

DESEMPENHO ELÉTRICO E TÉRMICO DE MÓDULO FOTOVOLTAICO-TÉRMICO (FVT) SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CÉU

Bruna de Oliveira Busson – bruna.busson@yahoo.com.br

Rafael Pereira da Cruz

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Uallas Henrique de Oliveira de Brito

Petrobras

Rafael Willian Faleiros

Júlio César Passos

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. A energia solar é uma opção de energia renovável capaz de fornecer tanto eletricidade como calor. Para aproveitar ao máximo a energia solar disponível, converte-se um módulo fotovoltaico (FV) em módulo fotovoltaico-térmico (FVT) a partir da instalação de um trocador de calor de polipropileno (PP). O objetivo é verificar o desempenho de um módulo FVT, em dias de céu claro e nublado, utilizando água para arrefecer as células FV e aproveitá-la aquecida para outros fins. A bancada de testes possui um módulo FVT ao lado de um FV para comparação dos seus desempenhos energéticos com dados coletados entre 11:00 e 13:00 horas. A raiz do valor quadrático médio (RMS) da irradiância solar no plano inclinado no dia de céu claro (Dia 1) é de 857 W/m^2 e no dia de céu nublado (Dia 2) é de 459 W/m^2 . No Dia 1, a diferença entre as temperaturas de entrada e saída da água é de cerca de $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ maior do que a diferença entre essas temperaturas no Dia 2. Assim, a maior irradiação solar produz uma potência térmica máxima de 980 W no Dia 1, enquanto no Dia 2, 735 W . No entanto, o trocador de PP tem uma eficiência térmica com valores RMS próximos independente das condições do céu. Por sua vez, a eficiência elétrica depende fortemente das condições climáticas, pois tanto a irradiância solar quanto a temperatura ambiente influenciam na temperatura de operação FV. No Dia 1, devido à irradiância superior no período analisado, a eficiência elétrica é inferior à eficiência do Dia 2, pois o módulo FVT apresenta temperatura superior no Dia 1 em relação ao Dia 2. A maior vantagem energética do módulo FVT em relação ao FV deve-se tanto ao seu maior desempenho elétrico como térmico em dias de céu claro e nublado.

Palavras-chave: Módulo FVT, Desempenho Elétrico, Desempenho Térmico.

1. INTRODUÇÃO

Uma estratégia para enfrentar as mudanças climáticas globais é melhorar a eficiência energética dos sistemas energéticos, que possa buscar a segurança energética e o desenvolvimento econômico sem prejudicar os avanços tecnológicos na sociedade (Bukarica e Tomšić, 2017; Lima, Ferreira e Moraes, 2017). As fontes não renováveis utilizadas principalmente nos setores energético e de transportes intensificam a emissão de poluentes aumentando as emissões de CO_2 e, conseqüentemente, o aquecimento global e outros problemas ambientais (Fraidenraich et al., 2022; Rocha, 2019).

Embora as fontes não renováveis forneçam 70% da energia global disponível, a procura de petróleo, carvão e gás natural reduziu-se em 14%, 4% e 2%, respectivamente, em 2020 em relação a 2019. Ao mesmo tempo, a participação das fontes renováveis aumentou 3% em 2020 (IEA, 2021). O Sol revela-se uma promissora fonte renovável capaz de fornecer calor e eletricidade, fazendo parte da cultura humana há milênios (Pinho e Galdino, 2014; Barbón, et al., 2019; Mathew e Venugopal, 2021; Fraidenraich et al., 2022). A energia solar é um exemplo de opção de fonte renovável. Por exemplo, em 2019, os coletores solares térmicos (ST) foram responsáveis pelo fornecimento de 389 TWh de energia e os sistemas solares fotovoltaicos (FV) por 751 TWh de eletricidade no mundo (Weiss e Spörk-Dür, 2020).

