

## **Comparação do impacto da temperatura no desempenho de módulos fotovoltaicos estáticos e com sistemas de rastreamento solar (L-O, L-O + N-S)**

**Comparison of the impact of temperature on the performance of static photovoltaic modules and with solar tracking systems (L-O, L-O + N-S)**

**Comparación del impacto de la temperatura en el rendimiento de módulos fotovoltaicos estáticos y con sistemas de seguimiento solar (L-O, L-O + N-S)**

Recebido: 21/02/2022 | Revisado: 02/03/2022 | Aceito: 06/03/2022 | Publicado: 13/03/2022

### **Gilson Debastiani**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3429-4257>  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil  
E-mail: [gilsondebastiani2013@gmail.com](mailto:gilsondebastiani2013@gmail.com)

### **Carlos Eduardo Camargo Nogueira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3886-9118>  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil  
E-mail: [cecn1@yahoo.com.br](mailto:cecn1@yahoo.com.br)

### **Jeferson Manenti Acorci**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1153-5855>  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil  
E-mail: [jefe84@gmail.com](mailto:jefe84@gmail.com)

### **Jair Antonio Cruz Siqueira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8140-444X>  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brazil  
E-mail: [jair.siqueira@unioeste.br](mailto:jair.siqueira@unioeste.br)

### **Vander Fabio Silveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5725-0591>  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brazil  
E-mail: [vfabios@hotmail.com](mailto:vfabios@hotmail.com)

### **Samuel Nelson Melegari de Souza**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-902X>  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil  
E-mail: [samuel.souza@unioeste.br](mailto:samuel.souza@unioeste.br)

### **Resumo**

A participação da energia fotovoltaica aumentou a relevância no cenário mundial. Este estudo objetivou avaliar se o rastreamento solar em sistemas fotovoltaicos, além de afetar positivamente a geração de energia, também impacta a irradiância solar, temperatura e eficiência, comparando-os a um sistema estático. Foram instalados três módulos fotovoltaicos em Cascavel-PR, simulando os arranjos avaliados; um sistema robusto para coletar dados meteorológicos, térmicos e elétricos por 365 dias. Os dados foram tabulados com médias horárias e mensais, por faixa térmica, densidade de ocorrência e irradiância. Foi utilizado a Análise de Variância objetivando-se comparar a igualdade entre as médias. Então, aplicado o Teste de Tukey. Como principal resultado, destaca-se, nos arranjos rastreáveis, a menor temperatura máxima, ocorrência das maiores eficiências e maior produção de energia. A eficiência final dos arranjos, por faixa de irradiância, apresentaram valores estatisticamente diferentes, registrando 7,27% para o Arranjo 1; 10,38% para o Arranjo 2 e 12,73% para o Arranjo 3. O acréscimo de produção, em comparação ao Arranjo 1, foi de 20,1% (Arranjo 2) e 37,2% (Arranjo 3). As correlações entre a irradiância, temperatura do módulo e produção de energia mostraram-se similares, demonstrando que o aumento da irradiância ocasionou maior temperatura do módulo e maior produção de energia, mesmo com redução na eficiência.

**Palavras-chave:** Rastreamento solar; Impacto térmico; Eficiência.

### **Abstract**

The participation of photovoltaic energy has increased its relevance on the world stage. This study aimed to evaluate whether solar tracking in photovoltaic systems, in addition to positively affecting energy generation, also impacts solar irradiance, temperature and efficiency, comparing them to a static system. Three photovoltaic modules were installed in Cascavel-PR, simulating the evaluated arrangements; a robust system to collect meteorological, thermal and electrical data for 365 days. Data were tabulated with hourly and monthly averages, by thermal range, occurrence density and irradiance. Analysis of Variance was used in order to compare the equality between the means. Then, applied the Tukey Test. As a main result, the lowest maximum temperature, the occurrence of the highest efficiencies and the highest

energy production, stands out in the traceable arrangements. The final efficiency of the arrays, by range of irradiance, presented statistically different values, registering 7.27% for Arrangement 1; 10.38% for Arrangement 2 and 12.73% for Arrangement 3. The increase in production, compared to Arrangement 1, was 20.1% (Arrangement 2) and 37.2% (Arrangement 3). The correlations between irradiance, module temperature and energy production were similar, showing that the increase in irradiance caused higher module temperature and greater energy production, even with a reduction in efficiency.

**Keywords:** Solar tracking; Thermal impact; Efficiency.

### Resumen

La participación de la energía fotovoltaica ha aumentado su relevancia en el escenario mundial. Este estudio tuvo como objetivo evaluar si el seguimiento solar en sistemas fotovoltaicos, además de afectar positivamente la generación de energía, también impacta en la radiación solar, la temperatura y la eficiencia, comparándolos con un sistema estático. Se instalaron tres módulos fotovoltaicos en Cascavel-PR, simulando los arreglos evaluados; un sistema robusto para recopilar datos meteorológicos, térmicos y eléctricos durante 365 días. Los datos fueron tabulados con promedios horarios y mensuales, por rango térmico, densidad de ocurrencia e irradiancia. Se utilizó el Análisis de Varianza para comparar la igualdad entre las medias. Luego, se aplicó la Prueba de Tukey. Como resultado principal, se destaca en los arreglos trazables la temperatura máxima más baja, la ocurrencia de las eficiencias más altas y la producción de energía más alta. La eficiencia final de los arreglos, por rango de irradiancia, presentó valores estadísticamente diferentes, registrando 7,27% para el Arreglo 1; 10,38% para el Arreglo 2 y 12,73% para el Arreglo 3. El incremento en la producción, con respecto al Arreglo 1, fue de 20,1% (Arreglo 2) y 37,2% (Arreglo 3). Las correlaciones entre la irradiancia, la temperatura del módulo y la producción de energía fueron similares, mostrando que el aumento de la irradiancia provocó una mayor temperatura del módulo y una mayor producción de energía, incluso con una reducción de la eficiencia.

**Palabras clave:** Seguimiento solar; Impacto térmico; Eficiencia.

## 1. Introdução

A energia solar passou a ter uma participação mais ampla na matriz de energia elétrica mundial a partir do final do século XX e na primeira década do século XXI, quando os processos de conversão para energia solar tornaram-se viáveis economicamente e mais eficientes (Nobre *et al.*, 2019). Na última década, principalmente em função da queda aproximada de 75% no preço dos sistemas fotovoltaicos, o mercado da energia fotovoltaica apresentou elevada taxa de crescimento mundial (Lopes, 2016).

A radiação solar desempenha um papel decisivo em diferentes processos encontrados nas energias renováveis, hidrologia, bem como na arquitetura e engenharia. É a fonte mais importante de energia renovável, atuando como um modulador crucial do sistema climático (Almorox *et al.*, 2020).

O recurso solar possui diversas formas de aproveitamento, seja como fonte de calor, como fonte de luz ou como fonte para produção de energia elétrica (Torres, 2012). O aproveitamento passivo da energia solar nas edificações permite maior eficiência energética, uma vez que reduz os gastos com aquecimento ou climatização, disponibilizando o conforto térmico desejado aos usuários (Sousa, 2018).

Em sua forma ativa, diferentes tecnologias permitem o aproveitamento da radiação solar, quer seja na forma de calor ou de eletricidade (Rebollar & Rodrigues, 2011). A utilização direta da luz solar possui imenso potencial para produção de eletricidade através da tecnologia fotovoltaica e representa uma alternativa viável e sustentável, técnica e financeiramente, para propor soluções às demandas energéticas (Tavares, 2020).

Uma barreira que a energia fotovoltaica precisa romper, visando aumentar ainda mais a sua participação nos sistemas de distribuição, consiste em prever o comportamento estocástico e flutuante da irradiação solar no tempo, devido ao padrão climático irregular. A precisão da previsão da incidência solar permite que o operador do sistema elétrico planeje a inserção de outras fontes de base, para compensar as flutuações na potência de saída dos sistemas fotovoltaicos, sem comprometer a qualidade da energia (Paulescu & Paulescu, 2019).

Recentemente, várias pesquisas foram conduzidas visando aprofundar o conhecimento do funcionamento e desempenho dos módulos fotovoltaicos em campo. Estas, tem permitido um melhor entendimento sobre os impactos que os fatores ambientais

promovem na geração elétrica de sistemas fotovoltaicos. Dentre os fatores que mais afetam o desempenho de um módulo fotovoltaico, destacam-se a irradiância, a temperatura, o ângulo de incidência e o espectro solar (Neves, 2016; Souza *et al.*, 2016).

A variação das condições ambientais a que os módulos são expostos ao ar livre tem afetado significativamente o desempenho e a operação de sistemas fotovoltaicos (Kumar & Kumar, 2017). Apenas uma pequena parcela da irradiância solar (menos de 20%) é convertida pela célula FV em energia elétrica. O restante, é convertido em calor, que promove o superaquecimento do módulo e afeta muito a eficiência do sistema, bem como a produção de energia (Fouada *et al.*, 2017). Quando a temperatura aumenta, o intervalo de banda do semicondutor encolhe, e a tensão de circuito aberto,  $V_{oc}$ , diminui conforme a dependência da temperatura de tensão da junção p – n observada no fator de diodo  $q/kT$  (Berwanger, 2019).

Várias etapas de conversão fotovoltaica são influenciadas pela temperatura elevada. Todavia, o mais prejudicial para o desempenho do módulo fotovoltaico é a redução da população de portadores foto gerados do absorvedor de seu máximo teórico em circuito aberto, resultando em significativa perda de tensão. O stress térmico também pode induzir mecanismos de degradação secundária, podendo levar a falhas de segurança, como arcos ou curtos no laminado do módulo ou na caixa de junção, além de reduzir a produção de energia (Bryan *et al.*, 2021).

A temperatura de uma célula fotovoltaica não apresenta relevante interferência na corrente elétrica produzida pelo painel, que é diretamente proporcional à incidência da irradiância solar. Contudo, o aumento da temperatura contribui para uma significativa redução na tensão de saída, afetando diretamente a energia total produzida (Ruviano *et al.*, 2018). A queda de eficiência do módulo, em função de ser extremamente sensível aos incrementos de temperatura, proporciona perdas de 0,25%/°C a 0,5%/°C (Benato & Stoppato, 2019).

Após o módulo atingir a temperatura de 34°C, mesmo com o aumento da irradiância solar, ocorre uma redução nos valores de tensão de circuito aberto, o que impacta diretamente na sua eficiência (Souza & Aristone, 2018).

O impacto da temperatura na operação de sistemas fotovoltaicos é distinto entre as regiões brasileiras, podendo ocasionar uma queda de eficiência elétrica de uma usina fotovoltaica de até 15%, apenas por influência térmica. Desta forma, apenas com a avaliação desta variável, regiões com menores índices de irradiância solar, mas com temperaturas mais amenas, podem apresentar maior produção efetiva de energia elétrica (Simioni, 2017).

Outro fator que afeta significativamente a produção de energia fotovoltaica consiste em aumentar a incidência dos raios solares, de forma perpendicular aos módulos. A utilização de rastreador solar permite maior período e disponibilidade de irradiância solar sobre a superfície do módulo, maximizando a produção (Hafeza *et al.*, 2018).

Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar se sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar, além de afetar positivamente a geração de energia, também impactam nas variáveis da irradiância solar e térmica de forma diferente em cada sistema, ocasionando alterações na eficiência dos mesmos.

