

## Geração fotovoltaica mais eficiente com técnicas de arrefecimento

*More efficient photovoltaic generation with cooling*

Denise Castanho Antunes<sup>1</sup> , Marcos Antonio Tavares Lira<sup>2\*</sup> , Diego Oliveira Miranda<sup>1</sup> 

**Citação:** Antunes, D. C.; Lira, M. A. T., & Miranda, D. O. (2025). Geração fotovoltaica mais eficiente com técnicas de arrefecimento. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 10, e025002  
<https://doi.org/10.18554/rbcti.v10i00.7502>

**Recebido:** 11 abr. 2024

**Aceito:** 10 jul. 2025

**Publicado:** 16 set. 2025



**Copyright:** este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença de atribuição Creative Commons, que permite uso irrestrito, distribuição, e reprodução em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1. Instituto Federal de Minas Gerais , Curso de Pós-Graduação em Gestão, Sabará (MG), Brasil.
2. Universidade Federal do Piauí , Teresina (PI), Brasil.

\* Autor correspondente: marcoslira@ufpi.edu.br

**Resumo:** Diversos fatores atrapalham o desempenho dos módulos fotovoltaicos, entre eles estão sombreamento, sujeiras, temperatura, intensidade da luz solar, entre outros. Considerando o natural aquecimento que os módulos sofrem ao longo do dia e as perdas de eficiência em decorrência disso, o uso de técnicas de arrefecimento torna-se uma possibilidade com bastante potencial para minimizar as perdas. Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho foi de desenvolver um sistema simples, porém eficiente, de controle e monitoramento padrão para uma planta de energia fotovoltaica que permita o arrefecimento dos módulos utilizando água, visando aumentar a potência de saída, a eficiência e a vida útil através de um canal remoto. O sistema foi testado e avaliado na cidade de Teresina, no estado do Piauí. E o resultado experimental revelou que com o sistema de arrefecimento sob a superfície do módulo, a temperatura pôde ser reduzida em até 19-21°C. Ocasionando uma eficiência de aproximadamente 10% na geração de energia.

**Palavras-chave:** Módulos fotovoltaicos; arrefecimento; rendimento; eficiência energética; monitoramento remoto.

**Abstract:** Various factors hinder the performance of photovoltaic modules, including shading, dirt, temperature, intensity of sunlight, among others. Considering the natural heating that modules undergo throughout the day and the efficiency losses as a result, the use of cooling techniques becomes a viable option with great potential to minimize losses. In this context, the main objective of this study was to develop a simple yet efficient standard control and monitoring system for a photovoltaic power plant that allows cooling of the modules using water, aiming to increase output power, efficiency, and lifespan through a remote channel. The system was tested and evaluated in the city of Teresina, in the state of Piauí. And the experimental result revealed that with the cooling system under the module's surface, the temperature could be reduced by up to 19-21°C, resulting in an efficiency improvement of approximately 10% in energy generation.

**Keywords:** Photovoltaic modules; cooling; performance; energy efficiency; remote monitoring.

## 1. Introdução

A capacidade global de energia solar fotovoltaica instalada cresceu exponencialmente nas últimas décadas. De acordo com a International Energy Agency (IEA), a capacidade global instalada passou de menos de 1 GW em 2000 para mais de 1.000 GW em 2022. Isso representa um crescimento de mais de 1.000 vezes em apenas 22 anos. A IRENA (International Renewable Energy Agency) também destaca esse crescimento impressionante. Em seu relatório de 2022, a IRENA indica que a energia solar fotovoltaica representou 60% da nova capacidade de energia renovável adicionada globalmente em 2021.

Neste cenário, regiões intertropicais se destacam pela sua localização favorável que proporciona uma grande incidência de irradiação solar. Com isso, o Brasil possui um grande potencial para utilização dos módulos fotovoltaicos para geração de energia. Entretanto, o desempenho do sistema fotovoltaico está diretamente relacionado à temperatura das células. Uma compreensão do parâmetro de temperatura se faz necessário e crucial para garantir a eficiência elétrica em um sistema fotovoltaico. Uma série de trabalhos foram realizados para demonstrar que a temperatura da célula influencia na eficiência de conversão. Para Audwinto et al. (2015) as altas temperaturas e os elevados níveis de irradiação prejudicam o tempo de vida útil dos módulos.

A parte da radiação solar que não é convertida em eletricidade converte-se em energia térmica e causa uma diminuição na geração (Siecker et al., 2017). Para Siecker et al. (2017), existe uma relação inversa entre o desempenho do painel e a temperatura operacional que ele suporta. Isto insinua que há uma necessidade da utilização de métodos que controlem a temperatura das células fotovoltaicas para retirada ou aproveitamento do calor. No trabalho feito por Skoplaki & Palyvos (2009), os resultados comprovaram que tanto a eficiência elétrica quanto a potência de saída do módulo PV dependem linearmente da temperatura da célula.

