

Desempenho de um painel fotovoltaico (PV) convertido em um fotovoltaico térmico com coletor para água quente (PVT/w)

Performance of a photovoltaic panel (PV) converted to a thermal photovoltaic with collector for hot water (PVT/w)

Rendimiento de un panel fotovoltaico (PV) convertido en fotovoltaico térmico con colector de agua caliente (PVT/w)

Recebido: 24/05/2021 | Revisado: 30/05/2021 | Aceito: 31/05/2021 | Publicado: 04/07/2021

Rodrigo Aparecido Jordan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2479-4461>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: rodrigojordan@ufgd.edu.br

Orlando Moreira Junior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6232-7100>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: orlandojunior@ufgd.edu.br

Bruno Machado Antunes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4222-0787>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: bruno.m.antunes@anhanguera.com

Anamari Viegas de Araujo Motomiya

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2170-8676>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: AnamariMotomiya@ufgd.edu.br

Ítalo Sabião Sanches

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3212-6199>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: italosabiao@hotmail.com

Édipo Sabião Sanches

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0783-772X>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: ediposabiao@hotmail.com

Agleison Ramos Omido

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0014-8537>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: agleisonomido@ufgd.edu.br

Elton Aparecido Siqueira Martins

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3195-2317>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: eltonmartins@ufgd.edu.br

Resumo

Foram realizados testes em ambiente aberto com dois painéis fotovoltaicos, na cidade de Dourados/MS, durante seis dias não consecutivos, entre os meses de junho a julho de 2018, onde um painel foi mantido original (PV), enquanto o outro sofreu modificações para operar como um módulo fotovoltaico-térmico utilizando água (PVT/w), sendo este conectado a um reservatório para acumulação de água quente. Nos ensaios foram feitas medições de tensão de circuito aberto (Voc), temperatura na superfície das células fotovoltaicas e temperatura da água do sistema de resfriamento e termoacumulação do PVT/w, para determinação da energia térmica produzida e estimativa do rendimento térmico. O aumento da temperatura da água de arrefecimento afeta de forma negativa o valor da tensão de circuito aberto, a qual foi, em média, 2,3% maior para o PVT/w, o qual apresentou menor temperatura superficial em todos os testes. O rendimento térmico médio do PVT/w foi de 242 W m⁻², resultando numa estimativa de rendimento total (térmico e elétrico) de 349 W m⁻², um aumento de 161% em relação ao rendimento energético do PV (apenas energia elétrica), estimada em 106 W m⁻² com base nas informações do catálogo técnico do fabricante.

Palavras-chave: Energia solar; Energia térmica e elétrica; Rendimento energético.

Abstract

Tests were carried out in an open environment with two photovoltaic panels, in the city of Dourados/MS, for six non-consecutive days, between the months of June to July 2018, where one panel was kept original (PV), while the other underwent modifications to operate as a photovoltaic-thermal module using (PVT/w), which is connected to a reservoir for hot water accumulation. The tests were carried out according to the open circuit voltage (Voc), the surface temperature of the photovoltaic cells and the water temperature of the cooling and thermoaccumulation system of the PVT/w, to determine the adequate and adequate thermal energy of the thermal yield. The increase in the temperature of the cooling water negatively affects the value of the open circuit voltage, which was, on average, 2.3% higher for PVT/w, which presented a lower surface temperature in all tests. The average thermal efficiency of PVT/w was 242 W m^{-2} , given in an estimate of total efficiency (thermal and electrical) of 349 W m^{-2} , an increase of 161% in relation to the energy efficiency of PV (only electricity), estimated at 106 W m^{-2} based on information from the manufacturer's technical catalog.

Keywords: Solar energy; Thermal and electric energy; Energy efficiency.

Resumen

Las pruebas se realizaron en un ambiente abierto con dos paneles fotovoltaicos, en la ciudad de Dourados / MS, durante seis días no consecutivos, entre los meses de junio a julio de 2018, donde un panel se mantuvo original (PV), mientras que el otro se sometió a modificaciones para funcionar como módulo fotovoltaico-térmico utilizando (PVT / w), que se conecta a un depósito para la acumulación de agua caliente. Las pruebas se realizaron en función de la tensión en circuito abierto (Voc), la temperatura superficial de las células fotovoltaicas y la temperatura del agua del sistema de refrigeración y termoacumulación del PVT / w, para determinar la energía térmica adecuada y adecuada del rendimiento térmico. El aumento de la temperatura del agua de refrigeración incide negativamente en el valor de la tensión de circuito abierto, que fue, en promedio, un 2,3% superior para PVT / w, que presentó una temperatura superficial más baja en todas las pruebas. La eficiencia térmica promedio de PVT / w fue de 242 W m^{-2} , dada en una estimación de eficiencia total (térmica y eléctrica) de 349 W m^{-2} , un aumento del 161% en relación a la eficiencia energética de PV (solo electricidad), estimado en 106 W m^{-2} según información del catálogo técnico del fabricante.

Palabras clave: Energía solar; Energía térmica y eléctrica; Eficiencia energética.

1. Introdução

Junto com o crescimento populacional vem o aumento da demanda de alimentos e de energia. Até 2050, estima-se que a população mundial seja de 9,7 bilhões de pessoas (United Nations [UN], 2019) e, com isso, seja necessário cerca de 50% a mais de comida (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2017), 30% a mais de água (Burek et al., 2016) e 50% a mais de energia (Energy Information Administration [EIA], 2019). Ressalta-se que cerca de 30% de todo o consumo mundial de energia é destinado a cadeia de produção de alimentos, sendo ainda muito dependente de combustíveis fósseis para operar (FAO, 2017). Logo, além da redução do desperdício de alimentos, são necessárias medidas mais eficientes e sustentáveis no uso dos recursos naturais, principalmente no que tange o consumo de água, energia e uso da terra, a fim de garantir a crescente demanda de produção de alimentos (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2013).

Neste cenário podemos destacar a importância do uso de sistemas de energia de fontes renováveis, como as provenientes do vento, sol, hídrica e geotérmica, que são amplamente disponíveis nas propriedades rurais e ajudam a diminuir a dependência dos combustíveis fósseis (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2011). Para a produção de energia elétrica, por exemplo, uma das formas mais promissoras, é a utilização da energia solar fotovoltaica. Uma justificativa para tal afirmação é que o sol é considerado uma fonte limpa e inesgotável na escala de vida humana, de energia para a terra e é indiretamente responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia (Pinho & Galdino, 2014).

