



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
CECAU – COLEGIADO DO CURSO DE
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



Dieferson Waslan Figueiredo

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS COM SISTEMA DE SEGUIDOR SOLAR

Monografia de Graduação

Ouro Preto
2024

Dieferson Waslan Figueiredo

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS COM SISTEMA DE SEGUIDOR SOLAR**

Trabalho apresentado ao colegiado do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Agnaldo José da Rocha Reis, Dr.

Ouro Preto

2024



FOLHA DE APROVAÇÃO

Dieferson Waslan Figueiredo

Análise da Eficiência Energética em Painéis Fotovoltaicos com Sistema de Seguidor Solar

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 19 de dezembro de 2024

Membros da banca

Doutor - Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Paulo Marcos de Barros Monteiro - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Paulo Raimundo Pinto - (Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto)

Agnaldo José da Rocha Reis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou o seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/01/2025



Documento assinado eletronicamente por **Agnaldo Jose da Rocha Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/01/2025, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0837655** e o código CRC **C37A3F36**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pois sem a misericórdia Dele e se Ele não tivesse me dado o fôlego de vida, nada disso seria possível. Agradeço a minha mãe, Ana Maria da Silva, que sempre foi um exemplo de fibra, por ter enfrentado muitas dificuldades na vida e por não ter desistido de seus sonhos. Agradeço aos meus irmãos, Kever, Yorra e Igor, que além de irmãos, são como filhos para mim, pois eles foram muito importantes para o meu amadurecimento. Agradeço a Ana Carolina, pelo incentivo, por ser um porto seguro nos momentos difíceis e pelas puxadas de orelha. Agradeço a toda a minha família e todas as pessoas especiais em minha vida. Agradeço ao meu orientador, Agnaldo José da Rocha Reis, pela paciência, dedicação e por contribuir com os seus conhecimentos. Agradeço também a todos os professores da Universidade, pela dedicação e pelo compartilhamento dos seus conhecimentos.

RESUMO

Em face da crescente necessidade de diversificação da matriz energética do país e das políticas ambientais cada vez mais restritivas, as pesquisas nas últimas décadas não têm poupado esforços no desenvolvimento de fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzem um menor impacto ambiental. Uma das principais fontes de energia alternativa é a solar, que pode ser compreendida, de acordo com a nossa escala de tempo e com os níveis atuais de consumo, como uma fonte inesgotável de energia. Para se ter uma ideia, mesmo com os fenômenos de reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera, estima-se que, a energia solar incidente na superfície terrestre seja da ordem de dez mil vezes superior ao consumo energético mundial. Em virtude disso, a geração de energia a partir de células fotovoltaicas vem adquirindo um grande destaque no âmbito mundial, em pesquisas e com incentivos governamentais. Porém, vale ressaltar que para compensar os altos custos de instalação destes sistemas, faz-se necessário o investimento em pesquisas nesta área para se obter um maior retorno dos sistemas fotovoltaicos. Neste trabalho, foi analisada a influência do posicionamento dos painéis solares em relação aos raios solares e o quanto isso influencia na geração de energia, fazendo uma análise comparativa entre um painel fixo e um painel instalado em um seguidor solar e com a implementação de um controlador de carga do tipo MPPT (Maximum Power Point Tracking), instalados em uma residência na localidade de Antônio Pereira, distrito de Ouro Preto, no estado de Minas Gerais, que possui localização geográfica de 20° 18' 14'' Sul e 43° 28' 53'' Oeste. O seguidor solar desenvolvido neste trabalho permitiu uma maior exposição do painel fotovoltaico aos raios solares, realizado por meio de um controle feito com uma central de comando, para o acionamento dos atuadores lineares a partir da luminosidade captada pelos sensores de luminosidade. Os resultados obtidos foram bastantes promissores, apresentando um aumento de cerca de 41,8% em relação aos sistemas fixos, comprovando o aumento da eficiência na captação das fotocélulas.

