

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FRANCISCO BIASOTO NETO

**Sistema para aumento de eficiência na geração
fotovoltaica por aspersão de água**

Itajubá

2025

Sistema para aumento de eficiência na geração fotovoltaica por aspersão de água

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Roberto Ribeiro
Coorientador: Prof. Dr. Décio Rennó de Mendonça Faria

Itajubá, 2025

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos milhares de heróis anônimos que prestam diariamente seus serviços em prol de um mundo melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me conceder as oportunidades de aprender e evoluir a cada dia, à minha família pelo carinho e companhia e aos meus orientadores pela paciência e dedicação.

RESUMO

A eficiência de um painel fotovoltaico pode ser reduzida tanto pelo sombreamento, pelo aumento de sua temperatura e pelo acúmulo de sujeira em sua superfície. Estudos indicam que a circulação de água sobre o painel contribui para melhorar a geração de energia, uma vez que a aspersão auxilia na redução da temperatura das células e, ao mesmo tempo, promove a limpeza da superfície. No entanto, como a água é um recurso finito e de alto custo, torna-se essencial investigar o momento mais adequado para sua utilização, de modo a maximizar o ganho de energia proporcionado por esse processo.

Este trabalho apresenta uma investigação sobre a viabilidade econômica de se usar pequenas doses de água para aumento da geração de energia elétrica em painéis fotovoltaicos. O trabalho também apresenta uma investigação sobre o momento apropriado para aplicação das doses de água de modo a obter maior ganho monetário devido ao aumento da geração.

Os experimentos foram conduzidos em dois painéis fotovoltaicos semelhantes aos utilizados em usinas fotovoltaicas. Um deles foi mantido como referência, enquanto o outro recebeu a aspersão de água. Durante esse processo, algumas variáveis foram registradas com o objetivo de identificar um possível parâmetro de controle a ser empregado em um sistema automático de aspersão.

Os maiores incrementos de energia foram obtidos quando o painel apresentava potência instantânea mais próxima da nominal. A partir dos cálculos realizados, foi possível concluir que em determinadas condições a aspersão de água é favorável e um ganho monetário é obtido.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica; eficiência energética; painel fotovoltaico; redução de temperatura; aspersão de água.

ABSTRACT

The efficiency of a photovoltaic panel can be reduced both by shadows, by the increase in its temperature and by the accumulation of dirt on its surface. Studies indicate that water circulation over the panel helps improve energy generation, since spraying assists in lowering the temperature of the cells while also promoting surface cleaning. However, as water is a finite and costly resource, it is essential to investigate the most appropriate moment for its use in order to maximize the energy gain provided by this process.

This work presents an investigation into the economic feasibility of using small doses of water to increase electricity generation in photovoltaic panels. It also examines the appropriate timing for applying water doses so as to obtain greater monetary gains from the increase in generation.

The experiments were conducted on two photovoltaic panels similar to those used in photovoltaic power plants. One panel was kept as a reference, while the other received water spraying. During this process, several variables were recorded with the aim of identifying a possible control parameter to be employed in an automatic spraying system.

The greatest energy increments were obtained when the panel exhibited instantaneous power closer to its nominal value. Based on the calculations performed, it was possible to conclude that under certain conditions water spraying is beneficial, leading to monetary gains.

Keywords: Photovoltaic energy; energy efficiency; photovoltaic panel; temperature reduction; water spraying.

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1: Variação da potência do painel fotovoltaico em função da temperatura.....</u>	<u>16</u>
<u>Figura 2: Montagem típica do painel fotovoltaico.....</u>	<u>18</u>
<u>Figura 3: Átomos de Silício dopados.....</u>	<u>19</u>
<u>Figura 4: Circuito elétrico equivalente de um painel fotovoltaico.....</u>	<u>20</u>
<u>Figura 5: Gráfico de corrente versus tensão sob várias temperaturas.....</u>	<u>21</u>
<u>Figura 6: Gráfico da potência versus tensão em diferentes temperaturas.....</u>	<u>22</u>
<u>Figura 7: Diagrama de ligação do transdutor de tensão.....</u>	<u>23</u>
<u>Figura 8: Transdutor de corrente LTS25-NP.....</u>	<u>24</u>
<u>Figura 9: Tensão de saída do transdutor de corrente.....</u>	<u>24</u>
<u>Figura 10: Amplificador diferencial.....</u>	<u>25</u>
<u>Figura 11: Divisor de tensão.....</u>	<u>26</u>
<u>Figura 12: Circuito para medição de corrente.....</u>	<u>26</u>
<u>Figura 13: Amostra de potência ao longo do tempo.....</u>	<u>27</u>
<u>Figura 14: correlação entre variáveis.....</u>	<u>29</u>
<u>Figura 15: Diagrama do sistema de ensaios.....</u>	<u>30</u>
<u>Figura 16: Condicionamento de tensão.....</u>	<u>31</u>
<u>Figura 17: Condicionamento de Corrente.....</u>	<u>32</u>
<u>Figura 18: Coletor de dados.....</u>	<u>33</u>
<u>Figura 19: Bancada de testes.....</u>	<u>34</u>
<u>Figura 20: Aspersor.....</u>	<u>34</u>
<u>Figura 21: Amostras para determinar a média por aspersão.....</u>	<u>35</u>
<u>Figura 22: Temperatura do painel e da água durante um teste.....</u>	<u>36</u>
<u>Figura 23: Normalização das curvas de potência.....</u>	<u>37</u>
<u>Figura 24: Gráfico de dispersão: da potência inicial pelo incremento na geração.....</u>	<u>39</u>
<u>Figura 25: Gráfico de dispersão: da temperatura do painel pelo incremento na geração.....</u>	<u>39</u>
<u>Figura 26: Gráfico de dispersão: da temperatura da água pelo incremento de energia.....</u>	<u>40</u>
<u>Figura 27: Gráfico de dispersão: diferença das temperaturas pelo incremento de energia.....</u>	<u>40</u>
<u>Figura 28: Gráfico de desempenho da bomba.....</u>	<u>44</u>
<u>Figura 29: Regressão quadrática.....</u>	<u>45</u>
<u>Figura 30: Regressão cúbica.....</u>	<u>46</u>

SUMÁRIO

1	Introdução.....	15
2	Embasamento teórico.....	18
2.1	O painel fotovoltaico.....	18
2.2	Medida de tensão e corrente.....	23
2.2.1	Medição de forma isolada.....	23
2.2.1.1	<i>Medida de tensão contínua.....</i>	23
2.2.1.2	<i>Medida de corrente contínua.....</i>	24
2.2.2	Medição de forma não isolada.....	26
2.2.2.1	<i>Medição de tensão contínua.....</i>	26
2.2.2.2	<i>Medição de corrente contínua.....</i>	26
2.3	Medida de energia.....	27
2.4	O coeficiente de correlação de Pearson.....	29
3	Experimento com painéis fotovoltaicos.....	31
3.1	Materiais utilizados nos experimentos.....	31
3.2	Desenvolvimento do coletor de dados.....	32
3.3	Instalações Mecânicas e hidráulicas.....	34
3.4	Medição das temperaturas.....	36
3.5	Ensaios.....	36
4	Resultados e discussões.....	40
4.1	Investigação sobre as variáveis de controle.....	40
4.2	Cálculo do custo da dose de água.....	42
4.2.1	Custo da água proveniente da rede de abastecimento.....	43
4.2.2	Custo da água proveniente de bombeamento por equacionamento.....	44
4.2.3	Custo da água proveniente de bombeamento pelo gráfico da bomba.....	45
4.3	Determinação do ponto de equilíbrio.....	46
5	Conclusão.....	48
6	Referências.....	50

1 Introdução

A geração de energia elétrica utilizando fontes renováveis torna-se mais necessária em um planeta cada vez mais populoso. A energia gerada por painéis fotovoltaicos era, antigamente, usada no Brasil sobretudo em embarcações e em lugares isolados onde a energia elétrica ainda não tinha chegado [1]. Hoje esse tipo de geração contribui para a matriz energética nacional e a energia gerada pode ser injetada na rede elétrica existente. As instalações de geração fotovoltaica variam em potência desde alguns kilowatts até dezenas ou centenas de megawatts. Existem instalações pequenas, como as encontradas nas casas e pequenos comércios, com principal objetivo de suprir a própria demanda. Caso a geração mensal supere o consumo, essa energia excedente pode ser transformada em créditos a serem descontados em uma conta de energia futura ou descontados de outra instalação de mesma titularidade do proprietário da instalação [2]. Existem também as instalações maiores, como as instalações de usinas solares, onde o principal objetivo é vender a energia para outros consumidores. Em julho de 2024, o Brasil possuía 21.224 usinas fotovoltaicas instaladas, com outras 2.641.323 unidades de geração solar na modalidade de geração distribuída, onde consumidores instalam painéis para gerarem sua própria energia. A capacidade total, englobando as duas classes citadas, é de 43,6 GW o que representa cerca de 18,7% do total do país. É a segunda fonte de energia do país em termos de potência instalada [3].

A geração de energia por painéis fotovoltaicos é uma tecnologia utilizada há várias décadas, porém a eficiência de um painel fotovoltaico comercial ainda está em torno de 20% e tende a cair ainda mais conforme a temperatura dos painéis aumenta, fato difícil de evitar, visto que as células necessitam de exposição direta ao sol para gerar a máxima potência possível [4]. Segundo o datasheet da Sunova Solar, fabricante de painéis fotovoltaicos, a potência de um painel diminui 0,30% para cada grau Celsius de aumento [5]. Isso significa uma diminuição de 10,5% na potência quando o painel estiver operando a uma temperatura de 60°C. O gráfico da Figura 1 do mesmo fabricante mostra a variação da potência em função da temperatura de um painel fotovoltaico.

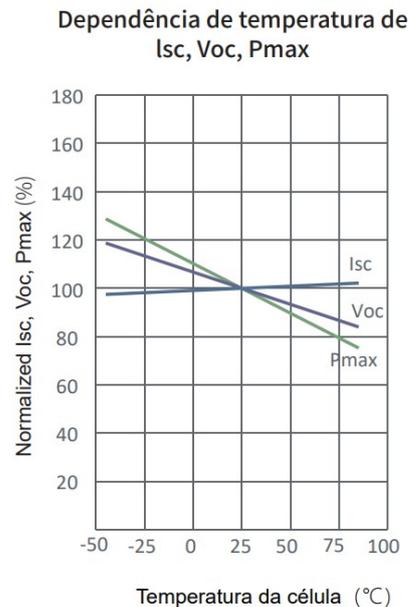


Figura 1: Variação da potência do painel fotovoltaico em função da temperatura

Neste gráfico é possível verificar que com o aumento da temperatura a corrente de curto circuito do painel aumenta. Porém a tensão de saída diminui de forma mais acentuada, resultando em uma potência de saída que diminui conforme o aumento da temperatura.

Outro fator que reduz a eficiência dos painéis fotovoltaicos é o acúmulo de sujeira sobre a sua superfície, o qual diminui a luz solar incidente, e por consequência, a potência gerada [6].

Fernandes [7] aborda o aumento da eficiência de painéis fotovoltaicos usando o resfriamento por água. Um trocador de calor foi instalado na parte traseira do painel com o objetivo de resfriamento do mesmo. A água circulava por meio de uma bomba, passando pelo subsolo de modo a diminuir sua temperatura antes de circular pelo painel. Após resfriar o painel, a água aquecida poderia ser usada em uma residência para diminuir o gasto de energia elétrica com o chuveiro. O autor apresenta a comparação do rendimento entre o painel teste (com o sistema de troca de calor) e o painel de referência (sem qualquer intervenção). O ganho de potência relativa chegou próximo a 20% em um dado momento do dia.

