

# DESEMPENHO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO/TÉRMICO (PV/T) CONECTADO A RASTREADOR SOLAR DE DOIS EIXOS (DAST)

Jossias Zwirtes – jzwirtes@ucs.br

Augusto César Fialho Wanderley – agosto.fialho@ifrn.edu.br  
Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Campus Natal Central

**Resumo.** Este artigo apresenta o desenvolvimento de um protótipo de sistema fotovoltaico/térmico (PV/T) conectado a um rastreador solar de dois eixos (DAST), tendo o objetivo de analisar o desempenho elétrico e térmico do sistema PV/T-DAST, comparando os resultados a um módulo fotovoltaico fixo e sem controle de temperatura. O sistema híbrido fotovoltaico/térmico, consiste em módulos fotovoltaicos acoplados a dispositivos de extração de calor, fornecendo energia elétrica e térmica. Os trabalhos revisados do sistema PV/T a base de água, apresentam valores de eficiência térmica entre 35,4% e 74,6%, e o aumento da potência elétrica entre 2,5% e 15%. O rastreador solar de dois eixos atua movendo a face do módulo fotovoltaico em direção ao ponto de maior incidência de radiação direta, aumentando a produção de energia elétrica. Os trabalhos revisados do desempenho do DAST apresentam acréscimo na produção de energia elétrica entre 24% e 41%. O protótipo apresentou 43,71% de eficiência térmica e 37,86% de aumento na produção elétrica. O consumo dos motores elétricos do rastreador representou uma diminuição de 0,05% na energia produzida. A combinação PV/T-DAST aumenta a produção dos módulos fotovoltaicos, fornecendo água aquecida e ganho na produção elétrica, ampliando a sua competitividade no mercado energético.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Sistema Fotovoltaico/Térmico (PV/T), Rastreador Solar de Dois Eixos (DAST)

## 1. INTRODUÇÃO

A recente expansão da geração fotovoltaica no setor energético brasileiro trouxe um cenário de crescimento acelerado do aproveitamento do potencial solar, porém o mercado global de energia ainda é dominado pelos combustíveis fósseis. Problemas como a baixa eficiência de conversão e a intermitência de geração dos módulos fotovoltaicos, impactam negativamente neste processo de crescimento. Com o desenvolvimento de novas tecnologias que aprimorem a eficiência de conversão da energia, a competitividade dos sistemas fotovoltaicos tende a aumentar, diminuindo o consumo de combustíveis fósseis (Frontin, Brasil, Carneiro, & Godoy, 2017; Michaelides, 2012).

Nas palavras de Goswami, Kreith e Kreider (2000), em testes controlados pode-se obter eficiências de até 25% para dispositivos fotovoltaicos de silício. Porém, alguns fatores influenciam para que esse valor seja ainda menor, de acordo com Pinho e Galdino (2014) dois dos principais fatores que afetam o desempenho dos sistemas fotovoltaicos são a alta temperatura de operação do sistema e a variação da irradiância incidente sobre eles. Tolmasquim (2016) destaca que módulos comerciais em operação podem ser até 40% menos eficientes do que os módulos testados em laboratório.

Nessa perspectiva, diante dos desperdícios relacionados à conversão de energia fotovoltaica que ocorre nos sistemas convencionais, sem controle de temperatura e com a inclinação fixa, percebe-se a necessidade de se avaliar técnicas capazes de mitigar essas perdas.

Segundo Pinho e Galdino (2014), geradores fotovoltaicos com sistema de rastreamento, como o rastreador solar de dois eixos (DAST, do inglês *Dual-Axis Solar Tracker*), podem ser utilizados para melhorar a captação da radiação solar, aumentando a produção de energia. De acordo com Frontin *et al.* (2017), os rastreadores são capazes de aumentar em teoria até 48% da produção de energia em um dia ensolarado.

Conforme Soteris (2016), uma alternativa para aumentar a produção total de energia dos sistemas fotovoltaicos é a utilização de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico (PV/T, do inglês *Photovoltaic/Thermal*). Este sistema converte a radiação solar absorvida em energia elétrica e térmica. Ao retirar calor do sistema fotovoltaico, a eletricidade produzida aumenta. Módulos fotovoltaicos de silício monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si), tem a eficiência aumentada em cerca de 0,45% para cada grau a menos na temperatura de funcionamento. Nesse sistema o módulo troca calor com um fluido que circula em seu interior, saindo este com uma temperatura mais elevada, podendo ser utilizado tanto na indústria como no uso doméstico.

Consequentemente, indaga-se: com a utilização do rastreador solar de dois eixos combinado a um sistema fotovoltaico/térmico, em quanto pode ser melhorado o percentual de produção de energia elétrica comparado aos módulos fotovoltaicos convencionais?

Portanto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho dos sistemas híbridos fotovoltaicos/térmicos adaptados aos rastreadores solares de dois eixos. Tendo como objetivo específico construir um protótipo (PV/T-DAST) e comparar o seu desempenho com um sistema fotovoltaico estático e sem resfriamento. Encontrando o acréscimo na

produção elétrica, eficiência térmica, consumo dos motores, diferença de temperatura dos módulos e diferença de temperatura da água na entrada e na saída do sistema.

Parte-se da hipótese de que o aumento da produção de energia elétrica, juntamente com a produção de água quente, possa tornar os sistemas fotovoltaicos mais competitivos no mercado energético.

Este trabalho traz uma revisão de dois fatores que afetam o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, mostrando a influência do calor e da irradiância na produção dos módulos. Apresentando como solução, a união entre o rastreador solar de dois eixos e o sistema híbrido fotovoltaico/térmico.

Na sequência, são descritos os dados do protótipo, detalhando a construção e funcionamento do sistema fotovoltaico/térmico e do rastreador solar de dois eixos. Apresentando as condições e os métodos utilizados durante o experimento. Na seção dos resultados e discussões, os valores obtidos no experimento são apresentados em forma de gráficos, tanto para o aumento na produção de energia, como para as diferentes temperaturas obtidas para os módulos e para a água.