Palavras-chaves: Energia fotovoltaica, desempenho energético, seguidor solar, controlador de carga.

ABSTRACT

In view of the growing need to diversify the country's energy matrix and increasingly restrictive environmental policies, research in recent decades has spared no effort in developing alternative energy sources that are less polluting, renewable and have a lower environmental impact. One of the main sources of alternative energy is solar energy, which can be understood, according to our time scale and current consumption levels, as an inexhaustible source of energy. To give you an idea, even with the phenomena of reflection and absorption of solar rays by the atmosphere, it is estimated that the solar energy incident on the Earth's surface is on the order of ten thousand times greater than the world's energy consumption. As a result, energy generation from photovoltaic cells has been gaining great prominence worldwide, in research and with government incentives. However, it is worth noting that to offset the high costs of installing these systems, investment in research in this area is necessary to obtain a greater return on photovoltaic systems. This study analyzed the influence of the positioning of solar panels in relation to the sun's rays and how much this influences energy generation, making a comparative analysis between a fixed panel and a panel installed on a solar tracker and with the implementation of an MPPT (Maximum Power Point Tracking) charge controller, installed in a residence in the town of Antônio Pereira, district of Ouro Preto, in the state of Minas Gerais, which has a geographic location of 20° 18' 14" South and 43° 28' 53" West. The solar tracker developed in this study allowed greater exposure of the photovoltaic panel to the sun's rays, carried out by means of control made with a command center, for the activation of the linear actuators based on the luminosity captured by the luminosity sensors. The results obtained were quite promising, presenting an increase of approximately 41.8% in relation to the fixed systems, proving the increased efficiency in the capture of photocells.

Keywords: Photovoltaic energy, energy performance, solar tracker, charge controller

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Matriz Energética Mundial.....	15
Figura 2: Matriz Energética Brasileira.....	16
Figura 3: Matriz Elétrica Mundial.....	17
Figura 4: Matriz Elétrica do Brasil.....	17
Figura 5: Mapa Solarimétrico do Brasil.....	18
Figura 6: Efeito Fotovoltaico.....	20
Figura 7: Processo de produção da Célula Mono-Si.....	22
Figura 8: Processo de produção da Célula Multi-Si.....	23
Figura 9– Seguidor Solar.....	31
Figura 10 – Painel fotovoltaico.....	35
Figura 11– Central de Comando.....	36
Figura 12: Medidor de consumo PZEM-25.....	37
Figura 13: Controlador de carga MPPT.....	38
Figura 14: Medidor de Energia Solar.....	38
Figura 15: Anemômetro.....	41
Figura 16: Chave fim de Curso.....	42
Figura 17: Atuador eletromecânico.....	42
Figura 18: Dispositivo de Proteção contra Surto - DPS.....	43
Figura 19: Disjuntor.....	44
Figura 20: Estrutura do Seguidor Solar.....	44
Figura 21: Sistema Solar com painéis Fixo.....	46
Figura 22: Painéis instalado no Seguidor solar.....	47
Figura 23– 1º Dia - Comparação da Potência do painel fixo x Potência do seguidor solar.....	51
Figura 24 - 2º Dia - Comparação da Potência do painel fixo x Potência do seguidor solar.....	53
Figura 25– 3º Dia - Comparação da Potência do painel fixo x Potência do seguidor solar.....	55
Figura 26– 4º Dia - Comparação da Potência do painel fixo x Potência do seguidor solar.....	57
Figura 27– 5º Dia - Comparação da Potência do painel fixo x Potência do seguidor solar.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de Materiais.....	44
Tabela 2 - Tabela de Itens e Valores.....	45
Tabela 3 - Irradiação solar diária média mensal para diferentes ângulos de inclinação	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AU	Astronomical Unit (Unidade Astronômica)
PERC	Passivated Emitter and Rear Cell (Emissor Passivado e Contato Traseiro (ou Célula Traseira))
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Rastreador de Ponto de Potência Máxima)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa e Relevância	12
1.2	Metodologia	12
1.2.1	Revisão Bibliográfica	12
1.2.2	Desenvolvimento Computacional	12
1.2.3	Testes de funcionamento e ajustes no protótipo	13
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos específicos	13
1.4	Organização do Texto	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA CIENTÍFICA	14
2.1	Energia Solar	14
2.1.1	História	14
2.1.2	Matriz energética Mundial	15
2.1.3	Matriz Elétrica Mundial e Brasileira	17
2.1.4	Energia Solar no Brasil	18
2.2	Energia Solar Fotovoltaica	19
2.2.1	Efeito Fotovoltaico	19
2.3	Células Fotovoltaicas	21
2.3.1	Células Fotovoltaicas de Silício Cristalino: Primeira Geração	21
2.3.2	Células Fotovoltaicas de Fime Fino: Segunda Geração	23
2.3.3	Células Solares de Terceira Geração	26
2.4	Aspectos Astrômnicos	28
2.4.1	Posicionamento e movimentação do Sol	30