## 2. Metodologia

Diversos estudos foram conduzidos visando avaliar o aumento de eficiência de um sistema com rastreamento solar, de um e dois eixos, comparando-os a sistemas estáticos, bem como os impactos térmicos que afetam a eficiência de sistemas fotovoltaicos. Esses estudos foram realizados em diversas latitudes e longitudes, bem como utilizando intervalos de tempo variados, considerando um único ciclo diário, poucos dias ou alguns meses (Bittencourt *et al.*, 2017; Fernandes, 2014; Oliveira, 2007; Berwanger, 2019; Carvalho, 2011; Frosi *et al.*, 2018; Meceneiro, 2018; Hoffmann *et al.*, 2018; Bona *et al.*, 2015; Passos *et al.*, 2017; Martins, 2016; Lopes, 2016; Konneh *et al.*, 2021; Assaf, 2014; Lo *et al.*, 2015; Garcia *et al.*, 2015). Contudo, a presente pesquisa norteou-se na metodologia científica desenvolvida por Severino (2018).

O presente experimento foi instalado sobre o telhado de uma garagem, na Cidade de Cascavel, Paraná. A localização geográfica local é definida pelas coordenadas 24° 57' 56" (S) e 53° 26' 37" (W). O telhado encontra-se voltado a 35° NNE, possui inclinação de 10° em relação ao plano horizontal.

Foram instalados três módulos fotovoltaicos idênticos, da marca Canadian Solar (modelo 330P CS6U). Na Figura 1 encontra-se representado o módulo fotovoltaico estático, denominada Arranjo 1, voltado para o norte verdadeiro, com inclinação Norte/Sul de 21° em relação ao plano horizontal.

**Figura 1:** Arranjo 1.



Fonte: Autores.

O módulo fotovoltaico móvel, com seguidor solar em um único eixo rotativo, sobre o eixo Leste-Oeste (L-O), denominado Arranjo 2, foi instalado em estrutura tipo pedestal, com rastreador ativo microcontrolado. Está voltado para o norte verdadeiro e possui inclinação Norte/Sul de 21° em relação ao plano horizontal, encontrando-se representado na Figura 2.

**Figura 2:** Arranjo 2.



Fonte: Autores.



Já na Figura 3, que representa o Arranjo 3, encontra-se o módulo fotovoltaico móvel, com seguidor solar em dois eixos rotativos Leste-Oeste e Norte-Sul (L-O + N-S). Está instalado em estrutura tipo pedestal, com rastreador ativo microcontrolado, apresentando inclinação N-S variada conforme dia juliano pré-determinado e rotação diária sobre o eixo L-O. Também apresenta sua face voltada para o norte verdadeiro.

**Figura 3:** Arranjo 3.



Fonte: Autores.

Foi instalado um piranômetro segunda classe (modelo SR05-D2A2-BL – Hukseflux), em plano horizontal, bem como sensores de temperatura para ambiente (PT100 classe A) e para cada um dos módulos fotovoltaicos (PSB-4-A-5000).

Os Arranjos 2 e 3, que simulam os sistemas móveis, foram instalados sobre uma estrutura tipo pedestal. Cada movimento sobre os eixos (L-O / N-S) é proporcionado pela atuação de um motoredutor, que foi acoplado à estrutura, alimentados em 24 Vcc com energia armazenada num banco de baterias, de forma a permitir o posicionamento pré-definido.

Foi instalado um piranômetro segunda classe (modelo SR05-D2A2-BL – Hukseflux), em plano horizontal, bem como sensores de temperatura para ambiente (PT100 classe A) e para cada um dos módulos fotovoltaicos (PSB-4-A-5000).

Os Arranjos 2 e 3, que simulam os sistemas móveis, foram instalados sobre uma estrutura tipo pedestal. Cada movimento sobre os eixos (L-O / N-S) é proporcionado pela atuação de um motoredutor, que foi acoplado à estrutura, alimentados em 24 Vcc com energia armazenada num banco de baterias, de forma a permitir o posicionamento pré-definido.

No eixo de cada motoredutor (modelo MR 10.05.013.24V) foi instalado um mancal, modelo KFL004, com rolamento KFL 20mm CNC, visando minimizar os esforços mecânicos do módulo sobre o eixo do motoredutor. Este, foi introduzido em uma das extremidades de um fuso de 7/8", tipo rosca sem fim, com um metro de comprimento.

O fuso, por sua vez, passa por um sistema de acoplamento, com castanha fixa no pedestal, para elevação sazonal do módulo (Arranjo 3) e outro fuso, em castanha fixa na estrutura móvel do sistema, responsável pelo movimento diário (Arranjos 2 e 3).

O rastreamento solar diário, no eixo L-O, foi programado para proporcionar o posicionamento do módulo fotovoltaico em horários pré-estabelecidos. O sistema de rastreamento foi projetado para utilizar parte da energia gerada por cada um dos arranjos móveis, posicionando-os sempre de forma a otimizar a geração fotovoltaica, proporcionando a incidência perpendicular dos raios solares na superfície do módulo durante o maior período de tempo.

Para realizar a automação do rastreamento solar, nos Arranjos 2 e 3, e a medição dos dados elétricos de todos os protótipos, foi confeccionado um sistema dinâmico. Neste, as coletas elétricas foram realizadas simultaneamente, em intervalos pré-definidos, bem como os posicionados dos arranjos móveis ocorrem conforme horários e posições pré-programadas.

A corrente elétrica, gerada por cada um dos módulos, foi mensurada com a utilização do sensor ACS712-30A, no instante anterior ao seu consumo em resistências dissipativas. Essas grandezas, após serem medidas, foram registradas no datalogger, a cada minuto, no período compreendido entre as 6h e 20h, de 01 Fev 21 a 31 Jan 22.

A energia elétrica produzida foi definida com a aplicação das Leis de Ohm, através da soma horária do produto entre o quadrado da corrente elétrica, medida próxima ao resistor, e a sua respectiva resistência.

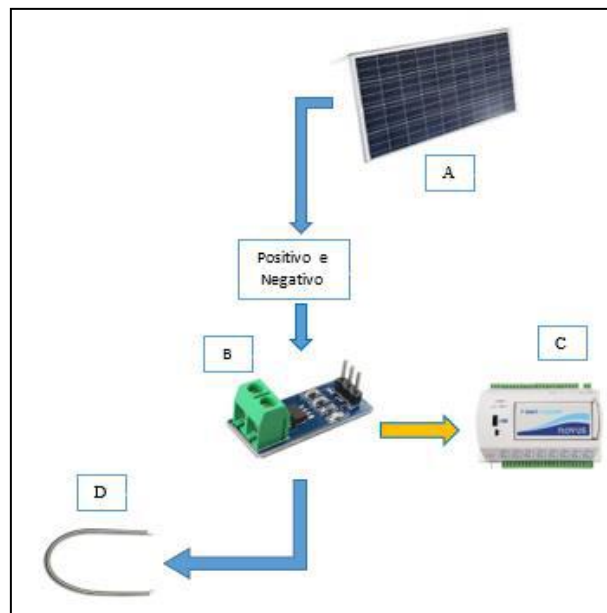
Foi instalado um módulo regulador de tensão (LM2596), responsável por receber a energia do banco de baterias e disponibilizar uma tensão de 5Vcc aos sensores, permitindo assim a alimentação das placas de controle.

Para comandar cada um dos sistemas, foi utilizado o Arduino® Nano, com acelerômetro (ADXL345) e um relógio com calendário (DS1307).

Para a correção da posição dos Arranjos 2 e 3, foi adicionado um módulo relê (5V – 10A), responsável por promover a interface de ligação dos sinais da placa Arduino® Nano com o acionamento do motoredutor de posicionamento.

Através da Figura 4, que apresenta um fluxograma com a configuração adotada para o Arranjo 1. Nela são ilustrados cada componente integrante do arranjo proposto.

**Figura 4:** Configuração do Arranjo 1.



Fonte: Autores.

A Tabela 1 apresenta os componentes e suas respectivas funções, que integram o Arranjo 1.

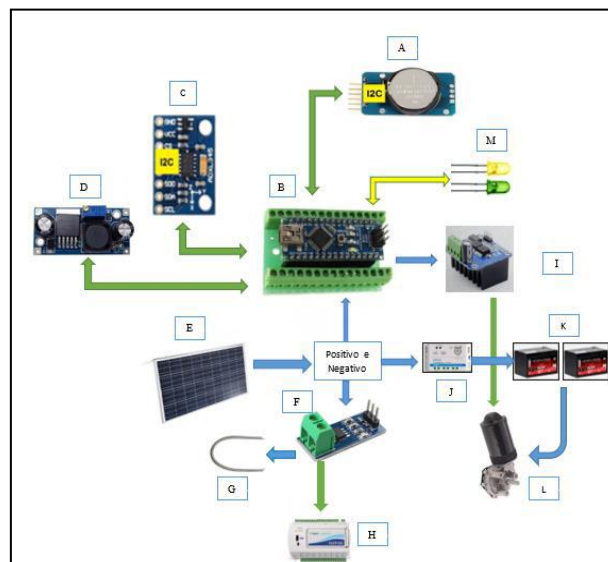
**Tabela 1:** Arranjo 1 – componentes x função.

Componente	Descrição	Função
A	Módulo fotovoltaico [330P CS6U]	Recebe radiação solar e a converte parcialmente em energia elétrica, em corrente contínua
B	Sensor de corrente [ACS712 - 30A]	Monitora a corrente elétrica da carga
C	Datalogger FieldLogger	Registra os dados elétricos e meteorológicos
D	Resistência dissipativa [600W 110V]	Gera uma carga dissipativa para a energia produzida pelo sistema fotovoltaico

Fonte: Autores.

Na Figura 5 está sendo representado um fluxograma com a configuração adotada para o Arranjo 2. Todos os componentes integrantes do Arranjo 2 encontram-se ali representados.

**Figura 5:** Configuração do Arranjo 2.



Fonte: Autores.

Contudo, é na Tabela 2 que são apresentados os componentes, bem como as respectivas funções, utilizadas tanto do Arranjo 2 como do Arranjo 3. Em ambos os sistemas a configuração utilizada é idêntica, diferindo apenas na quantidade do Módulo Relé e do Motoredutor, que possui uma unidade cada no Arranjo 2, enquanto que no Arranjo 3, são duas unidades.

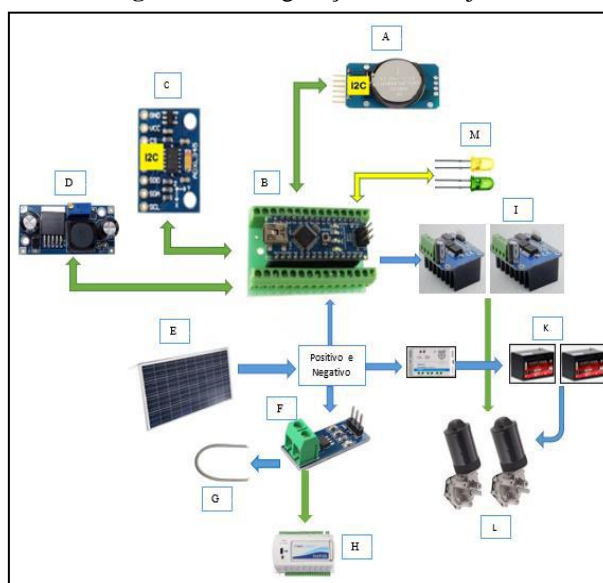
**Tabela 2:** Arranjo 2 e Arranjo 3 – componentes x função.