## 2. DESEMPENHO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

De acordo com Pinho e Galdino (2014), a Equação (1) apresenta o cálculo da eficiência ( $\eta$ ) do módulo fotovoltaico. A potência máxima ( $P_{MP}$ ) presente na folha de dados do fabricante é calculada em condições padrão de ensaio (STC, do inglês *Standard Test Conditions*), que considera a irradiância solar ( $G$ ) de  $1000 \text{ W/m}^2$ , para uma distribuição espectral padrão de AM 1,5 e a temperatura do módulo em  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . A área ( $A$ ) deve incluir toda moldura que envolve o módulo.

$$\eta = \frac{P_{MP}}{G \cdot A} \quad (1)$$

Os módulos fotovoltaicos possuem curvas características de tensão e corrente que os definem. Nestas curvas encontramos os valores de tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ), corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ), tensão de máxima potência ( $V_{MP}$ ), corrente de máxima potência ( $I_{MP}$ ) e o ponto de máxima potência ( $P_{MP}$ ) (Frontin et al., 2017).

Segundo Goswami et al. (2000), em teoria os módulos fotovoltaicos podem atingir até 30% de eficiência na conversão de energia, porém em testes controlados os módulos de silício atingem no máximo 25%. Nas condições reais de funcionamento essa eficiência é menor. Para Pinho e Galdino (2014), a alta temperatura de operação do sistema e a variação da irradiância incidente reduzem a tensão e a corrente produzida, diminuindo a potência entregue pelo sistema fotovoltaico e afetando o seu desempenho real.

### 2.1 Influência da temperatura

O principal efeito do aumento na temperatura do módulo fotovoltaico é a queda da tensão, que diminui linearmente com a subida da temperatura do módulo, o efeito na corrente é menor conforme ilustrado na Figura 1. Um aumento de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  na temperatura de funcionamento em um módulo de silício cristalino reduz a tensão em cerca de 15%, enquanto a corrente tem um acréscimo de apenas 0,1% (Pinho & Galdino, 2014; Soteris, 2016).

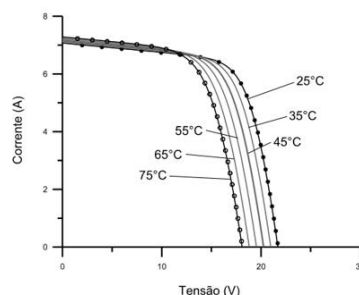


Figura 1 - Efeito causado pela variação da temperatura em módulos fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si) sobre a curva característica de tensão e corrente (Fonte: Pinho e Galdino, 2014).

A radiação solar que é absorvida e que não é convertida em energia elétrica aumenta a temperatura do módulo fotovoltaico. No verão a temperatura na superfície dos módulos fotovoltaicos pode ultrapassar os  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  (Balfour, Shaw e Nash, 2019; Frontin et al., 2017; Soteris, 2016).

Para representar o efeito da temperatura nas características dos módulos, utilizam-se alguns coeficientes específicos. O coeficiente ( $\beta$ ) de variação da tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ), o coeficiente ( $\beta_{VPM}$ ), específico para variação da tensão de máxima potência ( $V_{PM}$ ), o coeficiente ( $\alpha$ ) de variação da corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ) e o coeficiente ( $\gamma$ ) de variação da potência máxima ( $P_{MP}$ ). A folha de dados do módulo também fornece as características elétricas em condições normais de temperatura (NOCT, do inglês *Normal Operation Cell Temperature*). Ela traz valores para a corrente, tensão e potência

nas condições de temperatura de 48,4 °C e uma taxa de radiação solar de 800 W/m<sup>2</sup>. Esses valores se aproximam da produção real, podendo ser adotados como parâmetro de escolha entre diferentes módulos fotovoltaicos (Pinho & Galdino, 2014; Villalva, 2015).

Segundo Virtuani, Pavanello e Friesen (2010), citados por (Tolmasquim, 2016), módulos com a tecnologia de silício cristalino (c-Si) reduzem a sua potência em cerca de 0,45% a cada grau Célcius de incremento, módulos com a tecnologia de telureto de cádmio (CdTe) reduzem a sua potência em cerca de 0,21% e módulos com a tecnologia de silício amorfo (a-Si) reduzem 0,13% da sua potência.

## 2.2 Influência da irradiância solar

A variação da irradiância solar incidente em um módulo fotovoltaico, mantendo-o em uma temperatura de 25 °C, afeta a sua curva de tensão e corrente, como ilustra a Figura 2. A corrente elétrica gerada diminui linearmente com a diminuição da irradiância solar incidente, enquanto a tensão diminui com menor intensidade (Pinho & Galdino, 2014).

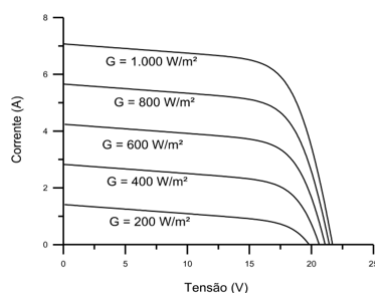


Figura 2 - Efeito causado pela variação da irradiância em módulos fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si) sobre a curva característica de tensão e corrente (Fonte: Pinho e Galdino, 2014).

A escolha incorreta da inclinação do módulo fotovoltaico reduz a captação dos raios solares e compromete a produção de energia elétrica. O ângulo de inclinação que maximiza a geração de energia varia com a época do ano e com a latitude onde o sistema será instalado. Porém, para manter o painel fixo durante todo o ano, o ângulo que usualmente é considerado como ótimo é igual à latitude do local, devendo estar orientados em direção à linha do equador. Essa recomendação visa aumentar a produção de um módulo com a posição fixa, pois, ao meio-dia solar, a massa de ar é menor, assim os raios incidentes mais intensos estão perpendiculares ao plano óptico do módulo (Frontin *et al.*, 2017; Goswami *et al.*, 2000; Pinho & Galdino, 2014; Tolmasquim, 2016).