Por esta razão, a energia solar fotovoltaica vem ganhando cada vez mais espaço no mundo. De acordo com BP (2019), a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica mundial cresceu 24,4% em 2018, alcançando a marca de 487,8 GW. Já o Brasil, saltou de apenas 80 MW em 2016 para 2,3GW em 2018 (crescimento de 2.870%) e atualmente a energia solar é responsável por cerca de 1,69% da sua matriz de energia elétrica, o que representa 2,94 GW de capacidade instalada (Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL], 2020). Apesar da pouca participação, o Brasil possui um grande potencial solar e vem

ganhando vários incentivos nos últimos anos, o que é possível ver pelo plano decenal de expansão de energia (Empresa de Pesquisa Energética [EPE], 2015), estimando que a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica irá atingir 7 GW em 2024.

O equipamento responsável pela conversão da irradiação solar em energia elétrica é o painel ou módulo fotovoltaico. Este equipamento possui alguns fatores de perda que reduzem sua eficiência, tais como sujeira, sombreamento, degradação do material (Simioni, 2017) e possui ainda uma temperatura nominal de operação que, quando ultrapassada, reduz sua eficiência a cada grau excedente, resultado de uma característica natural do silício presente nas células, que é o principal material construtivo destes equipamentos (Da Silva, 2015).

Atualmente a eficiência dos modelos comerciais se encontra na faixa de 15 a 22,6%. Existem vários estudos sobre o resfriamento de painéis fotovoltaicos com o intuito de diminuir a temperatura nominal de operação e aumentar o rendimento energético. Da Silva (2015), por exemplo, obteve um ganho médio de rendimento de 5,9% com o seu sistema arrefecido em comparação com um sistema comum. Já Hajjaj et al. (2019) obteve um ganho médio de 8,46% e, Beltrão (2008), um ganho médio de até 10%.

O conceito de resfriar o painel solar e aproveitar este calor residual como fonte térmica é chamado de sistema híbrido PVT (*Photovoltaic/Thermal*) (Hajjaj et al, 2019). Nesse tipo de sistema temos a geração de eletricidade e de energia térmica no mesmo equipamento (Simioni, 2017), o que representa uma das maneiras mais eficientes de se aproveitar o recurso solar (Dupeyrat, Ménézo & Fortuin, 2014). Essa tecnologia consiste no acoplamento de um trocador na parte de trás do painel fotovoltaico, o qual aproveitará o calor residual para aquecer algum fluido refrigerante, geralmente água ou ar, criando energia térmica (Duffie & Beckman, 2013; Dupeyrat et al., 2014; Al-Waeli, Kazem, Sopian & Chaichan, 2016).

Este conceito não é recente, ao final da década de 1970 alguns autores já pesquisavam o assunto (Kern Jr & Russel, 1978; Florschuetz, 1979; Cox & Raghuraman, 1985), porém, no Brasil, além de recentes, ainda são poucos os trabalhos com PVT. Dentre esses podemos citar: Ancines, Krenzinger e Soares (2016), Guerra (2016) e Medeiros (2017);

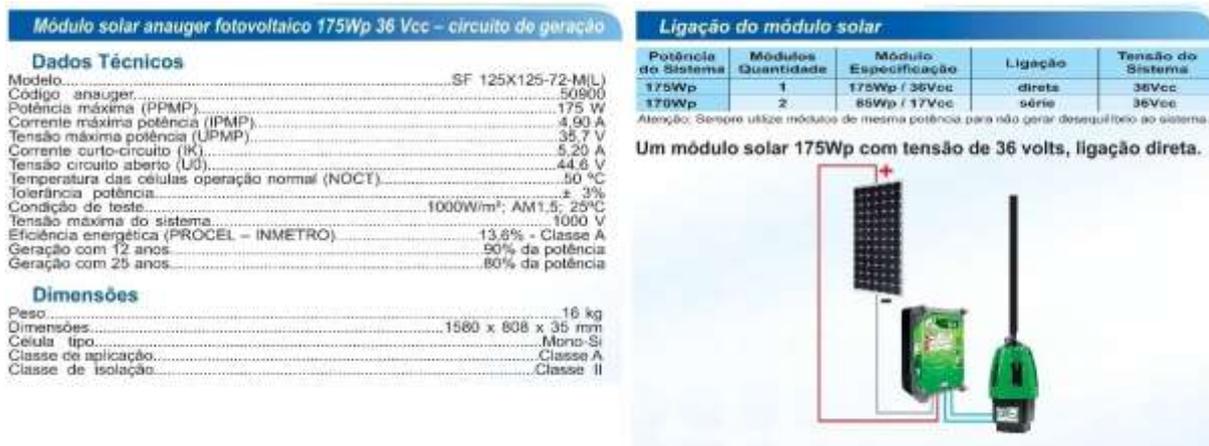
Nesse contexto, o trabalho teve o objetivo de avaliar o desempenho e o potencial térmico de um painel fotovoltaico (PV) convertido para operar como fotovoltaico térmico via arrefecimento a água (PVT/w).

2. Metodologia

A pesquisa foi realizada numa área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA), localizada no Campus II da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), em Dourados, Mato Grosso do Sul, sobre as coordenadas geográficas 22° 11' 53'' S e 54°56' 03'' W, com altitude de 408 m. Essa região é caracterizada por clima tropical, temperatura média de 26°C com pouca pluviosidade no inverno, com média anual de 1110 mm. A classificação do clima é Aw segundo a Köppen e Geiger (1928). O experimento foi realizado no período de junho a julho de 2018, em dias não consecutivos, de forma a realizar os testes em dias de céu totalmente limpo. A pesquisa apresentou um estudo de carácter quantitativo, haja vista a necessidade de uma base de dados numéricos submetidos à procedimentos estatísticos (Pereira, Shitsuka, Parreira & Shitsuka, 2018).

Foram utilizados dois painéis fotovoltaicos que faziam parte de dois kits de bombeamento de água com energia solar da marca Anauger. As informações dos módulos utilizados no experimento, segundo o fabricante, estão disponibilizados na Figura 1.