Componente	Descrição	Função
A	Relógio com calendário [DS 1307]**	Mantém a data e hora do sistema atualizado
B	Placa Arduino [Nano]	Recebe informações dos sensores e controla o posicionamento da placa
C	Acelerômetro [ADXL345]*	Responsável por controlar o posicionamento da placa
D	Módulo regulador de tensão [LM2596]	Recebe energia do banco de baterias e regula a tensão de 5Vcc para a alimentação das placas
E	Módulo fotovoltaico [330P CS6U]	Recebe radiação solar e a converte parcialmente em energia elétrica, em corrente contínua
F	Sensor de corrente [ACS712 - 30A]	Monitora a corrente da carga
G	Resistência dissipativa [600W 110V]	Tem a função de gerar uma carga dissipativa para a energia produzida pelo sistema fotovoltaico
H	Datalogger FieldLogger	Registra os dados elétricos e meteorológicos
I	Módulo relé [5V – 10A]	Interface de ligação dos sinais da placa Arduino com o acionamento do motor de posicionamento Leste – Oeste.
J	Controlador de Cargas	Protege o banco de baterias
K	Baterias	Armazenam energia para movimentar o motoredutor
L	Motoredutor [10.05.013.24V]	Realiza o posicionamento do módulo fotovoltaico
M	Led Verde/Amarelo	Informam o estado de funcionamento do sistema***

\* Comunica com a placa Arduino através da rede SPI. \*\* Comunica com a placa Arduino através da rede I<sup>2</sup>C. \*\*\* Led verde: Ligado = Sistema em funcionamento | Led amarelo: Ligado = Falha no funcionamento do sistema. Fonte: Autores.

Na Figura 6 encontra-se em destaque o fluxograma utilizado para o Arranjo 3, apresentado todos os seus componentes.

**Figura 6:** Configuração do Arranjo 3.



Fonte: Autores.

O funcionamento de todo experimento, resumidamente, pode ser representado pelos procedimentos e ciclos apresentados na



Tabela 3. Nela observa-se toda dinâmica de monitoramento, início e término dos ciclos diários de cada um dos arranjos propostos.

**Tabela 3:** Ciclos diários de funcionamento dos sistemas propostos.

Dia	Hora	Arranjo 1	Sistema Móvel	
			Arranjo 2	Arranjo 3
Todos	5h30min	-	Início do posicionamento: o Arduino® ativa o motoredutor de posicionamento L-O, movendo os Arranjos 2 e 3 da posição horizontal para a posição inicial de $-52,5^\circ$ L	
Todos	6h	Início dos registros diários das grandezas elétricas no datalogger, a cada minuto, até às 20h.	Confirmação da posição inicial de rastreamento e início dos registros diários das grandezas elétricas no datalogger, a cada minuto, até às 20h.	
Todos	9h30min	-	Início das correções da posição L-O dos Arranjos 2 e 3 – a cada 30min, até às 16h, o Arduino® ativa o motoredutor de posicionamento L-O, promovendo um acréscimo angular de $7,5^\circ$ .	
Pré-definido	12h30min	-	-	O Arduino® ativa o motoredutor de posicionamento N-S, movendo o Arranjo 3, conforme dia juliano e ângulo pré-definido.
Todos	16h	-	Última correção da posição L-O dos Arranjos 2 e 3.	
Todos	20h	Término dos registros diários.		
Todos	20h5min	-	Reposicionamento do módulo: o Arduino® ativa o motoredutor de posicionamento L-O, movendo os Arranjos 2 e 3 da posição final de rastreamento ( $52,5^\circ$ O) para a posição horizontal.	

Fonte: Autores.

Com o início da incidência da irradiância solar sobre o módulo, ocorre a produção de energia elétrica pelo processo fotovoltaico. Esta energia, através dos condutores, foi conduzida até a resistência dissipativa, onde ocorreu o seu consumo.

Nos Arranjos 2 e 3, antes da resistência dissipativa, os condutores foram conectados nos respectivos controladores de carga. Nestes, parte da energia foi direcionada ao banco de baterias, responsáveis por alimentar os motoredutores, utilizados na automação dos sistemas.

Próximo ao ponto de consumo, a energia passa pelo sensor de corrente (ACS712 - 30A), promovendo a leitura da corrente elétrica e enviando o dado para registro no datalogger. A corrente elétrica medida caracteriza a performance útil do sistema, pois, a energia necessária ao acionamento dos sistemas de rastreamento já foi direcionada às baterias.

## 2.1 Sistema de aquisição dos dados Meteorológicos, Térmicos e Elétricos

Para armazenar os dados meteorológicos, térmicos e elétricos coletados no experimento, foi utilizado um datalogger FieldLogger, da marca Novus®.

Os canais analógicos do datalogger foram configurados para registrar os dados meteorológicos na seguinte ordem:

- Canal 1: Irradiância solar no plano horizontal ( $W.m^{-2}$ );
- Canal 2: Temperatura ambiente ( $^\circ C$ )
- Canal 3: Temperatura do módulo fotovoltaico no Arranjo 1 ( $^\circ C$ )
- Canal 4: Temperatura do módulo fotovoltaico no Arranjo 2 ( $^\circ C$ )
- Canal 5: Temperatura do módulo fotovoltaico no Arranjo 3 ( $^\circ C$ )
- Canal 6: Corrente elétrica na carga do Arranjo 1 (A);
- Canal 7: Corrente elétrica na carga do Arranjo 2 (A);
- Canal 8: Corrente elétrica na carga do Arranjo 3 (A);

Os valores coletados e armazenados da temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura de trabalho dos módulos, coletados na sua base inferior ( $^{\circ}\text{C}$ ), irradiância solar local ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) e corrente elétrica em cada arranjo foram medidos e registrados no datalogger a cada minuto, no período de 01 Fev 21 a 31 Jan 22, entre 6h e 20h.

### 2.1.1 Alimentação do Sistema de aquisição de dados Meteorológicos, Térmicos e Elétricos

Para permitir o funcionamento autônomo do datalogger, operando em sistema *off grid*, foi instalado um módulo fotovoltaico de 30W/18V-P, um controlador de cargas SUNSAVER-6, modelo SS-6 e uma bateria estacionária Unipower VRLA 12V, 12 Ah – F250.

Todo o sistema adicional visou, exclusivamente, fornecer a energia elétrica necessária ao funcionamento do datalogger. Já a Figura ilustra toda a montagem da automação e coleta de dados do experimento.

**Figura 7:** Representação do sistema de medição e coleta de dados.



Onde: 1) Sistema de controle do Arranjo 1; 2) Sistema de controle do Arranjo 2; 3) Sistema de controle do Arranjo 3; 4) Controlador de cargas dos Arranjos 2 e 3; 5) Banco de baterias (duas para cada um dos Arranjos 2 e 3); 6) Sistema de registro dos dados elétricos e meteorológicos. Fonte: Autores.

### 2.2 Carga resistiva

Para dissipar a energia produzida por cada um dos arranjos, foi instalada uma carga resistiva, composta por três resistências dissipativas de níquel cromo, com 600W de potência unitária e tensão de 110V, associadas em paralelo. A carga resistiva instalada funciona em corrente contínua e encontra-se representada na Figura .

**Figura 8:** Carga resistiva de níquel cromo.



Fonte: Autores.

### 2.3 Cálculo de correção da radiação solar no plano inclinado

A radiação solar incidente foi medida na posição horizontal, através do piranômetro já qualificado, instalado horizontalmente na estrutura superior no módulo do Arranjo 1.

A correção desta, da posição horizontal para o ângulo de inclinação do módulo, foi efetuada com o auxílio das equações, numeradas de 1 a 10, propostas por Duffie e Beckman (2013), relacionadas na Tabela 4.

**Tabela 4:** Equações de correção da posição solar incidente propostas por Duffie e Beckman (2013):

Equação	Número
$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$	1
$\theta_{z, \text{noon}} =  -\phi + \delta $	2
$\omega'_s = \min \left[ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi + \beta) \tan \delta) \end{array} \right]$	3
$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta$	4
$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180) \omega'_s \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \omega_s \sin \phi \sin \delta}$	5
$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta\right)$	6
$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{H_o}$	7
$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.391 - 3.560 \bar{K}_T + 4.189 \bar{K}_T^2 - 2.137 \bar{K}_T^3$	8
$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.311 - 3.022 \bar{K}_T + 3.427 \bar{K}_T^2 - 1.821 \bar{K}_T^3$	9
$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$	10

Onde:

$\delta$ : declinação solar para um dia específico [°].

$\theta_z$ : ângulo de incidência da radiação solar medido do zenit [°].

$\phi$ : Latitude local [°].

$\beta$ : Inclinação do plano com relação ao plano da superfície horizontal [°].

$G_{sc}$ : Constante solar com valor de  $1.367 \text{ Wm}^{-2}$ .

$H$ : Irradiação solar diária num plano horizontal da superfície terrestre [ $\text{Wh/m}^2$ ].

$H_o$ : Média mensal diária de radiação extraterrestre no plano horizontal.

$\bar{H}$ : Irradiação solar média mensal num plano horizontal da superfície terrestre [ $\text{Wh/m}^2$ ].

$\bar{H}_o$ : Irradiação solar média mensal extraterrestre no topo da atmosfera num plano teórico horizontal [ $\text{Wh/m}^2$ ].

$\bar{H}_d$ : Irradiação solar média mensal difusal [ $\text{Wh/m}^2$ ].

$\bar{H}_T$ : Irradiação solar global sobre um plano inclinado [ $\text{Wh/m}^2$  dia].

$K_T$ : Índice de clareza médio.

$\bar{\kappa}_r$ : Índice de claridade atmosférico ou de transparência, médio mensal.

$n$ : data medida por ordinal de 1 a 365.

$\bar{R}$ : Razão entre a radiação média diária do feixe na superfície inclinada e a da superfície horizontal.

$\bar{R}_b$ : Proporção da radiação média diária do feixe na superfície inclinada e a da superfície horizontal mensal.

$\omega_s$ : ângulo horário do anoitecer [°].

$\omega'_s$ : ângulo horário do pôr do Sol para uma superfície inclinada [°].

Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013).

A determinação do período do ano geralmente é expressa em termos de “n” dias, como um número inteiro  $1 \leq n \leq 365$ , válidos para a maioria dos cálculos de engenharia. A taxa máxima de alteração da declinação ( $\delta$ ) é de aproximadamente  $0,4^\circ$  por dia, apresentando valores mensais mais significativos durante os períodos dos solstícios de verão e de inverno.

Para determinar a correção diária a ser adotada, considerou-se os períodos dos equinócios do outono e da primavera, quando o sol ilumina igualmente os dois hemisférios e faz com que o dia e a noite apresentem igual duração. No equinócio de outono, ocorrido em 20 Mar 2021, o sol iluminou Cascavel-PR por 12 horas, com o nascer às 6h38min. Já no equinócio da primavera, no dia 22 Set 2021, o nascer do sol ocorreu às 6h24min. (SUNRISE, 2021).

Considerando o equador solar no plano horizontal, a abertura angular média do movimento aparente do sol durante os equinócios, entre 6h30min e 18h30min, percorre um ângulo de  $180^\circ$ . Com o sol à pino às 12h30min, exatamente perpendicular ao plano horizontal, a abertura máxima possível de correção é de  $-90^\circ$  (leste) pela manhã e  $+90^\circ$  (oeste) à tarde.

O sistema mecânico instalado não possibilita que o posicionamento do módulo ocorra exatamente entre os intervalos de  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ , desta forma, programou-se o sistema para que o mesmo seja posicionado com amplitude total máxima de  $105^\circ$ , abertura angular que permite atuar nas principais faixas de radiação. O primeiro comando de posicionamento dos módulos ocorreu diariamente às 5h30min, quando os módulos dos Arranjos 2 e 3 saíram da posição horizontal ( $0^\circ$ ) e se posicionaram a  $-52,5^\circ$  L.

A confirmação da posição do módulo dos Arranjos 2 e 3 e início dos registros elétricos ocorreu diariamente às 6h, permanecendo com inclinação inalterada até às 9h30min. Após este horário, o sistema automatizado comandou um novo posicionamento dos Arranjos 2 e 3 a cada 30 minutos, com acréscimo angular de  $7,5^\circ$ . Desta forma, o primeiro posicionamento angular ocorreu sempre a  $-52,5^\circ$  L, correspondendo à posição do sol, durante os equinócios, às 9:00 h.

