



XXVIII CREEM

Congresso Nacional de Estudante
de Engenharia Mecânica

Santa Maria - RS



XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
09 a 13 de maio de 2022, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

INFLUÊNCIA DO USO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCMs) NA TERMORREGULAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Luís Henrique Custódio da Fonseca, luis.custodio@unesp.br¹

João Batista Campos Silva, campos.silva@unesp.br²

Elaine Maria Cardoso, elaine.cardoso@unesp.br¹

¹Unesp – Univerdade Estadual Paulista/Faculdade de Engenharia de São João da Boa vista, Av. Profa Isette Correa Fontão, 505 – Jardim da Flores, São João da Boa Vista – SP, 13876-750

²Docente aposentado da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Resumo. A geração de energia elétrica utilizando placas fotovoltaicas vem crescendo acentuadamente durante os últimos anos, principalmente, por se tratar de uma fonte de energia renovável, com impacto ambiental mínimo, comparado a outras fontes não renováveis, mostrando-se uma alternativa viável diante da escassez de chuvas que, periodicamente, afeta a geração de energia de fonte hídrica no Brasil. O maior desafio para a implementação em grande escala é a perda de eficiência, cerca de 0,5% por °C de aumento na temperatura de operação do módulo PV; assim se faz necessário utilizar técnicas de resfriamento passivos e/ou ativos visando manter a eficiência, inclusive conservando sua vida útil. No presente trabalho se faz uma análise usando meio de resfriamento passivo, através de utilização de um material de mudança de fase (PCM) contido num contêiner metálico acoplado à face posterior do painel. Um modelo teórico foi proposto para avaliar a temperatura de operação de um módulo PV; os resultados mostraram boa concordância quando comparados aos encontrados na literatura, e o uso de PCM mantém a temperatura de operação do módulo fotovoltaico cerca de 10 °C mais baixa, durante o período mais crítico do dia, em relação à temperatura de um painel experimental sem nenhum sistema de resfriamento adicional acoplado.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, resfriamento passivo, material de mudança de fase.

Abstract. Renewable generation using photovoltaic panels has been growing, impacting a renewable source of energy, with other non-renewable environmental sources, if a viable alternative to hydropower for electricity generation. The biggest challenge for large-scale implementation is the loss of efficiency, about 0.5% per °C increase in the operating temperature of the PV module, so it is necessary to use passive and/or active cooling techniques to maintain the efficiency, increasing its useful life. In the present work, an analysis is carried out using a passive cooling method by using a phase change material (PCM) in a metallic container attached to the back face of the panel. A theoretical model was proposed to evaluate the operating temperature of the PV, the results showed good agreement when compared to those found in the literature, and that the use of PCM keeps the operating temperature of the photovoltaic module about 10 °C lower than the temperature of an experimental panel with no additional cooling system attached, during the most critical period of the day.

Keywords: solar energy, passive cooling, phase change material.

1. INTRODUÇÃO

O crescente consumo de energia elétrica traz à tona discussões relacionadas à geração sustentável de energia, um grande problema na maioria dos países, uma vez que, atualmente, não há uma tecnologia viável a ponto de substituir todas as geradoras energéticas que utilizam fontes não renováveis.

Entretanto, os painéis fotovoltaicos (PV), capazes de converter a irradiação solar em energia elétrica, vêm despontando como uma das tecnologias mais promissoras, juntando sustentabilidade com uma eficiência crescente ao longo dos anos. Segundo o balanço energético nacional (BEN, 2020), realizado em 2021, houve um aumento de 61,5% na geração da energia solar quando comparado ao ano anterior, mas a contribuição para a oferta interna chega a apenas 0,32%. Entretanto, seu destaque é devido as micro e minigeradoras de energia (centrais geradoras de energia elétrica com potência instalada inferior ou igual a 75 kW e 5 MW respectivamente). O balanço energético nacional (BEN, 2020) estima que em 2019 houve um salto de 320% e em 2020 de 290% quando comparado ao ano anterior, na capacidade de geração de energia nessas centrais.

Apesar da pouca utilização, a localização do Brasil o contempla com uma ótima insolação regular durante o ano, com ótimas características para a instalação de células PV. Todavia, devido à alta temperatura é comum a perda de

eficiência se não houver um meio de resfriamento do painel fotovoltaico. Segundo Chandell e Agarwal (2017), estima-se que para cada 1 °C acima da temperatura nominal de operação da placa existe uma perda de 0,4-0,5% na eficiência de conversão energética.