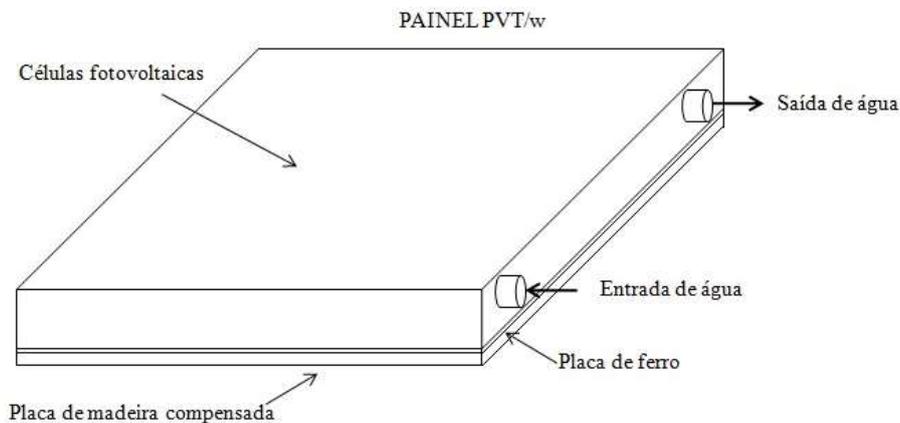
Figura 1. Dados do módulo solar de onde foram retiradas as placas utilizadas nos testes.



Fonte: Adaptado do Catálogo técnico/comercial Anauger (<https://anauger.com.br/linha-anauger-solar/anauger-solar-r100/>).

De acordo com a Figura 1, o modelo dos painéis utilizados é o SF 125X125-72-M(L), o qual apresenta uma tensão de circuito aberto de 46,4 V para uma temperatura de operação normal (NOTC) de 50°C. Um painel foi mantido original (PV), enquanto o outro sofreu modificações para operar como um módulo fotovoltaico-térmico utilizando água (PVT/w) (Prakash, 1994; Da Silva, 2015), do tipo com canal sob as células fotovoltaicas (Chow, 2010). Para isso, utilizando uma cola a base de poliuretano, foi fixada uma placa de metal na parte debaixo da estrutura do painel fotovoltaico. Para reforçar a estrutura, abaixo da placa metálica foi fixada uma placa de madeira compensada de 15 mm de espessura (Figura 2).

Figura 2. Esquema de montagem do módulo PVT/w.



Fonte: Autores (2019).

Conforme Figura 2, o caixilho do painel PV foi utilizado como canal (entrada e saída de água), para que a água tivesse o máximo contato com a parte inferior das células, de forma a se obter um melhor resfriamento.

Os painéis foram instalados em ambiente aberto, um ao lado do outro, com orientação para o norte geográfico. Devido à baixa resistência mecânica da membrana plástica sobre a qual estavam coladas as células fotovoltaicas, a mínima coluna d'água provocava deformação dessa estrutura, o que poderia causar danos às mesmas. Para solucionar esse problema, seria necessária a colocação de um reforço na parte inferior dessa membrana, o que implicaria em ter que desfazer toda a fabricação do PVT/w, o que também traria riscos de avarias no painel. A solução foi montar a placa PVT/w sem inclinação e usar uma

pequena bomba de aquário de 20 W para fazer a circulação da água. Assim, para manter igualdade de comparação, o painel sem modificação (PV) também foi instalado sem inclinação. A Figura 3 mostra as placas PVT/w e PV instaladas para testes.

Figura 3. Placas PVT/w e PV instaladas para testes.



Fonte: Autores (2019).

O PVT/w foi conectado a um reservatório de água com volume de 100 litros, cujo propósito foi mensurar a geração de energia térmica. Para isso, foi instalado um termômetro digital com sonda para medir a temperatura da água desse reservatório.

Devido à presença de barreiras físicas no entorno onde as placas foram instaladas, os raios de sol atingiam as placas de forma plena somente entre 9:00 e 15:00 horas, restringindo os ensaios a esse intervalo. Foram realizadas leituras horárias de tensão de circuito aberto (V_{oc}), temperatura na superfície das placas e temperatura da água do reservatório térmico.

Para medição da tensão foram utilizados multímetros Fluke, modelo 28 II EX. A medição de temperatura na superfície das placas foi realizada com um termômetro digital infravermelho com mira laser EOS, modelo AS390 (-50 a 380° C). A temperatura registrada foi tomada como sendo a média da leitura central em três pontos (quadrantes).

Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 2 x 7 (2 painéis x 7 horas de determinação), com 6 repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância (teste F), comparando-se os painéis ao nível de significância de 5%. Efetuou-se o ajuste de modelos de regressão linear e polinomial, tomando-se como critério de escolha, os modelos com melhor R^2 (coeficiente de determinação). Os procedimentos estatísticos foram realizados com pacote “ExpDes.pt” (Ferreira, Cavalcanti & Nogueira, 2014) disponível no software estatístico R (R Development Core Team, 2014).

A taxa de energia térmica em cada hora foi estimada com base na massa de água do reservatório e na variação da entalpia da água em função da temperatura. Os valores de entalpia foram determinados com o auxílio de tabelas de propriedades termodinâmicas para a água (Borgnakke & Sonntag, 2009).

Os dados meteorológicos, para os dias dos ensaios, foram fornecidos pela estação meteorológica do CEMTEC-MS (Centro de Monitoramento de Tempo e do Clima de Mato Grosso do Sul), localizada sobre as coordenadas geográficas 22° 11' 38'' S e 54° 54' 41'' W.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 exibe os dados meteorológicos para os dias em que foram realizados os ensaios.

Tabela 1. Dados meteorológicos para os dias dos ensaios.