As correções e registros de inclinação L-O ocorreram diariamente no período compreendido entre as 9h30min e 15h30min. Entre as 6h e 9:30h, e das 16:00h às 20h, os Arranjos 2 e 3 permaneceram na mesma posição. Os registros das medidas de corrente elétrica ocorreram a cada minuto, desde as 6h até as 20h. Às 20h05min, por comando pré-determinado, os Arranjos 2 e 3 retornavam à posição horizontal. Na Tabela 5 encontram-se os horários pré-estabelecidos, com as respectivas inclinações de correção da posição dos Arranjos 2 e 3.



**Tabela 5:** Correção da inclinação Leste-Oeste dos arranjos móveis.

Horário	Inclinação (referência 0° no eixo vertical)
05:30	-52,5° (Início do posicionamento – Leste)
06:00	-52,5° (primeiro registro)
09:30	-45,0°
10:00	-37,5
10:30	-30,0
11:00	-22,5
11:30	-15,0
12:00	-7,5
12:30	0,0
13:00	7,5
13:30	15,0
14:00	22,5
14:30	30,0
15:00	37,5
15:30	45,0°
16:00	52,5°
20:00	52,5° (Último registro – Oeste)
20:05	0,0° (Retorno à posição horizontal)

Fonte: Autores.

Já para o posicionamento sazonal do Arranjo 3, a rotação do eixo no sentido N-S, ocorreu conforme o dia juliano e de acordo com as inclinações pré-definidas, permanecendo na mesma posição até a próxima correção. O evento ocorre sempre às 12h30min do dia pré-programado, quando a posição L-O se encontra a 0°. O movimento foi proporcionado com a utilização de um motoredutor de corrente contínua, modelo MR 10.05.013.24V.

A abertura angular mínima em relação ao plano horizontal ocorreu em 20 de dezembro, quando a inclinação no plano N-S foi de 1,5°. Já a inclinação máxima ocorreu em 21 de junho, quando o módulo foi posicionado em 48,4°. Desta forma, a amplitude angular máxima do Arranjo 3 foi de 46,9°. Considerando que o módulo, para o período anual avaliado, realizou um ciclo completo e retornou à posição inicial, a abertura angular objetiva foi de 93,8° para o período de 365 dias. Desta forma, pela razão  $93,8^\circ/365$ , identificou-se uma necessidade de correção aproximada, que não é linear, de  $0,257^\circ/\text{dia}$ .

Em função da insignificância diária da posição a ser corrigida, optou-se para que esta correção ocorresse a cada 10 dias, quando o ângulo a ser corrigido obedeceria a posição relativa ao dia juliano, estando apresentados resumidamente na Tabela 6, de acordo com os cálculos das equações de 1 a 10. No sentido N-S, o módulo do Arranjo 3 permaneceu sempre na mesma inclinação durante o período aproximado de dez dias, quando então sofreu a nova correção pré-determinada.

**Tabela 6:** Correção da inclinação Norte-Sul do Arranjo 3.

Dia do ano	Inclinação do módulo
30/01/21	6,9°
10/02/21	10,1°
20/02/21	13,4°
28/02/21	16,3°
10/03/21	20,2°
20/03/21	24,2°
30/03/21	28,2°
10/04/21	32,5°
20/04/21	36,2°
30/04/21	39,5°
10/05/21	42,5°
20/05/21	44,9°
30/05/21	46,7°
10/06/21	48,0°
20/06/21	48,4°
30/06/21	48,1°
10/07/21	47,2°
20/07/21	45,6°
30/07/21	43,4°
10/08/21	40,3°
20/08/21	37,1°
30/08/21	33,4°
10/09/21	29,2°
20/09/21	25,2°
30/09/21	21,1°
10/10/21	17,2°
20/10/21	13,6°
30/10/21	10,2°
10/11/21	7,0°
20/11/21	4,7°
30/11/21	3,0°
10/12/21	1,9°
20/12/21	1,5°
30/12/20	1,8°
10/01/22	2,9°
20/01/22	4,6°

Fonte: Autores.

#### 2.4 Temperatura de trabalho do módulo fotovoltaico

Um dos objetivos principais do presente estudo foi avaliar o efeito de uma possível variação da temperatura de trabalho do módulo fotovoltaico, em função da sua posição, na eficiência e produção de energia. Para isso, foi instalado um sensor de temperatura ambiente (temperatura de referência), bem como um sensor de temperatura de módulo na posição inferior média do módulo, para cada um dos arranjos, todos à altura de 1,15m acima do telhado.

Os valores da temperatura foram registrados no datalogger a cada minuto, permitindo correlacionar os seus impactos no desempenho final de cada sistema. A hipótese de que sistemas com rastreamento solar, além de afetar positivamente a geração de energia, também possa impactar nas variáveis da irradiância solar e térmica de forma diferente em cada sistema, afetando a eficiência destes, foi testada, visando levar à aceitação ou rejeição desta hipótese para cada um dos arranjos.

## 2.5 Análise dos dados coletados

Os dados elétricos e meteorológicos foram organizados por períodos mensais de observação, com registro inicial no 1º dia do mês de fevereiro de 2021. Os períodos foram agrupados conforme se observa na Tabela 7.

**Tabela 7:** Períodos de aquisição dos dados do experimento.

Períodos	Data
P2	01/02/21 a 28/02/21
P3	01/03/21 a 31/03/21
P4	01/04/21 a 30/04/21
P5	01/05/21 a 31/05/21
P6	01/06/21 a 30/06/21
P7	01/07/21 a 31/07/21
P8	01/08/21 a 31/08/21
P9	01/09/21 a 30/09/21
P10	01/10/21 a 31/10/21
P11	01/11/21 a 30/11/21
P12	01/12/21 a 31/12/21
P13	01/01/22 a 31/01/22

Fonte: Autores.

As grandezas elétricas de corrente elétrica coletadas ( $I_{\text{Arranjo 1}}$ ,  $I_{\text{Arranjo 2}}$ ,  $I_{\text{Arranjo 3}}$  [A], juntamente com os dados da estação meteorológica (irradiância solar [ $\text{Wm}^{-2}$ ], temperatura ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ], temperatura do Arranjo 1 [ $^{\circ}\text{C}$ ], temperatura do Arranjo 2 [ $^{\circ}\text{C}$ ] e temperatura do Arranjo 3 [ $^{\circ}\text{C}$ ]) foram registrados a cada minuto, pelo período de um ano, no intervalo horário das 6h às 20h.

Todos os resultados são apresentados em forma gráfica, avaliando-se assim o desempenho dos três arranjos propostos, bem como o impacto que a temperatura exerce sobre os resultados.

Na avaliação dos resultados apresentados, a energia consumida nos sistemas de rastreamento não foi objeto de mensuração, pois objetivou-se apenas mensurar a energia elétrica útil de cada sistema, dissipada pela carga instalada. Desta forma, os percentuais de produção refletem o desempenho final de cada arranjo.

A razão entre a energia elétrica útil produzida e a disponibilidade total de energia solar incidente no plano do módulo fotovoltaico, determinou a eficiência de cada sistema proposto.

Visando validar a hipótese testada no projeto, buscando verificar se houve diferença significativa na eficiência dos módulos, assim como nas temperaturas médias horárias e na irradiância solar horária, foi utilizado a Análise de Variância (ANOVA). Nela, objetivou-se comparar as médias, com uma probabilidade de significância de 5%.

Sendo o valor testado estatisticamente igual ao valor sugerido pelas amostras, então será aceita a hipótese nula; caso contrário, esta será rejeitada. A estatística da ANOVA é o valor de  $F$  (que é a razão entre a estimativa dentre os tratamentos e dentro dos tratamentos analisados).

Assim: Rejeita-se  $H_0$  quando  $F_{cal} \leq F_{tab}$ . e aceita-se  $H_0$  quando  $F_{cal} > F_{tab}$ .

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Densidade de ocorrência da irradiância solar

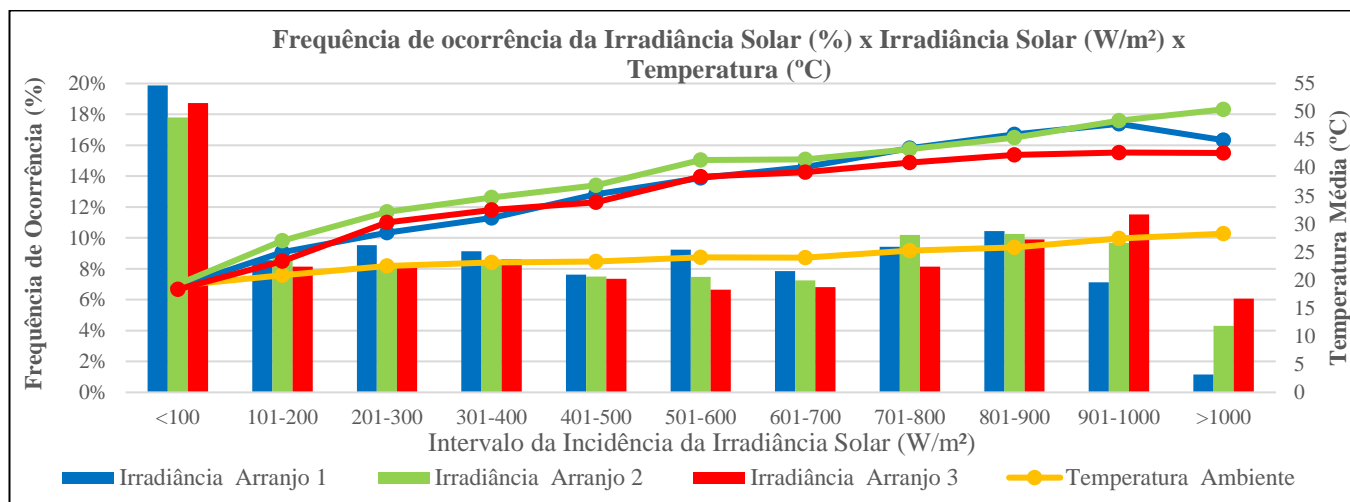
A densidade de ocorrência da irradiância solar horária, no plano horizontal, obteve mediana máxima horária de 779,1 W/m<sup>2</sup>, entre 12h e 13h, e maior registro horário médio de 1.141,9 W/m<sup>2</sup>, entre 11h e 12h. Sobre o Arranjo 1, a mediana horária medida obteve registro superior de 854,7 W/m<sup>2</sup>, entre 12h e 13h, com valor máximo horário médio de 1.063,6 W/m<sup>2</sup>, ocorrido entre 13h e 14h. Os valores para o Arranjo 2 tiveram registro médio máximo de mediana de 865,8 W/m<sup>2</sup>, entre 12h e 13h, o registro da maior média horária, cujo valor foi de 1.130,3 W/m<sup>2</sup> ocorreu entre 11h e 12h. No Arranjo 3, a mediana máxima média horária foi de 905,3 W/m<sup>2</sup>, com máximo registro de média horária de 1.146,1 W/m<sup>2</sup>, ambas ocorrências registradas entre 11h e 12h.

Destaca-se que o maior acréscimo de incidência média horária do Arranjo 2, em relação ao Arranjo 1, ocorreu entre 7h e 8h, e se apresentou superior em 25,6%. Para o Arranjo 3, em relação ao Arranjo 1, o acréscimo foi de 25,4%, na faixa horária entre 9h e 10h.