Dessa forma, para viabilizar o uso consistente das placas fotovoltaicas é necessário buscar meios de resfriá-las. Dentre as técnicas conhecidas, podemos citar o uso de materiais de mudança de fase (*phase change material* – PCM), materiais capazes de absorver o calor do módulo PV enquanto passa por mudança de fase, retirando calor do módulo fotovoltaico.

Em vários estudos tem sido avaliado o uso da placa solar com PCM (PV+PCM), em suas devidas localidades. Huang et al. (2006) conseguiram obter valores de redução de temperatura próximas aos 17 °C, acumulando um ganho de 7,5% na eficiência energética. Hendricks e Van Sark (2013), em seu estudo teórico usando uma temperatura ambiente e irradiação fixa, estimaram um aumento de 3% na produção de energia quando comparado a um mesmo painel nessas condições. Smith et al. (2014) propuseram um sistema de equações diferenciais usando dados de temperatura e irradiação de todo o globo terrestre para determinar o ganho em algumas localidades; os autores obtiveram um ganho de eficiência de até 6%, de acordo com as condições climáticas da região. Savvakis e Tsoutsos (2015) realizaram um estudo experimental e relataram um aumento de 5% na eficiência de um sistema PV+PCM. Segundo Wagas et al. (2018), houve um aumento de 5,2% na produção de energia, quando se reduziu a temperatura de operação de um painel em até 20 °C.

É notável um ganho efetivo na eficiência no painel ao se utilizar um PCM, porém, nenhum dos estudos apresentados considera localidades brasileiras. Dessa forma, sabendo do potencial dessa técnica para controle de temperatura, o presente trabalho consiste em um estudo analítico a fim de descrever o comportamento da temperatura de um painel PV+PCM considerando condições climáticas da região noroeste paulista.

2. METODOLOGIA

2.1. Características geométricas e propriedades físicas do PV+PCM

A geometria do problema analisado é apresentada na Fig. 1. O painel fotovoltaico é constituído por: 1) uma cobertura de vidro temperado; 2) uma camada de revestimento antirreflexo; 3) células PV de p-Si; 4) uma camada de metal de contato (alumínio); 5) uma camada de etileno vinil acetato (EVA) e 6) uma camada de fluoreto de polivinila (PVF). As espessuras das camadas, densidades e calores específicos dos materiais componentes do módulo PV são especificadas na Tab. 1. As dimensões do módulo PV, bem como propriedades relativas à radiação são apresentadas na Tab. 2. O material de mudança de fase utilizado nas simulações foi o RT35HC da fabricante Rubitherm® Technologies GmbH; com um custo de aproximadamente €4.93/kg segundo Smith et al. (2014). A espessura do PCM será determinada na análise teórica e suas propriedades térmicas são apresentadas na Tab. 3.