Para aproveitar ao máximo a energia disponível da irradiação solar surge a tecnologia fotovoltaica-térmica (FVT) que combina a geração de eletricidade por módulos fotovoltaicos e água quente por coletores ST. Os sistemas FVT podem alcançar uma melhoria na eficiência global, pois aumentam a eficiência elétrica devido ao efeito de resfriamento e utilizam a energia térmica removida pela água para outras aplicações (Allan et al., 2015). Normalmente, a configuração dos módulos FVT é com módulo FV com trocador de calor acoplado na superfície traseira (Lenin et al., 2019). As células fotovoltaicas também se comportam como absorvedores térmicos, pois a radiação solar não convertida é transformada em energia térmica e depois transferida para fluido refrigerante (Guarracino et al., 2016).

Além de serem diferenciados entre si pelo tipo de fluido de trabalho, os módulos FVT são categorizados a partir do tipo de trocador de calor que empregam. O trocador pode ser do tipo placa e tubo com dutos fixados sob a superfície inferior de uma chapa fixada no módulo FV ou do tipo completamente molhado com canais retangulares na superfície inferior do módulo, o que promove um aumento na área de troca de calor (Kim e Kim, 2012). No entanto, o maior desafio envolvendo módulos FVT está no balanceamento entre a otimização das eficiências elétrica e térmica (Shyam, Tiwari e Al-Helal, 2015). As duas, por sua vez, aumentam com a elevação da vazão de água, pois a transferência de calor global

para a água é melhorada e a eficiência elétrica também (Nasrin, Hasanuzzaman e Rahim, 2018). Além disso, a eficiência do FVT depende do tipo de fluido de trabalho, material das células, cobertura vítrea, padrão de escoamento e tipo de trocador de calor (Chow, 2010; Herrando et al., 2019).

O principal objetivo do presente artigo é atestar o desempenho do módulo FVT com trocador de calor de polipropileno (PP) com canais retangulares em dia de céu claro e nublado em um período de 2 horas em torno do meio-dia. O módulo FVT é obtido a partir da instalação de um trocador de calor de PP em um módulo FV convencional de maneira rápida e prática. A água é o fluido escolhido para circular nos canais do trocador e arrefecer as células FV, este líquido é o mais comumente utilizado em sistemas FVT tanto pela sua capacidade térmica como sua versatilidade em posterior aplicação. O arrefecimento promovido pela água aumenta a geração de eletricidade do módulo FVT ao mesmo tempo que produz energia térmica, conseguindo, assim, um maior aproveitamento da energia solar disponível.

2. METODOLOGIA

O trocador de calor utilizado nos testes experimentais é feito de canais paralelos retangulares de PP. No interior dos canais de PP circula água que retira o calor do módulo FV e a água aquecida é conduzida para um reservatório térmico. Este novo tipo de trocador de PP é facilmente moldado, apresenta baixo custo e instalação simples. A Fig. 1 mostra o módulo FVT utilizado nos experimentos com o trocador de calor de PP instalado sob a superfície posterior do módulo. Neste módulo FVT, a água fria entra pela parte inferior e a água quente é coletada na parte superior do trocador.



Figura 1 - Módulo FVT com trocador de calor de PP.

A bancada de testes está localizada no Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina (LEPTEN/USFC) em Florianópolis. Nesta bancada são avaliados um módulo FV e um FVT lado a lado, como mostra a Fig. 2, cujas especificações estão na Tab. 1.



Figura 2 - Módulos FVT e FV da bancada de testes do LEPTEN/UFSC.

Tabela 1 - Especificações elétricas dos módulos FV e FVT da marca *Canadian Solar* da bancada de testes do LEPTEN/UFSC para as condições de irradiância 1.000 W/m^2 , temperatura de célula $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e espectro AM 1,5.

CARACTERÍSTICA	MÓDULO FV	MÓDULO FVT
Modelo	CS3W-405P	CS3W-405P
Potência Nominal	405 Wp	405 Wp
Área	2,21 m ²	2,21 m ² (+ área do trocador de PP = 1,64 m ²)
Eficiência Nominal	18,33%	18,33%
Tensão de Máxima Potência	35,5 V	35,5 V
Corrente de Máxima Potência	8,48 A	8,48 A
Tensão de Circuito Aberto	47,4 V	47,4 V
Corrente de Curto-Circuito	10,98 A	10,98 A
Coefficiente de Temperatura (Potência máxima)	-0,37%/°C	-0,37%/°C
Coefficiente de Temperatura (Tensão de Circuito Aberto)	-0,29%/°C	-0,29%/°C
Coefficiente de Temperatura (Corrente de Curto-Circuito)	0,05%/°C	0,05%/°C

Os dados da bancada são coletados a cada 10 segundos por um Sistema de Aquisição de Dados (SAD) num intervalo de 2:00 horas entre 11:00 e 13:00 horas de dois dias com características de céu diferente. Apesar do SAD ser capaz de realizar medições ao longo de todo o dia, assim como os módulos FV e FVT conseguem gerar durante todo o período de exposição solar, a análise é realizada apenas com os dados coletados durante o horário de máxima radiação solar incidente.