A maior densidade de ocorrência da irradiância solar, para os três arranjos, encontra-se na primeira faixa avaliada, inferior a 100 W/m<sup>2</sup>, com registros de 19,9% (Arranjo 1), 17,8% (Arranjo 2) e 18,7% (Arranjo 3). Percebe-se também que a maior amplitude na densidade de ocorrência é registrada nos Arranjos 2 e 3, em comparação ao Arranjo 1, nos valores superiores a 900 W/m<sup>2</sup>. Esses resultados contribuem para o aumento de produção dos sistemas com rastreamento.

A Figura destaca o percentual da frequência de ocorrência da irradiância solar, por faixa de incidência, e o respectivo impacto térmico, dentro das faixas avaliadas.

**Figura 9:** Frequência de ocorrência da Irradiância Solar x Temperatura.



Fonte: Autores.

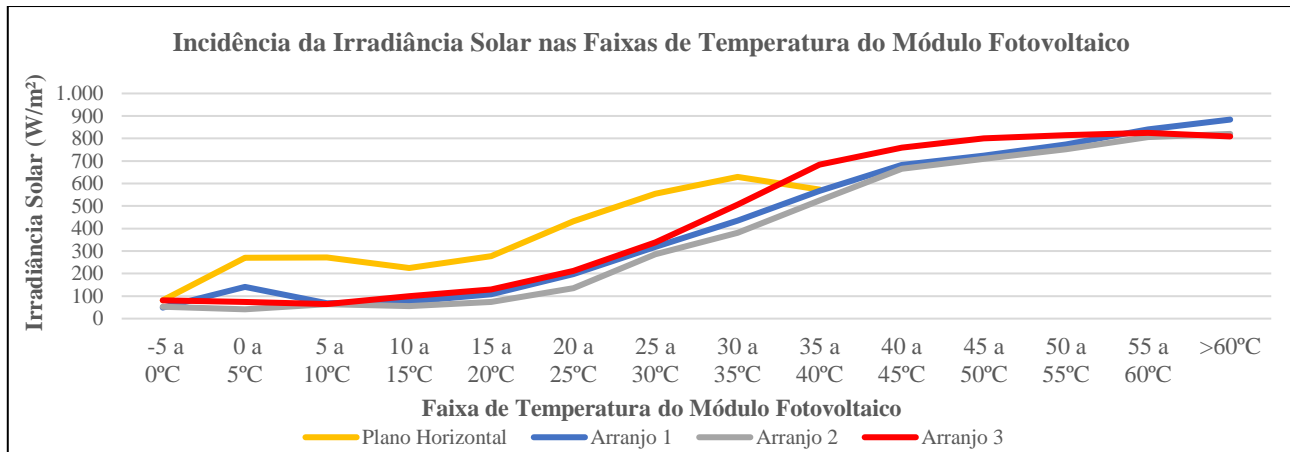
Também é possível observar que o Arranjo 2 é onde ocorre a maior média de temperatura em praticamente todas as faixas de irradiância solar, com registro máximo de 50,4°C nas irradiâncias superiores a 1000 W/m<sup>2</sup>. Entretanto, o Arranjo 3 possui os menores registros de temperatura para a irradiância solar inferior a 200 W/m<sup>2</sup> e após os 400 W/m<sup>2</sup>.

A temperatura ambiente registrou máximas de 27,4°C e 28,3°C para as irradiâncias de 901 a 1000 W/m<sup>2</sup> e superiores a 1000W/m<sup>2</sup>, respectivamente.

### 3.2 Temperatura dos Módulos Fotovoltaicos

Foi realizada a comparação dos valores da incidência da irradiância solar no plano horizontal à temperatura ambiente, bem como seus valores incidentes na superfície de cada arranjo, por faixas de temperatura do módulo, conforme encontra-se representado na Figura .

**Figura 10:** Incidência da irradiância solar nas diversas faixas de temperatura.



Fonte: Autores.

Foi observado que as faixas de menor temperatura do módulo fotovoltaico, até os 25°C, coincidem com as menores incidências da irradiância solar, em que, em todos os arranjos, mantiveram-se com valores inferior a 212 W/m<sup>2</sup> (valor registrado no Arranjo 3). Já a ocorrência da irradiância solar sobre a superfície horizontal, sob condições de temperatura ambiente, apresentou a maior média horária de ocorrência entre a faixa de temperatura de 30°C a 35°C, com registro médio horário máximo de 629,3 W/m<sup>2</sup> nesse intervalo térmico.

Entre as médias horárias de 10°C a 55°C, a incidência da irradiância solar sobre o Arranjo 3 apresentou-se levemente superior aos demais arranjos. O destaque de máximo acréscimo percentual desta irradiância ocorre entre 10°C e 15°C, onde os acréscimos são de 80,14% e 30,66% sobre os valores registrados, respectivamente, nos Arranjos 2 e 1. Para as demais faixas de temperatura, os três arranjos apresentaram valores de irradiância solar muito próximos.

Foi com temperatura superior a 60°C que o Arranjo 1 apresentou maior valor de irradiância solar, registrando média horária máxima de 884,0 W/m<sup>2</sup>. Nesta mesma faixa térmica, o Arranjo 2 registrou 820,3 W/m<sup>2</sup> e o Arranjo 3, 809,7 W/m<sup>2</sup>.

De modo geral, quando a irradiância solar foi menor que 600 W/m<sup>2</sup>, as temperaturas ambientes (variando de -5°C a 40°C) foram maiores que as temperaturas nos arranjos. Com irradiâncias acima de 600 W/m<sup>2</sup>, as temperaturas horárias médias nos arranjos (que chegaram até 65°C) superaram as temperaturas ambientes.

A maior média horária da temperatura ambiente registrada durante o período de avaliação foi de 36,22° C, observada entre 14h e 15h do dia 20 Set 21. No entanto, o maior registro de média horária para a temperatura de todos os módulo fotovoltaicos ocorreu no dia 16 Dez 21: a) no Arranjo 1 entre 13 h e 14 h, quando este registrou 67,04°C; b) no Arranjo 2, o registro foi de 65,79°C, entre 16 h e 17 h; e c) no Arranjo 3, entre 13 h e 14 h, o registro médio horário foi de 61,60°C.

Já a menor média térmica horária ambiente foi de -2,20°C, registrada no dia 30 Jun 21, entre 6h e 7h. No mesmo dia e horário, foram registradas as mínimas de -4,75°C (Arranjo 1) e -4,44°C (Arranjo 2). No Arranjo 3, a temperatura mínima registrada ocorreu entre 6h e 7h de 29 Jun 21, onde o valor médio horário foi de -3,50°C.

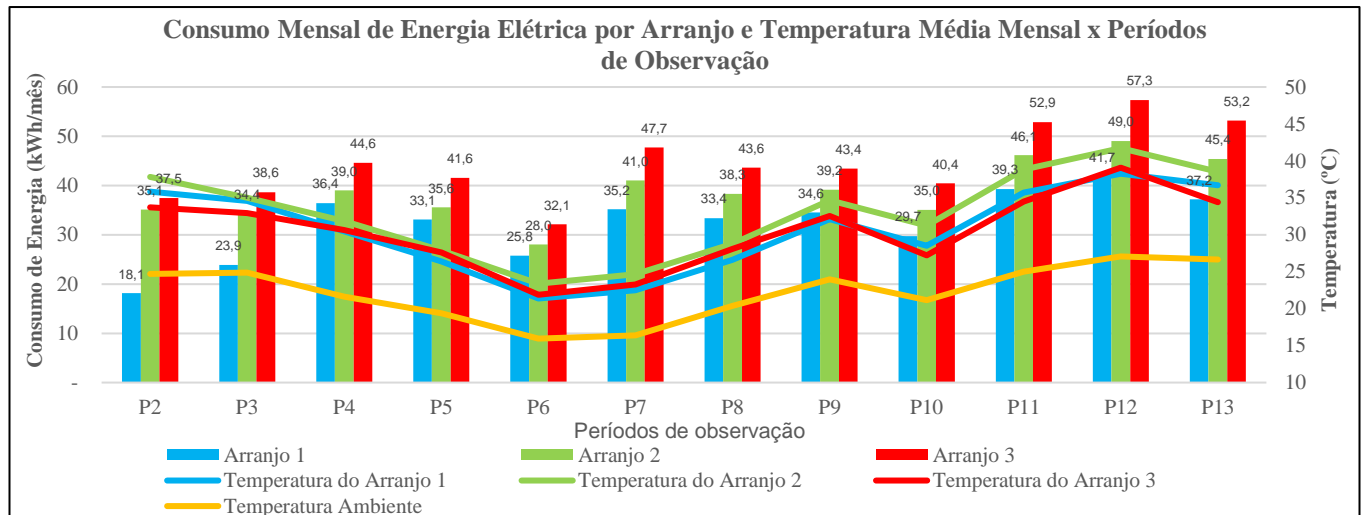
Avalia-se que a rastreabilidade, em um e dois eixos, respectivamente, contribuiu para uma menor média horária máxima da temperatura do módulo fotovoltaico e menor amplitude térmica. Isso ocorre, possivelmente, em função da maior facilidade na troca de calor com o ambiente, pela ação do vento, variável não avaliada no experimento.



### 3.3 Consumo Mensal de Energia Elétrica

O consumo mensal de energia elétrica, bem como as respectivas temperaturas dos módulos e ambiente, por período e por arranjo, encontra-se representado na Figura . Os registros ora apresentados referem-se à energia efetivamente dissipada nos resistores, definindo-a como energia útil de cada arranjo, já desconsiderando toda energia utilizada na movimentação dos Arranjos 2 e 3.

**Figura 11:** Consumo mensal de energia por arranjo.



Fonte: Autores.

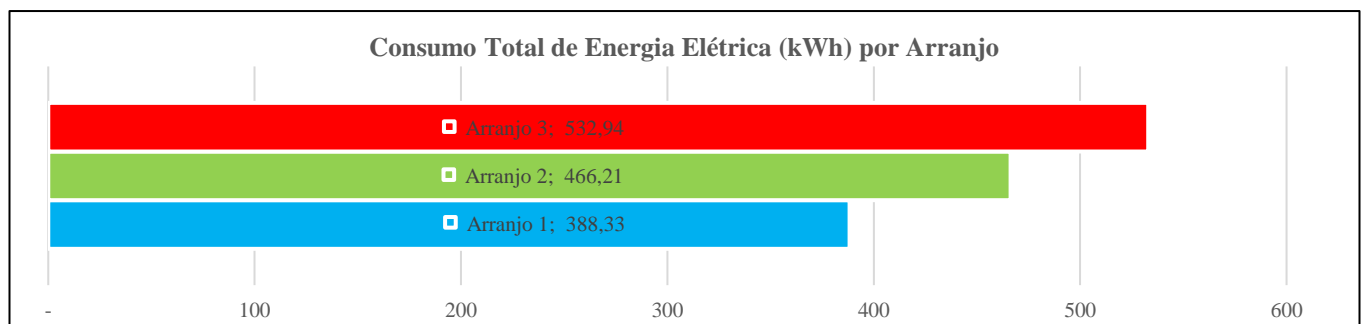
Destaca-se que os resultados de geração observados são proporcionais às incidências. As maiores taxas de incidência e de consumo de energia ocorrem para o Arranjo 3, Arranjo 2 e Arranjo 1, de forma decrescente, nesta ordem.

O período P12 registrou o maior consumo mensal individual nos sistemas, com registros de 57,34 kWh (Arranjo 3), 49,02 kWh (Arranjo 2) e 41,71 kWh (Arranjo 1), período este que coincide com a maior disponibilidade de irradiância solar sobre os módulos, com média diária mensal de 7.155,4 kWh (Arranjo 3), 7.352,8 kWh (Arranjo 2) e 6.490,4 kWh (Arranjo 1).

No entanto, a melhor performance dos sistemas com rastreamento (Arranjo 2 e Arranjo 3), comparados ao sistema estático (Arranjo 1) ocorreu no período P2, quando este registrou a produção de apenas 18,1 kWh.