Contudo, esse problema pode ser minimizado com sistemas de arrefecimento, com os quais se pode arrefecer os módulos PVs, proporcionando a diminuição de temperatura em sua superfície e, consequentemente, aumentando o rendimento e a potência gerada pelo sistema. Existem vários trabalhos na literatura que tratam de sistemas de arrefecimento para aumentar a produção de energia solar fotovoltaica. Entre as pesquisas, a que obteve maior redução de temperatura foi alcançada por Nižetić et al. (2017) através de jatos de água na parte frontal e posterior do painel.

O arrefecimento é uma técnica promissora para realizar a maior redução de temperatura e fornecer melhor eficiência elétrica em comparação com outras alternativas. Para Reddy et al. (2015), o painel PV arrefecido não só melhora a eficiência como também aumenta a vida útil das células fotovoltaicas. Para Edaris et al. (2018), a técnica de arrefecimento foi capaz de reduzir a temperatura da célula PV em até 22 °C. E que essa diminuição da temperatura elevou em 10% a eficiência de saída do módulo. Moharram et al. (2013) projetaram seu sistema de arrefecimento com a condição de que a temperatura máxima permitida para o módulo arrefecido é de 45 °C. Ao chegar a essa temperatura, o arrefecimento se inicia e só termina quando o módulo chega a 35 °C. Este fato é explicável já que Siecker et al. (2017) afirmam que os estudos de um modo geral, apontam que a eficiência do módulo diminuirá 0,5% toda vez que a superfície do painel fotovoltaico aumentar 1°C.

As revisões de literatura mencionadas acima, motivaram este trabalho para determinar o efeito da temperatura da célula PV sobre o desempenho do módulo PV no clima da cidade de Teresina, no estado do Piauí. O presente trabalho desenvolve um sistema de medição experimental com sensores de temperatura, tensão, corrente e potência para coletar dados reais do comportamento dos módulos em tempo real. Essa abordagem prática permite obter informações precisas sobre o efeito da temperatura nos parâmetros de desempenho do módulo. Adicionalmente, o trabalho utiliza um modelo desenvolvido no Excel para simular o desempenho do módulo fotovoltaico com base nos dados coletados.

Essa modelagem permite analisar o impacto da temperatura nos parâmetros de desempenho do módulo de forma mais detalhada e completa. No final desta pesquisa, em novembro de 2023, registrou-se temperaturas de até 70 °C no plano dos módulos em dias típicos. Esse dado motiva a relevância de buscar por métodos de arrefecimento de módulos fotovoltaicos, pois de acordo com o

trabalho de Fouad et al. (2017), seriam perdidos cerca de 12,5% da eficiência de instalações fotovoltaicas devido à temperatura acima da faixa normal de operação dos módulos.

## 2. Métodos

A configuração consiste na comparação de dois módulos PV. O primeiro é usado como um valor de referência, chamado de módulo controle (MC), enquanto o outro é projetado com a técnica de arrefecimento com base em jatos de água, denominado de módulo experimental (ME). As características gerais dos módulos PV bem como a descrição dos materiais utilizados estão respectivamente listadas nas Tabelas 1 e 2. A planta experimental foi montada e desenvolvida no centro acadêmico (CA) do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Piauí (UFPI).

**Tabela 1.** Características técnicas dos módulos fotovoltaicos

MODULE TYPE	YL055P-17B 2/5
RATED POWER	55.0 W ( $\pm 5\%$ )
RATED VOLTAGE	17.8 V
RATED CURRENT	3.08 A
MAX. SERIES FUSE	10 A
APPLICATION CLASS	A
OPEN-CIRCUIT VOLTAGE	22.1 V
SHORT-CIRCUIT CURRENT	3.28 A
MAX. SYSTEM VOLTAGE	50 V

**Tabela 2.** Descrição da instrumentação

Item	Dispositivos	Quantidade
1	Bomba Hidráulica 12 V	1
2	Tanque de água 5 litros	1
3	Radiador de Motocicleta	1
4	Ventoinha 12 V	2
5	Regulador de Tensão LM2596	3
6	Sensor de Tensão 0-25V DC	2
7	Microcontrolador Arduino UNO	1
8	Protoboard	1
9	Módulo DS3231	1
10	Módulo Cartão SD	1
11	Módulo Relé 5V Dois Canais	1
12	Sensor de Temperatura e Umidade DHT22	2
13	Bomba Hidráulica 3-6V	1
14	Sensor de Nível de Água	1
15	Válvula Solenóide 12 V	1

A configuração experimental do sistema é mostrada na Figura 1. A água do resfriamento é armazenada em um recipiente conectado ao sistema de arrefecimento por uma mangueira de nível (material comumente usado em construções para fazer nivelamento em alvenaria). A bomba de água de 12V, cujo o chaveamento foi feito com um dos canais do módulo relé de 5V, bombeia a água do recipiente através da mangueira até chegar ao telhado. Existem 7 furos por onde o jato de água é distribuído sobre o plano do módulo, todos localizados em um cano fixado na parte superior, como