Jurinic [8] investigou um sistema de resfriamento para painéis fotovoltaicos baseado na circulação de água sobre sua superfície, considerando diferentes ângulos de inclinação. Observou-se um acréscimo de até 25,5% de energia gerada em relação a um painel

fotovoltaico sem refrigeração. Em Dorobantu and Popescu [9], a superfície de um painel fotovoltaico foi submetida a uma lâmina de água. Um incremento de potência foi observado devido ao resfriamento do painel e a melhora do coeficiente de reflexão do vidro devido a água presente na superfície. Foi verificado um aumento de geração de 9,5% por conta dessa intervenção.

Nizetic et al. [10] propuseram um trabalho inspirado em Dorobantu and Popescu (2013), porém usaram a água nas duas superfícies do painel. Nos testes realizados, o resfriamento de apenas uma superfície do painel resultou em um aumento de 14,6%. O resfriamento em ambas as faces do painel resultou em um acréscimo de 16,3%, indicando que esse modo pode não ser vantajoso quando se considera o consumo de água e os recursos necessários para a intervenção na parte de trás do painel.

Elnozahy et al. [11] apresentaram um sistema eletrônico que acionava uma solenoide para distribuir água na superfície de um painel fotovoltaico de teste e comparou o resultado com um painel sem adição de água. Os acionamentos aconteciam enquanto a temperatura no painel em teste era dois graus Celsius acima da temperatura ambiente. O circuito também acionava a solenoide por 24 segundos a cada quatro dias com o objetivo de limpeza. Foi registrado um incremento máximo de aproximadamente 26% na potência gerada em um dado momento do dia por conta do resfriamento do painel.

Os artigos mencionados, demonstraram que o resfriamento do painel fotovoltaico trouxe um ganho de potência, mas não levaram em conta o custo da água e não otimizaram o uso dela no sistema de esfriamento proposto.

Esta dissertação apresenta uma estimativa do benefício econômico do uso de aspersão de água na superfície do painel fotovoltaico obtido através do aumento da produção de energia. Utilizando-se do coeficiente de correlação de Pearson, a variável com maior proporcionalidade foi escolhida como uma possível opção a ser usada em um sistema de controle para administrar as doses de água no momento certo. Para a realização dos experimentos, um coletor de dados foi desenvolvido para a medição da potência dos painéis.

2 Embasamento teórico

2.1 O painel fotovoltaico

Um painel fotovoltaico possui moldura de alumínio, fundo de material plástico e superfície frontal de vidro ou material transparente. Essa estrutura possui alta rigidez mecânica e proteção contra entrada de umidade com o objetivo de proteger a células fotovoltaicas presentes no mesmo. Na parte de trás do painel é instalada a caixa de conexão que liga as células fotovoltaicas presentes no interior do painel e permite a sua ligação com a carga que se deseja alimentar [12]. A Figura 2 ilustra esta configuração.

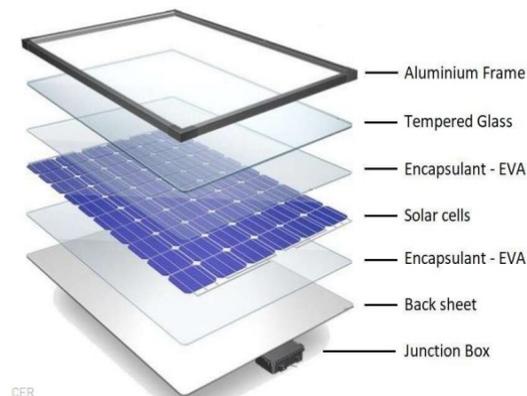


Figura 2: Montagem típica do painel fotovoltaico.

A quantidade de células depende da potência desejada. Quanto maior o número de células, maior a área do painel e conseqüentemente maior a quantidade de energia gerada. A ligação em série das células aumenta a tensão total, enquanto que a ligação em paralelo de células aumenta a corrente total do conjunto. Geralmente em painéis destinados ao uso em sistema desconectados da rede, onde o objetivo é carregar uma bateria (valor típico de tensão de 12 V) a tensão utilizada é menor do que a de um painel projetado para sistemas conectados na rede de distribuição de energia. Além disso, os painéis destinados à geração e fornecimento de energia elétrica ao sistema nacional são projetados de forma a alimentar um inversor que injeta a energia gerada na rede de distribuição.

A célula fotovoltaica é o principal elemento desse sistema, sendo fabricada com materiais semicondutores, tipicamente o Silício. Nesta célula, o cristal de Silício puro

(chamado de cristal intrínseco) é dopado com elementos pentavalentes formando uma nova estrutura chamada de “cristal tipo n”. Nesta mesma célula, parte do cristal de Silício puro é dopado com elementos trivalentes formando outra estrutura chamada de “cristal tipo p”. Geralmente utiliza-se o elemento Boro para criação dos cristais tipo p e o elemento Fósforo para criação dos cristais tipo n.

A Figura 3 ilustra a estrutura interna destes cristais.

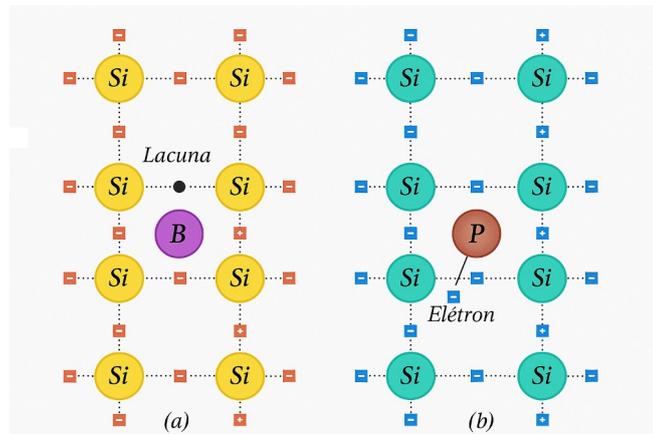


Figura 3: Átomos de Silício dopados.

A união de um cristal tipo n com um cristal tipo p cria na junção entre os dois cristais uma região de ausência de cargas, região esta chamada de região de depleção, onde o excesso de elétrons do cristal tipo n preenche as lacunas presentes no cristal tipo p. Nessa região é formado um campo elétrico e por consequência uma diferença de potencial. Depois de sua formação, como o conjunto está em equilíbrio, não mais haverá passagem de elétrons do lado n para o lado p. A exposição dessa região à luz possibilita que a energia dos fótons seja utilizada para levar elétrons da banda de valência para a banda de condução produzindo a corrente elétrica que será utilizada pela carga ligada ao painel.

As células de Silício podem ser do tipo Monocristalino ou Policristalino. As células de Silício do tipo Monocristalino possuem uma eficiência maior em relação à do tipo Policristalino [13]. Podem ser também do tipo Filme Fino, subdivididas nos tipos Amorfo (a-Si), Cristalino e a-Si/Cristalino.

Segundo Coelho [14], o circuito elétrico equivalente de um módulo fotovoltaico pode ser representado como na Figura 4.

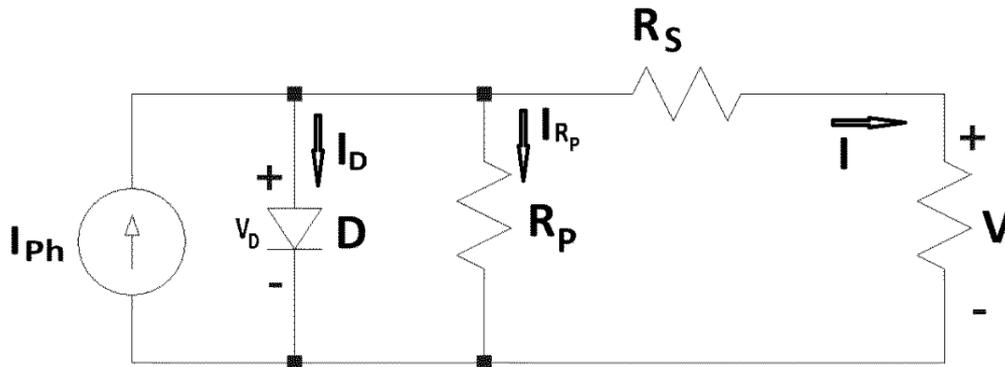


Figura 4: Circuito elétrico equivalente de um painel fotovoltaico.

A fonte de corrente I_{ph} representa o fluxo de elétrons criado pela exposição da célula aos fótons, sendo D a modelagem da junção pn desta célula. A tensão e corrente de saída da célula são representadas por V e I respectivamente. V_D representa de forma simplificada a queda de tensão nas junções pn das células que podem estar ligadas em paralelo ou em série. A corrente I_D representa a corrente aplicada ao diodo D. Neste modelo, para representação das perdas internas é utilizado uma resistência denominada R_p sendo I_{Rp} a corrente de perda nesta resistência. A resistência R_s representa a resistência ôhmica dos condutores e contatos metálicos utilizados para alimentação da carga. As correntes ilustradas na Figura 4 estão relacionadas pela Equação 1 abaixo permitindo, segundo ao autor chegar na Equação 2 que expressa a corrente de saída do painel fotovoltaico em função da tensão de saída V do módulo.

$$I_{módulo} = I_{Phmódulo} - I_{Dmódulo} - I_{Rp módulo} \quad (1)$$

$$I_{módulo} = \frac{S}{S^{ref}} \left[1 + u_1 (T - T_{ref}) \right] \cdot I_{Phmódulo}^{ref} - I_o^{ref} \cdot \left[\frac{T}{T^{ref}} \right]^3 \cdot e^{\frac{n_s \cdot E_G}{A \cdot k} \left(\frac{1}{T^{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \cdot \left[e^{\frac{q(V_{módulo} + R_{Smódulo} \cdot I_{módulo})}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \left(\frac{V_{módulo} + R_{Smódulo} \cdot I_{módulo}}{R_{Pmódulo}} \right) \quad (2)$$

Podemos observar na Equação 2 a utilização de um parâmetro S que representa a irradiância sobre o painel, enquanto S^{ref} a irradiância nas condições padrão de teste fornecida pelo fabricante do painel definida como sendo 1000 W/m^2 . Da mesma forma T e T^{ref} se referem à temperatura que se pretende analisar e a temperatura padrão de testes dos fabricantes, sendo esta tipicamente 25°C . A variável $I^{\text{ref}}_{\text{Phmódulo}}$ é a corrente gerada nas condições de teste e I_0^{ref} a corrente de saturação reversa nessas condições. A constante de Boltzmann representada por k é igual a $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ e a carga elementar q igual à carga do elétron, ou seja, $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. A variável nS é a quantidade de células ligadas em série no painel e o fator A é o parâmetro ideal das células solares variando entre 1 e 5. Geralmente as variáveis R_p e R_s (resistência paralela e resistência série do módulo) são utilizadas como fator de ajuste para que as curvas geradas por simulação se aproximem às curvas fornecidas pelo fabricante. Tipicamente os valores de R_s de cada célula de silício presente em um painel fotovoltaico variam entre $0,01\Omega$ e $0,1\Omega$ enquanto que valores de R_p de cada célula variam entre 200Ω e 800Ω .

Observando a equação, nota-se que a corrente entregue por um painel fotovoltaico é influenciada pela temperatura do mesmo. Um aumento da temperatura produz um aumento da corrente. Este aumento se deve às características do semicondutor que possui um coeficiente de temperatura negativo liberando um número maior de elétrons da banda de valência para banda de condução com o aumento da temperatura. Por outro lado, esse aumento da temperatura fará com que os elétrons livres e lacunas possuam um excesso de energia térmica. Esse excesso altera o campo elétrico na região de depleção diminuindo a tensão de saída da célula. Como o efeito do incremento da temperatura é maior na tensão, a potência no painel diminui com o aumento da temperatura.