Quanto à avaliação de produção útil de energia elétrica durante todo o período do experimento, o que define a performance de cada arranjo, evidencia-se um significativo acréscimo de geração dos Arranjos 2 e 3, comparados ao Arranjo 1, conforme representado na Figura 5.

**Figura 5:** Consumo total de energia por arranjo.



Fonte: Autores.

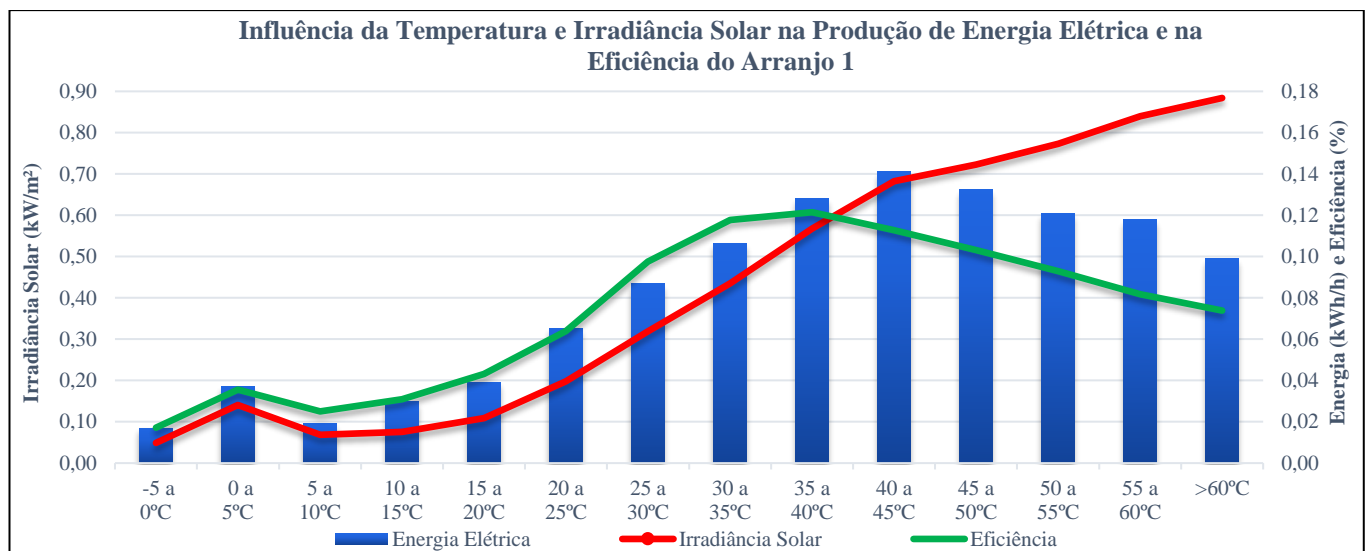
Cabe destacar que toda a energia elétrica produzida pelo Arranjo 1 é totalmente dissipada nos resistores, imediatamente após a sua mensuração e registro. No entanto, nos Arranjos 2 e 3, a energia elétrica gerada é consumida tanto pelos motores elétricos, responsáveis pela movimentação dos mesmos, como pelos resistores, sendo apenas a última parcela mensurada e representada graficamente.

Em função do rastreamento solar, o Arranjo 2 apresentou acréscimo de produção anual útil média na ordem de 20,1%, em relação ao Arranjo 1, enquanto no Arranjo 3, este ganho foi de 37,2%.

### 3.4 Influência da temperatura

No Arranjo 1, o aumento da eficiência do módulo coincide com o aumento da irradiância solar, desde as menores médias de temperatura até atingir a faixa de 35°C a 40°C, quando a eficiência atinge o percentual máximo de 12,1%, apresentando simetria inclusive com a produção de energia. Nesta, a irradiância solar média é de 567 W/m<sup>2</sup>. A representação gráfica do Arranjo 1 (Figura 6) evidencia tal dependência, nas faixas de temperatura atingidas.

**Figura 6:** Influência da temperatura e irradiância na produção e eficiência do Arranjo 1.



Fonte: Autores.

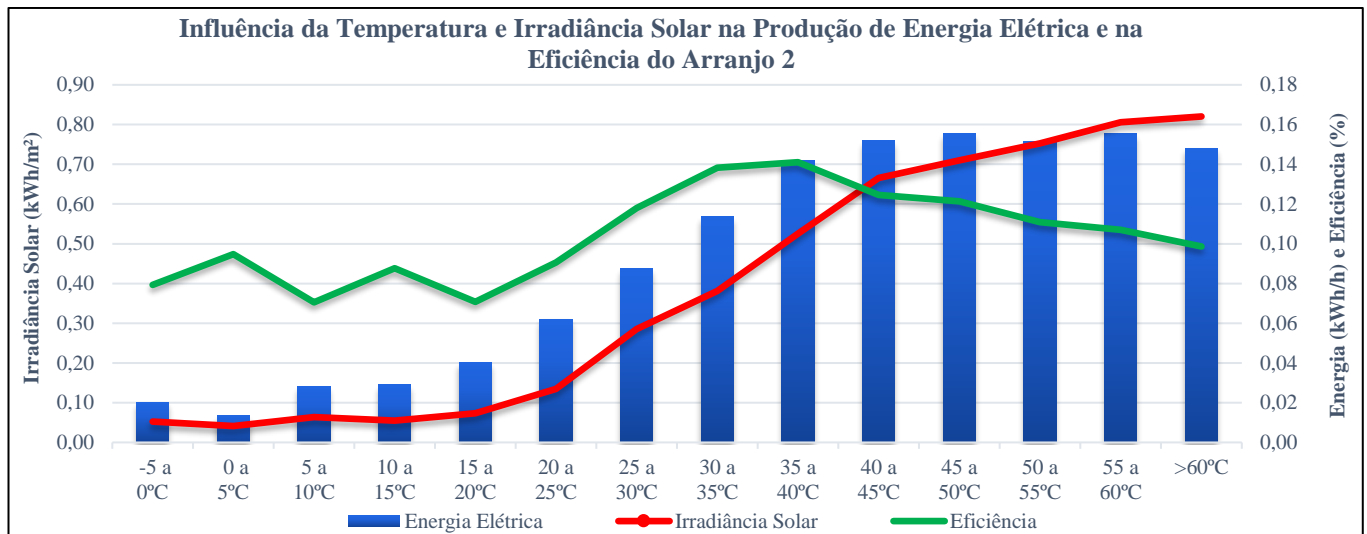
Após o módulo atingir a máxima eficiência, o aumento da irradiância solar reflete em aumento de produção até atingir a faixa de temperatura de 40°C a 45°C, que é onde ocorre a maior produção efetiva de energia, no entanto, com queda significativa e linear na performance e eficiência do módulo.

No Arranjo 2, a eficiência possui máxima de 14,1%, na faixa de temperatura de 35°C a 40°C, onde a irradiância solar atinge média de 525 W/m<sup>2</sup>. Contudo, a maior produção ocorre na faixa de temperatura de 45°C a 50°C, com registro de 0,1554 kWh, 710 W/m<sup>2</sup> e 12,1% de eficiência. A



Figura 7 destaca as correlações observadas no Arranjo 2, nas faixas de temperatura atingidas.

**Figura 7:** Influência da temperatura e irradiância na produção e eficiência – Arranjo 2.

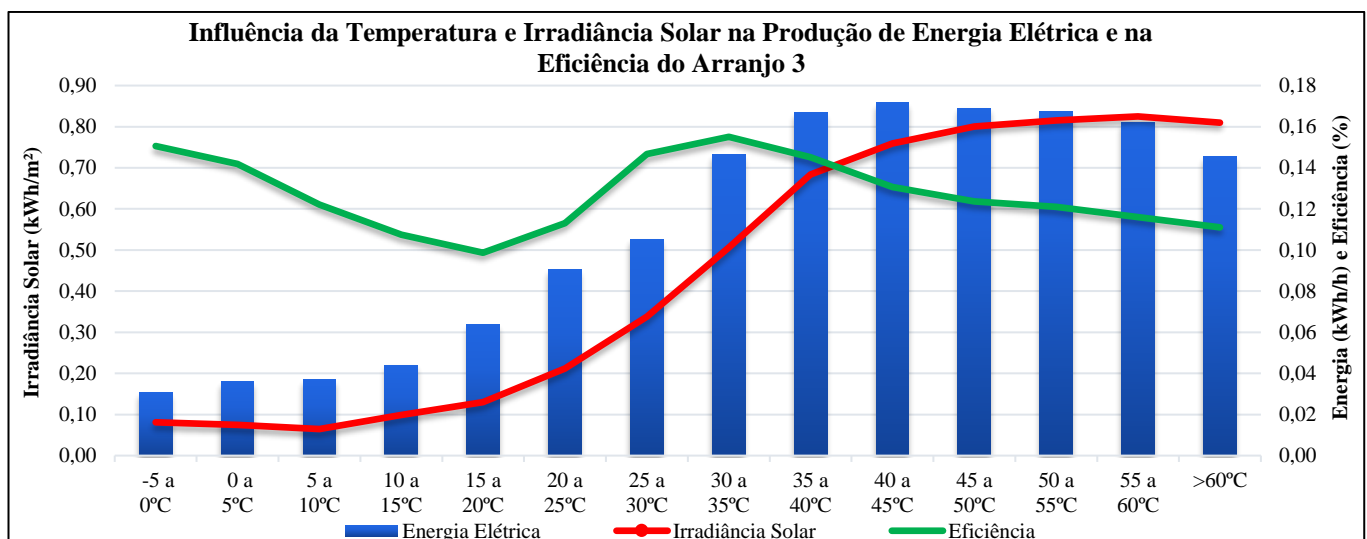


Fonte: Autores.

A menor eficiência registrada, de 7,05%, ocorreu com produção de 0,028 kWh, 64 W/m<sup>2</sup> e entre 5°C e 10°C. Somente após atingir registros superiores a 74 W/m<sup>2</sup> a eficiência do módulo apresenta crescimento estável até a sua máxima, quando então passa a demonstrar uma tendência de queda.

Já para o Arranjo 3, a eficiência possui máxima registrada de 15,5%, na faixa de temperatura de 30°C a 35°C, onde a irradiância solar atinge média horária de 506 W/m<sup>2</sup>. Contudo, a maior produção de energia elétrica ocorre na faixa de temperatura de 45°C a 50°C, com registro de 0,1717 kWh, 760 W/m<sup>2</sup> e 13,1% de eficiência. A Figura 8 destaca as performances de produção, irradiância solar e eficiência, observadas no Arranjo 3, nas faixas de temperatura atingidas.

