoltaicos faz-se necessário somente a determinação da temperatura média de operação da região central do módulo – segundo Silva et al. (2020), para um painel com 60 células seria suficiente o monitoramento de 12 células centrais – representando grande economia de recursos e instrumentação.

Para tal predição da temperatura do painel, é adicionado um termo de transferência de calor referente às aletas (q_{aletas}) na Equação 5, obtendo o novo balanço de energia explicitado pela Equação 29.

$$C_{PV} \frac{dT_{painel}}{dt} = q_G - (q_{rad_sup} + q_{conv_sup} + q_{rad_inf} + q_{conv_inf} + P_{ele} + q_{aletas}) \quad (29)$$

Para essa transferência de calor das aletas é considerado a troca de calor por convecção e radiação das aletas em um único coeficiente de transferência de calor (h_{aleta}), dada pela Equação 30.

$$q_{aletas} = h_{aleta} \cdot n \cdot A_{aleta} (T_{painel} - T_a) \quad (30)$$

A área de uma aleta (A_{aleta}) é dada pela área das suas 5 faces livres somadas, já que uma está em contato com o painel. O coeficiente de transferência de calor das aletas é composto pelos coeficientes de convecção natural (h_{nat_aleta}) e forçada (h_{for_aleta}), juntamente com o de radiação (h_{rad_aleta}), conforme Equação 31. As Equações 32, 33 e 34 mostram como são calculados cada um desses coeficientes.

$$h_{aletas} = \sqrt[3]{h_{nat_aleta}^3 + (h_{for_aleta} + h_{rad_aleta})^3} \quad (31)$$

$$h_{nat_aleta} = \frac{\overline{Nu}_{aleta} \cdot \kappa_{ar}}{S} \quad (32)$$

$$h_{for_aleta} = 0,664 \cdot \kappa_{ar} \sqrt{Re} \frac{\sqrt[3]{Pr}}{L} \quad (33)$$

$$h_{rad_aleta} = \varepsilon_a \cdot \sigma (T_{painel} + T_a) (T_{painel}^2 + T_a^2) \quad (34)$$

sendo S o espaçamento entre as aletas, Re é o número de Reynolds, ε_a é a emissividade das aletas, que é igual a 0,75.

2.4 Metodologia para análise numérica

O módulo fotovoltaico está sendo modelado usando *softwares* Fluent® e Mechanical® do pacote ANSYS® com o objetivo de prever a temperatura média do módulo fotovoltaico, fornecendo como dados de entrada a irradiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento. Está sendo considerado como condições de contorno: fluxo de calor prescrito na superfície frontal do módulo fotovoltaico, correspondendo à irradiação solar; e calor perdido por convecção e radiação para o ambiente.

A análise numérica foi feita de modo análogo à teórica, considerando um regime não permanente; para tanto, usa-se a ferramenta *Transient Thermal* para a solução do problema. É importante ressaltar que essa ferramenta analisa sólidos, portanto, não temos detalhes sobre o escoamento do fluido (ar) até o momento (isso será feito com o auxílio da ferramenta Fluent®).

A grande diferença da análise numérica para a teórica está relacionada à complexidade das equações, visto que há alteração na dimensão da geometria, sendo que a teórica é unidimensional e a numérica tridimensional. O desenho da geometria a ser analisada foi feita com o auxílio da ferramenta *Space Claim*, contida no pacote ANSYS®. A malha foi feita utilizando o sistema automático contido no Mechanical® e foi definido um *Body Sizing* com tamanho 0,01 m na placa para que os elementos ficassem uniformes (Figura 6).

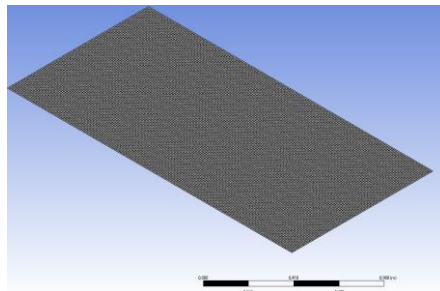


Figura 6. Malha construída no Mechanical®.

A malha obtida contém 20000 elementos, com parâmetros de qualidade de malha como *Skewness* da ordem de 10^{-10} e qualidade ortogonal igual a 1.

Para a obtenção da temperatura média do painel foi considerado como condições de contorno um fluxo de calor na face superior do painel, que consiste na irradiação solar subtraída da potência gerada em cada instante de tempo, convecção nas faces superior e inferior, e radiação em todas as faces do painel, com coeficiente de emissividade 0,91 (Tabela 4). É importante mencionar que foi testado a implementação de convecção nas faces laterais do painel, mas como a espessura do mesmo é muito pequena em relação ao seu comprimento e largura, esse termo não alterou de forma significativa a temperatura de modo que, para evitar gasto computacional, foi desconsiderada.