2.4.2	Sistema para Geração de Energia Fotovoltaica.....	31
2.4.3	Rastreamento do Máximo Ponto de Potencia	32
3	MATERIAS E MÉTODOS	34
3.1	Painéis Fotovoltaicos	35
3.2	Central de comando	35
3.3	Medidor de Consumo PZEM - 025.....	36
3.4	Controlador de carga.....	37
3.5	Medidor de Energia Solar.....	38
3.6	Bateria	39
3.6.1	Baterias Automotivas de Chumbo-Ácido.....	39
3.6.2	Baterias LiFePO4 (Lítio Ferro Fosfato).....	40
3.6.3	Comparação de Custo.....	40
3.7	Itens de Segurança do projeto.....	41
3.7.1	Anemômetro	41
3.7.2	Chaves de fim de curso	42
3.7.3	Atuador Eletomecânico.....	42
3.7.4	Dispositivo de Proteção Contra Surtos - DPS	43
3.7.5	Disjuntor	43
3.7.6	Estrutura do Seguidor Solar	44
3.8	Custo do Projeto.....	45
3.9	Experimento	45
3.9.1	Caracterização do Local.....	45
3.9.2	Experimento com os Painéis Fixo.....	46
3.9.3	Experimento com os painéis instalado no Seguidor Solar.....	46
3.9.4	Eficiência das placas Solares.....	48
4	RESULTADOS	49
4.1	Resultados e Discussão	49

4.1.1	Comportamento do 1° dia 08/10/2024	49
4.1.2	Comportamento do 2° Dia 09/10/2024.....	51
4.1.3	Comportamento do 3° dia 10/10/2024	53
4.1.4	Comportamento do 4° Dia 11/10/2024.....	55
4.1.5	Comportamento do 5° Dia 12/10/2024.....	57
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

Com os alarmantes impactos ambientais do aquecimento global causado pelas emissões de gases poluentes provenientes das fontes não renováveis e com a crescente demanda energética na atualidade, se faz cada vez mais importante para os países do mundo que invistam em meios alternativos para a geração de energia a partir de fontes renováveis, também conhecidas como energias alternativas. Uma destas é a energia solar, que é obtida a partir da conversão da luz em energia elétrica (Efeito Fotovoltaico). À vista disso, temos a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com um material semicondutor, o elemento fundamental desse processo de conversão (RIBEIRO, 2020).

1.1 Justificativa e Relevância

Com o aumento do consumo de energia elétrica e com a evolução da tecnologia, faz-se necessário, a busca por sistemas de geração de energia mais eficientes e menos poluentes. Logo, estudar a eficiência energética de sistemas fotovoltaicos é de suma importância na área de Engenharia de Automação, pois por meio desses estudos, é que se conseguirá produzir energia de maneira sustentável e eficiente, reduzindo os impactos ambientais a partir da melhoria dos meios de produção da energia elétrica.