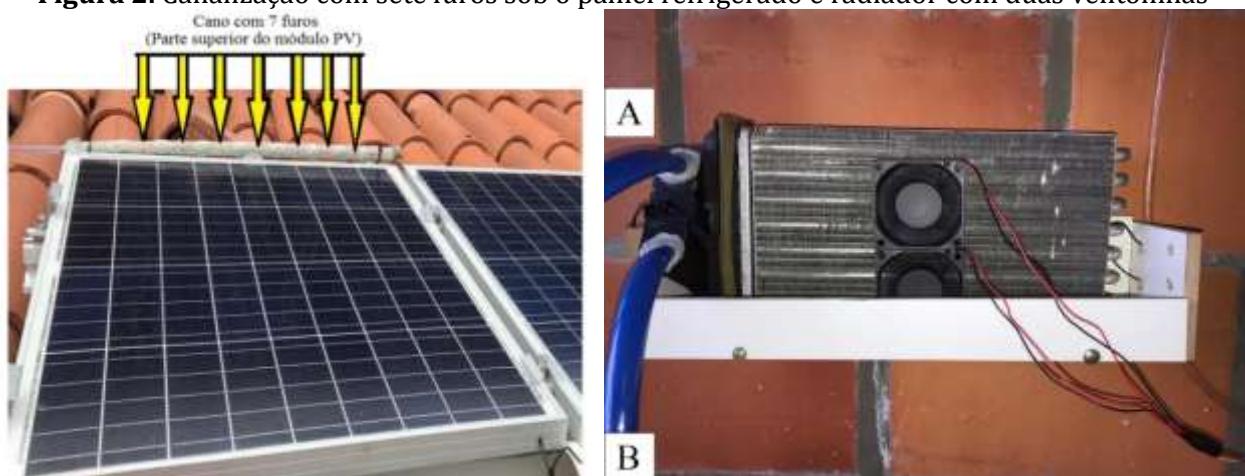
demonstra a Figura 2. Em seguida a água é coletada por uma calha de PVC fixada na parte inferior do módulo, passa pelo radiador e é devolvida ao recipiente, fechando o ciclo.

**Figura 1.** Configuração experimental do sistema



A Figura 2 apresenta uma visualização melhor do módulo arrefecido acompanhado da canalização o duto por onde a água do resfriamento sai.

**Figura 2.** Canalização com sete furos sob o painel refrigerado e radiador com duas ventoinhas



A água do resfriamento que flui na superfície frontal do módulo PV captura calor residual. Seguindo a orientação da Figura 2, a água bombeada para o arrefecimento dos módulos é coletada pela mangueira indicada por A, então é resfriada pelas ventoinhas e encaminhada de volta ao recipiente pela mangueira indicada por B.

As ventoinhas são instaladas no radiador para evitar o aumento da temperatura no interior do recipiente, e também atua como uma carga para o módulo fotovoltaico, pois só é necessário acionar as ventoinhas nas horas mais quentes do dia (quando há radiação suficiente). Para evitar que elas sejam danificadas pela tensão dos módulos, é utilizado um regulador de tensão LM2596, de forma que a tensão no terminal das ventoinhas não deve ser superior a 12V.