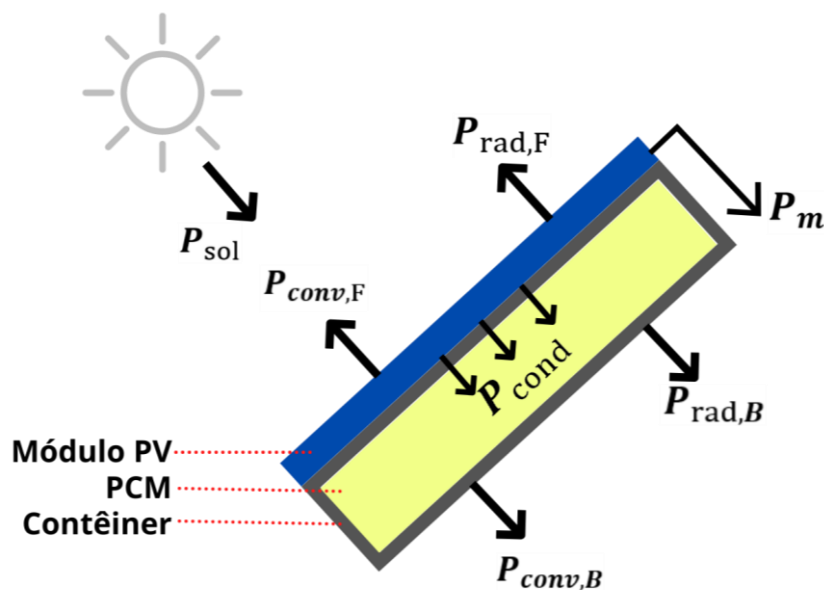


Figura 1. Sistema painel fotovoltaico (PV) e material de mudança de fase (PCM).*

* P_{sol} a energia solar absorvida; P_{rad} se refere a troca de calor devido à radiação; P_{conv} trata-se do fluxo de energia devido à convecção; P_m é a energia elétrica gerada pelo módulo; P_{cond} a energia térmica transferida ao PCM.

Tabela 1. Propriedades dos materiais das camadas do módulo PV (adaptado de Armstrong e Hurley, 2010).

Camada	Material	Espessura [$m \cdot 10^{-3}$]	Densidade [kg/m^3]	Calor específico [$J/kg \cdot K$]
1	Vidro temperado	3,2	3.000	500
2	Revestimento antirreflexo	0,0001	2.400	691
3	Células PV p-Si	0,225	2.330	677
4	Metal de contato (tipicamente alumínio)	0,01	2.700	900
5	Camada de etileno vinil acetato (EVA)	0,5	960	2090
6	Camada de fluoreto de polivinila (PVF)	0,0001	1.200	1.250

Tabela 2. Valores dimensionais, parâmetros físicos e elétricos do módulo PV (adaptado de Jones e Underwood, 2001; Canadian Solar; Armstrong e Hurley, 2010).

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Largura do módulo PV CS3U-350P	W_{PV}	0,992	m
Comprimento do módulo PV CS3U-350P	L_{PV}	2	m
Área do módulo PV CS3U-350P	A_{PV}	1,984	m^2
Absortância (α) da célula PV	α	0,8	-
Transmitância (τ) do vidro temperado	τ	0,88	-
Emissividade frontal do módulo PV	ε_f	0,91	-
Emissividade posterior do módulo PV	ε_p	0,85	-
Potência Máxima PV CS3U-350P	P	350	W
Perda de potência PV CS3U-350P	γ_{pv}	-0,38	$\%/^{\circ}C$

Tabela 3. Propriedades térmicas do material de mudança de fase (PCM) (adaptado de Rubitherm[®] Technologies GmbH).

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Temperatura de Fusão	T_m	35	$^{\circ}C$
Calor específico do PCM sólido	c_{PCms}	2900	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Calor específico do PCM líquido	c_{PCml}	2100	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Calor latente do PCM	H	$2,2 \times 10^5$	$J \cdot kg^{-1}$
Densidade do PCM sólido	ρ_{PCms}	860	$kg \cdot m^{-3}$
Densidade do PCM líquido	ρ_{PCml}	780	$kg \cdot m^{-3}$
Condutividade térmica do PCM sólido	k_{PCms}	0,24	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Condutividade térmica do PCM líquido	k_{PCml}	0,15	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

2.2. Avaliação da espessura ideal do PCM

Buscando maximizar o ganho na eficiência com o uso de PCM, avaliou-se a importância da quantidade utilizada, mais especificamente, a espessura da camada que será acoplada ao módulo PV, uma vez que precisa ser uma quantidade suficiente para que haja redução de temperatura, durante todo o período de insolação.

Inicialmente, a temperatura do céu é descrita pela equação de SwinBank, 1963, Eq.(1):

$$T_{céu} = T_{amb} \times 0,00552^{1.5} \quad (1)$$

Porém, para a condição de céu limpo, Notton et al. (2015) propuseram uma simplificação:

$$T_{céu} = T_{amb} - 20 \quad (2)$$

Para a temperatura do chão, na condição de céu limpo, tem-se:

$$T_{chão} = T_{amb} + 5 \quad (3)$$

Esses valores são importantes para o balanço de energia que será apresentado, posteriormente, para definir a temperatura do módulo PV.

Outras simplificações consideradas foram: as trocas térmicas na lateral do módulo PV foram desconsideradas devido a espessura do painel ser desprezível quando comparada às demais medidas geométricas. As análises sempre consideraram dias de céu limpo, com uma distribuição uniforme de temperatura no módulo PV, e no começo do dia, ou seja, na condição inicial, a temperatura do PV foi considerada igual à temperatura ambiente.