Conforme Kelly e Gibson (2009,2011), citados por Soteris (2016), em dias nublados a irradiação é majoritariamente difusa, portanto, a posição que maximiza o rendimento é na horizontal, sem inclinação. Porém, segundo Villalva (2015), deve-se evitar a instalação dos módulos fotovoltaicos em inclinações inferiores a 10 graus, diminuindo-se assim o acúmulo de poeira. De acordo com Pinho e Galdino (2014), os módulos parcialmente sombreados perdem potência e podem causar danos ao sistema, pois a potência gerada que não é consumida pode ser dissipada nos pontos sombreados.

## 2.3 Sistema fotovoltaico/térmico (PV/T)

O sistema híbrido fotovoltaico/térmico converte a energia solar em energia térmica e energia elétrica, utilizando a circulação forçada de ar, água ou outro fluido em um trocador de calor em contato com a parte posterior do módulo. Esse sistema diminui a temperatura do módulo fotovoltaico, aumentando a sua produção elétrica, podendo ainda fornecer água quente adequada principalmente à sistemas que necessitem temperaturas abaixo de 50 °C (Soteris, 2016).

De acordo com Soteris (2016), em um coletor fotovoltaico/térmico à base de água a unidade de extração de calor é geralmente uma placa condutora de calor com tubos de circulação de água, que ficam em contato térmico com o lado posterior do módulo fotovoltaico. A Figura 3 apresenta um sistema fotovoltaico/térmico resfriado à base de água, com tubos de cobre adaptados a um painel em contato direto com o módulo, onde as múltiplas camadas de isolamento maximizam a transferência do calor para a água.

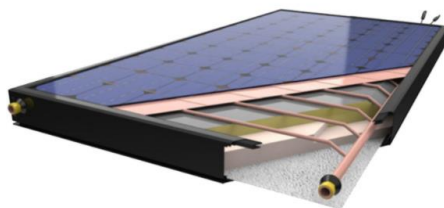


Figura 3 - Camadas do modelo fotovoltaico/térmico Volther PowerVolt (Fonte: <http://solimpeks.com>).

A eficiência térmica do coletor ( $\eta_{th}$ ) pode ser calculada através da Equação (2), onde a vazão mássica é representada por ( $\dot{m}$ ), o calor específico do fluido é representado por ( $CP$ ), a temperatura de entrada do fluido por ( $T_i$ ), a temperatura de saída do fluido por ( $T_o$ ), a área do módulo por ( $A$ ) e a irradiância por ( $G$ ) (Soteris, 2016).

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_o - T_i)}{A \cdot G} \quad (2)$$

Para Balfor et al. (2019), um fator que deve ser analisado na instalação do sistema PV/T é o *clipping*, se o inversor não estiver configurado corretamente o aumento na produção de energia em baixas temperaturas pode ser desperdiçado, pois parte da energia DC não será transformada em AC. Outros fatores devem ser analisados, como a disponibilidade de água e o armazenamento da água quente, procurando-se evitar desperdícios de água e do calor produzido.

Trabalhos recentes buscam encontrar formas de melhorar a troca térmica do sistema PV/T, testando diversos materiais, como os materiais com mudança de fase (PCM, do inglês *Phase Change Material*), colocados em contato com os tubos de resfriamento. Outros trabalhos testam nanofluidos, diferentes formas de circulação do fluido pelo módulo e a mistura de glicol para evitar o congelamento em baixas temperaturas. A Tabela 1 relaciona o desempenho, em ordem crescente de acréscimo na produção elétrica, de diferentes trabalhos que foram selecionados sobre o sistema PV/T, além de apresentar o país, a latitude, a vazão do fluido e a eficiência térmica.

Tabela 1 – Desempenho do sistema PV/T para diferentes autores (Fonte: Compilação do autor, 2021).

Referência	País	Latitude (DD)	vazão (L/min)	Eficiência térmica (%)	Acréscimo na produção elétrica (%)
(Karunasena et al., 2020)	Sri Lanka	6.8	2,4	70	2,5
(Simms & Dorville, 2015)	Jamaica	18.01	-	-	2,5
(Baiceanu et al., 2020)	Romênia	44.44	1,6	-	5,2
(Hossain et al., 2019)	Malásia	3.11	4	74,62	5,76
(Kazem, 2019)	Omã	24.35	1	-	6
(Medeiros et al., 2021)	Brasil	-5.84	0,33	42,61	6,86
(Al-Waeli et al., 2017)	Malásia	2.93	10,5	35,4	9,92
(Shouquat et al., 2019)	Malásia	3.12	4	73,88	11,08
(Kaewchoothong et al., 2021)	Tailândia	7.01	90	41	13,97
(Jouhara et al., 2016)	País de Gales	51.48	1	49,9	15

#### 2.4 Rastreador solar de dois eixos (DAST)

Os módulos fotovoltaicos com sistema de rastreamento do movimento aparente do sol, otimizam o ângulo de incidência dos raios solares ao longo dos dias e meses do ano, melhorando a captação da radiação solar. Os sistemas de rastreamento podem ter um ou mais graus de liberdade (Pinho & Galdino, 2014; Villalva, 2015).

Conforme Villalva (2015), o rastreador solar de dois eixos altera os dois ângulos do módulo fotovoltaico, recebendo os raios solares com o melhor ângulo de incidência possível. De acordo com Kelly e Gibson (2009, 2011), citado por Soteris (2016), comparado com rastreadores de um único eixo, os de eixos duplos conseguem um aumento adicional no rendimento entre 5% e 10%.

Os sistemas de rastreamento podem trabalhar em malha aberta, malha fechada ou uma combinação dos dois sistemas. O sistema em malha aberta rastreia o sol seguindo um algoritmo específico, onde a posição dos módulos pode ser determinada pelos ângulos azimutal, zenital e pela altura solar, definidos anualmente para o local da instalação. A malha aberta é importante e necessária porque o sol pode ser obscurecido por nuvens, eliminando ou alterando os sinais de resposta dos sensores de malha fechada. O sistema em malha fechada rastreia o sol utilizando sensores de luz convenientemente distribuídos, esse sistema busca uma posição onde todos os sensores são igualmente iluminados. A malha fechada é importante para eliminar os erros que resultam da variabilidade na instalação, montagem, calibração e montagem do codificador (Frontin et al., 2017; Villalva, 2015).