1.2 Metodologia

O trabalho foi realizado conforme os itens descritos a seguir.

1.2.1 Revisão Bibliográfica

O estágio preliminar do desenvolvimento deste trabalho foi feito por meio de um levantamento e estudo sobre painéis fotovoltaicos, suas aplicações no âmbito residencial, as técnicas de análise de eficiência e as metodologias de instalação dos painéis.

1.2.2 Desenvolvimento Computacional

Utilizou-se, neste trabalho, o Software, Fusion 360 para a modelagem do suporte em que as placas fotovoltaicas foram instaladas.

1.2.3 Testes de funcionamento e ajustes no protótipo

Durante o desenvolvimento do protótipo foi realizado os testes de funcionamento dos dispositivos mecânicos e elétricos e também foram realizados os ajustes necessários para a correção dos desvios encontrados que não foram previstos em projeto.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é maximizar a captação de energia em células fotovoltaicas, a partir da incidência ortogonal dos raios solares.

1.3.1 Objetivo Geral

Aumentar o tempo de exposição dos painéis fotovoltaicos, com a utilização de um seguidor solar confeccionado para manter os painéis posicionados perpendicularmente aos raios solares.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar a modelagem da estrutura do seguidor solar no software Fusion 360;
- Fabricar um seguidor solar;
- Fabricar dois atuadores lineares;
- Instalar e testar os dispositivos de comando e proteção do seguidor solar;
- Realizar coleta e análise dos dados do experimento.

1.4 Organização do Texto

Este texto é organizado como se segue. O capítulo 2 trata da fundamentação teórica científica necessárias para o embasamento e pleno entendimento do trabalho desenvolvido. No capítulo 3 aborda-se os materiais e o método empregado no desenvolvimento da parte prática do trabalho. No capítulo 4 apresenta-se os resultados obtidos da análise da eficiência energética dos painéis fotovoltaicos equipados com sistemas de seguidor solar e por fim no capítulo 5 discute as principais conclusões e os trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA CIENTÍFICA

2.1 Energia Solar

2.1.1 História

Ao longo dos séculos, a matriz energética passou por diversas transformações. Durante um longo período na origem da humanidade, a força braçal foi a principal fonte de energia utilizada pelo homem.

Aproximadamente 400 mil anos atrás, ocorreu o primeiro avanço tecnológico: o uso do fogo e de ferramentas para a caça e pesca. Posteriormente, há cerca de 12 mil anos, a Revolução Agrícola deu início à utilização da tração animal, da força dos ventos e das quedas d'água na produção agrícola e pecuária.

Com a colonização e o comércio nas margens do Mediterrâneo, a força dos ventos foi responsável por impulsionar os navios a vela, substituindo os barcos a remo. Durante o Império Romano, entre 31 a.C. e 410 d.C., o carvão vegetal obtido pela queima das árvores foi amplamente utilizado no processo de forja de metais. Nessa mesma época, na China, foram introduzidas grandes inovações em tecnologia hidráulica, como a criação de dispositivos capazes de elevar a água de um nível para outro e de sistemas de irrigação.

Até a Revolução Industrial, a matriz energética mundial não sofreu muitas alterações em termos de diversidade e padrões de uso. O desenvolvimento tecnológico voltado à exploração de recursos energéticos foi notável entre os séculos XVIII e XIX, especialmente no que diz respeito à exploração e ao uso do carvão e de outros combustíveis fósseis. Essa energia foi aplicada nos meios de transporte, na indústria e na geração de energia elétrica.