M. H. WANG and M. J. CHEN [15] em seu trabalho mostra um gráfico de corrente versus tensão típico de um painel fotovoltaico. Esse gráfico é mostrado na Figura 5. Nota-se que enquanto a variação de temperatura de 0°C a 100°C acarretou um singelo acréscimo na corrente gerada, a tensão apresentou uma forte queda.

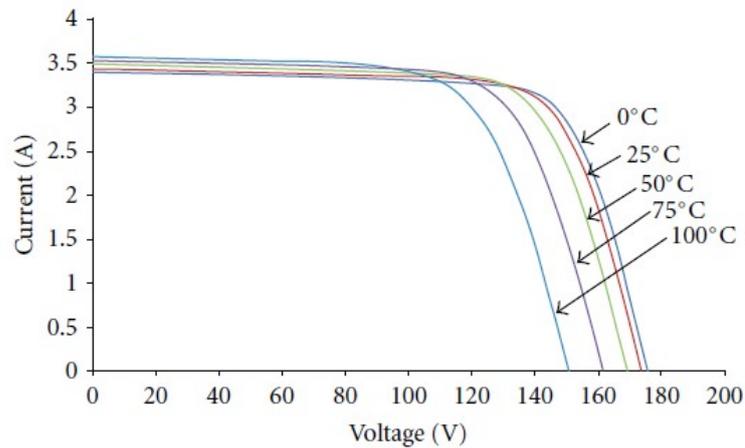


Figura 5: Gráfico de corrente versus tensão sob várias temperaturas.

Essa variação de corrente e tensão resulta em um acréscimo da potência de saída conforme diminuição da temperatura conforme mostra a Figura 6

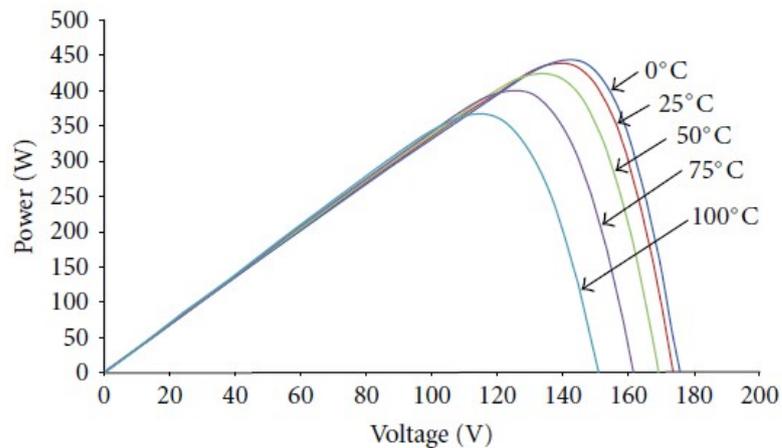


Figura 6: Gráfico da potência versus tensão em diferentes temperaturas.

2.2 Medida de tensão e corrente

Para que os valores de tensão e corrente de um painel fotovoltaico possam ser medidos por um sistema eletrônico e utilizados no cálculo da energia gerada, é necessário que essas grandezas sejam previamente condicionadas a níveis compatíveis com o sistema de medição [16]. Esse condicionamento pode ser realizado de duas formas: de maneira isolada, quando não há ligação elétrica direta entre entrada e saída, ou de forma não isolada.

2.2.1 Medição de forma isolada

Uma forma de medir corrente contínua de forma isolada é através de transdutores baseados no efeito Hall. Esses dispositivos exploram a geração de uma tensão transversal em um material semicondutor percorrido por uma corrente, quando submetido a um campo magnético perpendicular. No caso da medição de corrente, o condutor a ser monitorado passa por um núcleo magnético (geralmente toroidal) com um entreferro, onde é posicionado o sensor Hall. A corrente no condutor gera um campo magnético no núcleo, concentrado no gap, que é detectado pelo sensor Hall. A tensão Hall resultante é então amplificada por um circuito de entrada de alta impedância, baixo ruído e alto ganho, produzindo um sinal de saída proporcional à corrente medida. Esse sinal é disponibilizado tipicamente como uma tensão (e, em alguns casos, convertido em corrente de saída para aplicações específicas). A medição isolada de tensão pode ser realizada com circuitos integrados projetados especialmente para essa funcionalidade.

2.2.1.1 Medida de tensão contínua

Para medições de tensão contínua podemos utilizar um transdutor de tensão, como exemplo o modelo LV-25P do fabricante LEM. De acordo com as especificações do fabricante é necessário o dimensionamento dos resistores de entrada e de saída. A Figura 7 mostra o diagrama de ligação típico deste componente.

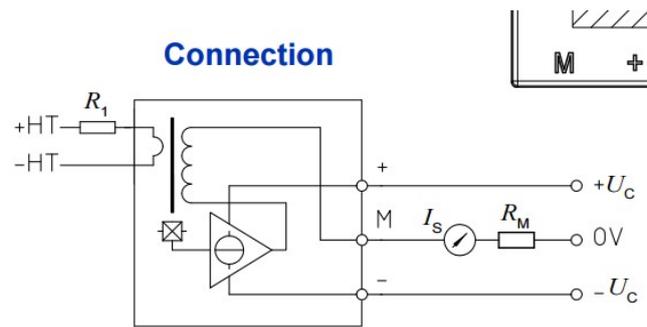


Figura 7: Diagrama de ligação do transdutor de tensão.

R_1 é escolhido de modo que a corrente gerada a partir da tensão máxima que se deseja medir seja de 10 mA. Mantendo a corrente próxima desse valor o erro é de mais ou menos 0,9%. Se a tensão a ser medida cair pela metade a corrente cairá pela metade e o erro será próxima de 1,5% segundo o fabricante.

A relação entre saída e entrada do transdutor é de 2500:1000. Uma corrente de 10 mA induzirá uma corrente de 25 mA na saída. O resistor R_M é calculado com base na tensão desejada de saída. Para medição de tensões positivas somente os terminais 0 V e $+U_c$ deverão ser utilizados.

2.2.1.2 Medida de corrente contínua

Para fazer a medição de corrente de forma isolada, neste trabalho foi utilizado um transdutor de corrente modelo LTS 15-NP do fabricante LEM usado para medir correntes de até 15 A. A Figura 8 mostra o aspecto físico do dispositivo, onde a corrente a ser medida passa por um fio que atravessa o mesmo através do buraco disponível para esse fim ou através dos terminais laterais.

$$I_{PN} = 15 \text{ At}$$

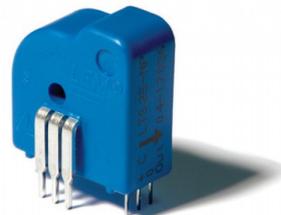


Figura 8: Transdutor de corrente LTS25-NP.

Esse dispositivo não necessita de resistor externo para funcionamento. Uma tensão proporcional à corrente é obtida diretamente no pino "out" sendo seu valor apresentado pelo gráfico da Figura 9. Os pinos 0 e + são usados para alimentação, que nesse caso é de 5 V.

Output voltage - Primary current

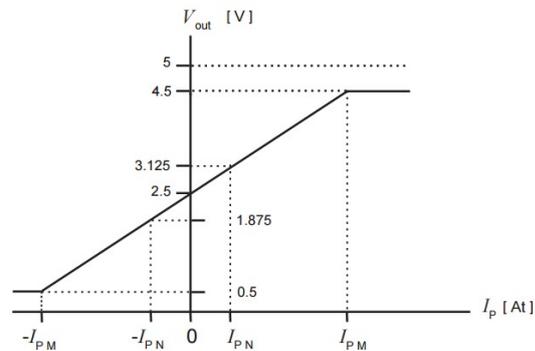


Figura 9: Tensão de saída do transdutor de corrente.

A tensão de saída sem corrente na entrada é de 2,5 V, variando linearmente até 3,125 V quando a corrente atinge seu máximo de 15 A. Essa pequena variação de apenas 625 mV pode ser um problema principalmente quando usados conversores analógicos digitais de 8 bits, resultando em uma baixa resolução na medição [17]. Uma forma de contornar esse problema é utilizar um circuito amplificador diferencial conforme ilustra a Figura 10.

Aplicando uma tensão fixa de 2,5 V em V1 e aplicando a tensão de saída do transdutor em V2, teremos em Vo uma tensão que é a diferença entre as duas entradas multiplicada pela razão entre R2 e R1

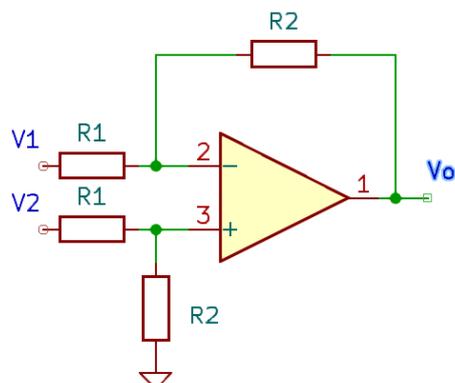


Figura 10: Amplificador diferencial.

2.2.2 Medição de forma não isolada

Quando o isolamento entre as grandezas medidas e o equipamento de medição não é necessário, pode-se empregar a medição não isolada. Essa abordagem apresenta a vantagem de utilizar componentes eletrônicos mais simples e de menor custo e, dependendo da faixa de valores a serem monitorados, pode ainda oferecer melhor linearidade.

2.2.2.1 Medição de tensão contínua

Para medição de tensão com valores superiores aos utilizados pelo conversor analógico digital, um simples divisor de tensão usando dois resistores faz a adequação da faixa de tensão a ser medida para a faixa de tensão da entrada do conversor. A Figura 11 mostra tal configuração seguida de um amplificador operacional opcional configurado como *buffer* de ganho unitário.

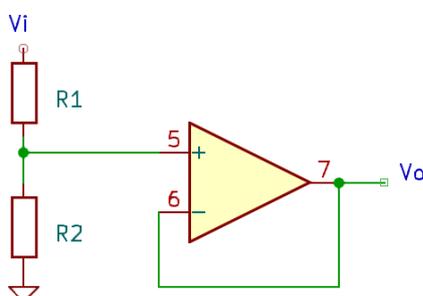


Figura 11: Divisor de tensão.

2.2.2.2 Medição de corrente contínua

Nesse tipo de medição, a corrente a ser monitorada percorre uma resistência de valor conhecido, denominada **resistência shunt**. Essa resistência deve ser suficientemente baixa para não introduzir aumento significativo na resistência série do circuito, evitando alterações na corrente real. Ao mesmo tempo, precisa ser alta o bastante para produzir uma queda de tensão mensurável, a qual será amplificada e utilizada no cálculo da corrente. Além disso, a resistência shunt deve ser dimensionada para suportar a potência dissipada, que cresce

proporcionalmente ao quadrado da corrente medida. A Figura 12 ilustra um circuito onde a diferença de tensão em cima da resistência *shunt* é multiplicada por um ganho fixo de modo a atender os níveis de tensão dos circuitos subsequentes.