Os sistemas com seguidor solar devem garantir a continuidade elétrica das peças metálicas, conectando as partes móveis e fixas à malha de terra. Esses sistemas têm um custo mais elevado em comparação ao sistema convencional, gerando um custo mais elevado de manutenção das partes móveis e do sistema eletrônico de controle. O seguidor solar de dois eixos deve ser devidamente posicionado, tanto em relação às possíveis cargas de vento, como em relação ao sombreamento entre as linhas (Frontin et al., 2017; Soteris, 2016; Villalva, 2015).

A parte mecânica do sistema pode ser construída de diferentes maneiras. A Figura 4 apresenta três modelos adotados para a movimentação dos módulos fotovoltaicos. O modelo (a) utiliza uma base giratória e a mudança de inclinação horizontal através de um braço hidráulico. O modelo (b) apresenta um seguidor de um eixo horizontal com função adicional de inclinação dos módulos. O modelo (c) utiliza cabos fixados nas quatro extremidades do suporte dos módulos, enquanto o suporte fica apoiado sobre uma coluna central (Frontin et al., 2017; Lo et al., 2015).

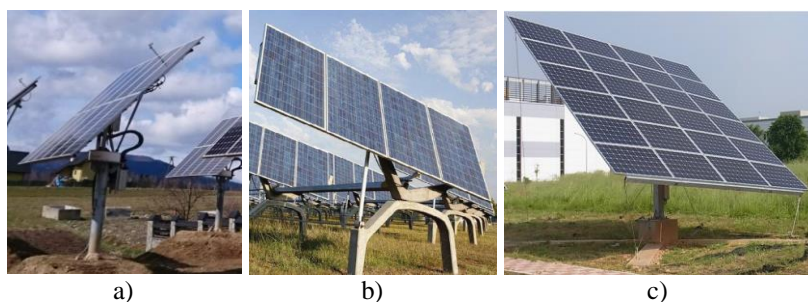


Figura 4 - Modelos de DAST – a) base giratória e inclinação horizontal (Fonte: <http://www.elfran.com.pl>); b) função adicional a sistema de um eixo (Fonte: Frontin et al., 2017); c) cabos fixados nas extremidades (Fonte: Lo et al., 2015).

A Tabela 2 apresenta o desempenho dos trabalhos selecionados, em ordem de acréscimo na produção elétrica, para os sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar de dois eixos. Além de apresentar o país, a latitude e o ângulo de inclinação utilizado pelos módulos fixos.

Tabela 2 - Desempenho dos rastreadores solares de dois eixos para diferentes autores (Fonte: Compilação do autor, 2021).

Referência	País	Latitude (DD)	Inclinação fixa (°)	Acréscimo na produção elétrica (%)
(Rahman <i>et al.</i> , 2019)	Bangladesh	23.73	23	24,09
(Frosi <i>et al.</i> , 2018)	Brasil	-29.2	29	25,4
(Neto, 2018)	Brasil	-9.35	9,35	26,21
(Kumar & Raghuwanshi, 2019)	Índia	27.60	-	26,6
(Nascimento <i>et al.</i> , 2018)	Brasil	-29.5	29,5	30
(Lo <i>et al.</i> , 2015)	Taiwan	24.15	24	30,1
(Pratama <i>et al.</i> , 2019)	Indonésia	6.17	10	33,16
(Bin Mostafa <i>et al.</i> , 2019)	Bangladesh	23.86	25	37,76
(Chhoton & Chakraborty, 2017)	Bangladesh	23.75	-	40
(Burnham <i>et al.</i> , 2019)	Estados Unidos	44.45	30	41

## 2.5 Sistema fotovoltaico/térmico conectado ao rastreador solar de dois eixos

Os sistemas PV/T e DAST trabalham de forma independente e podem ser adaptados, somando o benefício de ambos para a geração dos módulos fotovoltaicos. Dois trabalhos selecionados na pesquisa bibliográfica se destacam por estudarem o sistema fotovoltaico/térmico conectado a um rastreador solar de dois eixos.

O trabalho de Ocloń et al. (2020) traz uma modelagem com validação experimental do desempenho elétrico e térmico do sistema. Os testes ocorreram de 11/10/2018 a 16/10/2018 na latitude 50.07°, cidade de Cracóvia, Polônia. Os resultados encontrados apresentam o aumento de 33% na geração de eletricidade do sistema PV/T-DAST em relação ao sistema estacionário, sendo que a eficiência elétrica do sistema aumentou em cerca de 1% devido ao sistema de resfriamento.

O trabalho de Xu, Zhang, Wang, Qu e Zhang (2020) apresenta medições experimentais detalhadas de um sistema PV/T com um material de mudança de fase (PCM), adaptado a um seguidor solar de dois eixos. A regulação térmica do módulo é realizada através da circulação de água por períodos de 30 minutos e com fluxo de 1,7 L/min, tendo como proposta manter os módulos em temperaturas pré-estabelecidas. Os testes ocorreram na latitude 31.27°, em Xangai, China. Os resultados encontrados em um dos testes chegaram a 78,7% de eficiência térmica, aumentando a eficiência elétrica de 11,9% para 12,2%.

## 3. METODOLOGIA

Este estudo constitui uma abordagem quantitativa, analisando os valores de desempenho de trabalhos voltados a eficiência de rastreadores de dois eixos e sistemas térmicos/fotovoltaicos para a sua classificação e, posteriormente, comparação com os resultados obtidos com o protótipo desenvolvido. A natureza da pesquisa é aplicada, tendo como foco gerar conhecimentos para práticas dirigidas ao aumento da produção energética dos módulos fotovoltaicos. O objetivo da pesquisa é exploratório, buscando familiarizar-se com os sistemas PV/T e DAST utilizados para aumentar a produção dos módulos fotovoltaicos.

Os testes com o protótipo ocorreram no dia 13 de junho de 2021 no município de Carlos Barbosa (latitude -29,2917 e longitude -51,5018), no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Com o nascer do sol às 7h18min e o pôr do sol às 17h33min, o dia teve predomínio do sol e temperaturas entre 6 °C e 19 °C. A figura 5 mostra o sistema em funcionamento, o item A

identifica o sistema fotovoltaico/térmico com rastreamento solar de dois eixos, o item B identifica o módulo fixo com a inclinação utilizada de 29 graus, voltado para a linha do equador.