**Figura 8:** Influência da temperatura e irradiância na produção e eficiência – Arranjo 3.



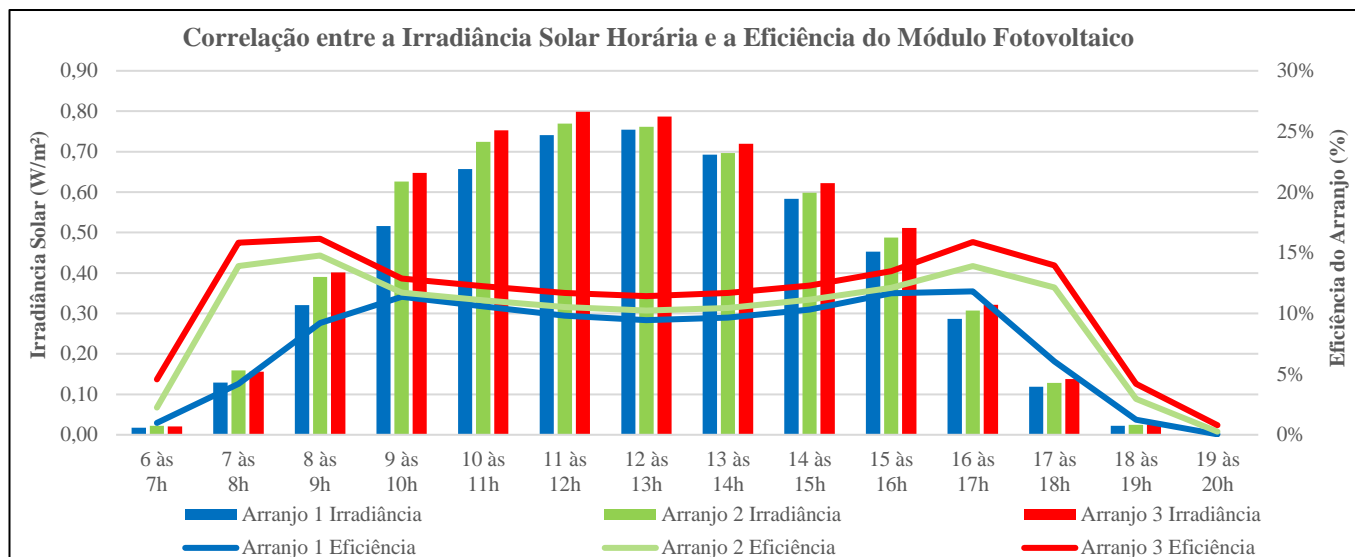
Fonte: Autores.

A eficiência mínima observada ocorre entre 15°C e 20°C, com registro mínimo de 9,9%, onde a produção útil é de 0,064 kWh e a irradiância solar é de 130 W/m<sup>2</sup>. Nas faixas de 5°C a 25°C, a eficiência se manteve entre 12,2% e 11,3%, após, apresentando aumento de eficiência até o registro máximo, quando então o módulo passa a sofrer uma suave redução em sua eficiência, atingindo a segunda mínima, que é de 11,1%, entre 60°C e 65°C, nela a irradiância solar possui valor de 810 W/m<sup>2</sup>.



A correlação entre a irradiância solar que atinge a superfície dos arranjos, bem como o percentual de eficiência horária estão representados na Figura 9.

**Figura 9:** Correlação entre a Irradiância Solar Horária e a Eficiência dos Arranjos.

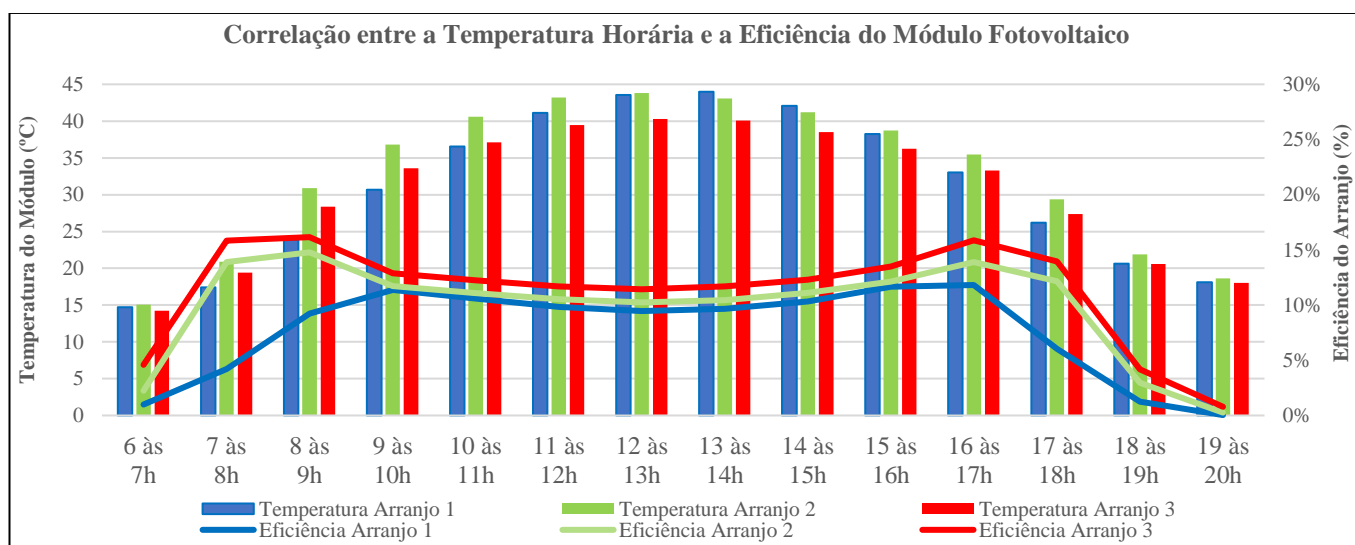


Fonte: Autores.

Nela, observa-se que a maior eficiência dos Arranjos 2 e 3 ocorrem pela manhã, entre 07:00h e 09:00h, assim como à tarde, entre 17:00h e 18:00h. Também, entre as 09:00h e 16:00h, horários de maior disponibilidade solar, ocorre grande redução na eficiência, inversamente proporcional à irradiância solar efetiva incidente, em todos os arranjos.

Também foi representado, através da Figura 10, a correlação entre a média horária da temperatura do módulo fotovoltaico e a sua eficiência horária média, nas faixas horárias de observação.

**Figura 10:** Correlação entre a Temperatura Horária e a Eficiência dos Arranjos.



Fonte: Autores.

Em todos os arranjos, a eficiência máxima horária ocorre, pela manhã, nas temperaturas de 30,67°C (Arranjo 1, 11,4%), 30,89° C (Arranjo 2, 14,8%) e 28,37°C (Arranjo 3, 16,2%). Contudo, enquanto o módulo atinge essa temperatura nos Arranjos 2 e 3 entre 8h e 9h, no Arranjo 1, essa temperatura somente ocorre entre 9h e 10h.

No período da tarde, todas as eficiências máximas ocorreram entre 16h e 17h, com temperaturas e eficiências de 33,01°C e 11,8% (Arranjo 1), 35,47°C e 13,9% (Arranjo 2) e 32,29°C e 15,9% (Arranjo 3).

Foram comparadas as médias horárias das temperaturas e da eficiência horária dos módulos, para verificar se as diferenças entre os valores são estatisticamente iguais, a um nível de significância de 5%. Após aplicado o teste de Análise de Variância, foi aplicado o Teste de Tukey. Na Tabela possível verificar os resultados.

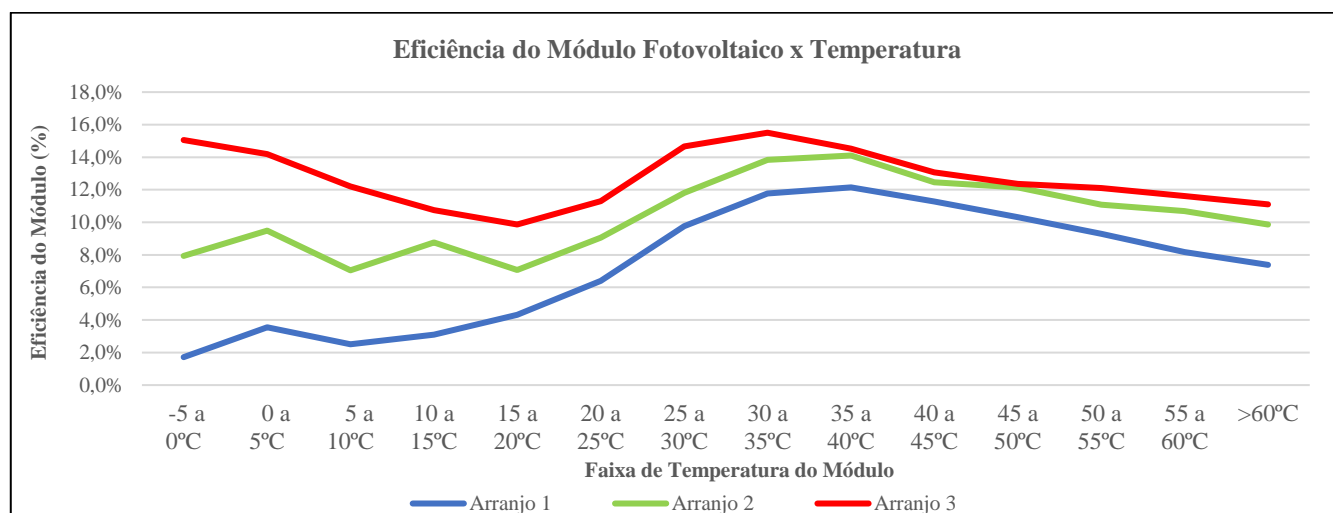
**Tabela 8:** Valores médios de temperatura e eficiência por faixa horária.

Superfície	Temperatura (°C)		Eficiência (%)	
	Médias	Resultado (*)	Médias	Resultado (*)
Arranjo 2	38,21	A	9,82	A
Arranjo 1	36,26	A B	7,60	A
Arranjo 3	34,95	B	11,22	A

Notas: (\*) Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Fonte: Autores.

Já a Figura 11 destaca a eficiência de cada arranjo em função das faixas de temperatura pré-estabelecidas.

**Figura 11:** Eficiência térmica dos arranjos.



Fonte: Autores.

Os resultados destacam que a performance dos arranjos, quando avaliados em todas as faixas de temperatura propostas, comprovam a maior eficiência média dos arranjos com rastreamento solar, em todas as faixas de temperatura, principalmente até atingir 20°C, com destaque para o Arranjo 3.

Contudo, usando os mesmos testes, quando as comparações das médias, tanto das temperaturas como das eficiências, por faixa de temperatura dos módulos, as condições de igualdade são as apresentadas na

Tabela .

**Tabela 9:** Valores médios de temperatura e eficiência por faixa de irradiância solar.

<i>Superfície</i>	<i>Temperatura (°C)</i>		<i>Eficiência (%)</i>	
	<i>Médias</i>	<i>Resultado (*)</i>	<i>Médias</i>	<i>Resultado (*)</i>
Arranjo 3	30,04	A	12,73	A
Arranjo 2	29,94	A	10,38	B
Arranjo 1	30,03	A	7,27	C

Notas: (\*) Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Fonte: Autores.

A avaliação da temperatura de trabalho do módulo fotovoltaico, dentro das faixas de temperatura pré-estabelecidas, influenciou na eficiência de cada sistema.

Os resultados observados do impacto da temperatura do módulo apresentam coerência os estudos de Souza e Aristone (2018), que comprovaram uma redução nos valores de tensão de circuito aberto após o módulo atingir 34°C, mesmo com o aumento da irradiância solar, o que impacta diretamente na sua eficiência. Também foi observado por Zampiva (2021) que o aumento da temperatura resulta na diminuição da eficiência do sistema, assim como, a existência de maiores índices de irradiação solar resultam em maior geração de energia.

#### 4. Conclusão

O presente trabalho avaliou o desempenho de três sistemas fotovoltaicos, sendo um estático e dois móveis, rotacionados em um plano (L-O) e dois planos (L-O + N-S), na cidade de Cascavel, no oeste do estado do Paraná. As conclusões apresentadas na avaliação deste experimento estão condicionadas à sua forma de execução, sendo um reflexo dos resultados dele obtidos.

Considerando-se a hipótese inicial deste experimento, onde esperava-se testar se a implantação de sistemas de rastreamento solar, diário e sazonal, pudesse impactar nas variáveis da irradiância solar e térmica de forma diferente em cada sistema, afetando a eficiência destes, comprovou-se verdadeira.

Os Arranjos 2 e 3 foram impactados positivamente na geração de energia, mas também apresentaram eficiências superiores e menor temperatura máxima, quando comparados ao Arranjo 1.