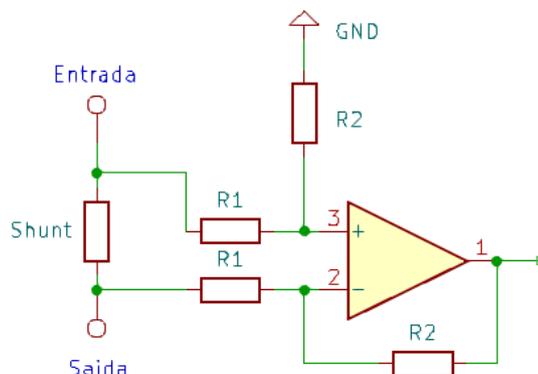


Figura 12: Circuito para medição de corrente.

Se a corrente fluir na direção da entrada para a saída a tensão na saída do amplificador operacional será positiva, caso contrário será negativa. O valor da tensão de saída será o valor da queda de tensão no resistor shunt multiplicado pela razão de $R2$ por $R1$.

2.3 Medida de energia

A partir dos valores de tensão e corrente amostrados ao longo de uma série temporal, a multiplicação ponto a ponto fornece a potência instantânea em cada instante analisado. A integração dessa potência em relação ao tempo resulta na energia gerada ou consumida, usualmente expressa em kWh. Em sistemas discretos, essa integração é aproximada pelo somatório das áreas sob a curva de potência versus tempo, obtidas pela multiplicação da variação de tempo no eixo x pela potência correspondente no eixo y. Quanto menor o intervalo entre amostras, maior será a precisão da estimativa da energia. A Figura 13 mostra algumas dessas áreas a serem calculadas, áreas estas destacadas pelos retângulos em vermelho.

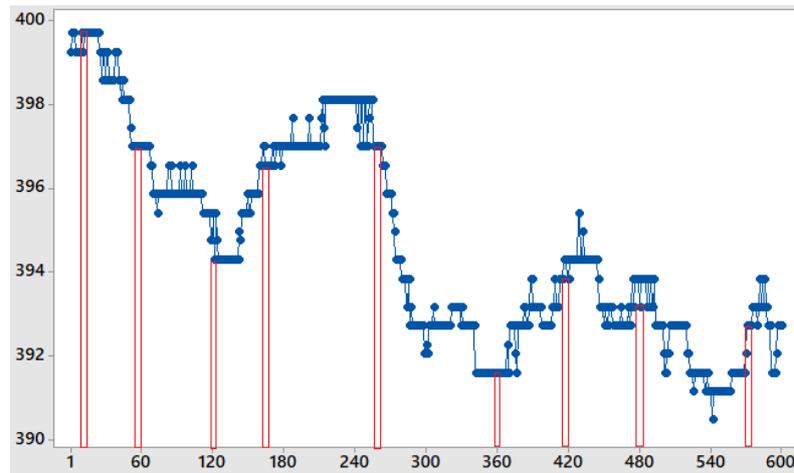


Figura 13: Amostra de potência ao longo do tempo.

Por se tratar de um sistema discreto, a integral ou área da curva de potência pode ser calculada pelos três métodos a seguir [18].

Backward Euler:

$$y(k) = y(k-1) + Ts \cdot x(k) \quad (3)$$

Forward Euler:

$$y(k) = y(k-1) + Ts \cdot x(k-1) \quad (4)$$

Trapezoidal:

$$y(k) = y(k-1) + \frac{Ts}{2} \cdot [x(k) + x(k-1)] \quad (5)$$

onde,

$y(k)$ é o valor da área do retângulo sendo calculado no momento

$y(k-1)$ é o valor da área do retângulo calculada no momento anterior

Ts é o tempo de amostragem

$x(k)$ é o valor no eixo x (potência) no instante da medida
 $x(k-1)$ é o valor no eixo x (potência) no instante anterior

Esse trabalho utilizou o método trapezoidal.

2.4 O coeficiente de correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida adimensional que mede o grau de relação linear entre duas variáveis [19]. Pode assumir valores de -1 até 1. Valores próximos de 1 indicam que as duas variáveis estão relacionadas de forma proporcional, enquanto que, valores próximos a -1 indicam que estão relacionadas de forma inversamente proporcional. Valores próximos a zero indicam que há uma baixa correlação entre as duas variáveis. O coeficiente é representado pela letra r e pode ser calculado pela Equação 6, onde n é o número de amostras.

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{xi} \cdot Z_{yi} \quad (6)$$

Cada elemento Z da somatória é o valor de cada variável subtraído da média de todos os valores das variáveis dividido pelo desvio padrão do conjunto de dados da variável conforme as Equações (7) e (8).

$$Z_{yi} = \frac{y - \bar{y}}{S_y} \quad (7)$$

$$Z_{xi} = \frac{x - \bar{x}}{S_x} \quad (8)$$

Ao subtrair cada valor da série de dados pela sua média, o conjunto de pontos é deslocado de modo que o centro passa a ser os valores médios. Ao dividir pelo desvio padrão a escala fica padronizada, ou seja, independente de sua unidade.

A Figura 14 ilustra graficamente uma alta e uma baixa correlação entre duas variáveis.

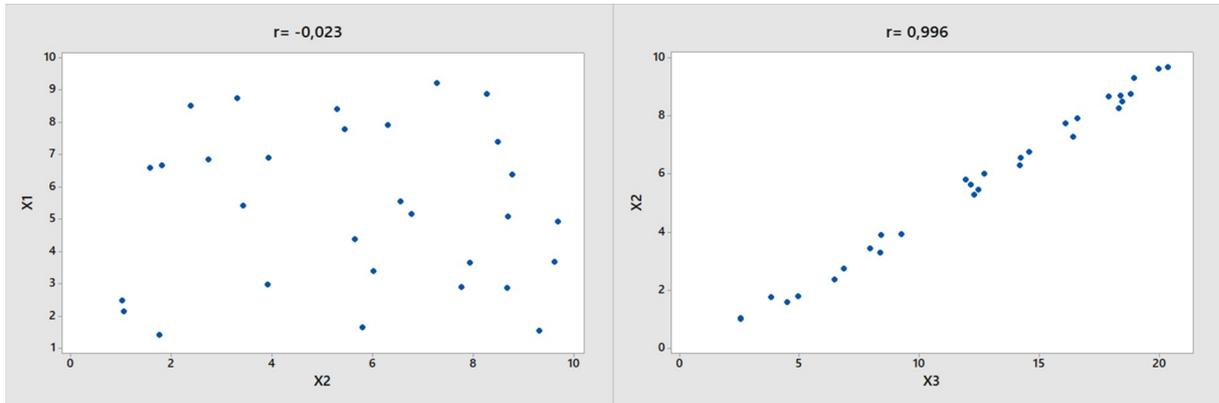


Figura 14: correlação entre variáveis.

3 Experimento com painéis fotovoltaicos

Os experimentos deste trabalho foram realizados com dois painéis dispostos lado a lado. Em um painel foi instalado um aspersor de água e sensores de temperatura: um para medir a temperatura do painel e o outro para a temperatura da água. As temperaturas do painel e da água foram registradas por um coletor de dados. A quantidade de água foi controlada por um sistema microcontrolado utilizando uma válvula solenoide e um medidor de fluxo de água. O outro painel, sem nenhum sistema de injeção de água, foi usado como referência para possibilitar o cálculo do ganho de energia em cada ensaio. Ambos painéis foram ligados a um coletor de dados para registro da tensão e corrente instantâneas e consequentemente o cálculo da energia gerada. Um coletor de dados foi desenvolvido exclusivamente para esses ensaios. A Figura 15 ilustra a configuração utilizada.

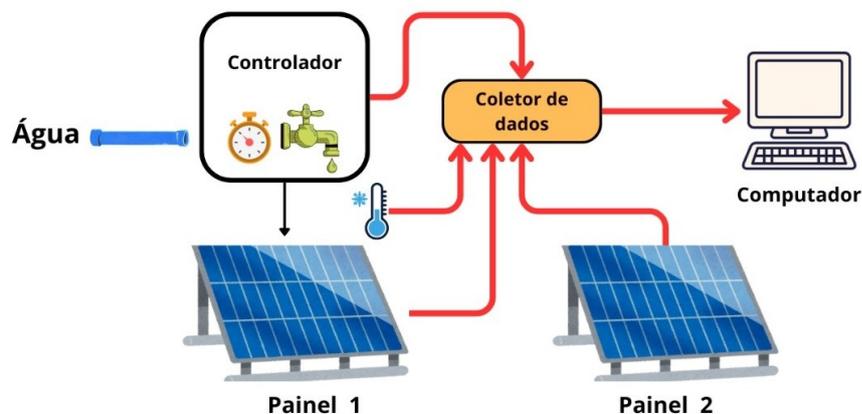


Figura 15: Diagrama do sistema de ensaios.

3.1 Materiais utilizados nos experimentos

Segue abaixo a relação dos materiais utilizados nos experimentos:

- Dois painéis fotovoltaicos monocristalinos modelo SS-550-72MDH de 550W da Sunova Solar.
- Suporte metálico para os painéis.

- Cargas resistivas de 2,8 Ω .
- Raspberry Pi 4.
- Coletor de dados para medição de temperaturas(PicoScope) modelo 4224.
- Solenoide para controle da água.
- Filtro de água modelo planeta água carvão ativado.
- Medidor de fluxo de água modelo YF-B6.
- Aspersor em PVC de construção própria.
- Tubos protetores térmicos de polietileno expandido.
- Placas condicionadoras de tensão e corrente.

3.2 Desenvolvimento do coletor de dados

Para medir as potências nos dois painéis fotovoltaicos foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados composto por um Raspberry Pi, duas placas condicionadoras de tensão e corrente, uma para cada canal, e uma placa conversora analógico-digital. O Raspberry Pi é um computador de placa única baseado em processador ARM, com armazenamento em cartão microSD, interfaces de comunicação (Bluetooth, Wi-Fi e rede cabeada), portas USB, saída HDMI e diversos pinos de entrada/saída. O sistema foi configurado com dois canais independentes, correspondendo a cada painel fotovoltaico, o que exigiu o uso de duas placas de aquisição de tensão e corrente.

No condicionamento do sinal, as tensões provenientes de cada painel passaram inicialmente por um divisor resistivo e, em seguida, por um amplificador operacional configurado como buffer de ganho unitário, garantindo baixa impedância de saída e preservação do sinal. A Figura 16 mostra o esquema elétrico do circuito utilizado.

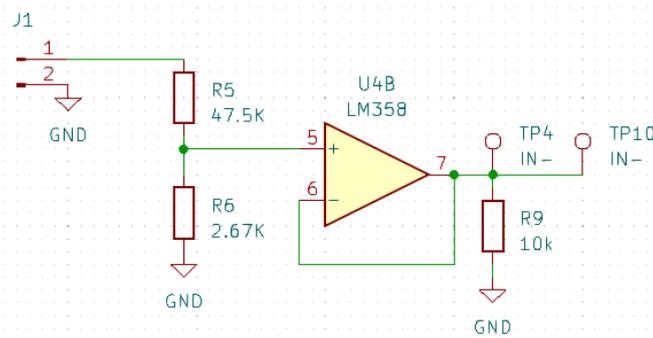


Figura 16: Condicionamento de tensão.

Para medição da corrente foi utilizado um resistor *shunt* de 0.1Ω , 3 watts e precisão de 1% modelo OAR3R010FLF. A tensão do resistor *shunt* foi condicionada à entrada do conversor analógico/digital através de um circuito amplificador diferencial com amplificador operacional. A Figura 17 mostra o esquema elétrico do circuito utilizado.