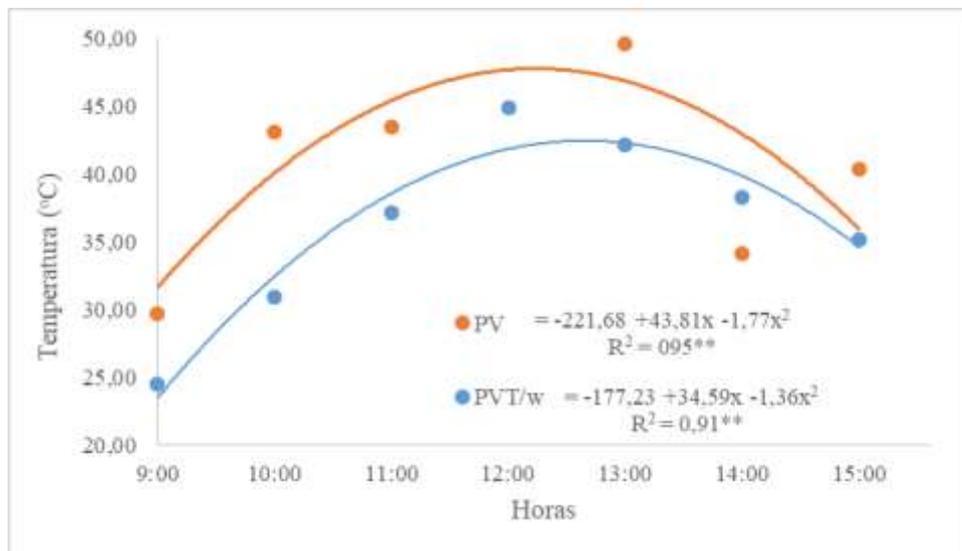
Dia	T (°C)	TM (°C)	HTM	V(ms ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
1	18.6	26.7	14:24	0.74	6.5
2	22.9	28.4	14:13	1.00	7.1
3	21.2	29.6	14:39	0.80	6.0
4	22.3	30.5	14:15	0.87	6.3
5	21.7	30.4	14:04	0.80	6.1
6	22.6	31.2	14:08	0.73	5.6
Média	21.6	29.5	-	0.82	6.3

Fonte: Centro de Monitoramento do Tempo, do Clima e dos Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul (<https://www.cemtec.ms.gov.br/boletins-meteorologicos/>).

Pela Tabela 1 nota-se que a temperatura média (T) esteve entre 18,6 e 22,9°C, enquanto que a temperatura máxima (TM) variou entre 26,7 e 31,2°C. As temperaturas máximas foram todas registradas por volta das 14:00 horas (HTM). A velocidade média do vento (V) foi de 0,82 m s⁻¹, enquanto a radiação líquida (Rad) variou de 5,6 a 7,1 MJ m⁻² dia⁻¹.

A Figura 4 mostra o ajuste de regressão para os valores de temperatura superficial dos painéis fotovoltaicos em função das horas do dia.

Figura 4. Temperatura dos painéis fotovoltaicos em função do horário de amostragem.

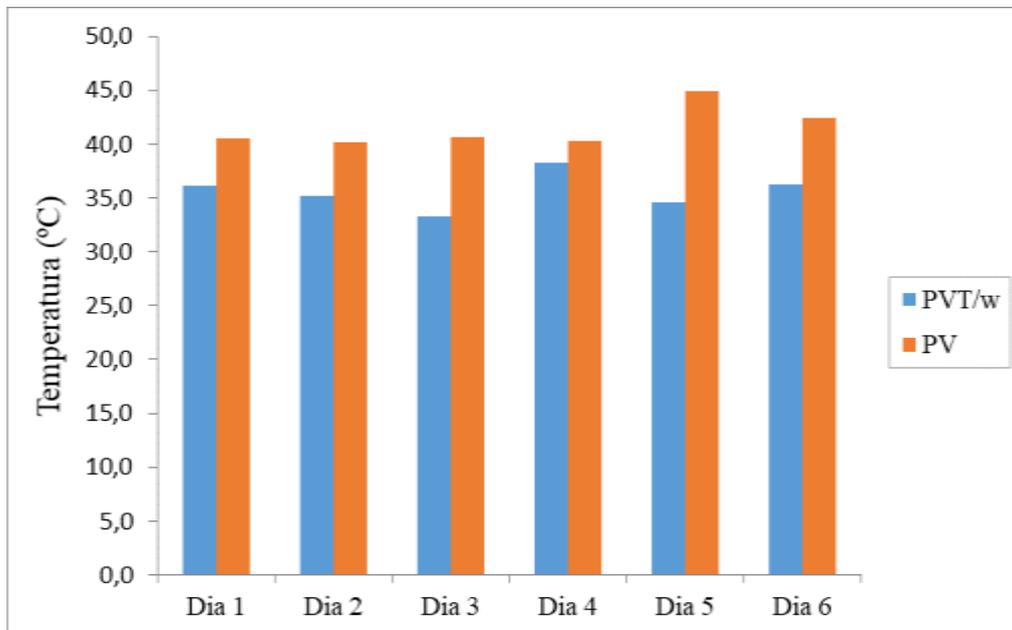


Fonte: Autores (2019).

Verificou-se que houve diferença significativa na temperatura entre os painéis durante a amostragem. A temperatura na superfície do PVT/w foi menor durante praticamente todo o tempo. As curvas de temperatura seguiram o comportamento típico de curvas de irradiância solar (Pereira, Vrisman & Galvani, 2002; De Souza, Da Silva & Ceballos, 2008; Da Silva, De Alvarenga, Pimentel & Marra, 2018), com ponto máximo ao meio-dia. Nesse horário, a temperatura do PV chegou aos 50 °C. A partir das 14 horas a diferença de temperatura entre os dois painéis diminuiu, com os valores convergindo no final.

Seguindo a mesma tendência dos valores horários, a temperatura média superficial diária (Figura 5) foi menor para o PVT/w, em todos os dias, com a diferença entre as placas sendo maior em alguns dias e menor em outros, isso em função de fatores como: temperatura da água de resfriamento do PVT/w, temperatura ambiente e velocidade do vento e radiação.

Figura 5. Temperatura média diária dos painéis.



Fonte: Autores (2019).

O dia 5 foi o que apresentou a maior diferença (10 °C), enquanto o dia 4 apresentou a menor (2°C). A partir do terceiro dia, com aumento da temperatura máxima ambiente (Tabela 1), as diferenças entre as placas apresentaram maior amplitude. Apesar destas variações diárias, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os dias avaliados, atribuindo-se a variação da temperatura diária ao efeito isolado dos painéis.