A validação da análise numérica – para o módulo PV sem a presença de sistema de resfriamento passivo – foi realizada comparando o presente resultado com o resultado experimental e teórico obtidos para diferentes dias. A etapa seguinte, a qual está em andamento, consiste na análise para o módulo PV com o sistema de resfriamento passivo (geometria e material igual ao do modelo teórico descrito no item 2.3) acoplado à sua face posterior.

3 RESULTADOS

Realizada a análise teórica e experimental dos painéis PV1 (referência) e do PV2 (contendo 4 aletas acopladas à parte posterior central), foi selecionado dias limpos, sem a presença de nuvens, para comparação dos resultados obtidos. O modelo térmico desenvolvido para o caso sem a presença do sistema de resfriamento (descrito na seção 2.2) foi validado comparando os resultados atuais com os resultados experimentais obtidos para o módulo PV1, de referência, para dois dias diferentes.

As Figuras 7 e 8 mostram as temperaturas obtidas pelo modelo teórico apresentado na seção 2.2, para o caso sem resfriamento passivo (T_{pv_teo}); a temperatura obtida pelo modelo teórico apresentado na seção 2.3 com resfriamento passivo ($T_{pv_aletas_teo}$); as temperaturas médias do módulo PV obtidas na análise numérica sem aletas (T_{pv_sim}); as temperaturas médias do módulo PV obtidas experimentalmente para o caso sem e com sistema de resfriamento acoplado (T_{pv_exp} e $T_{pv_aletas_exp}$, respectivamente); e a temperatura ambiente (T_{amb}).

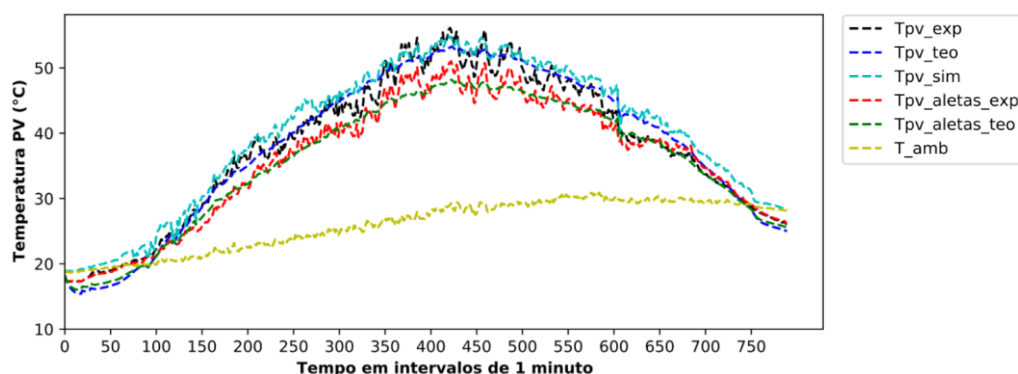


Figura 7. Temperatura do módulo fotovoltaico obtida experimentalmente, prevista pela análise teórica e pela análise numérica, com e sem a presença de aletas (*day #1*).

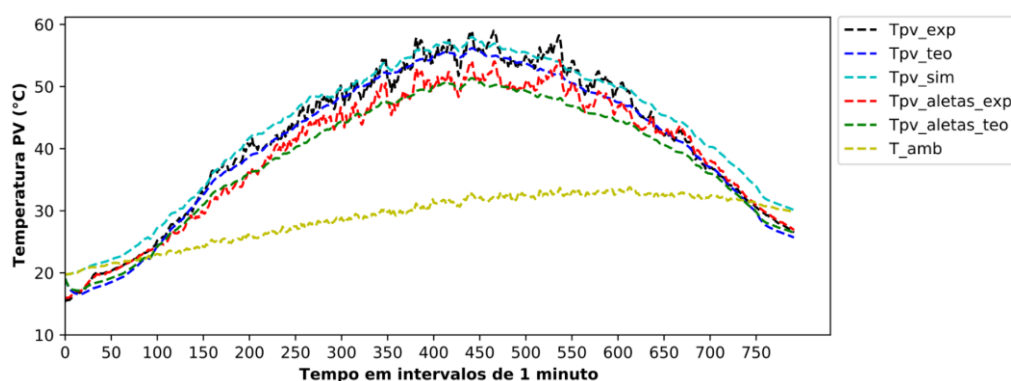


Figura 8. Temperatura do módulo fotovoltaico obtida experimentalmente, prevista pela análise teórica, e pela análise numérica, com e sem a presença de aletas (*day #2*).