O dia identificado como Dia 1 é um dia de céu claro, já o nomeado como Dia 2 é um dia de céu nublado. A irradiância solar no plano inclinado de 27° medida pelo piranômetro de Classe B no Dia 1 é, em média, cerca do dobro da irradiância medida no Dia 2. As outras medições são realizadas por sensores PT100, anemômetro e medidor de vazão. Destacando que, todas as médias calculadas no presente artigo são do tipo raiz do valor quadrático médio (RMS).

A eficiência térmica instantânea do módulo FVT é calculada a partir da razão entre a potência térmica, advinda da relação entre a vazão de água no trocador de PP e a diferença entre as temperaturas de entrada e saída de água, e a irradiância solar incidente no plano inclinado. Por sua vez, a eficiência de conversão elétrica instantânea é obtida através da razão entre a potência elétrica e a irradiância no plano inclinado. A potência elétrica é resultado do produto entre a tensão e a corrente, medidas por transdutores de tensão e corrente conectados na saída dos módulos.

Se for feita a integração das potências elétrica e térmica instantânea ao longo das duas horas de medição, obtém-se a energia global obtida de um módulo FVT no intervalo de 2:00 horas tanto em um dia de céu claro quanto em um dia de céu nublado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 3 apresenta as curvas de irradiância durante o período de 11:00 e 13:00 horas quando o sistema FVT foi posto em operação. A curva identificada como Dia 1 apresenta o comportamento da irradiância em um dia cujo valor RMS da irradiância foi de $857,2 \text{ W/m}^2$, já a curva rotulada como Dia 2 refere-se à curva de irradiância com valor RMS de $458,7 \text{ W/m}^2$. As duas curvas de irradiância da Fig. 1 são acompanhadas das temperaturas ambiente medidas. No Dia 1, a temperatura ambiente ficou na faixa de $28 \text{ }^\circ\text{C}$ a $32 \text{ }^\circ\text{C}$, o mesmo ocorreu no Dia 2. Mesmo tratando-se de níveis de irradiância diferentes, o Dia 1 era quase o dobro do Dia 2, as temperaturas ambientes eram próximas.

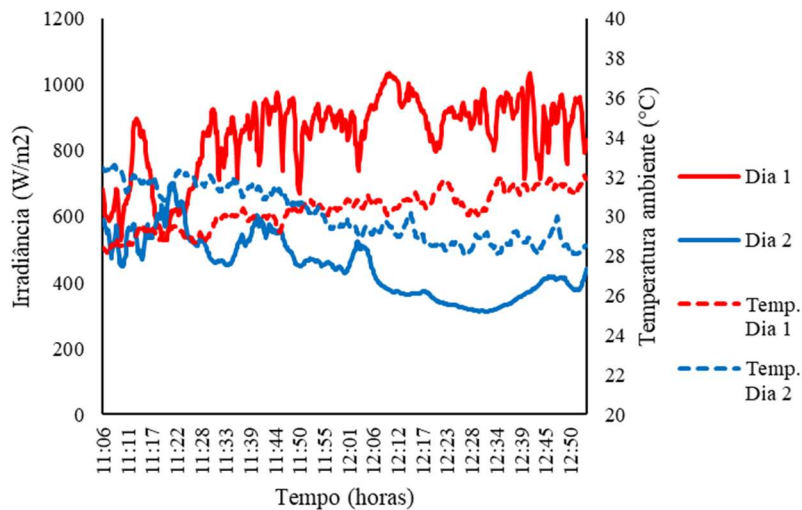


Figura 3 - Comparação da irradiância e da temperatura dos dois dias em análise durante o mesmo período.