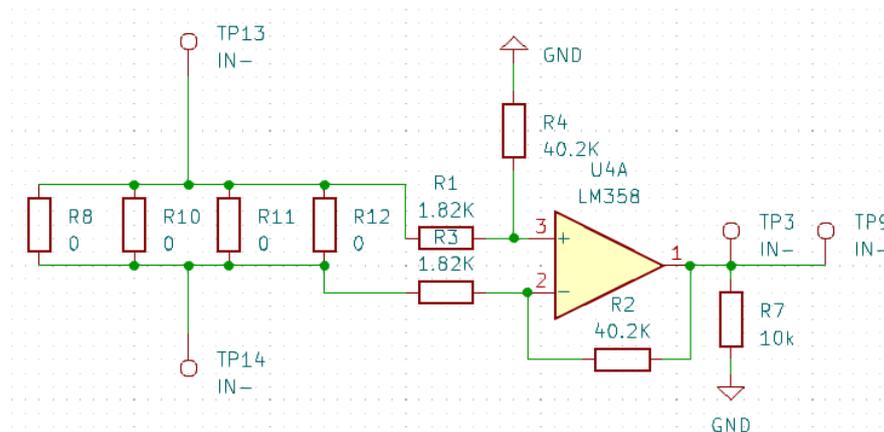


Figura 17: Condicionamento de Corrente.

Para a conversão analógico/digital foi utilizado o circuito integrado MCP3008 da microchip que dispõe de 8 entradas, comunicação via SPI e 10 bits de resolução. Este circuito integrado é capaz de fazer 200 mil conversões por segundo. Foi escolhida uma tensão de VREF e alimentação de 3.3 V por ser compatível com a entrada SPI da Raspberry Pi.

Inicialmente, a tensão de referência era fornecida diretamente pela placa do Raspberry Pi por meio dos pinos de interface. Entretanto, devido ao elevado nível de ruído observado nas medições, optou-se por utilizar um regulador LM317 dedicado para gerar essa tensão de forma mais estável. Outra modificação necessária para reduzir o ruído esteve relacionada à alimentação do próprio Raspberry Pi. Na configuração inicial, uma fonte remota de 12 V alimentava as placas condicionadoras de tensão e, em paralelo, um conversor chaveado step-down de 12 V para 5 V era utilizado para suprir o Raspberry Pi. Contudo, verificou-se que o conversor chaveado introduzia ruído significativo, sendo então substituído por uma fonte externa de 5 V linear dedicada, conectada diretamente ao Raspberry Pi.

Um programa escrito em Python permitiu escolher o intervalo de aquisição e o tempo total dos testes salvando a potência de cada painel em um arquivo do tipo separado por vírgulas (CSV). A Figura 18 mostra o coletor de dados em sua versão final.

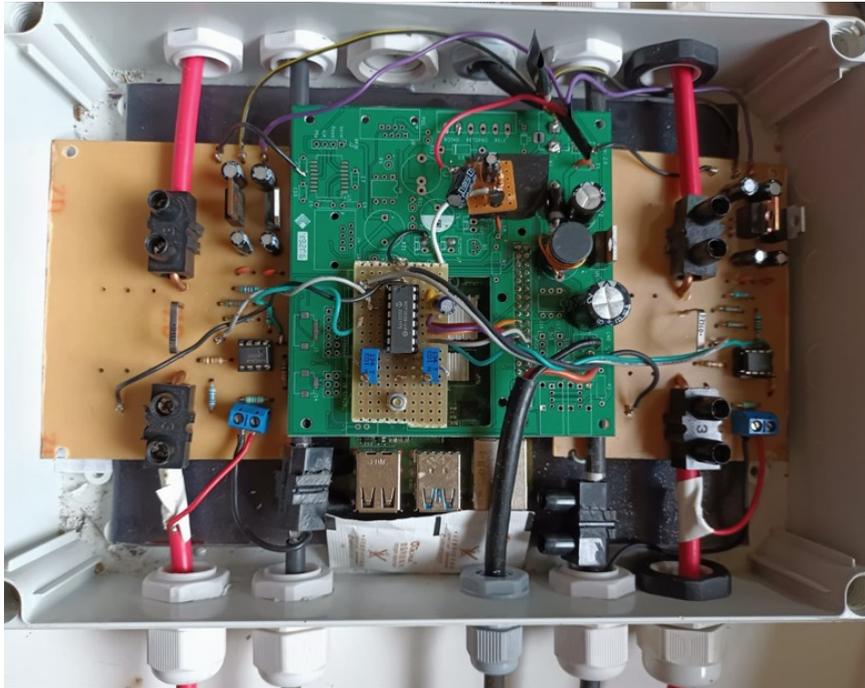


Figura 18: Coletor de dados

3.3 Instalações Mecânicas e hidráulicas

Foi construída uma bancada de teste para acomodar dois painéis fotovoltaicos de 550 Wp de modo que ficassem lado a lado direcionados para o norte em um ângulo de 22 graus em relação ao solo. Em um dos painéis foi instalado o aspersor construído com um tubo de PVC de 25 mm de diâmetro com furos de 1 milímetro de diâmetro a cada 50 mm em toda a extensão do tubo. Na lateral do tubo de PVC foi instalado um tubo aço inox de 350 milímetros de comprimento para alojar o sensor de temperatura da água do aspersor. A Figura 19 e a Figura 20 mostram a bancada de testes e o aspersor respectivamente. Esse último com uma proteção térmica removível.



Figura 19: Bancada de testes.



Figura 20: Aspersor.

O aspersor foi alimentado com água que passava por uma válvula solenóide do tipo liga-desliga, um filtro de carvão ativado para eliminar o cloro e um medidor de fluxo modelo YF-B6. Esse medidor consiste em um tubo de latão com um rotor e um sensor hall que gera pulsos conforme a água passa pelo tubo. Um sistema microcontrolado foi construído para acionar a válvula solenóide até que fosse registrada uma contagem de 29 pulsos. Esse valor foi obtido de forma experimental, que é a quantidade de água suficiente para que escorra sobre toda a superfície do painel.

Para determinar a quantidade de água aspergida durante esses 29 pulsos, foram tomadas 12 amostras em horários aleatórios ao longo de dois dias e registrado o peso de cada amostra. O peso médio foi de 0,275 kg com desvio padrão de 0,01551 kg. Portanto para fins práticos foi considerado que cada dose corresponde a 0,275 L de água. A Figura 21 mostra a dispersão das amostras da quantidade de água aspergida.

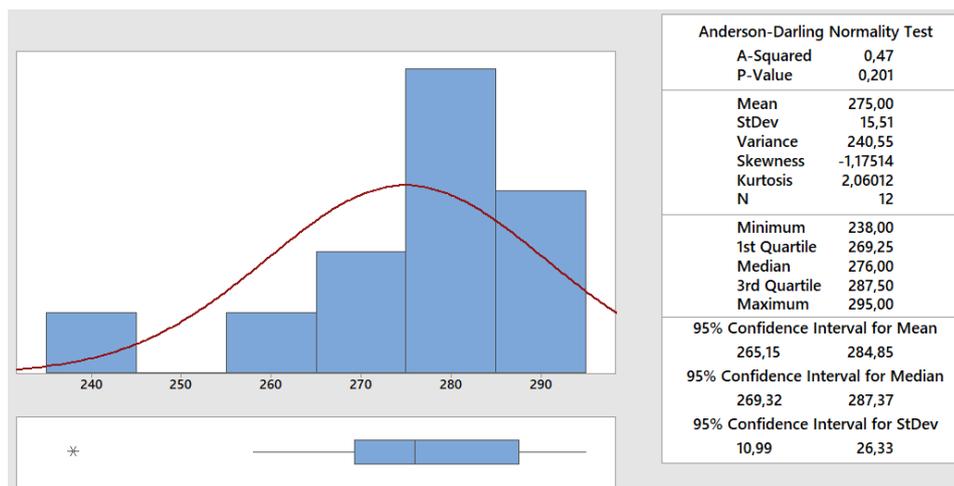


Figura 21: Amostras para determinar a média por aspersão.

3.4 Medição das temperaturas

Para a medição de temperaturas foram utilizados dois circuitos integrados LM35. O sensor em invólucro TO-220 foi empregado para monitorar a temperatura do painel fotovoltaico, enquanto o sensor em invólucro TO-92 foi destinado à medição da temperatura da água no interior do aspersor. Este último foi instalado dentro de um tubo alojado no próprio aspersor, ao passo que o primeiro foi fixado na parte traseira do painel, na região correspondente ao cruzamento entre o ponto médio da largura e o do comprimento do módulo fotovoltaico. As tensões de saída dos LM35, com sensibilidade de 10 mV/°C, foram conectadas a canais do sistema de aquisição PicoScope 4224, com resolução de 12 bits.

3.5 Ensaios

Inicialmente, os circuitos de medição de tensão e corrente de cada painel fotovoltaico foram conectados aos canais do sistema de aquisição de dados, sendo os painéis ligados a

cargas resistivas de $2,8 \Omega$. Antes da realização dos ensaios, ambos os painéis foram limpos com detergente e água. Cada teste teve duração de 20 minutos, durante os quais foram registradas, a cada segundo, as potências geradas por cada painel por meio do coletor de dados, bem como as temperaturas do painel fotovoltaico em teste e da água do aspersor, estas últimas medidas pelo PicoScope. Após os primeiros 60 segundos ($t = 60 \text{ s}$), foi aplicada ao painel em teste (denominado Painel 1 – P1) uma dose de aproximadamente 275 ml de água. O painel de referência (Painel 2 – P2) não foi alterado sendo coletados apenas os valores de potência a cada segundo. Também foi utilizada uma manta conhecida como “sombrite” para simular condições de baixa insolação. Para proporcionar diversas condições de temperatura alguns ensaios foram realizados sem a utilização de protetores térmicos nos tubos de alimentação da água do aspersor e no próprio aspersor. A Figura 22 apresenta as temperaturas medidas durante um ensaio. A curva 1 mostra a temperatura no painel e a curva 2 a temperatura da água dentro do aspersor. Cada ensaio foi registrado em um arquivo tipo separado por vírgulas contendo os valores de temperatura a cada segundo.

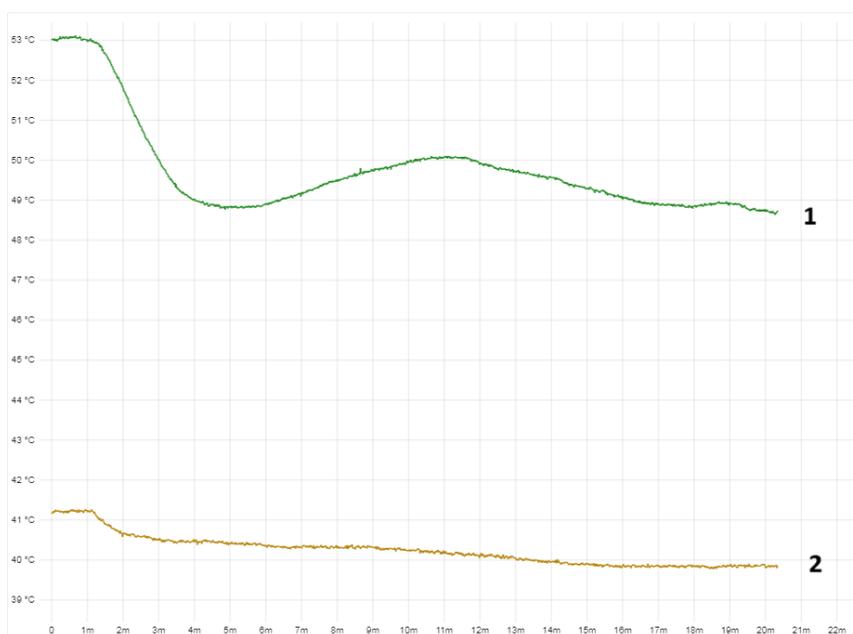


Figura 22: Temperatura do painel e da água durante um teste.