Os modelos teórico e numérico para o caso sem resfriamento passivo comparam-se muito bem com os dados experimentais para os dois dias considerados, com um desvio médio de 2,7% e 3%, respectivamente (a diferença máxima encontrada em relação aos dados experimentais foi de 4,2 °C, considerando ambos os modelos teórico e experimental, devido à flutuação da irradiação solar e ao tempo de resposta térmica fotovoltaica). Assim, pode-se afirmar que as análises numérica e teórica desenvolvidas no presente estudo são adequadas, predizendo, satisfatoriamente, a temperatura de painéis PV comerciais.

Para o caso com a presença do sistema de resfriamento passivo, as temperaturas obtidas pelo modelo teórico apresentado na seção 2.3 apresentaram boa concordância com as obtidas experimentalmente para o módulo PV2; um desvio médio de 2,6% foi encontrado para o período mais crítico do dia (10h00 às 16h00). Da mesma forma, pode-se afirmar que a análise térmica desenvolvida na seção 2.3 está adequada, sendo capaz de prever a temperatura de um módulo PV com o sistema de resfriamento proposto.

O efeito da redução da temperatura do módulo PV devido à adição do sistema de resfriamento passivo proposto pode ser observado nas Figuras 7 e 8. Comparando-se as temperaturas do módulo PV1 (referência) com as do PV2 (com as aletas acopladas na sua face posterior), foi obtida uma redução média teórica de 4,3 °C e uma redução média experimental de 3,6 °C. Assim, pode-se afirmar que a condição de montagem acoplada a um dissipador de calor melhora a convecção na parte posterior e, conseqüentemente, diminui a temperatura das células fotovoltaicas aumentando a eficiência de conversão de energia no módulo (observou-se um aumento de eficiência médio de 2%).

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo teórico e uma análise numérica para prever a temperatura de um módulo fotovoltaico sem e com sistema de resfriamento passivo acoplado da superfície posterior do painel PV. Primeiramente, os modelos teóricos sem e com a presença do dissipador de calor – consistindo de aletas de alumínio segmentadas – foram validados comparando-os aos resultados experimentais obtidos para módulos fotovoltaicos em diferentes dias; os modelos teóricos concordaram satisfatoriamente com os dados experimentais obtidos.

Para o caso sem a presença de sistema de resfriamento passivo acoplado ao painel, o modelo numérico concordou satisfatoriamente tanto com o modelo teórico quanto com os dados obtidos experimentalmente.

Para o caso com a presença do sistema de resfriamento, mostrou-se de maneira teórica e experimental, que o dissipador de calor proposto (aletas de alumínio segmentadas em formato de L posicionados na parte central da face posterior do painel) diminui a temperatura de operação do módulo, aumentando sua eficiência de conversão energética.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNESP, Conselho Nacional de Tecnologia e Desenvolvimento Científico do Brasil (Proc. 458702/2014-5 e 309848/2020-2), FAPESP (Proc. 2013/15431-7, 2019/02556-8 e 2021/08818-9).