Para um painel de referência (sem uso de PCM), a equação de balanço de energia, Eq.(4), que relaciona o aumento de temperatura com as entradas e saídas de energia para/do módulo fotovoltaico é dada por:

$$\frac{dT_{pv}}{dt} = \frac{P_{sol} - P_{rad} - P_{conv} - P_{out}}{C_m} \quad (4)$$

na qual T_{pv} é a temperatura do módulo PV, P_{sol} é a energia solar absorvida, P_{rad} se refere a troca de calor devido à radiação, P_{conv} trata-se da taxa de energia perdida por convecção, P_{out} é a potência elétrica gerada pelo módulo e, por fim, C_m é a capacidade térmica total do PV, englobando os diferentes materiais que constituem o painel fotovoltaico, para as características do painel (Tab. 1 e Tab. 2).

A energia solar absorvida pode ser definida, segundo Jones e Underwood (2001), pela Eq.(5):

$$P_{sol} = \alpha \times S \times G_t \quad (5)$$

sendo α o coeficiente de absorção, S a área do PV e G_t a irradiância solar [$\frac{W}{m^2}$].

A troca de calor por radiação é definida pela Eq.(6):

$$P_{rad} = P_{rad,F} + P_{rad,B} \quad (6)$$

sendo $P_{rad,F}$ a troca que ocorre na região frontal do painel, obtida pela Eq.(7):

$$P_{rad,F} = \sigma \times S \times \left[\frac{1+\cos(\beta)}{2} \times \varepsilon_m \times (T_{pv}^4 - T_{céu}^4) + \frac{1-\cos(\beta)}{2} \times \varepsilon_m \times (T_{pv}^4 - T_{chão}^4) \right] \quad (7)$$

e $P_{rad,B}$ é equivalente à troca de calor na região posterior do PV:

$$P_{rad,B} = \sigma \times S \times \left[\frac{1-\cos(\beta)}{2} \times \varepsilon_m \times (T_{pv}^4 - T_{céu}^4) + \frac{1+\cos(\beta)}{2} \times \varepsilon_m \times (T_{pv}^4 - T_{chão}^4) \right] \quad (8)$$

Nas equações (7) e (8), σ é a constante de Stefan Boltzmann [$5,67 \times 10^8 \frac{W}{K^4 \times m^2}$], β é o ângulo de inclinação do PV em relação à horizontal e ε_m é a emissividade do módulo. Para simplificação, T_{pv} e ε_m foram considerados iguais na superfície frontal e posterior do módulo PV.

A troca de calor por convecção, P_{conv} , é definida pela Eq.(9):

$$P_{conv} = P_{conv,F} + P_{conv,B} \quad (9)$$

em que

$$P_{conv,F} = h \times S \times (T_{pv} - T_{amb}) \quad (10)$$

$$P_{conv,B} = h \times S \times (T_{pv} - T_{amb}) \quad (11)$$

nas quais h é o coeficiente de troca de calor convectiva, definido na Eq. (12):

$$h = 1,31 \times (T_{pv} - T_{amb})^{1/3} + 2,8 + 3 \times V_v \quad (12)$$

sendo que V_v se refere à velocidade do vento.

Por último, a energia elétrica gerada pelo painel é estimada como:

$$P_{out} = P \times \eta_t \times \frac{G_t}{G_{stc}} \quad (13)$$

sendo P uma potência de referência do módulo PV, G_{stc} a irradiância padrão e η_t trata-se do coeficiente de redução devido ao aumento de temperatura:

$$\eta_t = \begin{cases} 1 + \gamma_{pv} \times (T_{pv} - 25^\circ C) & ; \text{ se } T_{pv} > 25^\circ C \\ 1 & ; \text{ se } T_{pv} \leq 25^\circ C \end{cases} \quad (14)$$

e γ_{pv} se refere à perda de potência do módulo PV.

Após realizar a definição de todas essas equações, é possível analisar a potência térmica máxima que será transferida ao PCM num determinado instante:

$$P_{pcm} = P_{sol} - P_{rad,F} - P_{conv,F} - P_m \quad (15)$$

Visando normalizar os dados obtidos durante o período de insolação para vários dias, pode-se usar a regra de Simpson, para obtenção da energia acumulada no painel, obtendo-se então:

$$E_{pcm} = \frac{t}{R_p} \times \sum_{i=1}^N P_{pcm}(t_i) \quad (16)$$

em que t_i é o instante de tempo e t representa o intervalo entre a coleta de dados e R_p é o intervalo total de tempo considerado.