Figura 5 - Sistema em funcionamento durante os testes (Fonte: Elaborado pelo autor).

As características elétricas e térmicas dos módulos utilizados nos testes, conforme a folha de dados do fabricante e nas condições padrão (STC), são: tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) de 22,5 V; corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ) de 0,6 A; tensão de máxima potência ( $V_{MP}$ ) de 19 V; corrente de máxima potência ( $I_{MP}$ ) de 0,53 A; ponto de máxima potência ( $P_{MP}$ ) de 10 W; eficiência do módulo de 11,34%; coeficiente ( $\beta$ ) de variação da tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) de  $-0,307\%/^{\circ}C$ ; coeficiente ( $\alpha$ ) de variação da corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ) de  $+0,039\%/^{\circ}C$ ; coeficiente ( $\gamma$ ) de variação da potência máxima ( $P_{MP}$ ) de  $-0,423\%/^{\circ}C$ .

O sistema de resfriamento adaptado ao módulo fotovoltaico de silício policristalino, que possui 0,09 m<sup>2</sup> de área, é apresentado na Figura 6. As camadas foram colocadas em sequência na parte posterior do módulo fotovoltaico. O item A é a primeira camada, contendo 2,5 mm de pasta térmica. O item B é a segunda camada, contendo 5 metros de tubo de cobre enrolado e com diâmetro externo de 5 mm. O item C é a terceira camada, contendo uma folha de alumínio. O item D é a quarta camada, contendo um isolamento térmico de isopor.

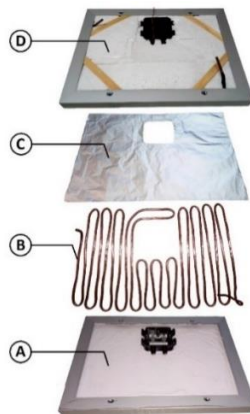


Figura 6 - Camadas do sistema de resfriamento do PV/T (Fonte: Elaborado pelo autor).

O sistema de rastreamento funciona em malha fechada, utilizando quatro sensores de luminosidade conforme o item A da Figura 7, onde a diferença entre os valores medidos alterna o sistema de movimentação. Foram pré-definidas faixas de valores para o controle do sistema atuando somente quando o nível de radiação ultrapasse o valor mínimo estabelecido, diminuindo os problemas de instabilidade relacionados ao sombreamento dos sensores.

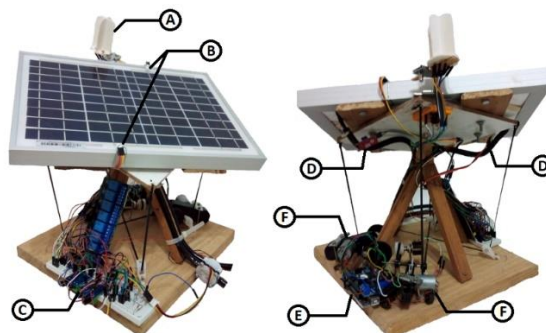


Figura 7 - Detalhes do seguidor solar de dois eixos e do sistema de medição de dados (Fonte: Elaborado pelo autor).

O sistema de movimentação é controlado por um Arduino UNO® conectado a um módulo com dupla ponte H L298, conforme o item E da Figura 7. O sistema controla dois motores de corrente contínua adaptados a dois sistemas de redução, conforme itens F. Através do eixo de saída são movimentadas duas correias fixadas nas extremidades do suporte, tendo a função de deslocar o módulo fotovoltaico/térmico para a posição correta. O sistema está adaptado a dois potenciômetros utilizados para identificar a posição de cada eixo, pré-definindo os valores para o final de curso e posicionando o módulo na inclinação ideal de parada.

O item C da Figura 7 indica o sistema de medição de corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto dos dois sistemas. Os valores de tensão dos dois módulos são coletados de forma simultânea utilizando dois sensores de tensão. Os valores de corrente são obtidos utilizando um módulo de relés para curto-circuitar a saída dos módulos três segundos após a medição das tensões, sendo realizada a coleta dos valores de corrente dos dois módulos de forma simultânea. A medição da temperatura da água na entrada e na saída do sistema PV/T foi realizada através de dois termistores em contato direto com a água, conforme indicam os itens D. A temperatura dos módulos foi calculada com a média aritmética dos valores fornecidos por dois sensores Dallas 18B20® posicionados sobre o vidro superior dos módulos, conforme item B.

Devido às baixas temperaturas no local dos testes no amanhecer e entardecer, o sistema de resfriamento foi programado para acionar somente quando o sensor na superfície do módulo indique temperaturas acima de 20 °C. Ao acionar a bomba submersa no reservatório de água com vazão de 0,13 L/min, ocorre a circulação da água pela serpentina de cobre fixada na parte traseira do módulo fotovoltaico. A bomba de água não foi contabilizada no gasto energético total do sistema, podendo ser substituída por um reservatório com altura mais elevada.

O valor de irradiância utilizado para o sistema fixo foi estimado com base nos dados de irradiação do programa SunData desenvolvido pelo CRESESB, selecionando a irradiação solar diária média mensal no plano inclinado de 29 graus para o mês de junho e considerando o fotoperíodo de 10 horas e 15 minutos. Em decorrência do efeito de linearidade entre a irradiância e a corrente, o valor de acréscimo de irradiância recebido pelo sistema PV/T-DAST foi estimado com base no aumento da corrente entre os módulos e considerando o efeito causado pela diminuição de temperatura na corrente de curto-circuito do sistema PV/T-DAST.

A coleta dos dados foi feita através de um Arduino Nano®, enviando os resultados em tempo real das tensões de circuito aberto, correntes de curto-circuito, temperaturas de entrada e saída da água, temperaturas da superfície dos módulos e o tempo de utilização dos motores para um programa de armazenamento de dados. Os resultados obtidos com os testes são apresentados em forma de gráficos, trazendo os valores com as diferenças entre os dois sistemas. A Figura 8 traz o diagrama elétrico utilizado no experimento detalhando todos os componentes e as suas conexões.