Como a produção de energia térmica está relacionada à irradiação solar que atinge a superfície superior do módulo FVT, é de se esperar que no dia com a maior média do nível de irradiância solar seja também aquele com maior diferença entre as temperaturas de entrada e saída da água, como pode ser visto na Fig. 4. No Dia 1, a RMS da diferença entre a temperatura de entrada e saída da água do trocador durante o período de 11:00 a 13:00 horas é de 1,7 °C. Esse valor é superior à RMS de 1,1 °C entre as temperaturas de entrada e saída da água do Dia 2. Apesar de a irradiância solar ser mais baixa no Dia 2, o módulo FVT ainda é capaz de aquecer a água.

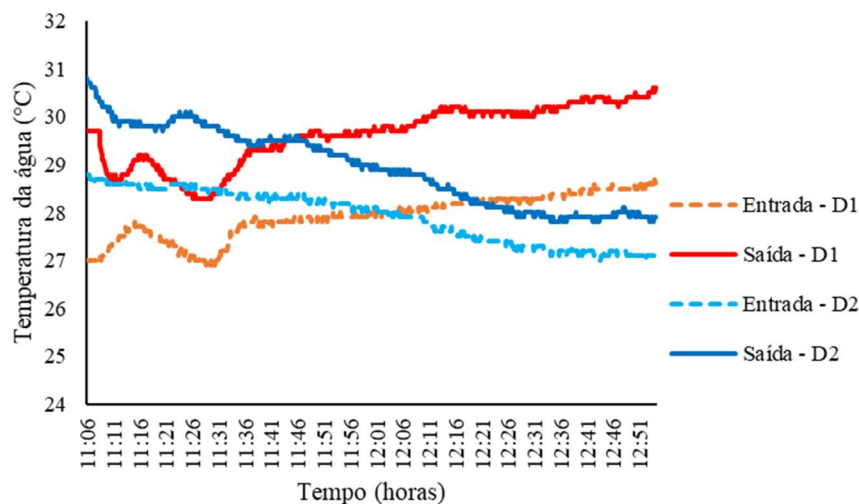


Figura 4- Diferença entre as temperaturas de entrada e saída da água do trocador de calor do módulo FVT.

Se as curvas de temperatura da água da Fig. 4 forem comparadas com as curvas de irradiância solar da Fig.3, verifica-se que quando o fluxo energético solar diminui também se diminui a elevação da temperatura da água, ou seja, há uma redução no ganho com a energia térmica em valores absolutos. No Dia 1, a potência térmica gerada pelo módulo FVT variou de 550 W a 980 W. No Dia 2, a potência térmica gerada variou de 270 W a 735 W. Dentro do período de tempo e dos dias analisados, há uma demonstração da influência da energia solar no desempenho térmico de um módulo FVT.

Entretanto, a Fig. 5 mostra que a eficiência térmica instantânea comporta-se de forma parecida com valores oscilando entre 30% e 60%. Os valores RMS da eficiência térmica instantânea foram de 44% no Dia 1 e 47% no Dia 2. Assim, o nível de irradiância não tem forte influência na eficiência térmica, mas impacta diretamente na potência térmica gerada.

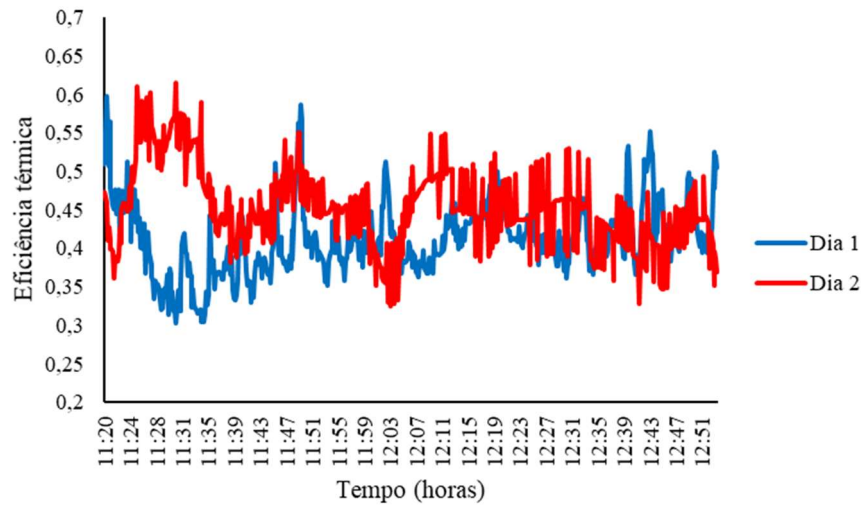


Figura 5 - Comparação entre as eficiências térmicas do módulo FVT nos dois dias sob análise.