Obtida a energia transferida ao PCM durante um certo período, é possível usar a relação proposta por Savvakis e Tsoutsos (2015) para estimar uma espessura adequada para o PCM, como mostrado na Eq. (17):

$$d_{pcm} = \frac{E_{pcm}}{\rho_{pcm} \times S \times [c_{pcm} \times (T_{fusão,pcm} - T_{pv,inicial}) + H + c_{pcm} \times (T_{pv,final} - T_{fusão,pcm})]} \quad (17)$$

O numerador dessa equação é conhecido e obtido pelas equações e dados acima citados, já os termos no denominador são: ρ_{pcm} é a densidade do PCM, c_{pcm} é o calor específico do PCM, $T_{fusão,pcm}$ a temperatura de fusão do PCM, $T_{pv,inicial}$ a temperatura inicial do PV, $T_{pv,final}$ a temperatura máxima atingível durante o período selecionado e H a capacidade de armazenamento de calor latente do PCM (Tab. 3).

Para viabilizar o uso em um painel comercial e baseando-se nos resultados obtidos na análise descrita acima, com dados de entrada experimentais de um painel PV, chegou-se em uma espessura de aproximadamente 5 cm pelo uso da Eq. (17); espessura essa capaz de fornecer uma boa capacidade de armazenamento de calor; sem um incremento de massa considerável (espessuras maiores aumentam de forma significativa o peso, devido à alta densidade do PCM, podendo danificar o sistema PV).

2.3. Equacionamento PV+PCM

Para o conjunto PV+PCM, o balanço de energia é similar; apenas deve ser acrescentado ao lado direito da Eq. (4) a parcela de energia transferida ao PCM. O equacionamento foi assumido na seguinte forma:

$$\frac{dT_{pv}}{dt} = \frac{P_{sol} - P_{rad} - P_{conv} - P_{out}}{C_m} - \frac{P_{cond}}{C_{pcm}} \quad (18)$$

Na Eq. (18), P_{cond} é a energia térmica transferida ao PCM e C_{pcm} é a capacidade térmica do PCM. Devido à mudança de fase do PCM, sua influência na variação de temperatura varia de acordo com a temperatura do PV, uma vez que sua maior contribuição será após iniciar a fusão e, em alguns casos, pode acontecer de se liquefazer toda a massa de PCM e a temperatura do conjunto ser até mais alta do que a do painel de referência, influenciando negativamente o sistema.

Os dados de entrada foram coletados experimentalmente (diariamente no período entre o nascer e pôr do sol a cada 30 segundos para um módulo fotovoltaico, de p-Si com 350 Wp), sendo este o caso da radiação solar incidente, da temperatura ambiente, da potência elétrica, da velocidade do vento e da temperatura do painel de referência. Aplicadas

as condições experimentais ao modelo teórico descrito acima foi possível verificar a influência do PCM na termorregulação do sistema PV. Dessa forma é possível comparar o modelo teórico PV+PCM com um sistema real de referência, sem a presença de PCM.

O processo de transferência de energia ao PCM pode ser dividido em três etapas. A primeira situação é aquela em que a temperatura do PCM não atingiu a temperatura de fusão $[T_m]$ e a segunda situação é quando todo o material foi liquefeito. Neste caso, P_{cond} , na Eq. (18), pode ser avaliado pela lei de Fourier:

$$P_{cond,1,2} = \frac{S \times k \times (T_{pv} - T_{amb})}{x} \quad (19)$$

na qual k é a condutividade térmica do PCM e x sua espessura.

Durante o período em que a temperatura do PV $[T_{pv}]$ for maior que a temperatura de fusão $[T_m]$ e a capacidade de armazenamento térmico do PCM não foi atingida, pode-se estimar a energia transferida ao PCM como:

$$P_{cond,3} = \frac{S \times k \times (T_{pv} - T_m)}{x} \frac{H}{c_{pcm} \Delta T_r} \quad (20)$$

sendo H a capacidade de armazenamento de calor latente e c_{pcm} o calor específico do PCM. O termo $\frac{H}{c_{pcm} \Delta T_r}$, na Eq. (20), se refere a um coeficiente de ajuste na lei de Fourier para tratar especificamente do PCM na mudança de fase; como proposto em Hendricks e Van Sark (2013).