## 2.1 Sistema de controle e monitoramento

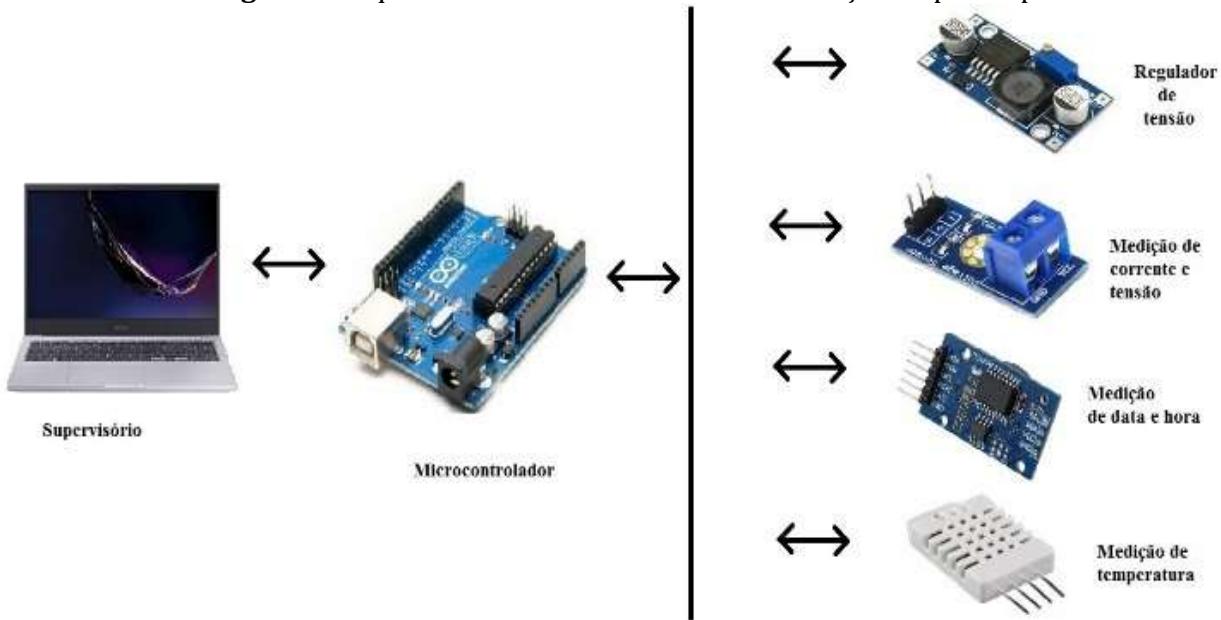
A comunicação de dados que foi utilizada no protótipo foi projetada com uma série de sensores, cada um dos quais coleta dados de um conjunto específico de variáveis, enviando-os para o microcontrolador que “dar ordens” aos atuadores para distribuir o processamento e facilitar as operações que executam.

O microcontrolador da planta PV tem três propriedades diferentes. Uma é responsável pela medição da geração, corrente e tensão, a segunda faz o controle do arrefecimento e a última é responsável pelo sistema de irrigação. Essas são as principais ações que o Arduino promove, mas fora isso, ainda tem atrelado a ele o sensor de nível de água e a válvula solenoide.

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto que é popular entre iniciantes e profissionais por sua facilidade de uso e flexibilidade. A versatilidade do Arduino permite que ele seja usado em uma ampla variedade de projetos, incluindo automação doméstica; robótica; eletrônica; dentre outros.

A Figura 3 mostra o esquema geral de comunicação, com o microcontrolador e os sensores, atuadores e o sistema supervisório. Este último não foi desenvolvido no trabalho, mas o mesmo não é essencial para o funcionamento do protótipo.

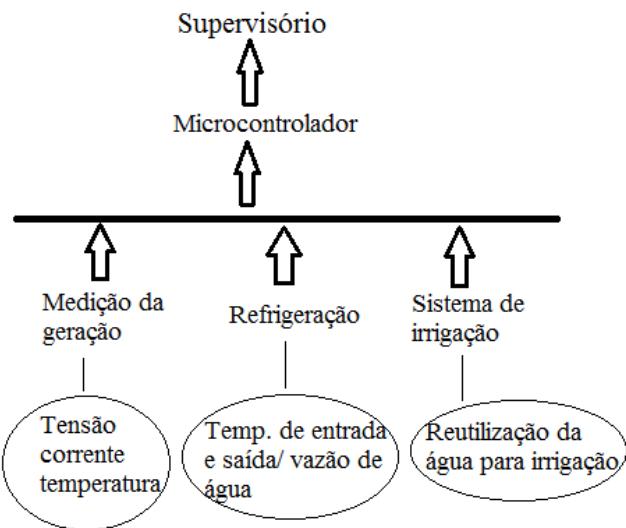
**Figura 3.** Esquema básico do sistema de comunicação do protótipo



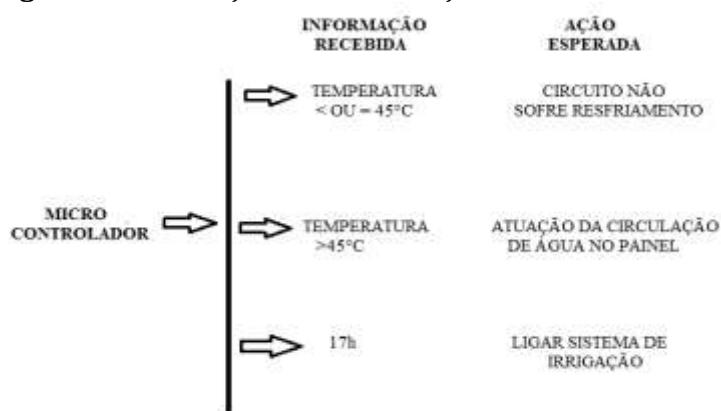
O microcontrolador tem como função primordial reunir todas as informações coletadas dos sensores além das atuações no protótipo. Para tanto, são apurados os dados de corrente, tensão e temperatura do painel, informações sobre a retirada de calor do painel, além da temperatura do módulo e vazão de água.

Com os dados coletados pelo monitoramento, o microcontrolador realiza as rotinas de controle de circulação de água. A Figura 4 ilustra o fluxo destes dados, enquanto a Figura 5 mostra o fluxo das informações obtidas e as tarefas realizadas para refrigerar o painel.