Tanto a irradiância solar incidente como a temperatura ambiente influenciam na temperatura de operação das células FV, por isso torna-se interessante o arrefecimento de um módulo FV convertendo-o em módulo FVT. A Fig. 6 mostra o efeito do arrefecimento pela circulação de água dentro dos canais do trocador de calor do módulo FVT em relação ao módulo FV entre 11:00 e 13:00 horas dos Dias 1 e 2. A Fig. 7 demonstra a relação entre a eficiência elétrica instantânea e a temperatura de operação do módulo FVT. Como a temperatura de operação do módulo FVT no Dia 1 com maior nível de irradiância é superior à temperatura do módulo FVT do Dia 2, a eficiência elétrica do Dia 1 é menor do que do dia Dia 2.

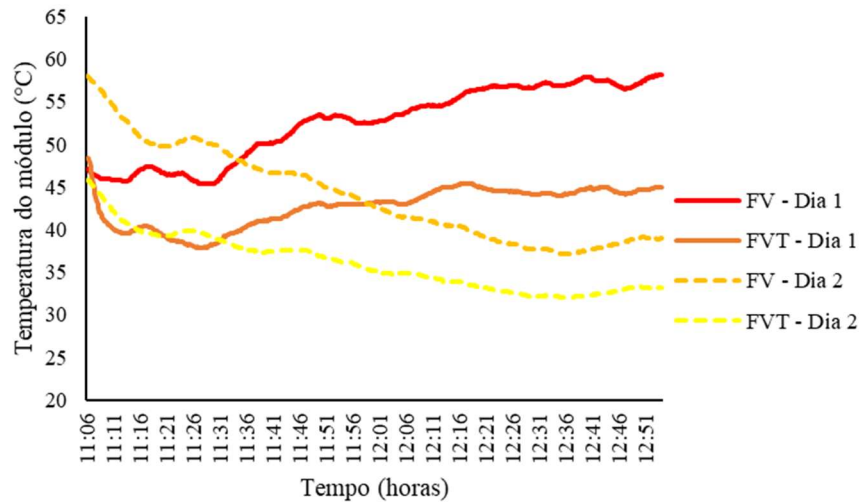


Figura 6 - Temperaturas de operação dos módulos FV e FVT nos dias sob análise.

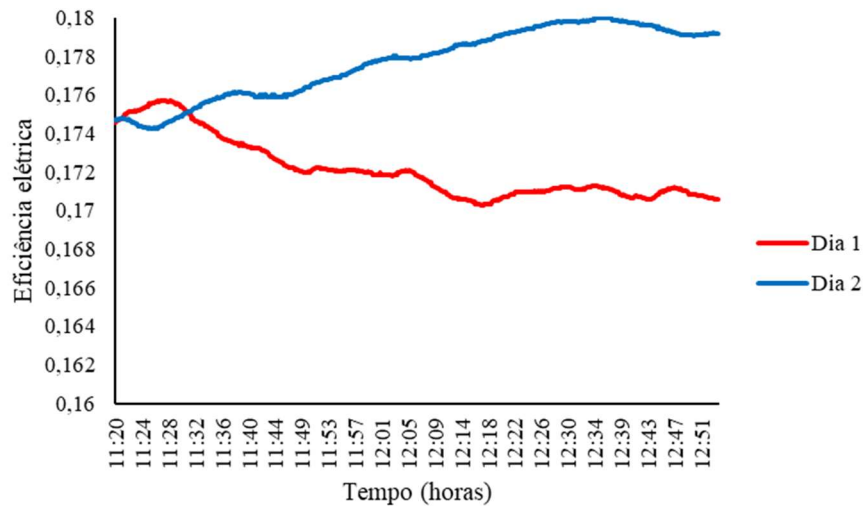


Figura 7 - Comparação entre as eficiências elétrica do módulo FVT nos dois dias sob análise.