A cada instante também é avaliada a quantidade de calor que foi absorvida pelo PCM e se está dentro da sua capacidade de armazenamento pela equação:

$$H \times m = \sum s \times k \times (T_{pv} - T_m) \times \Delta t \quad (21)$$

3. RESULTADOS

Com o equacionamento teórico estabelecido, foram utilizados softwares como MatLab® e Python, para criar uma rotina para obtenção da temperatura do sistema PV+PCM para fins de comparação com a temperatura do módulo PV de referência.

As Figs. 2 e 3 mostram a variação de temperatura em dias com condições de céu limpo e com boa irradiação. Nas figuras são mostradas a irradiação solar e as temperaturas do módulo PV de referência (sem PCM), do sistema PV+PCM (obtida por meio do modelo teórico proposto) e ambiente, bem como as curvas de irradiação (os valores da irradiação estão nos eixos à direita).

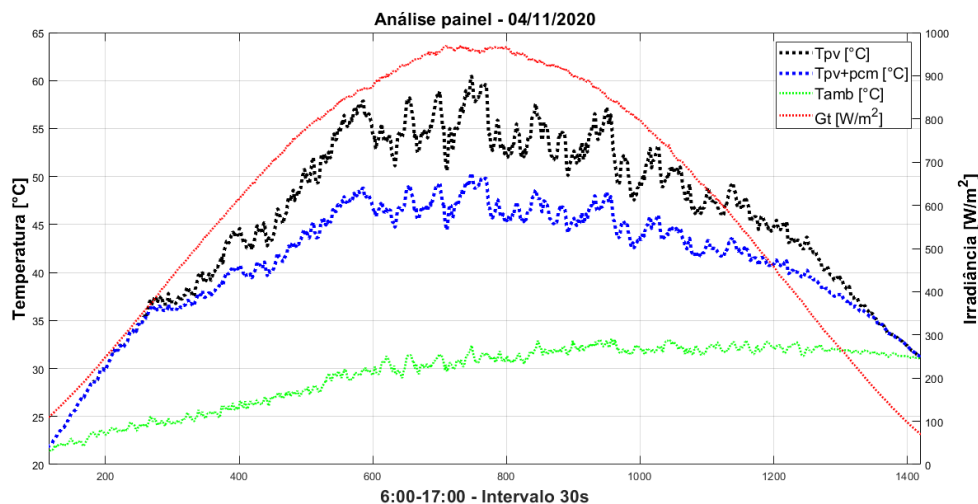


Figura 2. Comparativo entre as temperaturas do painel PV de referência e PV com PCM.

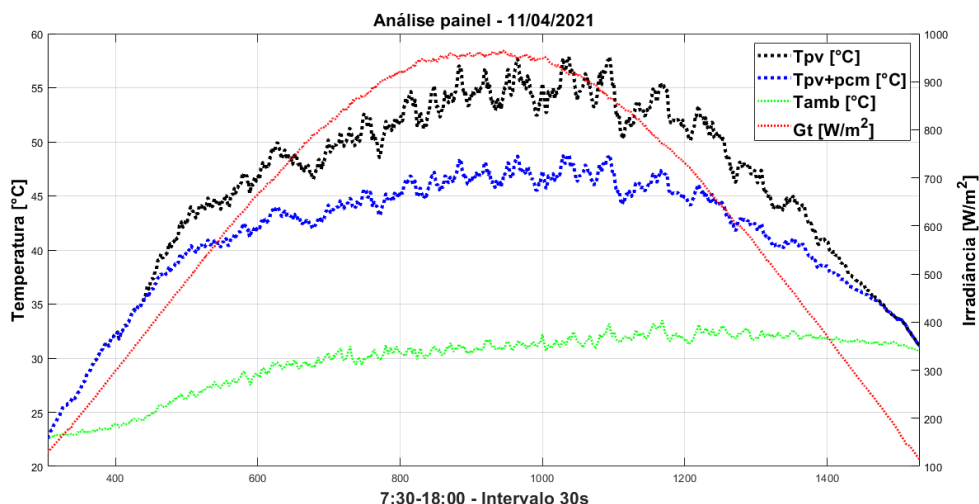


Figura 3. Comparativo entre as temperaturas do painel PV de referência e PV com PCM.