**Figura 4.** Informações coletadas para controle e monitoramento



**Figura 5.-** Informações enviadas e ações de cada atuador



Para a coleta dos dados, foi desenvolvido um algoritmo Datalogger, implementado para operar no Microcontrolador Arduino Uno, que registra os dados de tensão, potência, temperatura, data e hora num cartão de memória todos os dias. A Tabela 3 exibe as variáveis obtidas.

**Tabela 3.** Mapeamento dos registros de leitura do Arduíno na medição da geração

#### MEDIÇÃO DA GERAÇÃO

REGISTRADOR	VARIÁVEL	UNIDADE
0	Corrente	mA
1	Tensão	mV
2	Temperatura	°C
3	Data	xx/xx/xxxx
4	Hora	24h

As informações de data e hora foram obtidas a partir de um módulo de relógio em tempo real a bateria, o RTC DS3231. A Figura 6 mostra a montagem do sistema construído em MDF, localizado logo abaixo do telhado sobre o qual foram instalados os módulos fotovoltaicos.

**Figura 6.** Montagem eletrônica do sistema



A gravação dos dados no cartão de memória também foi possível devido um módulo para cartão micro SD comumente utilizado em aplicações com Arduino, e seguiu os comandos básicos da programação de Arquivos na linguagem C, interpretada pelo microcontrolador.

Para deixar o recipiente sempre cheio foi utilizado o sensor de nível de água, quando este registrasse um valor abaixo do ideal, um sinal seria mandado do microcontrolador para a válvula solenoide de 12V a qual iria abrir o contato para a passagem de água da torneira para o recipiente até chegar ao valor desejado.

## 2.2 Sistema de irrigação

A Figura 7 mostra o sistema de irrigação, feito com cortes de garrafas PET, nos quais foram plantadas sementes de alfazema. Ao final da tarde, precisamente às 17h, parte da água que é recolhida e está no recipiente é bombeada para ser reutilizada para irrigação de plantas próximas ao sistema. Esse bombeamento foi feito por uma bomba submersa que fica dentro do recipiente, com tensão de operação de 3 a 6V.

**Figura 7.** Sistema de irrigação

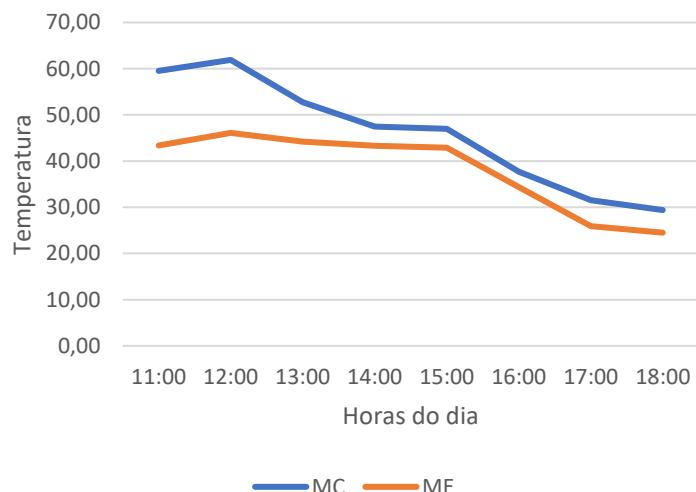


Como a irrigação consome parte da água do recipiente, é utilizado um canal do módulo relé de 5V para ativar uma válvula solenoide, alimentada pela fonte externa de 12V para que se encha novamente o tanque de água. Com isso, encerra-se o processo diário. A irrigação se inicia às 17 h, porque a partir desse horário não há mais necessidade de arrefecimento do ME, que já está abaixo de 45 °C.

### 3. Resultados e discussão

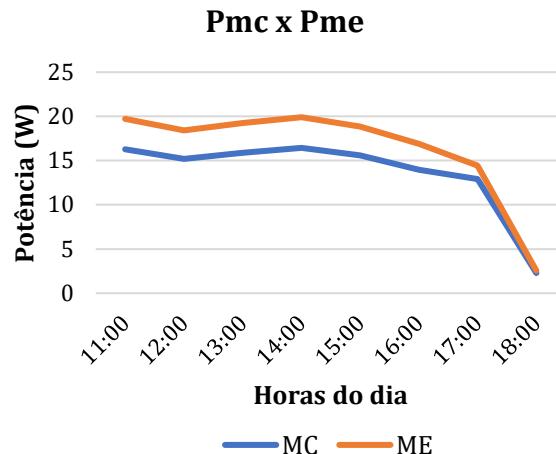
Para observar o efeito da temperatura sobre os módulos PV, uma série de testes foram realizados. As temperaturas foram medidas por dois sensores de temperatura e umidade DHT22, localizados na parte inferior, no ponto médio da superfície dos módulos. A pesquisa foi iniciada no mês de agosto e perdurou até o mês de novembro, contabilizando quatro meses de coleta de dados. Estes são os meses de maior radiação na região onde foi realizado este estudo. Embora isso implique temperaturas mais elevadas todos os dias, isso não acarreta maiores problemas. Para uma melhor visualização dos efeitos da temperatura sob a superfície dos módulos, o Figura 8 representa as medições de temperaturas entre os horários de 11h às 18h realizadas no dia 13 de novembro de 2023.