6 REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10899. Energia solar fotovoltaica – Terminologia. [S.l.]: [s.n.], 2013.
- ARMSTRONG, S.; HURLEY, W. G. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*, Oxford, v. 30, p. 1488-495, 2010.
- BEJAN, A.; KRAUS, A. D. Heat transfer handbook. [S.l.]: Jhon Wiley & Sons, Inc, 2003.
- BEN - Balanço Energético Nacional 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>
- CANADIAN SOLAR. Disponível em: <https://www.csisolar.com/downloads/>. Acesso em: 15 dez. 2021.
- DUFFIE, J.; BECKMAN, W.; NATHAN, B. Solar energy thermal processes, photovoltaics and wind. 5ª. ed. [S.l.]: Wiley, 2020.
- EBAID, M.; GHRAIR, A.; AL-BUSOUL, M. Experimental investigation of cooling photovoltaic (PV) panels using (TiO₂) nanofluid in water-polyethylene glycol mixture and (Al₂O₃) nanofluid in water-cetyltrimethylammonium bromide mixture. *Energy Conversion and Management*, v. 155, p. 324-343, 2018.
- EL MAYS, A., AMMAR, R., HAWA, M., AKROUSH, M.A., HACHEM, F., KHALED, M., RAMADAN, M., 2017. Improving photovoltaic panel using finned plate of aluminum. *Energy Procedia* 119, 812-817.
- EVANS, D. L. Simplified method for predicting photovoltaic array output. *Solar Energy*, v. 27, p. 555-560, 1981.
- EVANS, D. L.; FLORSCHUETZ, L. W. Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration. *Solar Energy*, v. 19, p. 255-262, 1977.
- EVANS, D. L.; FLORSCHUETZ, L. W. Terrestrial concentrating photovoltaic power system studies. *Solar Energy*, v. 20, p. 37-43, 1978.
- GLIAH, O. et al. The effective sky temperature: an enigmatic concept. *Springer Heat Mass Transfer*, Heidelberg, n. 47, p. 1171-1180, 2011.
- GREE, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (Version 55). *Wiley Progress in Photovoltaics*, v. 28, p. 3-15, 2019.
- GRUBISIC-CABO, F., NIZETIC, S., COKO, D., MARINIC KRAGIC, I., PAPADOPOULOS, A., 2018. Experimental investigation of the passive cooled free-standing photovoltaic panel with fixed aluminum fins on the backside surface. *Journal of Cleaner Production*. 176, 119-129.
- HERNANDEZ-PEREZ, J.G., CARRILLO, J.G., BASSAM, A., FLOTA-BANUELOS, M., PATINO- LOPEZ, L.D., 2020. A new passive PV heatsink design to reduce efficiency losses: a computational and experimental evaluation. *Renewable Energy* 147, 1209-1220.
- JONES, A.; UNDERWOOD, C. Thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy*, Oxford, v. 70, p. 349-359, 2001.
- MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. *Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*. 4. ed. [S.l.]: ELSEVIER, 2013.
- PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 1625–1636, 2011.

- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.
- REIS, R. C. Análise do efeito da convecção forçada para resfriamento de sistema térmico fotovoltaico. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. 2020.
- SANTIAGO, I. et al. Modeling of photovoltaic cell temperature losses: A review and a practice case in South Spain. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 90, p. 70-89, 2018.
- SILVA, D. D. Análise térmica, teórica e experimental, de um painel fotovoltaico comercial. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP - Faculdade de Engenharia/Câmpus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2021.
- SILVA, D. D. et al. Análise experimental da temperatura de células fotovoltaicas para diferentes condições de operação. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, p. 1-10, 2020.
- SKOPLAKI, E.; BOUDOUVIS, A. G.; PALYVOS, J. A. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 92, p. 1393-1402, 2008.
- STANDARD. IEC 61724-1:2017 Photovoltaic system performance – Part 1: monitoring. IEC International Electrotechnical Commission, 2017.
- WANG, Y.; ZHOU, S.; HUO, H. Cost and CO2 reductions of solar photovoltaic power generation in China: Perspectives for 2020. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [s. l.], v. 39, n. 2014, p. 370–380, 2014.

7 RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo incluído neste artigo.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PASSIVE COOLING TECHNIQUE FOR THERMAL REGULATION OF PHOTOVOLTAIC PANELS

Vinicius Marson¹

Domisley Dutra Silva¹

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira.

vinicius.marson@unesp.br

domisleydutra@gmail.com

João Batista Campos Silva¹

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira.

campos.silva@unesp.br

Elaine Maria Cardoso^{1,2}

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira.

²UNESP - Universidade Estadual Paulista/Câmpus de São João da Boa Vista, Av. Profa. Isette Correa Fontão, 505 - Jardim das Flores, São João da Boa Vista – SP, 13876-750

elaine.cardoso@unesp.br

Abstract. Photovoltaic systems are widely used for power generation; however, most commercial modules have low efficiency, even under ideal operating conditions. The remaining energy is transformed into thermal, increasing the PV panel's temperature, affecting energy production and shortening the equipment's useful life. One way to avoid the thermal degradation of a photovoltaic module is by decreasing its surface temperature, using a cooling system, or preventing it from heating up during operation. In the current work, a theoretical and experimental study is carried out on the thermal behavior of a PV system coupled to a passive cooling system, comparing its temperature with the operating temperature of a PV system without any cooling system. The passive cooling system consists of segmented aluminum fins arranged in the central region of the PV surface. The fins decrease the PV temperature (up to 5.6 °C) and the efficiency and the output power increase by 2.3% and 2%, respectively, compared to the conventional module. By the theoretical analysis of the panel temperature prediction, satisfactory results were obtained compared to the experimental values for both analyzed PV systems, with an average deviation of about 3%. The proposed heat sink improved the convective heat exchange and cooled the PV system satisfactorily; such a reduction in temperature can avoid electrical conversion efficiency losses under high irradiance conditions and increase a PV module's lifetime.

Keywords: Photovoltaic solar energy, passive cooling system, energy efficiency, numerical simulation.