Observa-se, para ambos os dias analisados, uma redução significativa da temperatura do sistema PV+PCM durante o período mais crítico do dia, em que há a maior perda de potência; a redução máxima foi de aproximadamente 10 °C, causando nessa situação um aumento de 5,5% na potência instantânea do PV nesse período. Tal resultado se mostrou de acordo com o encontrado por Smith et al. (2014), os quais estimaram um aumento da produção entre 3 e 6%. Savvakis e Tsoutsos (2015) obtiveram experimentalmente cerca de 5% de aumento na geração e Hendricks e Van Sark (2013) demonstraram uma redução entre 10 °C e 14 °C nos valores de temperatura. Os resultados obtidos pelo equacionamento proposto no presente trabalho se mostraram coerentes com os apresentados na literatura.

Portanto, o uso de materiais de mudança de fase (PCMs) tem grande potencial para diminuição de temperatura de operação de painel fotovoltaico, resultando em ganho de eficiência energética e, consequentemente, prolongamento de sua vida útil.

4. CONCLUSÃO

O modelo teórico para predição da temperatura do painel fotovoltaico para o caso sem a presença de sistema de resfriamento passivo mostrou-se satisfatório quando comparado aos valores de temperatura experimentais e de outros autores da literatura.

Do modelo teórico considerando o módulo PV acoplado a um sistema de resfriamento com base em PCM obteve-se uma redução significativa da temperatura do sistema, o que acarreta um aumento na eficiência do módulo PV; o PCM testado no presente estudo foi capaz de reduzir a temperatura do módulo PV em aproximadamente 10 °C, durante o período de maior insolação, aumentando em 5,5% a geração de energia desse período. Assim o uso de materiais de armazenamento de energia térmica, como PCMs, pode aumentar a produção de eletricidade a partir de módulos PV dissipando o calor resultante da alta temperatura de operação do módulo.

O uso de PCM regula a temperatura, melhora o desempenho e economiza energia e custo no sistema fotovoltaico. Também aumenta a vida útil das células fotovoltaicas devido à menor temperatura de operação do módulo PV.

Vale mencionar que a próxima etapa do projeto, em andamento, é verificar experimentalmente se esta redução de temperatura, observada da análise teórica, ocorrerá e será de mesma magnitude.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNESP, ao SENAI de Aparecida do Taboado/MS por conceder o local para realizar o experimento, ao apoio financeiro fornecido pelo PPGEM – UNESP/FEIS, ao CNPq (Processo 458702/2014-5) e a FAPESP (Processos 2013/15431-7 e 2019/02566-8).

6. REFERÊNCIAS

- Armstrong, S.; Hurley, W. G. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. Applied Thermal Engineering, Oxford, v. 30, 2010.
- BEN - *Balanco 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/>

- Chandel S. S.; Agarwal T. *Review of cooling using phase change material for enhancing efficiency of photovoltaic power systems*. Renew Sustain Energy Review, 2017.
- Hendricks, J. H.; Van-Sark, W. G. *Annual performance enhancement of building integrated photovoltaic modules by applying phase change materials*. Prog Photovoltaics Res Appl 2013.
- Huang et al. *Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaic*. Solar Energy. 2006.
- Jones, A. D.; Underwood, C. P. *A thermal model for photovoltaic systems*. Sol Energy 2001.
- Notton, G.; Cristofari, C.; Mattei, M.; Poggi, P. *Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences*. Appl Therm Eng, 2005.
- RubyTherm. Disponível em: <https://www.rubitherm.eu/en/productCategories>. Acesso em 05 de janeiro de 2022.
- Savvakis N., Tsoutsos T. *Theoretical design and experimental evaluation of a PV+PCM system in the Mediterranean climate*. Energy. 2021.
- Savvakis, N., Tsoutsos, T. *Performance assessment of a thin film photovoltaic system under actual Mediterranean climate conditions in the island of Crete*. Energy, 2015.
- Smith et al. *Global analysis of PV energy output enhanced by PCM cooling*. Applied Energy. 2014.
- Swinbank, W. C. *Long-wave radiation from clear skies*, Quart J Roy Meteo Soc, 1963.
- Waqas, A. et al., *Thermal and electrical management of photovoltaic panels using phase change materials – A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.