A descoberta do petróleo ocorreu em meados do século XIX, durante a construção de uma cisterna, quando foi encontrado a cerca de 20 metros de profundidade. Inicialmente, o petróleo foi utilizado apenas para a obtenção de querosene e óleos lubrificantes. A utilização da gasolina como combustível só veio a ocorrer após a invenção dos motores de combustão interna e a produção de automóveis em larga escala. A partir de então, a demanda energética aumentou de maneira célere nos países industrializados, principalmente a demanda por eletricidade e derivados do petróleo.

Entretanto, na década de 1970, o mundo enfrentou uma grave crise do petróleo, devido aos preços exorbitantes, o que fez com que as fontes de energia alternativa passassem a receber maior atenção e investimentos.

Devido aos impactos ambientais causados pela utilização de fontes de energia não renováveis e pelo efeito estufa, atualmente é imprescindível o investimento e o estudo de fontes de energia renováveis.

A fonte de energia renovável mais abundante e menos poluente conhecida na atualidade é a energia solar. Embora tenha sempre estado disponível para a humanidade ao longo da história, seu potencial nunca foi totalmente aproveitado. Considerando que o Sol emite ondas eletromagnéticas e que, em média, 43% da radiação é refletida e absorvida pela atmosfera, apenas 57% é absorvida pela Terra de forma direta e difusa. (DANTAS NETO; OUTROS, 2018).

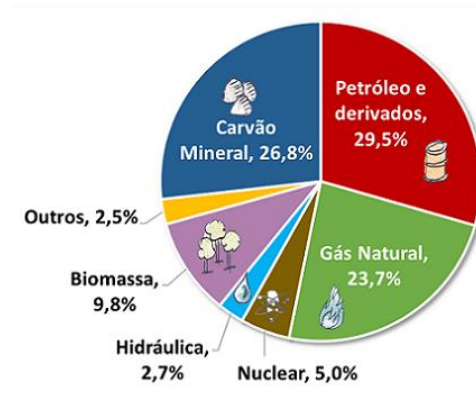
2.1.2 Matriz energética Mundial

Primeiramente, é importante distinguir o conceito de Matriz Energética da Matriz Elétrica. A Matriz Energética refere-se ao conjunto de fontes de energia disponíveis em um país, estado ou no mundo, destinadas a suprir a demanda energética.

Por sua vez, a Matriz Elétrica é uma parte da Matriz Energética, composta apenas por aquelas fontes de energia utilizadas exclusivamente para a geração de energia elétrica.

Atualmente, a matriz energética global é predominantemente composta por fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural.

Figura 1: Matriz Energética Mundial



Fonte: epe-Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

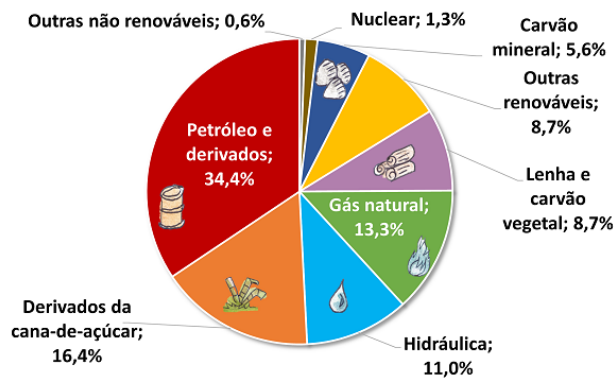
As fontes de energia renovável como solar, eólica e geotérmica, representam apenas 2,5% da matriz energética mundial, sendo classificadas como "outros" no gráfico. Quando

soma-se a participação da energia hidráulica e da biomassa, as fontes renováveis totalizam aproximadamente 5%.

No Brasil, a matriz energética apresenta um perfil bastante diferente quando comparada à matriz mundial. Embora o consumo de energia proveniente de fontes não renováveis seja superior ao de fontes renováveis, o país utiliza uma proporção maior de energias renováveis do que a média global. Somando-se lenha, carvão vegetal, energia hidráulica, derivados de cana e outras fontes renováveis, as fontes de energias renováveis totalizam 44,8%, quase a metade da matriz energética nacional.