Nas médias horárias de irradiância solar, o Arranjo 3 apresentou os maiores índices em todas as faixas observadas. O maior acréscimo observado ocorre entre 6h e 9h, quando os percentuais se mantiveram superiores a 21% para os sistemas com rastreamento.

A maior densidade de ocorrência da irradiância solar encontra-se na primeira faixa avaliada, inferior a 100 W/m<sup>2</sup>, com registros de 19,9% (Arranjo 1), 17,8% (Arranjo 2) e 18,7% (Arranjo 3). O registro da maior amplitude na densidade de ocorrência nos Arranjos 2 e 3, em comparação ao Arranjo 1, são identificadas nos valores superiores a 900 W/m<sup>2</sup>.

Até a faixa de 900W/m<sup>2</sup>, a incidência da irradiância solar apresenta frequência com valores muito próximos para todos os arranjos, porém, a partir desses níveis, a incidência sobre o Arranjo 1 é pouco relevante, enquanto os valores sobre os Arranjos 2 e 3 apresentam percentuais elevados de ocorrência. Contudo, as médias horárias não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

As faixas de menor temperatura do módulo fotovoltaico, até os 25°C, coincidem com as menores incidências da irradiância solar. Para valores de irradiância solar inferiores a 600W/m<sup>2</sup> a temperatura ambiente se manteve superior às temperaturas registradas nos módulos.

Nos períodos mensais observados, o P6 apresentou a menor disponibilidade de irradiância solar em todos os arranjos, período este que também coincidiu com as menores temperaturas mensais e menor produção de energia em todos os sistemas.

A amplitude térmica suportada pelos sistemas com rastreamento apresentou valores inferiores ao arranjo estático. O

Arranjo 1 registrou variação térmica de 71,79°C (de -4,75°C a 67,04°C); no Arranjo 2, esta foi de 70,23°C (de -4,44°C a 65,79°C) enquanto que no Arranjo 3, a amplitude térmica foi de 65,10°C (de -3,50°C a 61,60°C). A temperatura ambiente apresentou temperatura mínima de -2,20°C e máxima de 36,22°C, com amplitude de 38,41°C. Mesmo que as maiores temperaturas médias horárias fossem observadas no Arranjo 2, as maiores amplitudes ocorreram no Arranjo, provavelmente em função da maior influência da ação dos ventos (que não foi objeto de estudo).

Em todos os arranjos, o aumento da irradiância solar promoveu aumento de produção e da temperatura do módulo. As médias horárias máximas de temperatura absoluta apresentaram limites superiores decrescentes no Arranjo 1, Arranjo 2 e Arranjo 3, respectivamente, nesta ordem. Já nas médias horárias de temperatura, quando os critérios de avaliação são as faixas de irradiância solar, observa-se igualdade em todos os arranjos, com alteração de posição entre o Arranjo 1 e o Arranjo 2. No entanto, quando as comparações correlacionam as eficiências dos arranjos nas faixas de temperatura observadas, as eficiências não diferem entre si, contudo as temperaturas possuem as médias horárias que não diferem entre os Arranjos 1 e 2, bem como entre os Arranjos 1 e 3, ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

A eficiência média mostrou-se diferente entre todos os arranjos, com valores mínimos crescentes do Arranjo 1, Arranjo 2 e Arranjo 3, respectivamente, nesta ordem, quando as comparações correlacionam as eficiências dos arranjos nas faixas de temperatura observadas. Em todas as avaliações, os percentuais de eficiência do Arranjo 3 foi superior ao Arranjo 2, que foi superior ao Arranjo 1, conforme demonstrado.

Todas as correlações horárias entre a incidência da irradiância solar, temperatura do módulo e produção de energia mostraram-se similares, demonstrando que o aumento da irradiância solar ocasionou maior temperatura do módulo e maior produção de energia elétrica, mesmo que com redução na eficiência de conversão.

As maiores eficiências observadas nos arranjos com rastreamento ocorrem pela manhã entre 7h e 9h, e pela tarde, entre 16h e 18h. No arranjo estático, os maiores registros de eficiência ocorrem entre 9 e 10h e entre 16 e 17h. Em todos os arranjos, nos horários de maior disponibilidade solar, as eficiências foram reduzidas em função do maior aumento da temperatura dos módulos.

A faixa térmica entre 30°C e 40°C foi onde são encontradas as maiores médias de eficiência em todos os arranjos. Após essa temperatura, todos os módulos apresentam queda de eficiência. No entanto, é nas faixas de -5°C a 25°C onde são observadas as maiores diferenças entre as eficiências dos módulos, com melhor desempenho para o Arranjo 3 e Arranjo 2, respectivamente nesta ordem.

Sugere-se para trabalhos futuros a condução de estudos de campo, no sentido de avaliar sistemas comerciais, onde os painéis solares (compostos por diversos módulos) com um único comando automatizado poderão definir, com maior precisão, a viabilidade financeira dos sistemas com rastreamento. Da mesma forma, julga-se pertinente a avaliação de sistemas instalados em diferentes latitudes, próximas à linha do Equador e em grupos de locais, com latitudes variando a cada 10°.

## Referências

- Almorox, J., Arnaldo, J. A., Nadjem, B. & Martí, P. (2020). Adjustment of the Angstrom-Prescott equation from Campbell-Stokes and Kipp-Zonen sunshine measures at different timescales in Spain. *Renewable Energy*, 154, 337-350. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.023>
- Assaf, E. M. (2014). "Design and Implementation of a Two Axis Solar Tracking System Using PLC Techniques by an Inexpensive Method;" *International Journal of Academic Scientific Research*, 2 (3), 54-65.
- Benato, A. & Stoppato, A. (2019). An Experimental Investigation of a Novel Low-Cost Photovoltaic Panel Active Cooling System. *Energies*, 12, 1448 (1-24). <https://doi:10.3390/en12081448>.
- Berwanger, D. (2019). *Desenvolvimento de um sistema fotovoltaico com rastreador solar de um eixo instalado em uma propriedade rural conectado à rede*. 2019. 79f. Dissertação de mestrado. Curso de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.
- Bittencourt, F. T., Mota, L. S., Santana, L. P., Costa, M. M. & Souza Filho, J. C. (2017). Construção de um protótipo de rastreador solar para aplicação em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. *Sítio Novo*, Palmas, 1, 147-157.

- Bona, J. C., Tifton, M. G. & Bühler, A. J. (2015). Projeto de um seguidor solar de dois eixos de baixo custo e baixo consumo energético. *Acta de La XXXVIII Reunión de Trabajo de La Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, Argentina, 3, 04.171-04.177.
- Bryan, J. L., Silverman, T. J., Deceglie, M. G. & Holman, Z. C. (2021). Thermal model to quantify the impact of sub-bandgap reflectance on operating temperature of fielded PV modules. *Solar Energy*, 220, 246-250. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.045>
- Carvalho, D. R. (2011). *Desenvolvimento de um rastreador solar biaxial*. 60 f. Dissertação de mestrado. Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. (4a ed.), Wiley. 928 p.
- Fernandes, A. A. (2014). *Desenvolvimento de um rastreador de baixo custo para sistemas de energia fotovoltaicos*. 109 f. Dissertação de mestrado. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Fouada, M. M., Shihatab, L. A. & Morgana, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499-1511. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141>
- Frosi, F., Chesini, D., Gabe, I. J. & Bona, J. C. (2018). Análise comparativa da produção de energia de um seguidor solar de dois eixos para a região de Farroupilha-RS. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 7. Gramado. *Anais*. Gramado: Cbems, 2018. 1-9.
- Garcia, Y., Diaz, O. & Agudelo, C. (2015). Performance of a solar PV tracking system on tropic regions. [Thesis]. *Energy and Sustainability*, 4, 197-207. Faculty of Engineering, University of Cundinamarca, Colombia.
- Hafez, A. Z., Yousef, M. A. & Harag, M. N. (2018). Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 754-782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>
- Hoffmann, F. M., Molz, R. F., Kothe, J. V., Nara, E. O. B. & Tedesco, L. P. C. (2018). Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels. *Renewable Energy*, 115, São Paulo. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.079>
- Konneh, K. V., Masrur, H., Othman, M. L., Wahab, N. I. A., Hizam, H., Islam, S. Z. & Senju, T. (2021). Optimal Design and Performance Analysis of a Hybrid Off-Grid Renewable Power System Considering Different Component Scheduling, PV Modules, and Solar Tracking Systems. *IEEE Access*, 9, 64393-64413.
- Kumar, M. & Kumar, A. (2017). Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 78, 554-587. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.083>
- 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*, 6 (6), 549-557. <https://doi.org.ez89.periodicos.capes.gov.br/10.1002/ese3.92>
- Lopes, D. D. D. (2016). *Desenvolvimento e implementação de um Sistema de Seguimento Solar Ativo para sistemas fotovoltaicos*. 76 f. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências, Departamento e Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Martins, F. O. (2016). *Seguidor solar de dois eixos com motores passo-a-passo*. 80 f. Dissertação de mestrado. Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Meceneiro, G. D. (2018). *Desenvolvimento de um Sistema para Rastreamento Solar*. 81 f. Dissertação de mestrado. Curso de Faculdade de Tecnologia, Sistemas de Informação e Comunicação, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2018. [http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/331831/1/Meceneiro\\_GabrielDuarte\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/331831/1/Meceneiro_GabrielDuarte_M.pdf).
- Neves, G. M. (2016). *Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos*. 240 f. Dissertação de mestrado. Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais / Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Nobre, P., Pereira, E. B., Lacerda, F. F., Haddad, E. A. & Lay, D. (2019). Solar smart grid as a path to economic inclusion and adaptation to climate change in the Brazilian Semiarid Northeast. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. Bingley, 11 (4), 499-517.
- Oliveira, C. A. A. (2007). *Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias*. 2007. 83 f. Dissertação de mestrado. Curso de Ciências, Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Passos, D., Otto, F., Castro, L. L. M., Roncada, M. A., Hoepers, R. & Wolf, J. G. B. (2017). Eficiência energética em placas fotovoltaicas (projeto segue o sol). *Revista Maiêutica*, Indaial, 3 (1), 21-42.
- Paulescu, M. & Paulescu, E. (2019). Short-term forecasting of solar irradiance. *Renewable Energy*, 143, 985-994. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.075>
- Ruviaro, R. S., Daltrozo, J. G., Garlet, L., Lourenço, W. M. & Santos, I. P. (2018). Análise da variação da eficiência do módulo fotovoltaico em função da temperatura. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 7. Gramado. *Anais*. Gramado: Cbems. 1-8.
- Rebollar, P. B. M. & Rodrigues, P. R. (2011). *Energias Renováveis: Energia Solar*. Copyright © JELARE. (Edição – Livro Digital).
- Severino, A. J. (2018). *Metodologia do trabalho científico*. Ed. Cortez.
- Sousa, V. F. C. L. (2018). *Sistemas passivos na construção em Portugal: Análise de um caso de estudo*. 231 f. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Souza, A. & Aristone, F. (2018). Um estudo da temperatura e da irradiação solar em células fotovoltaicas. *Tecno-Lógica*, Santa Cruz do Sul, 22 (2), 194-200.

Souza, A., Aristone, F., Ferrari, L. F. & Reis, R. R. (2016). Modelagem da temperatura do módulo de células fotovoltaicas em função da temperatura ambiente, velocidade dos ventos e irradiância. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, Curitiba, 5 (4), 504-518.

Tavares, C. V. C. C. (2020). *Os desafios da descarbonização da economia por meio da energia solar no semiárido: estudo de caso em Juazeiro do Norte – CE*. 193 f. Tese de doutorado. Programa de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília.

Torres, R. C. (2012). *Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais*. 164 f. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Energia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Simioni, T. (2017). *O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil*. 222 f. Dissertação de mestrado. Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.