Dupré, Vaillon e Green (2017) demonstraram que o isolamento da parte inferior do painel fotovoltaico eleva a temperatura de operação, já que não há dissipação de calor nessa região. A chapa de madeira colocada como reforço no PVT/w, apesar da pequena espessura (15 mm), tem um efeito de isolamento, o que pode explicar uma menor diferença de temperatura entre os painéis, em função das condições de operação (ambiente).

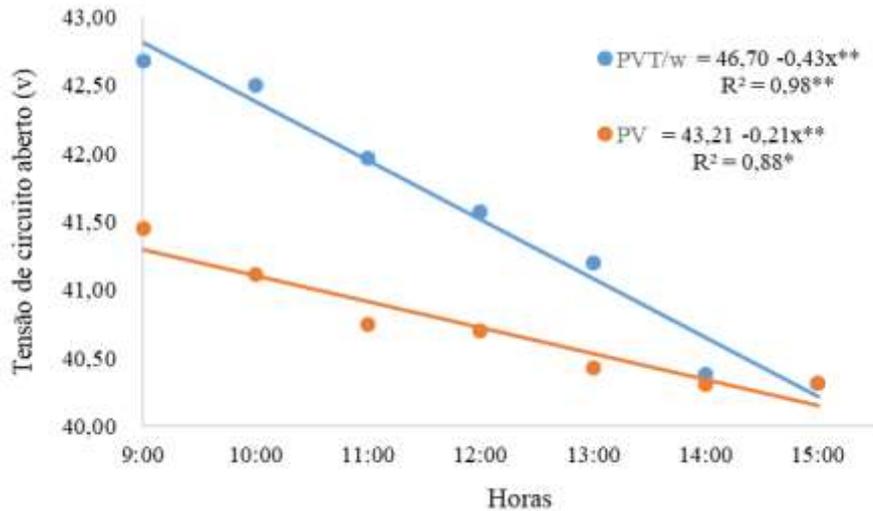
Amori e Abd-Alraheem (2014), trabalhando com resfriamento a ar (PVT/a) conseguiram uma redução de 15,52°C na temperatura da célula fotovoltaica, resultando em uma eficiência térmica (η_t) de 46%, uma eficiência elétrica (η_e) de 9,4% e uma eficiência global (η_o) de 55%.

Já Dorobantu, Popescu, Popescu e Craciunescu (2013) realizaram um estudo no qual o painel solar era resfriado com uma fina camada de água sobre a superfície, o que acarretou numa diminuição da temperatura da célula de 48 °C para 35,5°C, além de diminuir as perdas por reflexão.

Para os valores de tensão de circuito aberto (Figura 6), a análise estatística também mostrou ter havido diferença significativa entre os painéis, sendo que os maiores valores foram registrados para o PVT/w. Influenciada por fatores como radiação e temperatura superficial, as curvas de tensão mostram um comportamento linear decrescente ao longo do dia, com os maiores valores registrados às 9 horas e, os menores valores, registrados às 15 horas. Como verificado para o comportamento dos valores de temperatura superficial, no final os valores de tensão também convergem. Segundo Schwenzer et al. (2018), os

valores de tensão de circuito aberto de um painel fotovoltaico diminuem linearmente com o aumento da temperatura superficial.

Figura 6. Tensão dos painéis em função dos horários de amostragem.



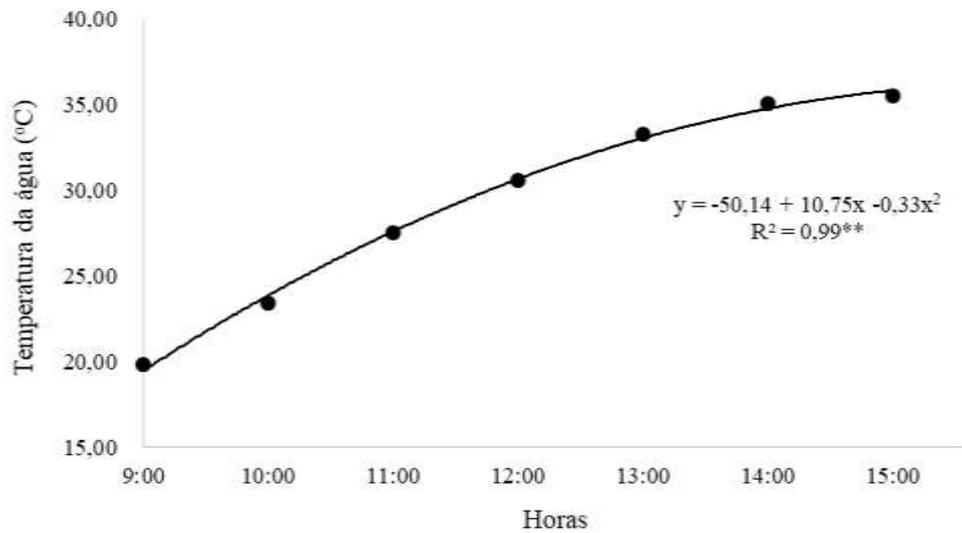
Fonte: Autores (2019).

O maior valor de tensão de circuito aberto registrada, foi de 43 V para o PVT/w, às 9:00 da manhã, com temperatura superficial da placa de 23,9°C. No entanto, as informações de catálogo técnico (Figura 1) indicam uma tensão de circuito aberto de 46,4 V para uma temperatura de operação normal (NOTC) de 50 °C. Fatores como a inclinação do painel ou mesmo a radiação podem ter tido influência nesse resultado.

Para uma temperatura de operação de um painel fotovoltaico de 51° C, muito semelhante ao NOCT, Gnoatto, Dallacort, Ricieri, Silva e Ferruzi (2005) obtiveram um rendimento 24% menor que o especificado pelo fabricante em condições de trabalho na STC (Standard TestConditions). Segundo De Souza, De Souza e Pereima (2018), embora o objetivo do NOCT seja representar a condição real a que os módulos estão sujeitos, é razoável considerar que há variações, por exemplo, da velocidade do vento e da temperatura do ar.

A Figura 7 mostra o comportamento da curva de temperatura média da água do reservatório conectado ao PVT/w, o que explica a convergência dos valores de temperatura superficial e tensão de circuito aberto.

Figura 7. Curvas de temperatura da água do reservatório térmico.



Fonte: Autores (2019).