A característica da matriz energética brasileira é de grande relevância, uma vez que as fontes não renováveis são as principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa. Como a proporção de energia proveniente de fontes renováveis é maior no Brasil em comparação com outros países, ao calcular a emissão de gases de efeito estufa por habitante, verifica-se que o país emite menos gases de efeito estufa por pessoa do que a maioria das nações. Após a compreensão do conceito de matriz energética, passa-se a analisar o conceito de matriz elétrica e sua formação tanto no contexto mundial quanto no brasileiro.

Figura 2: Matriz Energética Brasileira

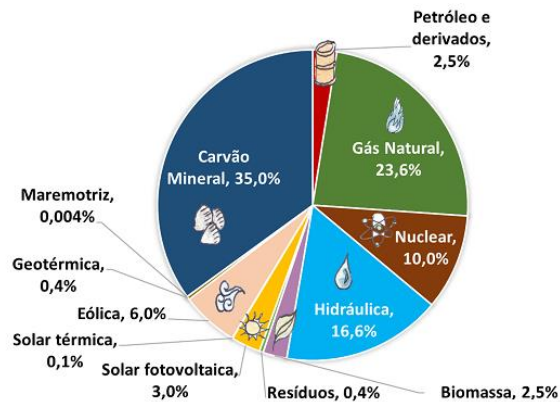


Fonte: epe-Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

2.1.3 Matriz Elétrica Mundial e Brasileira

A matriz elétrica do mundo é formada por combustíveis fósseis como carvão, óleo e gás natural, em termelétricas.

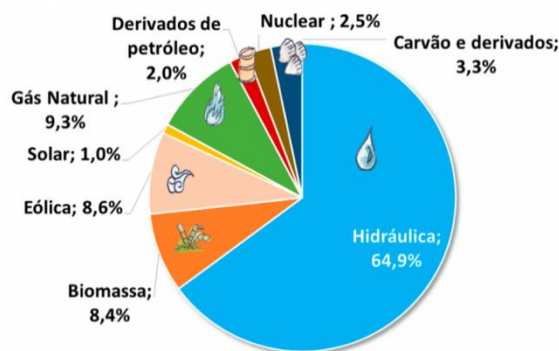
Figura 3: Matriz Elétrica Mundial



Fonte: epe-Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

A matriz elétrica brasileira é mais renovável do que a matriz energética, pois grande parte da energia gerada provém de usinas hidrelétricas. As fontes eólica e solar têm crescido significativamente, contribuindo para que a matriz elétrica seja predominantemente composta por fontes renováveis.

Figura 4: Matriz Elétrica do Brasil



Fonte: epe-Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

2.1.4 Energia Solar no Brasil

Em 2019, a energia solar fotovoltaica representava 1,27% da energia gerada no Brasil. No ano anterior, 2018, o país contava com uma capacidade instalada de aproximadamente 1,1 GW. Já em dezembro de 2020, essa capacidade havia aumentado significativamente, atingindo 7,9 GW, dos quais 4,5 GW eram provenientes de energia solar distribuída, 2,3 GW estavam localizados na Região Nordeste e 1,0 GW na Região Sudeste. Em 2021, o Brasil ocupava a 14ª posição mundial em termos de potência instalada de energia solar, com 13 GW, e se destacava como o 11º maior produtor de energia solar, com uma geração de 16,8 TWh. Finalmente, em outubro de 2022, o país alcançou uma capacidade instalada de 21 GW.

O Nordeste brasileiro, por ser uma região ensolarada e próxima ao equador, apresenta condições mais favoráveis para a instalação de centrais solares. Nessa região, estão localizadas as maiores usinas da América Latina: o Complexo Solar Lapa e o Parque Solar Ituverava.