Embora os dois painéis sejam do mesmo modelo e fabricante, ao longo do dia observaram-se diferenças de potência já nos primeiros 60 segundos, antes da aplicação da água no painel em teste, mesmo sem a presença de sombras visíveis a olho nu. Essas discrepâncias podem estar relacionadas a efeitos de reflexões complexas da luz solar em paredes e objetos próximos, resultando em uma iluminação desigual entre os painéis. Para

corrigir essa diferença inicial, foi desenvolvido um software de normalização, que calcula a média de potência dos dois painéis nos primeiros 60 segundos e ajusta a curva do Painel 2, de forma a coincidir com a do Painel 1.

A Figura 23 mostra o resultado desta normalização. O software calcula também a diferença entre a área das duas curvas pelo método dos trapézios resultando na diferença de geração de energia entre os dois painéis em kWh.

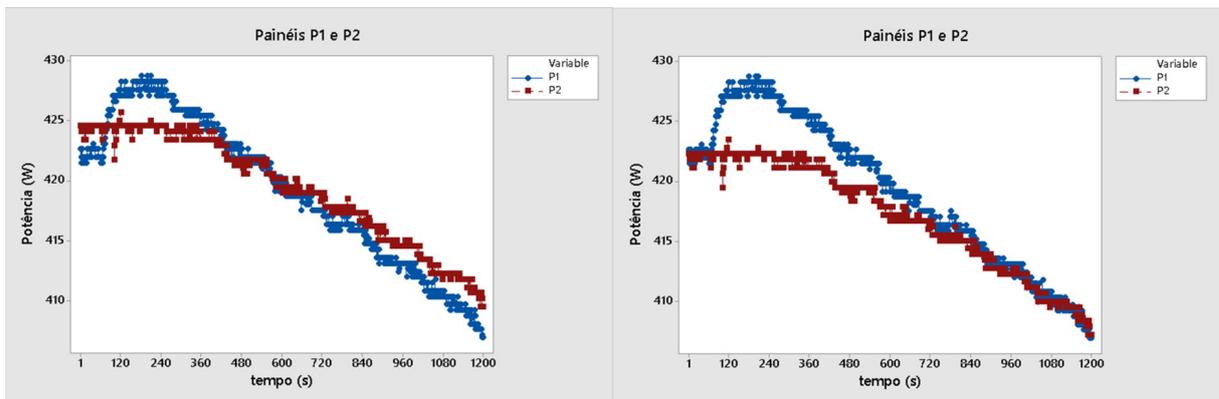


Figura 23: Normalização das curvas de potência.

Como variável dependente foi registrada a diferença da geração de energia gerada pelos dois painéis fotovoltaicos. Os resultados de cada ensaio foram tabelados como variáveis independentes: a potência instantânea do painel 1, temperatura do painel 1 e temperatura da água do aspersor. Uma quarta variável independente foi calculada como sendo a diferença entre as temperaturas citadas acima. A Tabela 1 resume os dados dos ensaios. Foram excluídos ensaios com ocorrência de nuvens.

Ensaio	Incremento na geração (Wh)	Potência Inicial (Wp)	T Painel (°C)	T água (°C)	T Painel (°C)-T água (°C)
114	0,2666	393,626	62,04	47,96	14,08
115	1,2253	421,613	59,61	42,83	16,78
116	0,9383	439,495	58,91	45,78	13,13
117	0,0169	214,216	52,08	43,39	8,69
118	0,7932	468,969	58,17	37,31	20,86
120	1,3651	458,933	60,47	44,84	15,63
121	0,8306	443,726	59,95	44,71	15,24
122	0,1391	153,346	64,76	38,9	25,86
123	0,0299	149,287	44,21	35,78	8,43
124	0,0251	148,067	48,01	37,54	10,47
125	1,1992	457,179	57,28	39,62	17,66
126	0,9947	433,594	59,27	45,81	13,46
127	0,3314	407,136	57,88	47,01	10,87
128	0,0562	153,768	54,77	46,75	8,02
129	-0,0149	154,783	53,01	41,22	11,79
130	0,6397	422,104	59,11	43,87	15,24
131	0,0083	152,085	58,36	43,38	14,98
132	0,0291	151,61	58,24	37,72	20,52
133	1,5775	461,102	51,8	37,58	14,22
134	0,5225	417,309	60,89	43,24	17,65

Tabela 1: Ensaios com aspersão de água

4 Resultados e discussões

4.1 Investigação sobre as variáveis de controle

Com base nos dados da Tabela 1 e com ajuda do software Minitab, foram gerados gráficos de dispersão de cada variável independente versus o incremento de energia em watt-hora devido à aspersão de água. Cada ponto do gráfico de dispersão representa um ensaio diferente. O coeficiente de correlação de Pearson foi calculado para investigar a proporcionalidade de cada par de variáveis. Um coeficiente próximo de 1 indica uma possível relação proporcional, enquanto que próximo de -1 indica uma possível relação inversamente proporcional. Já o coeficiente próximo a zero indica que a variável em questão não tem relação com o incremento de energia devido à aspersão de água. A Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27 mostram o gráfico de dispersão de cada variável independente versus o incremento de energia em watt-hora devido à aspersão de água. O título de cada gráfico traz consigo o valor do coeficiente de correlação representado por "r". É possível observar que menores valores de r apresentam pontos mais dispersos, enquanto maiores valores de r apresentam pontos mais agrupados indicando uma tendência de proporcionalidade.

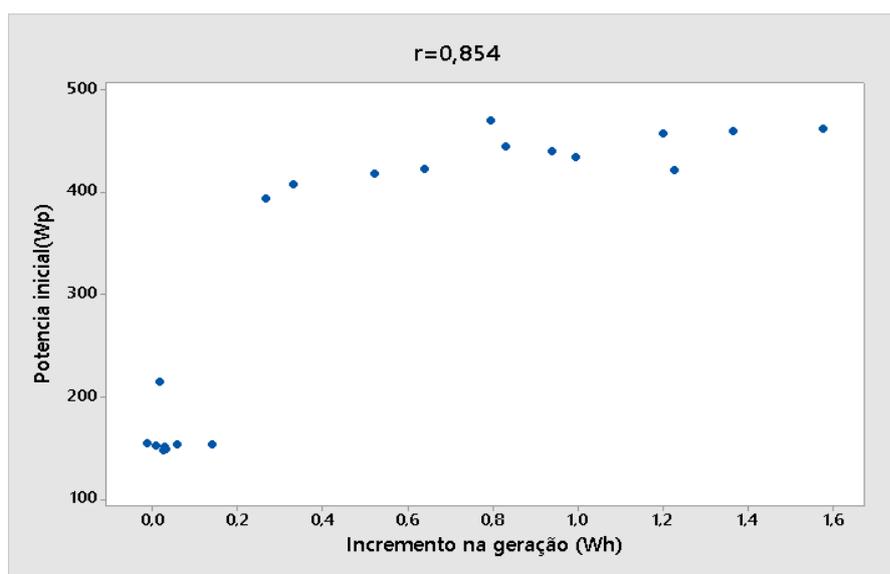


Figura 24: Gráfico de dispersão: da potência inicial pelo incremento na geração.

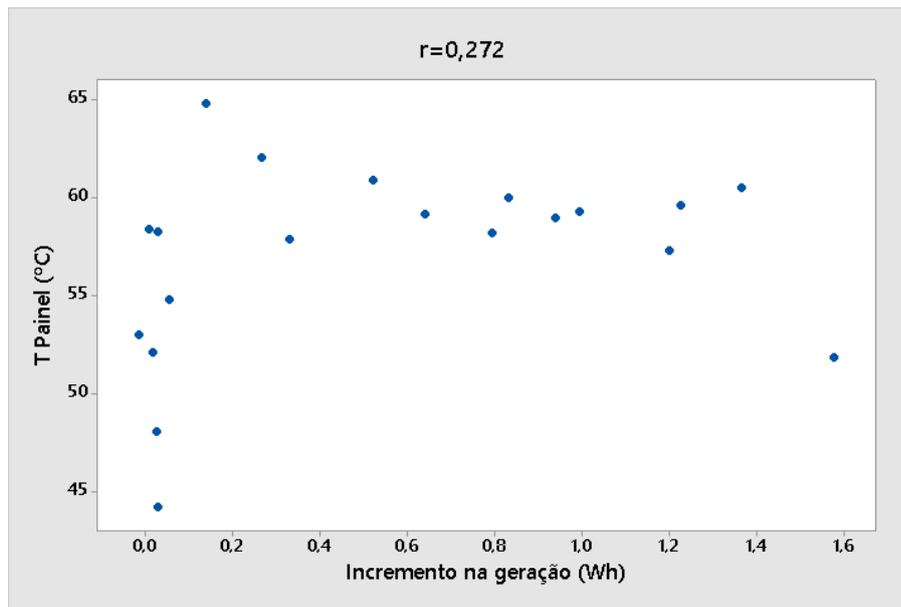


Figura 25: Gráfico de dispersão: da temperatura do painel pelo incremento na geração.

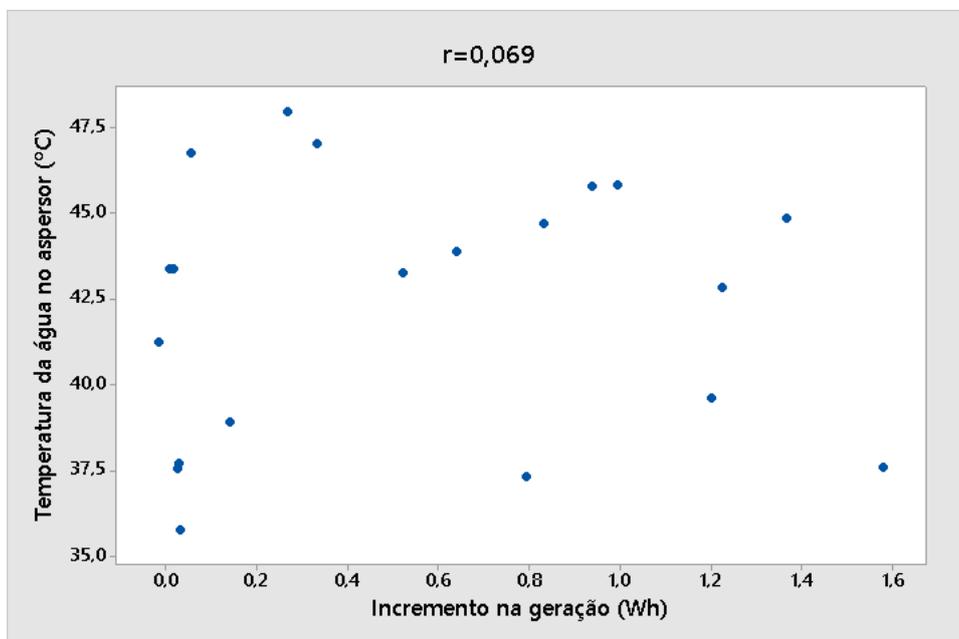


Figura 26: Gráfico de dispersão: da temperatura da água pelo incremento de energia.