Devido a característica do sistema utilizado (termoacumulativo), a temperatura da água vai se elevando ao longo do dia. Assim, a cada hora, a temperatura da água que circula vai ser maior, chegando ao ponto de manter certa temperatura no painel, mesmo quando a temperatura ambiente diminui. Certamente, se o ensaio pudesse ter sido realizado até às 17:00 horas, provavelmente ocorreria uma inversão nos valores de temperatura superficial e tensão dos painéis.

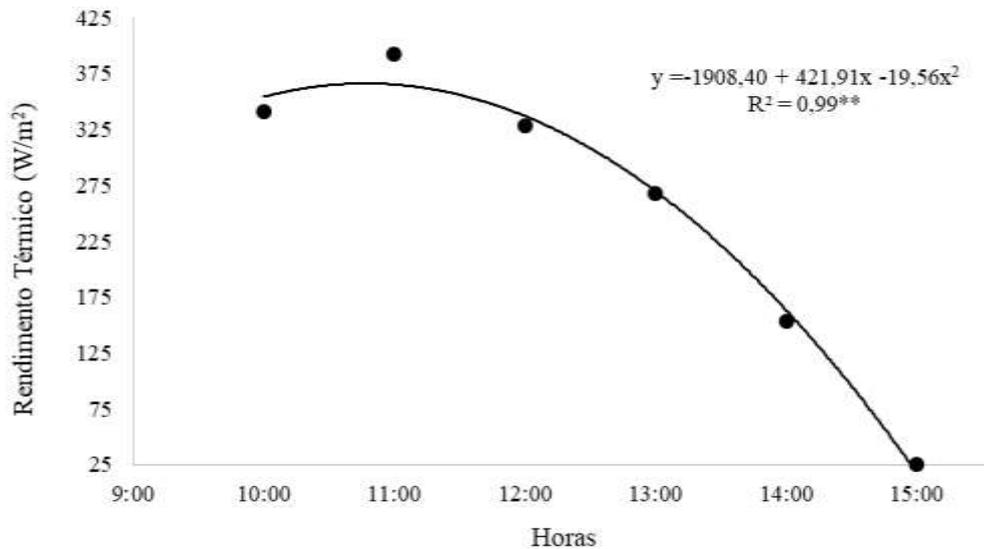
Fudholi et al. (2014), Dupeyrat et al. (2014) e Kumar, Baredar e Qureshi (2015) e Shyam, Tiwari e Al-Helal (2015) mostraram o efeito da temperatura da água de saída da placa na eficiência do sistema fotovoltaico térmico (PVT) em sistemas de acumulação. Segundo esses autores, a eficiência diminui à medida que a temperatura da água aumenta, pois o aumento de temperatura afeta a eficiência de conversão em energia elétrica das células fotovoltaicas (Aste, Del Pero & Leonforte, 2014; Pinho & Galdino, 2014; Da Silva, 2015; Ruviano, Daltrozo, Garlet, De Lourenço & Dos Santos, 2018).

Após às 14:00 horas, a temperatura da água mostra sinal de estabilização, com tendência de queda. A falta de isolamento na superfície do painel e o aumento da diferença de temperatura entre a água e o ar ambiente implicam num aumento da troca de calor e da perda de energia para o ambiente. Se pelo lado da geração elétrica é importante ter a maior dissipação de calor possível, isso já não é bom pelo lado do aproveitamento térmico. Alguns modelos de PVT possuem cobertura de vidro sobre as células fotovoltaicas, como uma forma de evitar essa dissipação de calor (Chow, 2010; Daghigh, Ruslan & Sopian, 2011; Dupeyrat et al., 2014; Kumar et al., 2015).

Segundo Dupeyrat et al. (2014), embora a presença de uma cobertura de vidro adicional possa reduzir levemente o desempenho óptico e fotovoltaico do módulo, ela aumenta fortemente o desempenho térmico do coletor, levando a uma melhor conversão geral de energia em comparação com coletores não cobertos.

A Figura 8 mostra o comportamento do rendimento térmico para geração de água quente.

Figura 8. Rendimento térmico para geração de água quente.



Fonte: Autores (2019).

O comportamento da curva é semelhante ao obtido por Jordan, Seye e Motomiya (2015) em ensaio de coletores solares em diferentes vazões. A diferença está nos valores, enquanto esses autores obtiveram valores máximos (de pico) superiores a 1000 W m^{-2} e médio diário variando entre 608 e 715 W m^{-2} , aqui o valor máximo médio foi de 392 W m^{-2} e, o médio diário, de 252 W m^{-2} . No entanto, deve se levar em conta que no caso do PVT, se trata de um aproveitamento de energia térmica.

Um dos objetivos principais deste tipo de sistema é a melhoria da eficiência elétrica da célula fotovoltaica que, mesmo possuindo um pequeno potencial térmico, possui diversas aplicações, tais como climatização de ambientes e secagem de produtos, além de prover um melhor aproveitamento do espaço físico disponível (Duffie & Beckman, 2013; Dupeyrat et al., 2014; Al-Waeli et al. 2016; Tiwari, Meraj & Khan, 2018).

Fudholi et al. (2014), analisando o desempenho de um PVT/w em condições de laboratório, com radiação de 800 W m^{-2} e um fluxo de massa de $0,041 \text{ kg s}^{-1}$, obtiveram uma eficiência térmica de 52%, o que resulta em um rendimento térmico de 416 W m^{-2} , valor condizente com o valor médio máximo encontrado nesse trabalho, considerando que o valor médio da irradiância máxima para o Centro Oeste está em torno de 800 W m^{-2} ao meio dia (De Souza et al., 2008; Da Silva et al., 2018), 11 horas no fuso local.

Com base nos dados de catálogo técnico (eficiência elétrica de 13,6%, irradiância de 1000 W m^{-2}), estimou-se um rendimento energético de aproximadamente 107 W m^{-2} para o PV (energia elétrica). Segundo Bhargava, Garg e Agarwal (1991), Fujisawa e Tani (1997), Chow (2010) e Fudholi et al. (2014), a eficiência de um PVT é a soma da eficiência elétrica e térmica. Assim, somando o rendimento térmico médio obtido nos ensaios ao rendimento elétrico estimado para as condições de teste do PV, tem-se que o rendimento total, rendimento do PVT, seria da ordem de 359 W m^{-2} , e que considerando as condições de ensaio do fabricante (irradiância de 1000 W m^{-2}), resulta em um valor estimado de 35,9% para eficiência do PVT, um aumento de 161% em relação ao PV.