**Figura 8.** Efeito da temperatura sob o plano dos módulos



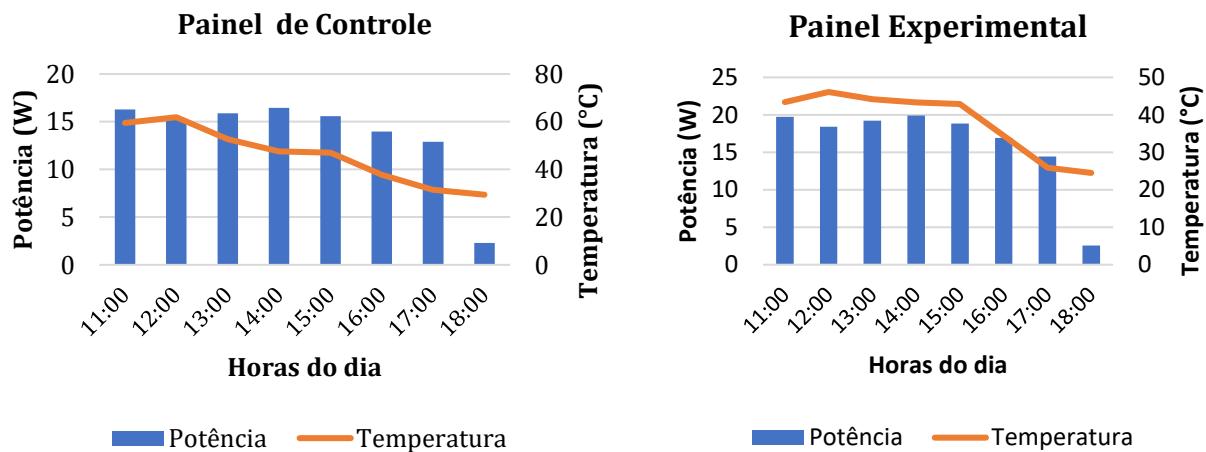
Nota-se que para este dia, o pico mais elevado da temperatura é ao meio dia, onde o MC ultrapassou a marca de 60 °C, enquanto que o ME alcançou a temperatura máxima com 46 °C. Isso significa uma melhoria considerável na eficiência do ME, já que a diferença de temperatura é de 14 °C. E durante praticamente todo o período exposto no gráfico, o módulo não arrefecido, obteve temperaturas mais elevadas comparadas com o ME, chegando a se igualarem apenas ao final da medição, às 17h. As informações de potência obtidas para o período de coleta de dados nesta mesma data com arrefecimento e sem arrefecimento está representado na Figura 9.