Observando a Fig. 7, nota-se que a curva de eficiência de conversão elétrica tende a diminuir justamente quando a curva da temperatura do módulo FVT da Fig. 6 aumenta. Como a temperatura de operação influencia na geração de eletricidade, o módulo FVT produziu mais eletricidade do que o módulo FV dentro do período analisado independente da cobertura de nuvens no céu. No Dia 1 (céu claro), entre 11:00 e 13:00 horas, o módulo FVT gerou 583 Wh de eletricidade enquanto o módulo FV gerou 559 Wh. No Dia 2 (céu nublado), entre 11:00 e 13:00 horas, o módulo FVT gerou 317 Wh enquanto o módulo FV gerou 306 Wh.

4. CONCLUSÕES

Um trocador de calor PP foi utilizado para converter um módulo FV convencional em módulo FVT com o objetivo de arrefecer as células FV ao mesmo tempo em que maximiza o ganho a partir da energia solar pela produção de energia térmica e elétrica. Esse novo tipo de trocador de calor utilizado é mais barato devido ao material de fabricação (PP) e de fácil conformação. Dentro dos canais retangulares do trocador de PP instalado sob o módulo circula água que diminui a temperatura de operação das células FV aumentando sua eficiência de conversão elétrica. A água aquecida, por sua vez, pode ser usada em processos que demandem energia térmica.

Como esperado, a produção de energia térmica foi mais elevada no dia com maior nível RMS de irradiância solar, por conta da maior diferença entre a temperatura da água na entrada e saída do trocador de calor. No Dia 1 (céu claro), a diferença entre essas temperaturas é cerca de 0,7 °C superior à diferença entre as mesmas temperaturas no Dia 2 (céu nublado). A diminuição no fluxo solar energético disponível permitiu verificar a capacidade de elevar a temperatura da água sendo reduzida. Dessa forma, houve diminuição no ganho de energia térmica, ressaltando que mesmo nessa condição o módulo FVT ainda foi capaz de aquecer a água.

Embora exista uma forte influência da energia solar no desempenho térmico do módulo FVT pela potência térmica produzida, observou-se que a eficiência térmica instantânea comportou-se de forma semelhante para os dias analisados, com valores RMS de 44% e 47% para o Dia 1 e o Dia 2, respectivamente. Portanto, a eficiência térmica durante o intervalo de tempo avaliado não sofreu variações significativas em relação à irradiância solar incidente no plano inclinado.

Tanto a irradiância solar como a temperatura ambiente são fatores que influenciam na temperatura de operação das células FV, afetando a geração de energia elétrica. Assim, a água que circulou no trocador e retirou calor do módulo, reduziu a temperatura do mesmo, o que aumentou a eficiência da conversão FV, gerando mais energia elétrica. O efeito do arrefecimento é verificado comparando as temperaturas entre os módulos FV e FVT, que no Dia 1 apresentou uma diferença de até 13 °C e no Dia 2, 12 °C. A redução na temperatura ocorreu independentemente da cobertura de nuvens no céu, o que justifica a geração de energia elétrica do módulo FVT 4,4% (céu claro) e 3,5% (céu nublado) superior a geração do módulo FV.

O Dia 1 apresentou uma menor eficiência elétrica em relação ao Dia 2, uma vez que apresentou, para as horas observadas, uma maior temperatura de operação do módulo FVT, pois este parâmetro é inversamente proporcional à capacidade de geração de energia elétrica. O mesmo pode ser analisado observando as curvas da eficiência de conversão elétrica que diminuíram nas horas com as maiores temperaturas de operação.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico – CNPq e do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015.