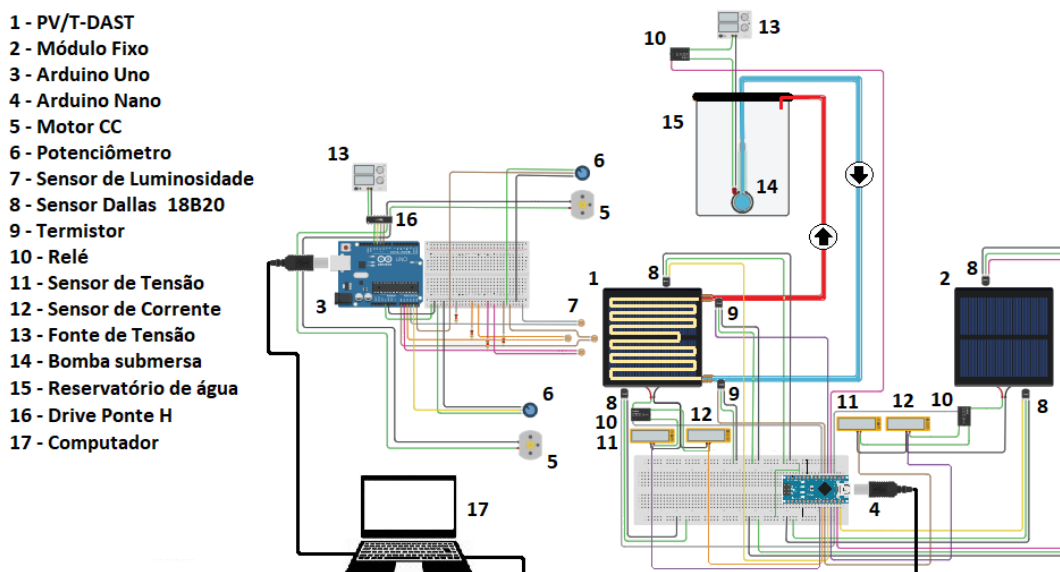


Figura 8 - Diagrama elétrico utilizado no experimento (Fonte: Elaborado pelo autor).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 9 mostra o gráfico das diferenças de temperaturas entre os dois sistemas, exibindo a temperatura medida na superfície do módulo fotovoltaico/térmico conectado ao rastreador solar de dois eixos e a temperatura medida na superfície do módulo fixo e sem resfriamento. O gráfico também traz as temperaturas da água na entrada e na saída do sistema de resfriamento adaptado no sistema PV/T-DAST.

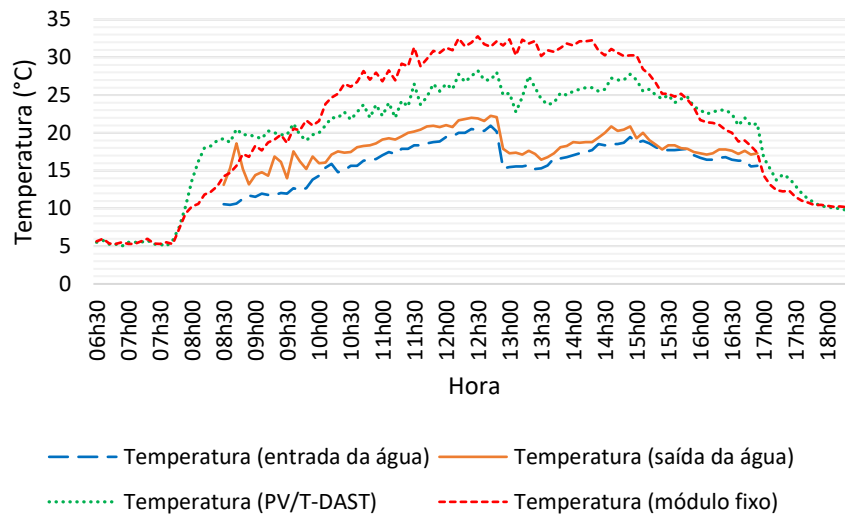


Figura 9 - Temperaturas obtidas no dia do teste (Fonte: Elaborado pelo autor).

A temperatura média do módulo fixo foi de 26,2 °C, a temperatura média do sistema PV/T-DAST foi de 23,7 °C, representando uma diferença de 2,5 °C em média. Essa diminuição de temperatura do módulo durante a circulação da água, representa de acordo com os dados do fabricante, um aumento em cerca de 1,06% na potência gerada. Às 13h12min ocorreu a maior diferença de temperatura entre os sistemas, atingindo uma diferença de 7,59 °C, representando um aumento momentâneo de 3,21% na potência gerada. O efeito do aumento de irradiância recebida pelo sistema PV/T-DAST causou dois períodos em que a temperatura de sua superfície superou a superfície do módulo fixo, entre 7h54min e 9h30min e após às 16h00min a temperatura do sistema PV/T-DAST se manteve acima do sistema fixo.

O sistema de refrigeração foi acionado às 8h30min, momento em que o módulo superou 20 °C. O sistema foi desligado às 16h54min, momento em que a temperatura do módulo ficou abaixo de 20 °C. A média de temperatura da água na entrada do sistema foi de 16,4 °C e a média de temperatura da água na saída foi de 18,22 °C. Em média o aumento de temperatura da água foi de 1,82 °C, a eficiência térmica obtida através da Equação (5) foi de 43,71%.

O gráfico na Figura 10 apresenta os valores calculados para a potência do sistema fixo e do sistema fotovoltaico/térmico adaptado ao rastreador solar de dois eixos. A potência foi calculada com a corrente de curto-circuito, a tensão de circuito aberto e utilizando o fator de forma obtido com os valores da folha de dados do fabricante dos módulos. O sistema PV/T-DAST gerou aproximadamente 60,44 Wh, enquanto o sistema fixo e sem controle térmico gerou aproximadamente 43,82 Wh, esse aumento representa 37,93% de acréscimo na geração bruta de energia elétrica.