**Figura 9.** Comparação entre as potências do MC e ME



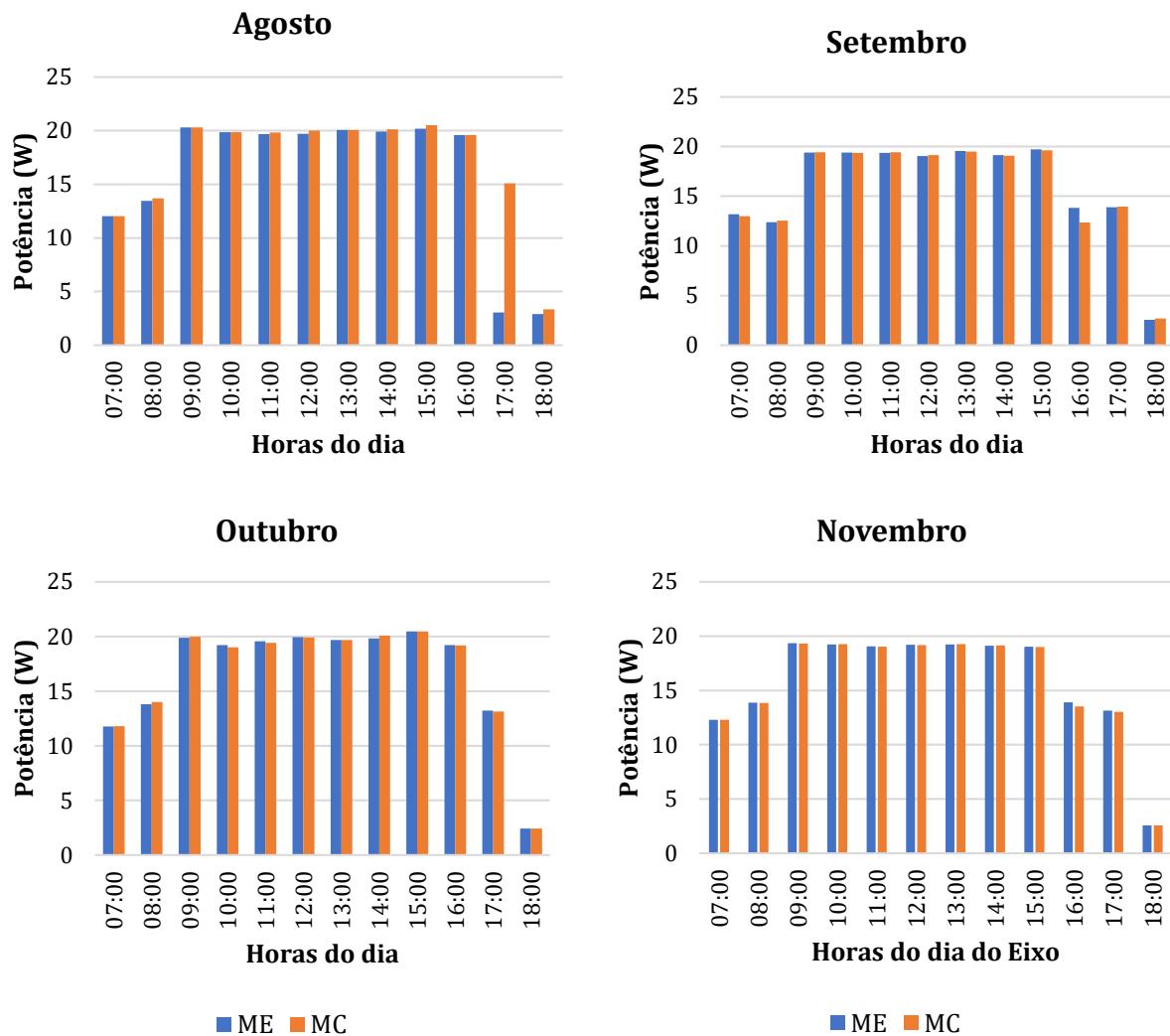
O arquivo escrito no cartão de memória, que armazena as aferições, tem formatação apropriada que otimiza sua conversão em planilha a ser tratada por programas como Excel e o SPSS. Através da planilha, mediu-se a potência média nas cargas (ventoinhas) no período de 4 meses. Através de um cálculo de variação percentual, concluiu-se que a potência média fornecida pelo ME é cerca de 9,4% maior que a potência média promovida pelo MC. Na Figura 10 é possível observar a variabilidade da potência com a temperatura no plano dos módulos.

**Figura 10.** Resultado da operação no módulo não arrefecido e arrefecido



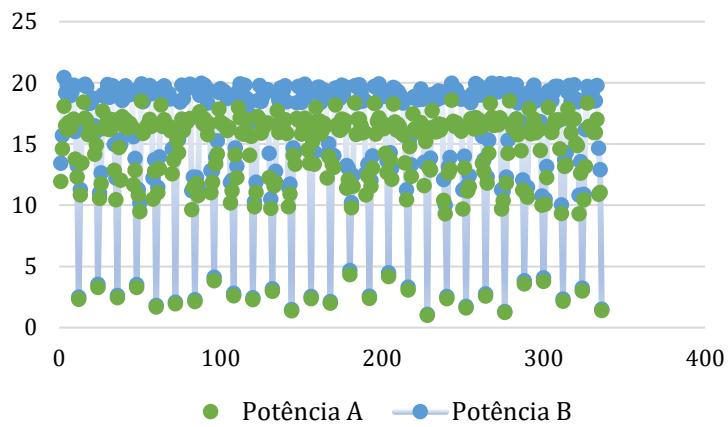
É evidente que a aplicação do jato de água durante os dias de teste mostra resultados significativos para as condições da cidade de Teresina no Piauí. O consumo de energia total do sistema é aproximadamente 40W, mas vale ressaltar que o mesmo não funciona com operação de todos os componentes o tempo todo como a válvula solenoide e a bomba de 12V, por exemplo. E torna-se desprezível conforme a potência do sistema instalado aumenta. A Figura 11 representa o conjunto das potências aferidas nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro desde às 7h da manhã ao final do dia, às 18h.

**Figura 11.** Conjunto das medianas de potência no mês de agosto a novembro



No mês de novembro, registra-se que as potências do ME, em alguns horários são ligeiramente mais elevadas do que as do MC, em comparação com as dos meses anteriores. Isso se deve ao fato desse mês ter menor incidência de chuvas e dias nublados. A Figura 12 apresenta um gráfico de dispersão relacionando os dados de potência dos dois módulos durante o mês de novembro de 2023, onde as Potências A e B se referem às Potências dissipadas pelas ventoinhas conectadas aos módulos MC e ME, respectivamente.