REFERÊNCIAS

- Allan, J., Dehouche, Z., Stankovic, S., Mauricette, L., 2015. Performance testing of thermal and photovoltaic thermal solar collectors. *Energy Science & Engineering*. 3, 4, 310–326
- Barbón, A., Bayón-Cueli, C., Bayón, L., Rodríguez, L., 2019. Investigating the influence of longitudinal tilt angles on the performance of small scale linear Fresnel reflectors for urban applications. *Renewable Energy*. 143, 1581–1593.
- Bukarica, V., Tomšić, Ž., 2017 Energy efficiency policy evaluation by moving from techno-economic towards whole society perspective on energy efficiency market. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 70, 968–975.
- Chow, T. T., 2010. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*. 87, n. 2.. 365–379.
- Fraidenraich, N., Krenzinger, A., Tiba, C., Pereira, E. D., 2022. *Ciência e tecnologia solar no Brasil: 60 anos*, 1st edition. Recife: Mariola Comunicação, Recife.
- Guarracino, I., Mellor, A., Ekins-Daukes, N. J., Markides, C. N., 2016. Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors. *Applied Thermal Engineering*. 101, 778–795.
- Herrando, M., Ramos, A., Zabalza, I., Markides, C. N., 2019. A comprehensive assessment of alternative absorber exchanger designs for hybrid PVT-water collectors. *Applied Energy*, 235, 1583–1602.
- IEA, 2021. *Global Energy Review 2021: Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021*, edition 2021. IEA Publications.
- Kim, J. H., Kim, J. T., 2012. The experimental performance of an unglazed PV-thermal collector with a fully wetted absorber. *Energy Procedia*, 30, 144–151.
- Lenin, N., Sivamurugan, P., Srimanickam, B., Ramanan, P., Kumar, M. S., 2019. Thermal and electrical performance evaluation of PV/T collectors in Southern India. *International Journal of Ambient Energy*. 42, 7, 751–757.
- Lima, L. C., Ferreira, L. A., Morais, F. H. B. L., 2017. Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. *Energy for Sustainable Development*. 37, 79–85.
- Mathew, A. A., Venugopal, T., 2021. Solar power drying system: a comprehensive assessment on types, trends, performance and economic evaluation. *International Journal of Ambient Energy*. 42, 1, 96–119.
- Nasrin, R., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A., 2018. Effect of high irradiation and cooling on power, energy and performance of a PVT system, *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 552–569.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. CEPEL- CRESESB, Rio de Janeiro.
- Rocha, D. H. D., 2019. *Análise Exergoambiental de Centrais Termelétricas Supercríticas e Ultrahiper-críticas*. 215 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- Shyam, G. N. Tiwari, and I. M. Al-Helal, 2015. Analytical expression of temperature dependent electrical efficiency of N-PVT water collectors connected in series. *Solar Energy*, 114, 61–76.
- Weiss, W., Spörk-Dür, M., 2020. *Solar Heat Worldwide 2020 - Global market development and trends in 2019*, edition 202. International Energy Agency, Gleisdorf.

ELECTRICAL AND THERMAL PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC-THERMAL MODULE (PVT) UNDER DIFFERENT SKY CONDITIONS

Abstract. *Solar energy is a renewable energy option that is capable of providing both electricity and heat. To take the most of the available solar energy, a photovoltaic (PV) module is converted into a photovoltaic-thermal (PVT) module by installing a polypropylene (PP) heat exchanger. The aim is to verify the performance of a PVT module, on clear and cloudy sky days, using water to cool the PV cells and use it heated for other purposes. The test bench has one PVT module near one PV module for comparing their energy performance with data collected between 11:00 and 13:00 hours. The root mean square (RMS) of solar irradiance on a tilted surface on a clear day (Day 1) is 857 W/m² and on a cloudy day (Day 2) is 459 W/m². On Day 1, the difference between inlet and outlet water temperatures is about 0.7 °C greater than the temperature difference on Day 2. Thus, the highest solar irradiation produces a maximum thermal power of 980 W on Day 1, while on Day 2, 735 W. However, the PP heat exchanger has an average thermal efficiency with similar RMS values, independently of sky conditions. In turn, electrical efficiency strongly depends on weather conditions, as both solar irradiance and ambient temperature influence PV operating temperature. On Day 1, due to the higher irradiance in the analyzed period, the electrical efficiency is lower than the efficiency of Day 2, because the PVT module presents a higher temperature on Day 1 compared to Day 2. The greater energy advantage of the PVT module compared to PV is due to its higher electrical performance as well as thermal performance on clear and cloudy days.*

Keywords: *PVT Module, Electrical Performance, Thermal Performance.*