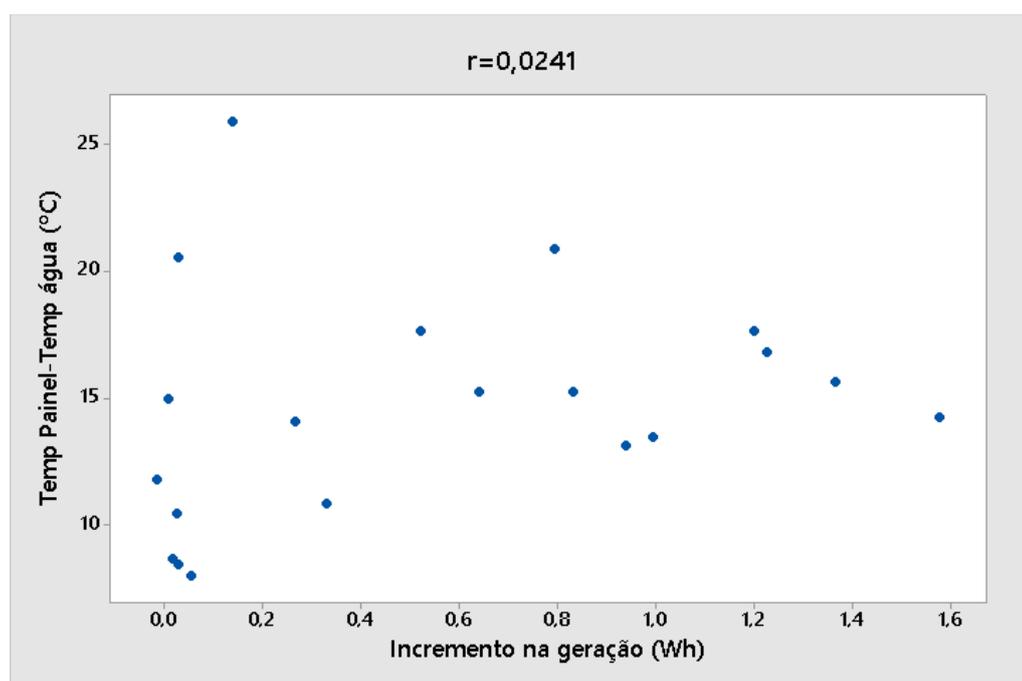


Figura 27: Gráfico de dispersão: diferença das temperaturas pelo incremento de energia.

Na faixa de temperatura estudada nenhuma variável apresentando essa grandeza apresentou um coeficiente de correlação expressivo. A variável “potência inicial” apresentou o maior coeficiente de correlação com o incremento de energia resultante da aplicação de água no painel. O gráfico que relaciona essas duas variáveis foi utilizado para determinar o ponto de equilíbrio, ou seja, a potência mínima instantânea do painel fotovoltaico a partir da qual um sistema automático poderia ser acionado de modo a garantir um ganho monetário.

4.2 Cálculo do custo da dose de água

Foram considerados dois cenários com relação à disponibilidade de água em uma usina fotovoltaica. O que existe água fornecida pela rede de abastecimento e o que a água é proveniente de um poço artesiano, lago ou rio e precisa ser bombeada para uma caixa d’água acima da superfície para que possa ser utilizada.

4.2.1 Custo da água proveniente da rede de abastecimento

Nesse cenário é preciso estimar o consumo mensal de água para determinar qual faixa de consumo se encontra no quadro de tarifas. Foi estimado que cada painel de uma usina com 400 painéis fotovoltaicos receberia 20 doses diárias. Como cada dose tem 0,275 L, o consumo de água calculado para essa usina é de 68,2 m³ mensais. A Tabela 2 mostra as tarifas da Companhia de Saneamento básico de Minas Gerais (Copasa) para as diversas categorias de consumidores [20].

Por se tratar de um assinante do tipo comercial ou industrial (que possuem os mesmos valores de tarifas), e sem uso da coleta de esgoto, o custo do metro cúbico para uma faixa de consumo de 40 a 200 metros cúbicos é de R\$14,664. Portanto cada dose de água custa R\$0,004032.

Categorias	Faixas	Água	Esgoto	Unidade
Residencial Social	Fixa	9,54	7,06	R\$/mês
	0 a 5 m ³	1,09	0,82	R\$/m ³
	> 5 a 10 m ³	2,342	1,734	R\$/m ³
	> 10 a 15 m ³	3,629	2,686	R\$/m ³
	> 15 a 20 m ³	4,956	3,668	R\$/m ³
	> 20 a 40 m ³	12,607	9,329	R\$/m ³
	> 40 m ³	15,381	11,380	R\$/m ³
Residencial	Fixa	21,23	15,70	R\$/mês
	0 a 5 m ³	2,20	1,63	R\$/m ³
	> 5 a 10 m ³	4,685	3,467	R\$/m ³
	> 10 a 15 m ³	7,260	5,372	R\$/m ³
	> 15 a 20 m ³	9,911	7,334	R\$/m ³
	> 20 a 40 m ³	12,607	9,329	R\$/m ³
	> 40 m ³	15,381	11,380	R\$/m ³
Comercial	Fixa	34,39	25,45	R\$/mês
	0 a 5 m ³	4,76	3,52	R\$/m ³
	> 5 a 10 m ³	7,139	5,283	R\$/m ³
	> 10 a 20 m ³	9,603	7,106	R\$/m ³
	> 20 a 40 m ³	12,098	8,953	R\$/m ³
	> 40 a 200 m ³	14,664	10,850	R\$/m ³
	> 200 m ³	17,245	12,761	R\$/m ³

Tabela 2: Custo da água tratada

4.2.2 Custo da água proveniente de bombeamento por equacionamento

Como a profundidade de um poço pode variar bastante de região para região foi arbitrado um valor de 20 metros como sendo a altura manométrica, ou seja, a distância em metros de onde encontra-se a bomba submersa no poço até a caixa d'água a 3 metros da superfície (onde fluiria por gravidade até os aspersores de água). Segundo Oliveira et, al. [21], o primeiro passo para se determinar o consumo de uma bomba é realização do cálculo da vazão de água necessária. Esse cálculo é realizado utilizando a Equação 9.

$$Q = \frac{V}{h} \quad (9)$$

onde,

Q=Vazão em m³/h

V=volume de água em m³

h=tempo para bombear

Como estipulado no item anterior, o volume diário utilizado em uma usina de 400 painéis fotovoltaicos é de 2,2 m³ por dia. Nesta condição a água é bombeada durante as horas de geração de energia, ou seja, por 8 horas o que dá uma vazão de 0,275 m³/h.

O segundo passo é calcular a potência elétrica necessária conforme a Equação 10.

$$P_{kW} = \frac{Q \cdot H_{man}}{367 \cdot \eta_b} \quad (10)$$

onde,

Q=vazão da bomba em m³/h

H_{man}=altura manométrica em mca

η_b=rendimento da bomba

Estimando uma eficiência de 50% temos uma potência necessária de 29,97 W. Como a bomba deve funcionar 8 horas por dia teria um consumo de 0,239 kWh. Atualmente uma

usina vende a energia gerada por aproximadamente R\$0,58 por kWh. A energia para funcionamento da bomba deve ser descontada da energia vendida. O valor gasto diariamente no bombeamento de água é de R\$0,13862 o que resulta em um custo de R\$0,00006300909 por litro ou R\$0,0000173275 por dose de água.

4.2.3 Custo da água proveniente de bombeamento pelo gráfico da bomba

Uma segunda alternativa para calcular a anergia necessária para o bombeamento é através do gráfico de uma bomba escolhida para essa função. Analisando os dados técnicos da bomba Ebara modelo 2,5BPS2/11, tem-se o gráfico de vazão por altura manométrica conforme a Figura 28 [22].

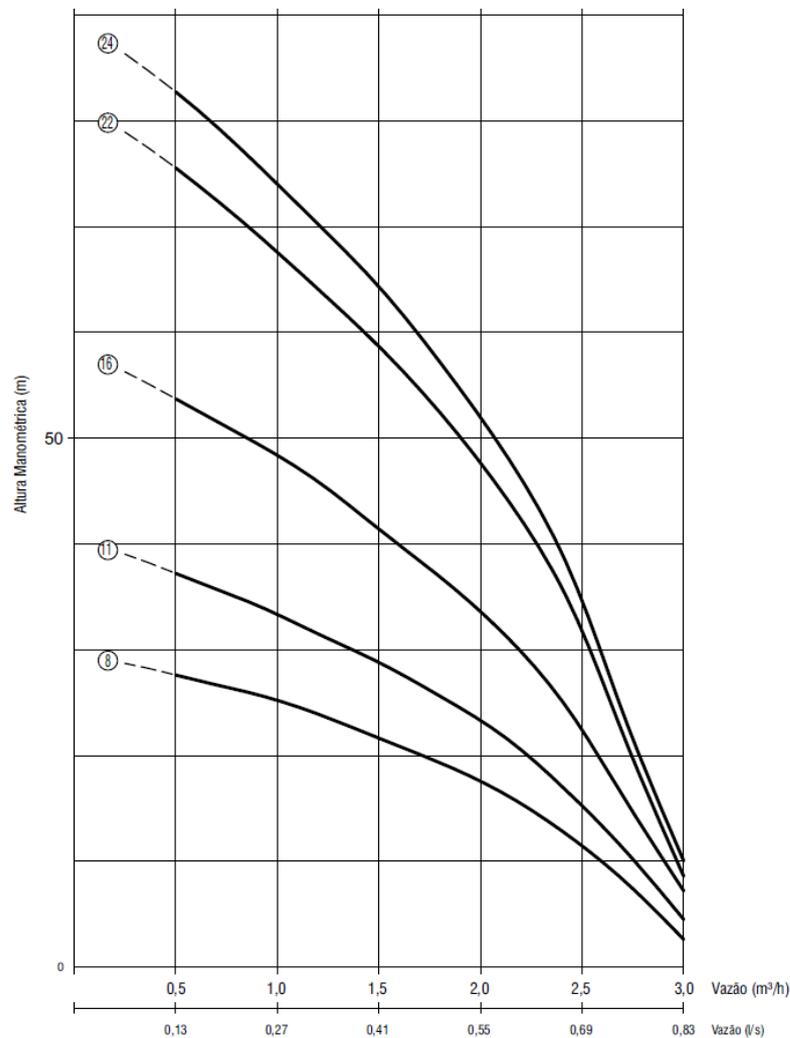


Figura 28: Gráfico de desempenho da bomba.

A uma altura manométrica de 20 m, a bomba escolhida, indicada pela curva 11 do

gráfico apresenta uma vazão de aproximadamente 2,2 m³/h. Como a potência dessa bomba é de 250 W, o consumo para bombear a água nessas condições é de 0,25 kWh. Proporcionalmente, o consumo para bombear a quantidade de uma dose, ou seja, 0,275 L é de 0,00003125 kWh.

O custo para o bombeamento de cada dose de água baseado no gráfico da bomba é de R\$0,000018125 que se aproxima muito do valor anteriormente calculado.

4.3 Determinação do ponto de equilíbrio

Para determinar o ponto de equilíbrio, o eixo x do gráfico da Figura 24 que representa o ganho de geração de energia do painel fotovoltaico ao receber a dose de água foi substituído pelo valor monetário equivalente, ou seja, R\$0,58 por kWh. Com ajuda do software Minitab foi gerada a equação que descreve o comportamento das duas variáveis através de uma regressão polinomial. Foi realizada uma regressão polinomial quadrática e uma regressão polinomial cúbica. Para escolha de qual equação melhor se adequa aos pontos, o software fornece o parâmetro R-sq. Quanto maior esse valor mais ajustados os pontos estão ao modelo, ou seja, à equação gerada a partir dos mesmos. Para a regressão quadrática o valor de R-sq foi de 89,91% enquanto que na regressão cúbica o valor de R-sq foi de 93,5%. A Figura 29 e Figura 30 mostram respectivamente os gráficos com a regressão quadrática e cúbica. No título de cada gráfico se encontra a equação que deu origem à curva em vermelho, que é a que mais se aproxima dos pontos azuis.