**Figura 12.** Dispersão das potências dos módulos em função da hora (mês de novembro)



Como cada ventoinha está sendo alimentada por um módulo, é perceptível um ganho de potência pela ventoinha B, que está sendo alimentada pelo ME. Os valores baixos de potência que foram registrados são consequências dos momentos de manutenção do sistema e falhas dos próprios sensores. Contudo, o sistema cumpriu bem suas atribuições de sistema automático e mostrou um ganho de 10% durante o tempo de funcionamento. Quanto ao sistema de irrigação, algumas plantas foram perdidas pelas fortes chuvas que ocorreram no período do estudo, mas algumas delas apresentaram crescimento.

#### 4. Conclusão

Nesta pesquisa experimental, pode-se notar que o módulo PV arrefecido pode reduzir sua temperatura em até 14 °C, produzindo uma potência cerca de dez por cento maior que o módulo não arrefecido em horários de temperaturas mais elevadas. E que a redução do parâmetro de temperatura acarreta uma melhor eficiência da célula PV e do valor de potência do sistema. Portanto, a técnica de arrefecimento através de jato de água sob a superfície do módulo é uma técnica útil para ser implementada para reduzir a temperatura da célula. E além do resfriamento, esta técnica tem a vantagem de promover à autolimpeza, pois o fluxo de água na parte superior do módulo PV foi capaz de eliminar as poeiras, folhas, excrementos de pássaros e possíveis manchas, contribuindo para aumentar a vida útil do painel. A partir da análise de dados, é evidente que a temperatura dos módulos é um dos parâmetros que contribui para o impacto na potência de geração de energia solar fotovoltaica. Quanto maior a temperatura na célula PV, menores são os valores de potência e tensão.

O Sistema de comunicação e controle proposto nesta pesquisa foi eficaz, porque trocou informações de forma rápida e segura entre o sistema de medição e os atuadores. O sistema de arrefecimento também se mostrou bem estável fazendo com que a temperatura do módulo PV arrefecido se mantivesse estável não atingindo elevadas temperaturas. Outro ponto a se destacar é que com o sistema de arrefecimento o rendimento do módulo PV foi próximo de seu valor nominal descrito nos manuais fornecido pelo fabricante. Ou seja, aumentou-se a potência, a eficiência e a vida útil das instalações de painéis fotovoltaicos.

Apoiado pelos resultados obtidos, avalia-se que um sistema fotovoltaico maior pode ser beneficiado pela implementação desse Sistema de baixo custo desenvolvido e sem os equipamentos que compõe o Sistema de monitoramento, pois não há necessidade de registar e nem avaliar os dados. Ou seja, o Sistema de datalogger é necessário apenas para pesquisa e desnecessário em uma aplicação prática, já que um medidor inteligente já desempenha o trabalho de monitoramento da potência gerada. Com isso, o objetivo de um Sistema de arrefecimento em larga escala é gerar maior energia com maior eficiência.

Para fins práticos, alguns cuidados devem ser tomados como: acoplar um filtro na saída de água do Sistema para evitar lodo, e sujeiras no tanque de água. Além disso, se faz necessário a utilização de encanamentos maiores e mais resistentes à irradiação solar, pois a água com temperatura elevada pode vir a ressecar o material e comprometer o arrefecimento do Sistema. E por último, mas não menos importante, seria necessário a utilização de bombas mais potentes e de tanques de água maiores, proporcionalmente ao tamanho do Sistema fotovoltaico em questão.

## Referências

- Audwinto, I. A.; Leong, C. S.; Sopian, K., & Zaidi, S. H. (2015). Temperature dependences on various types of Photovoltaic (PV) panel". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 88, p.12066, 2015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/88/1/012066>
- Edaris, Z. L., Mohammed, M. F., Saad, M. S., Yusoff, S., & Tajuddin, M. F. N. (2018). Experimental and Simulated Evaluation of Temperature Effect on Panel Efficiency Performance with Front Water Cooling. *International Conference on Computational Approach in Smart Systems Design and Applications (ICASSDA). IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ICASSDA.2018.8477625>
- Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499–1511, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141>
- Moharram, K. A., Abd-Elhady, M. S., Kandil, H. A., & El-Sherif, H. (2013). Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, 4, 869–77. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.03.005>
- Nižetić, S., Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2017). Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II: Active cooling techniques. *Energy Conversion and Management*, 155, 301–23. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.071>
- Reddy, S. R., Ebadian, M. A., & Lin, C. X. (2015). A review of PV-T systems: Thermal management and efficiency with single phase cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 861–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.134>
- Siecker, J., Kusakana, K., & Numbi, B. P. (2017). A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.053>
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83, 614–24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>