Rockendorf, Sillmann, Podlowski e Litzenburger (1999) ao instalarem células PV laminadas na superfície de um absorvedor solar de alumínio, que foi inserido em um coletor térmico, com cobertura de vidro e isolamento térmico, verificaram uma eficiência térmica medida a um nível de irradiância de 820 W m^{-2} de 63,3%, que somada a eficiência elétrica de 10,3%, resultou em uma eficiência geral de 73,6%. Outros autores trabalhando com PVT também obtiveram resultados

semelhantes com relação a eficiência geral (Tripanagnostopoulos, Nousia, Souliotis & Yianoulis, 2002; Zondag, De Vries, Van Helden, Van Zolingen & Van Steenhoven, 2003; Ji, Lu, Chow, He & Pei, 2007).

4. Conclusão

Com a conversão do PV em PTV/w, foi possível reduzir a temperatura de operação e aumentar enormemente a conversão de energia solar por área (rendimento térmico), sem afetar a geração de energia elétrica. Sendo possível assim, obter duas formas de energia (elétrica e térmica) a partir da energia solar, em um único equipamento, o que implica em economia de espaço e melhor aproveitamento do potencial solar.

Para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar a operação do PVT/w por um período maior do dia (8 às 17 horas), analisar o efeito do aquecimento da água em temperaturas mais elevadas sob o desempenho elétrico do PV e também avaliar o desempenho elétrico sob carga.

Referências

- Al-Waeli, A. H., Kazem, H. A., Sopian, K. B. & Chaichan, M. T. (2016). Photovoltaic Solar Thermal (PV/T) Collectors Past, Present and Future: A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*. 11(22), 10757-65. ISSN 0973-4562. https://www.researchgate.net/profile/Hussein-A-Kazem/publication/311204612_Photovoltaiac_Solar_Thermal_PVT_Collectors_Past_Present_and_Future_A_Review/links/583f11e008ae2d217557dac6/Photo-voltaic-Solar-Thermal-PV-T-Collectors-Past-Present-and-Future-A-Review.pdf.
- Amori, K. E. & Abd-Alraheem, M. A. (2014). Field study of various ais based photovoltaic/thermal hybrid solar collectors. *Renewable energy*. 63, 402-14. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.047>.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. (2020). *Matriz de Energia Elétrica*. <https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>.
- Aste, N., Del Pero, C. & Leonforte, F. (2014). Water flat plate PV–thermal collectors: A review. *Solar Energy*. 102, 98-115. ISSN 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.025>.
- Bhargava, A. K., Garg, H. P. & Agarwal, R. K. (1991). Study of a hybrid solar system-solar air heater combined with solar cells. *Energy Conversion and Management*. 31(5), 471-79. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(91\)90028-H](https://doi.org/10.1016/0196-8904(91)90028-H).
- Beltrão, R. E. de A. (2008). *Efeito da Temperatura na Geração de Energia de Módulos Fotovoltaicos Submetidos a Condições Climáticas Distintas. Estudo de Caso para as Localidades de Recife e Araripina*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Energia Nuclear. Recife-PE. https://atena.ufpe.br/bitstream/123456789/9740/1/arquivo8636_1.pdf.
- Borgnakke, C. & Sonntag, R. E. (2009). *Fundamentos da Termodinâmica*. (7a ed.), Ed. Edgard Blücher, 454 p.
- BP. *BP Statistical Review of World Energy*. (2019). <http://www.bp.com>.
- Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, M. T., Scherzer, A., Tramberend, S., Nava, L. F., Wada, Y., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Magnuszewski, P., Cosgrove, B. & Wiberg, D. (2016). *Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final Report)*. IIASA Working Paper (International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria). <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13008/1/WP-16-006.pdf>.
- Ancines, C., Krenzinger, A. & Soares, L. D. M. (2016). Comparação entre o desempenho de um coletor híbrido térmico fotovoltaico com um coletor plano e um módulo fotovoltaico convencional. *Avances em Energias Renovables y Medio Ambiente*. 20(4). 81-92. https://www.researchgate.net/publication/317587874_COMPARACAO_ENTRE_O_DESEMPENHO_DE_UM_COLETOR_HIBRIDO_TERMICO_FOTOVOLTAICO_COM_UM_COLETOR_PLANO_E_UM_MODULO_FOTOVOLTAICO_CONVENCIONAL.
- Chow, T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*. 87, 365–79. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>.
- Cox, C. H. & Raghuraman, P. (1985). Design considerations for flat-platephotovoltaic/thermal collectors. *Solar Energy*. 35(3), 227-41. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(85\)90102-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90102-1).
- Daghigh, R., Ruslan, M. H. & Sopian, K. (2011). Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15, 4156-70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.028>.
- Da Silva, J. A. A., De Alvarenga, B. P., Pimentel, S. P. & Marra, E. G. (2018). *Tratamento e Análise de Dados Solarimétricos da Estação Meteorológica da EMC/UFG*. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/725>.
- Da Silva, V. O. (2015). *Estudo e Modelagem da Arquitetura Modular de uma Usina Solar Fotovoltaica Arrefecida com Protótipo de Verificação*. (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-22072016-163255/en.php>.