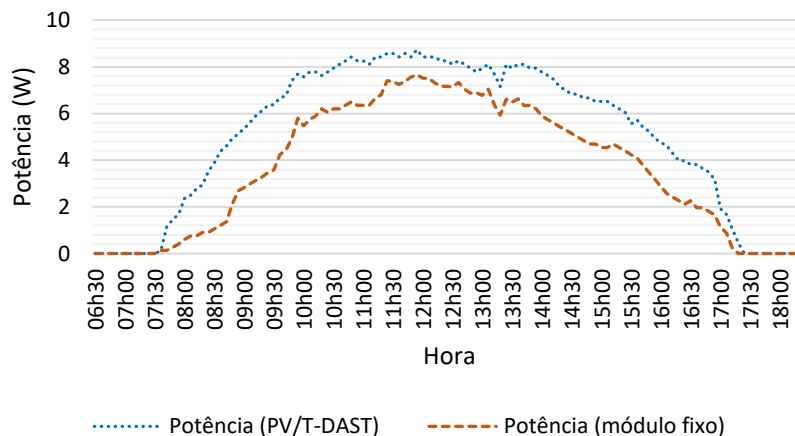


Figura 10 - Potência obtida entre os sistemas (Fonte: Elaborado pelo autor).

O consumo de energia dos motores elétricos durante todo o experimento foi de 0,03 Wh, o que equivale a cerca de 0,05% da energia gerada pelo sistema. Considerando esse consumo, o aumento da geração de energia do protótipo é de aproximadamente 37,86%.

A eficiência elétrica média obtida através da Equação (1) do sistema PV/T-DAST foi equivalente a 13,14%, enquanto a eficiência elétrica média do sistema fixo e sem controle de temperatura foi equivalente a 12,48%. Este acréscimo de eficiência representou 5,29% de melhora na conversão de energia elétrica do módulo.



## 5. CONCLUSÃO

A análise do desempenho do sistema fotovoltaico/térmico combinado ao sistema de rastreamento solar de dois eixos, indica que a união dos sistemas pode melhorar a baixa eficiência dos módulos fotovoltaicos fixos e sem controle de temperatura. Os testes com o protótipo apresentaram valores expressivos para o acréscimo de geração de energia, ultrapassando os 37% de aumento.

O sistema de refrigeração desenvolvido para o protótipo mostrou-se capaz de superar os 43% de eficiência térmica. A água aquecida gerada pelo sistema tem potencial para ser aplicada em residências ou na indústria, diminuindo o consumo necessário para atender a carga térmica total de processos que utilizem água quente.

O sistema proposto alcançou resultados semelhantes aos resultados dos trabalhos que serviram como referência, confirmando as expectativas de desempenho do PV/T-DAST. O sistema fornece água aquecida e um aumento significativo na produção elétrica, com baixo consumo dos motores utilizados na movimentação do módulo.

Os avanços tecnológicos dos sistemas fotovoltaicos que aumentem a eficiência de conversão, otimizando o espaço utilizado, tem potencial para impulsionar a geração fotovoltaica, aumentando a competitividade do módulo fotovoltaico no mercado energético.

Como sugestão de futuros estudos relacionados ao aumento do desempenho dos sistemas fotovoltaicos, propõe-se estudos do sistema PV/T-DAST a longo prazo, comparações de sistemas similares montados em diferentes latitudes e análise da inclusão de um sistema automatizado de limpeza do módulo fotovoltaico.

## REFERÊNCIAS

- Al-Waeli, A. H. A., Sopian, K., Chaichan, M. T., Kazem, H. A., Ibrahim, A., Mat, S., & Ruslan, M. H. (2017). Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study. *Energy Conversion and Management*, 151, 693–708. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.032>
- Baiceanu, M., Catalina, T., & Damian, A. (2020, novembro 12). Experimental and simulation performance investigation of a hybrid PV/ T solar panel. *2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering, EE and AE 2020 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/EEAE49144.2020.9279013>
- Balfor, J., Shaw, M., & Nash, N. B. (2019). *Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos* (1ª). LTC.
- Bin Mostafa, M. T., Choudhury, S. M. T. A., & Hosain, M. S. (2019, julho 1). Design and Performance Analysis of a Dual Axis Solar Tracker. *2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing, ICESIP 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICESIP46348.2019.8938338>
- Burnham, L., Riley, D., Walker, B., & Pearce, J. M. (2019). Performance of Bifacial Photovoltaic Modules on a Dual-Axis Tracker in a High-Latitude, High-Albedo Environment. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1320–1327. <https://doi.org/10.1109/PVSC40753.2019.8980964>
- Chhoton, A. C., & Chakraborty, N. R. (2017). Dual axis solar tracking system-A comprehensive study: Bangladesh context. *4th International Conference on Advances in Electrical Engineering, ICAEE 2017, 2018-Janua*, 421–426. <https://doi.org/10.1109/ICAEE.2017.8255393>
- Frontin, S. de O., Brasil Jr., A. C. P., Carneiro, M. T. D., & De Godoy, N. R. D. (2017). *Usina Fotovoltaica Jaíba Solar : Planejamento e Engenharia* (1ª). Teixeira.
- Frosi, F., Chesini, D., Gabe, I. J., & De Bona, J. C. (2018). ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA DE UM SEGUIDOR SOLAR DE DOIS EIXOS PARA A REGIÃO DE FARROUPILHA-RS. In *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018*. <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/161>
- Goswami, D. Y., Kreith, F., & Kreider, J. F. (2000). *Principles of solar engineering* (2ª). Taylor & Francis.
- Hossain, M. S., Pandey, A. K., Selvaraj, J., Abd Rahim, N., Rivai, A., & Tyagi, V. V. (2019). Thermal performance analysis of parallel serpentine flow based photovoltaic/thermal (PV/T) system under composite climate of Malaysia. *Applied Thermal Engineering*, 153, 861–871. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.007>
- Jouhara, H., Milko, J., Danielewicz, J., Sayegh, M. A., Szulgowska-Zgrzywa, M., Ramos, J. B., & Lester, S. P. (2016). The performance of a novel flat heat pipe based thermal and PV/T (photovoltaic and thermal systems) solar collector that can be used as an energy-active building envelope material. *Energy*, 108, 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.063>
- Kaewchoothong, N., Sukato, T., Narato, P., & Nuntadusit, C. (2021). Flow and heat transfer characteristics on thermal performance inside the parallel flow channel with alternative ribs based on photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116237. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116237>
- Karunasena, U. T. R. K., Karunarathna, M. A. P., Kumara, D. G. A. S., Manthilake, M. M. I. D., & Punchihewa, H. K. G. (2020). Efficiency Improvement of Solar Photovoltaic Thermal Systems by Experimental and Numerical Analysis. *MERCon 2020 - 6th International Multidisciplinary Moratuwa Engineering Research Conference, Proceedings*, 488–493. <https://doi.org/10.1109/MERCon50084.2020.9185279>
- Kazem, H. A. (2019). Evaluation and analysis of water-based photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100401. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100401>
- Kumar, V., & Raghuwanshi, S. K. (2019). Design and Development of Dual Axis Solar Panel Tracking System for Normalized Performance Enhancement of Solar Panel. *SSRN Electronic Journal*.