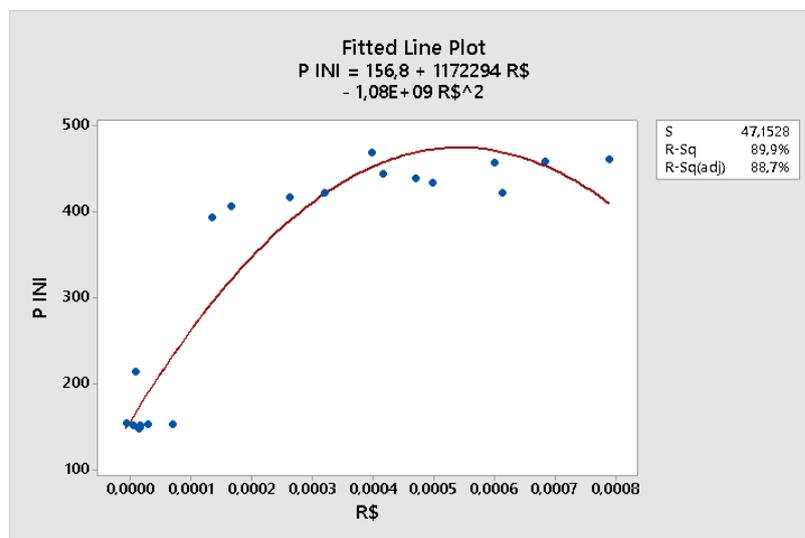


Figura 29: Regressão quadrática.

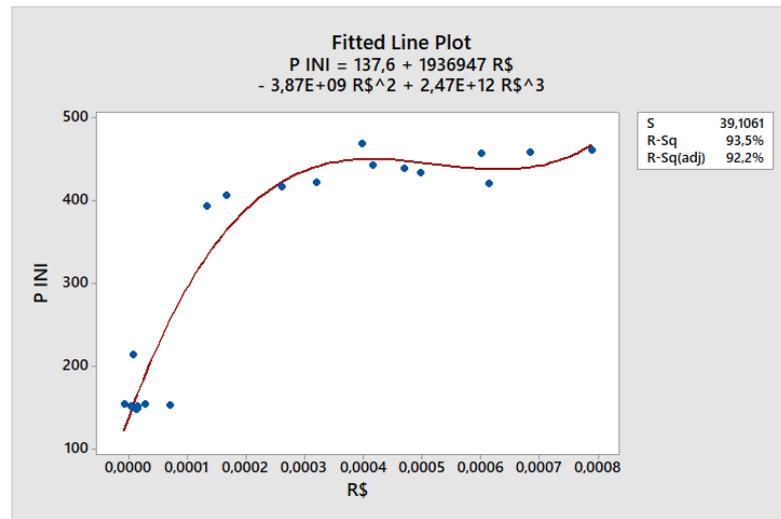


Figura 30: Regressão cúbica.

Foi escolhida a regressão cúbica (maior valor de R-sq) obtendo-se a seguinte equação:

$$P_{ini}(x) = 137,6 + 1936947 \cdot x - 3,87 \cdot 10^9 \cdot x^2 + 2,47 \cdot 10^{12} \cdot x^3 \quad (11)$$

Considerando que o custo da água por bombeamento é de R\$ 0,000018125 por dose, ao inserir esse valor na Equação 11 obteve-se o resultado de 171,40 W, que corresponde ao ponto de equilíbrio. Quando a potência do painel estiver acima desse valor, a aspersão de água proporcionará um ganho monetário superior ao custo de cada dose.

5 Conclusão

De acordo com a literatura científica, a aspersão de água sobre a superfície de um painel fotovoltaico provoca um aumento da potência instantânea em razão da redução da temperatura das células. Com a diminuição da temperatura, o aumento da tensão é maior que a diminuição da corrente, resultando em uma potência superior àquela obtida com o painel em maior temperatura.

Este incremento de potência foi observado durante os ensaios. Foi observado que ministrando doses de água quando o painel fotovoltaico se encontra com potência instantânea mais próxima de sua potência nominal resulta em maiores ganhos monetários. Essa proporcionalidade foi constatada através do coeficiente de correlação de 0,854. Na faixa de temperatura da água do aspersor e da temperatura do painel fotovoltaico, o coeficiente de correlação de Pearson não apresentou um valor significativo.

Ao se analisar o custo da dose de água com os incrementos monetários obtidos, foi constatado que com base nos valores vigentes do custo da água da Companhia de Saneamento de Minas Gerais e do valor recebido por cada kWh gerado de uma usina fotovoltaica não há um ganho monetário ao aspergir água sobre um painel fotovoltaico utilizando-se esta técnica. Nesse caso o custo da água foi aproximadamente cinco vezes maior que o ganho monetário obtido pelo incremento de geração de energia no melhor ensaio. Por outro lado, através do uso da água de um sistema de bombeamento utilizando energia da própria usina fotovoltaica, um ganho monetário foi obtido. Considerando o ensaio 133 da Tabela 1, onde o incremento na geração de energia foi de 1,5775 Wh, o ganho monetário foi 43 vezes maior que o custo de uma dose de água. Considerando o mesmo ensaio, porém usando a água da rede de abastecimento, o custo da dose de água é 4,4 vezes maior que o ganho monetário obtido. Foi determinado para o painel fotovoltaico testado, modelo SS-550-72MDH de 550 W da Sunova Solar, que o ponto de equilíbrio é de 171,40 W usando a água proveniente de um sistema de bombeamento. A aspersão de uma dose de água quando o painel está fornecendo energia acima dessa potência instantânea resultará em um ganho monetário. Ao se tentar encontrar o ponto de equilíbrio usando a água proveniente da rede de abastecimento, foi encontrado o valor de 106.937W. Valor bem além da capacidade máxima do painel, provando a inviabilidade do uso desse tipo de água.

Como sugestão, um trabalho futuro poderia realizar testes de longo prazo usando uma estratégia de controle com base na potência instantânea do painel de modo a contabilizar o a limpeza do painel. A contabilização deste fator pode trazer resultados positivos que se somam aos que foram apresentados, visto que a sujidade é um dos fatores que degradam a capacidade de geração de energia elétrica em painéis fotovoltaicos.

Outra sugestão é a investigação da correlação entre o número de doses consecutivas e o ganho monetário, encontrando talvez um ponto de equilíbrio.

6 Referências

- [1] Böing, G. C., & Koch, S. (2025). “A contribuição das energias renováveis par o futuro sustentável”, *Revista Ilustração*, 6(2), 89–96. <https://doi.org/10.46550/ilustracao.v6i2.461>
- [2] Mauricio Junior, R. D., Botelho, J. P. M., Botelho, M. M., Pakes, P. R., & Martins, T. M. (2025). O mercado de energia solar no Brasil: uma análise dos desafios e oportunidades do setor. *Revista De Gestão E Secretariado*, 16(3), e4768. <https://doi.org/10.7769/gesec.v16i3.4768>
- [3] Agência Gov, "Geração de energia solar alcança dois novos recordes no mês de junho" Conteúdo disponível em < <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/geracao-de-energia-solar-alcanca-dois-novos-recordes-no-mes-de-junho>>. Acesso em 29 Abr. de 2025.
- [4] J. Fiorentino, O. Seraphim, “Análise da eficiência de módulos fotovoltaicos instalados em condições normais de operação,” *Energ. Agric., Botucatu*, v. 20, n.3, pp. 89-112, 2005.
- [5] Sunova Solar, "Módulo mono de meia célula de alta eficiência N-type" Datasheet disponível em <[https://www.sunova-solar.com/attached/file/pt/datasheet/M-Series/Tangra%20M%20\(580-600\)-72MDH_PT_V20241227.pdf](https://www.sunova-solar.com/attached/file/pt/datasheet/M-Series/Tangra%20M%20(580-600)-72MDH_PT_V20241227.pdf)> Acesso em 29 Abr. de 2025.
- [6] D. Araújo Norberto, P. César Marques de Carvalho, I. Montero Dupont, “Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos,” *Rev. Tecnol. Fortaleza*, v. 40, n. 2, 2019.
- [7] F. T. Fernandes "Aumento da eficiência de painéis fotovoltaicos com esfriamento por energia geotérmica e aquecimento de água," dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2014.
- [8] F. Jurinic, “Estudo para melhoria na performance e eficiência de placas fotovoltaicas através de um sistema combinado de inclinação e resfriamento,” dissertação de mestrado, Universidade Federal Fronteira Sul, SC, 2020.

- [9] L. Dorobantu, O. Mihai Popescu. "Increasing the efficiency of photovoltaic panels through cooling water film," *UPB Sci. Bull. Series C* v. 75, n. 4, pp. 223-232, 2013.
- [10] S. Nizetic, D. Coko, A. Yadav, F. Grubisic Cabo "Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response," *Energy Conversion and Management*, v. 108, pp. 287-296, 2016.
- [11] A. Elnozahy, A. K. Abdel Rahman A. Hamza H. Ali, M. Abdel Salam S. Ookawara" Performance of a PV module integrated with standalone building in hot arid areas as enhanced by surface cooling and cleaning" *Energy and Buildings*, v. 88, pp. 100-109, 2015.
- [12] Reliable raw material – strengthening the back bone of PV module! disponível em <<https://waaree.com/blog/reliable-raw-material-strengthening-the-back-bone-of-pv-module/>>, Acesso em 22 de Agosto de 2025.
- [13] Huot, Mardy, Kumar, Laveet, Selvaraj, Jeyraj, Hasanuzzaman, Md, Rahim, Nasrudin Abd "Performance Investigation of Tempered Glass-Based Monocrystalline and Polycrystalline Solar Photovoltaic Panels, *International Journal of Photoenergy*," 2021, 2335805, 8 pages, 2021.
- [14] F. R. Coelho "Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos," dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2008.
- [15] M. H. WANG and M. J. CHEN, "Two-Stage Fault Diagnosis Method Based on the Extension Theory for PV Power Systems. *International Journal of Photoenergy*," v. 2012, n. 1, p. 892690, 2012.
- [16] SHUKLA, A. et al. "Monitoring of single-phase induction motor through IoT using esp32 module." *Journal of Sensors*, Hoboken, v. 2022, n. 1, p. 8933442, 2022.

- [17] Analog Devices, “AN-1264: Precision Signal Conditioning for High Resolution Industrial Applications”, disponível em <https://www.analog.com/en/resources/app-notes/an-1264.html>> Acesso em 25/8/2025.
- [18] M. Palmal, P. Roja and V. John, "Revisiting Numerical Integration Methods for Digital Implementation in Power Electronics Applications," 2023 11th National Power Electronics Conference (NPEC), Guwahati, India, 2023, pp. 1-6.
- [19] Montgomery, D.C. and Runger, G.C., *Applied Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley & Sons, Inc. 6^a ed, 2013.
- [20] COPASA, “RESOLUÇÃO ARSAE-MG N° 185, DE 28 DE NOVEMBRO DE 2023” Documento disponível em <https://copasaportalprd.azurewebsites.net/Copasa.Portal/Services/TariffEvolution>> Acesso em 25/8/2025.
- [21] D. Oliveira, M. C. Ribeiro, E. C. Mantovani, A .A. Soares, H. C. Fernandes, "Dimensionamento de motores para o bombeamento de água," *Engenharia Agrícola*, v. 30, pp. 1012-1022, 2010.
- [22] EBARA, “Catálogo de seleção de curvas e cabos”, Disponível em <https://ebaracom.br/detalhes/25bps>>, Acesso em 25/8/2025.