- De Souza, J. D., Da Silva, B. B. & Ceballos, J. C. (2008). Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. *Revista Brasileira de Geofísica*. 26(1), 31-44. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100003>.
- De Souza, M. A., De Souza, J. P. & Pereima, A. T. (2018). Simplified Methodology for Temperature Calculation of Operation and Photovoltaic Modules Yield in Non-Standardized Environmental Conditions. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 61, no.spe: e18000170. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2018000170>.
- Dorobantu, L., Popescu, M. O., Popescu, C. L. & Craciunescu, A. (2013). Experimental Assessment of PV Panels Front Water Cooling Strategy. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality. RE&PQJ*. 1(11), 1009-12. <https://doi.org/10.24084/repqj11.510>.
- Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. (4a ed.), John Wiley & Sons. 2013. 936 p.
- Dupeyrat, P., Ménéz, C. & Fortuin, S. (2014). Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system. *Energy and Buildings*. 68, 751-55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.032>.
- Dupré, O., Vaillon, R. & Green, M. A. (2017). *Thermal Behavior of Photovoltaic Devices: Physics and Engineering*. Ed. Springer, 220 p.
- EIA. Energy Information Administration. (2019). *International Energy Outlook 2019: With Projections to 2050*. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. (2015). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2024*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Empresa de Pesquisa Energética. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia/documentos/04-plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde-2024.pdf>
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). "Energy-smart" food for people and climate. Issue paper. <http://www.fao.org/3/a-i2454e.pdf>.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). *Food Wastage Footprint – Impacts on Natural Resources*. <http://www.fao.org/3/i3347e/i3347e.pdf>.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *The Future of Food and Agriculture - Trends and challenges*. Roma. <http://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>.
- Ferreira, E. B., Cavalcanti, P. P. & Nogueira, D. A. (2014). ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. *Applied Mathematics*. 5, 2952-58. <http://dx.doi.org/10.4236/am.2014.519280>.
- Florschuetz, L.W. (1979). Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. *Solar Energy*. 22(4), 361-66. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90190-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90190-7).
- Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Ibrahim, A. & Kazem, H. A. (2014). Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. *Energy Conversion and Management*. 78, 641-51. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.017>.
- Fujisawa, T., Tani, T. (1997). Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 47(1-4), 135-48. ISSN 0927-0248. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00034-2).
- Gnoatto, E., Dallacort, R., Ricieri, R. P., Silva, S. L. & Ferruzi, Y. (2005). Determinação da curva característica de um painel fotovoltaico em condições reais de trabalho. *Acta Scientiarum. Technology*. Maringá. 27(2), 191-96. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226514011>.
- Guerra, M. I. S. (2016). *Análise do desempenho elétrico de um gerador fotovoltaico com o auxílio da tecnologia PVT*. 141f. (Dissertação de Mestrado). Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/11644>.
- Hajjaj, C., Benhmida, M., Bendaoud, R., Amiry, H., Bounouar, S., Ghennioui, A., Chanaa, F., Yadir, S., Elhassnaoui, A. & Ezzaki, H. (2019). A PVT Cooling System Design and Realization: Temperature Effect on the PV Module Performance Under Real Operating Conditions. *International Journal of Renewable Energy Research*. Marrocos. 9(1), 1-13. <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/8789>.
- Ji, J., Lu, J. P., Chow, T. T., He, W. & Pei, G. (2007). A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy*. 84, 222-37. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.04.009>.
- Jordan, R. A., Seye, O. & Motomiya, A. V. (2015). A Influência da vazão de água sobre o rendimento de um coletor solar plano construído em termoplástico. *Revista Engenharia Agrícola*. Jaboticabal. 35(4), 665-75. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n4p665-675/2015>.
- Kern Jr, E. C. & Russel, M. C. (1978). *Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems*. Proceedings of the 13th ISES Photovoltaic Specialists, Washington. 1153-57. <https://www.osti.gov/servlets/purl/6352146>.
- Köppen, W. & Geiger, R. (1928). *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150 x 200 cm.
- Kumar, A., Baredar, P. & Qureshi, U. (2015). Historical and recent development of photovoltaic thermal (PVT) technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 42, 1428-36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.044>.
- Medeiros, R. R. B. (2017). *Estudo de desempenho de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico*. 79f. (Dissertação de Mestrado). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/22399>.
- Pereira, A. B., Vrisman, A. L. & Galvani, E. (2002). Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar da superfície do solo. *Scientia Agrícola*. 59(2), 211-16. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000200002>.

- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. UFSM. https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.
- Pinho, J. T. & Galdino, M. A. (Org.) (2014). Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf.
- Prakash J. (1994). Transient Analysis of a Photovoltaic Thermal Solar Collector for Cogeneration of Electricity and Hot Air Water. *Energy Conversion and Management*. 35, 967-72. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(94\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)90027-2).
- R Development Core Team. (2014). *R: Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>.
- Rockendorf, G., Sillmann, R., Podlowski, L. & Litzenburger, B. (1999). PV hybrid and thermoelectric collectors. *Solar Energy*. 67, 227-37. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00075-X).
- Ruviario, R. S., Daltrozo, J. G., Garlet, L., De Lourenço, W. M. & Dos Santos, I. P. (2018). *Análise da Variação da Eficiência do Módulo Fotovoltaico em Função da Temperatura*. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - Gramado. https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/29/29?fbclid=IwAR387SSU2hENOZfRUho_SWKXXQvUVs3WB9T4p88dSyr4CR3--LFIkqBKSWE.
- Schwenzer, J. A., Rakocevic, L., Gehlhaar, R., Abzieher, T., Gharibzadeh, S., Moghadamzadeh, S., Quintilla, A., Richards, B. S., Lemmer, U. & Paetzold, U. W. (2018). Temperature Variation-Induced Performance Decline of Perovskite Solar Cells. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 10(19), 16390-99. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b01033>.
- Shyam, Tiwari, G. N. & Al-Helal, I. M. (2015). Analytical expression of temperature dependent electrical efficiency of N-PVT water collectors connected in series. *Solar Energy*. 114, 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.026>.
- Simioni, T. (2017). *O Impacto da Temperatura para o Aproveitamento do Potencial Solar Fotovoltaico do Brasil*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro-RJ. <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/dissertacoes/2017/268-o-impacto-da-temperatura-para-o-aproveitamento-do-potencial-solar-fotovoltaico-do-brasil>.
- Tiwari, G. N., Meraj, Md. & Khan, M. E. (2018). Exergy analysis of N-photovoltaic thermal-compound parabolic concentrator (N-PVT-CPC) collector for constant collection temperature for vapor absorption refrigeration (VAR) system. *Solar Energy*. 173, 1032-42. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.031>.
- Tripapanagnostopoulos, Y., Nousia, T., Souliotis, M. & Yianoulis, P. (2002). Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy*. 72, 217-34. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00096-2).
- UN. United Nations. (Org.). (2019). "Growing at a slower pace, world population is expected to reach 9.7 billion in 2050 and could peak at nearly 11 billion around 2100". <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2019.html>.
- Zondag, H. A., De Vries, D. W., Van Helden, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C. & Van Steenhoven, A. A. (2003). The yield of different combined PV–thermal collector designs. *Solar Energy*. 74, 253-69. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00121-X).