<https://doi.org/10.2139/ssrn.3363084>

- Lo, S., Cheng, F., Chang, V., Liu, W. D., Chang, L., Adurodija, O. F., Chou, E., Lung, C., Liu, J., Lu, T., Su, J., & Cheng, E. (2015). Design, operation, and performance evaluation of a cable-drawn dual-axis solar tracker compared to a fixed-tilted system. *Energy Science & Engineering*, 3(6), 549–557. <https://doi.org/10.1002/ese3.92>
- Medeiros, R. R. B., Lima, A. V. N. A., Diniz, G. F., Melo, V. M., Souza, L. G. M. de, & Silva, K. C. G. da. (2021). Estudo de desempenho de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico. *Research, Society and Development*, 10(7), e1210716156. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16156>
- Michaelides, E. E. (Stathis). (2012). Alternative Energy Sources. In *Green Energy and Technology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20951-2>
- Nascimento, L. R. de, Veríssimo, P. H., Pires, A. M., Ruther, R., & Sobral, C. (2018). Geração solar fotovoltaica com sistema de rastreamento de dois eixos no município de Jaguari-RS. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018*, 10. [www.fotovoltaica.ufsc.br](http://www.fotovoltaica.ufsc.br)
- Neto, A. C. (2018). *Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar com dois eixos de baixo custo para painéis fotovoltaicos*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, AL, Brasil. Disponível: <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/5304>
- Ocloń, P., Cisek, P., Kozak-Jagiela, E., Taler, J., Taler, D., Skrzyniowska, D., & Fedorczak-Cisak, M. (2020). Modeling and experimental validation and thermal performance assessment of a sun-tracked and cooled PVT system under low solar irradiation. *Energy Conversion and Management*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113289>
- Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. CEPEL-CRESESB.
- Pratama, A. Y., Fauzy, A., & Effendi, H. (2019). Performance Enhancement of Solar Panel Using Dual Axis Solar Tracker. *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 2019-July*, 444–447. <https://doi.org/10.1109/ICEEI47359.2019.8988902>
- Potencial Solar. (2018). *Sundata* (V 3.0). [software]. CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Acessado em 13 de junho de 2021, de [www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata/](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata/)
- Rahman, M. R., Hossain, M. S., Shehab Uddin, S., & M Ibrahim, A. S. (2019). Fabrication and Performance Analysis of a Higher Efficient Dual-Axis Automated Solar Tracker. *Iranian Journal of Energy and Environment*, 10(3), 171–177. <https://doi.org/10.5829/ijee.2019.10.03.02>
- Rosma, I. H., Asmawi, J., Darmawan, S., Anand, B., Ali, N. D., & Anto, B. (2018). The Implementation and Analysis of Dual Axis Sun Tracker System to Increase Energy Gain of Solar Photovoltaic. *2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICon EEI)*, 187–190. <https://doi.org/10.1109/ICon-EEI.2018.8784321>
- Shouquat, H. M. D., Abd, R. N. Bin, Jeyraj Al, S., & Kumar, P. A. (2019, maio 21). Experimental Investigation on Energy Performance of hybrid PV/T-PCM system. *5th International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICEES.2019.8719239>
- Simms, S., & Dorville, J. F. (2015). Thermal performance of a hybrid photovoltaic-thermal collector with a modified absorber. *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2015*, 600–605. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2015.7418484>
- Soteris, K. (2016). *Engenharia de Energia Solar: Processos e Sistemas* (2ª). Elsevier.
- Tolmasquim, M. T. (2016). *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. EPE.
- Villalva, M. G. (2015). *Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações* (2ª). Érica.
- Xu, H., Zhang, C., Wang, N., Qu, Z., & Zhang, S. (2020). Experimental study on the performance of a solar photovoltaic/thermal system combined with phase change material. *Solar Energy*, 198, 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.064>

## PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC/THERMAL (PV/T) SYSTEM CONNECTED TO DUAL-AXIS SOLAR TRACKER (DAST)

**Abstract.** This article presents the development of a prototype photovoltaic/thermal (PV/T) system connected to dual-axis solar tracker (DAST). In order to analyze electrical and thermal performance of the PV/T-DAST system, comparing the results to a fixed photovoltaic module without temperature control. Hybrid system photovoltaic/thermal consists of photovoltaic modules coupled to heat extraction devices, providing electrical and thermal energy. The revised articles of the water-based PV/T system, presents values of thermal efficiency between 35.4% and 74.6%, and the increase of electrical production between 2.5% and 15%. Dual-axis solar tracker acts by moving the face of the photovoltaic module towards the point of highest incidence of direct radiation, increasing the production of electricity. The revised articles of the DAST performance, presents an increase in the production of electricity between 24% and 41%. The prototype showed 43.71% thermal efficiency and 37.86% increase in electrical production. The consumption of electric motors represented a decrease of 0.05% in the energy produced. The PV/T-DAST combination increases the production of photovoltaic modules, providing heating and gain in electrical production, expanding its competitiveness in the energy market.

**Key words:** Solar Energy, Photovoltaic/Thermal System (PV/T), Dual-Axis Solar Tracker (DAST)