O Brasil possui a maior incidência de irradiação solar do mundo, como pode ser observado no mapa solarimétrico da radiação solar direta incidente no país. Como mostrado na Figura 5. Outro fator importante que contribuiu para a utilização da energia solar no Brasil é a presença de grandes reservas de quartzo. Isso pode gerar uma vantagem competitiva na produção de silício de alta pureza, bem como na fabricação de células e módulos solares, produtos que possuem alto valor agregado. (NASCIMENTO, 2022).

Figura 5: Mapa Solarimétrico do Brasil



Fonte: GHI Solar Map, 2014.

2.2 Energia Solar Fotovoltaica

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez no século XIX, quando o cientista Alexandre Becquerel demonstrou, por meio de um experimento, a possibilidade de conversão da radiação luminosa em energia elétrica. O experimento consistiu na exposição à radiação luminosa de um eletrodo mergulhado em uma solução de eletrólito. Esse mesmo efeito foi observado por Adams e Day na Inglaterra em 1877, utilizando um sólido chamado selênio. A primeira célula solar com selênio foi produzida em 1883 e apresentava uma eficiência de 1%.

Na década de 1930, diversos pioneiros da física do estado sólido, como Lange, Grondahl e Schottky, fizeram importantes contribuições para a compreensão do efeito fotovoltaico em junção com o estado sólido. Em 1941, Ohl obteve a primeira fotocélula de silício monocristalino. No ano de 1949, Billing e Plessnar mediram a eficiência de fotocélulas de silício cristalino, ao mesmo tempo em que a teoria da junção P-N de Shockley foi divulgada. Porém, foi apenas em 1954 que surgiu a fotocélula de silício com características semelhantes às encontradas hoje, alcançando uma eficiência de 6%.

Inicialmente, as células solares foram amplamente empregadas na década de 1970 em programas espaciais. O grande impulso para sua aplicação terrestre ocorreu após a crise mundial de energia na mesma década. Esse evento levou a um aumento significativo em sua utilização. O crescimento da utilização das células solares tem sido acompanhado por inovações que permitem o aumento da eficiência de conversão de energia das fotocélulas, além de uma redução significativa em seus custos.

2.2.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é a criação de uma corrente elétrica a partir da exposição solar do módulo fotovoltaico. As células fotovoltaicas funcionam a partir da absorção de fótons, que são elementos de energia presentes na luz do sol.

O fóton por sua vez, libera elétrons que fluem através das células, gerando a energia elétrica. Esse efeito é caracterizado no semicondutor pela presença de uma banda de energia onde estão presentes os elétrons (banda de valência) e outra apresenta vazia (banda de condução) (BRAGA, 2008).

Atualmente os elementos mais aplicados no desenvolvimento dos dispositivos semicondutores, como as células fotovoltaicas, são o silício e o germânio. Porém as empresas tem optado em trabalhar mais com o silício na fabricação dos painéis

fotovoltaicos.

A atenção a estas matérias, se dá devido a sua pureza. Por outro lado, a adição de outro material (impureza), de forma adequada, pode tornar um condutor inferior em um bom condutor de eletricidade. A essa técnica se dá o nome de ‘dopagem’ (BOYLESTAD et al., 2018). Um material em que é aplicado esta técnica, é o cristal de silício puro, pois o mesmo não apresenta elétrons livres na sua camada de valência, portanto isso o torna um mal condutor elétrico. Esse estado pode ser alterado, quando adicionamos porcentagens de outros elementos.

No caso do silício, que apresenta apenas quatro elétrons em sua camada de valência, quando realiza-se a sua dopagem com átomos de fósforo, que possui cinco elétrons de ligação, haverá um elétron em excesso. Como este elétron está fracamente ligado a seu átomo de origem qualquer quantidade de energia térmica faz com que este elétron seja removido, indo para a banda de condução. Ao fósforo dá-se o nome de dopante n ou impureza n (FERREIRA, 2014).

Na figura 6 pode-se observar como ocorre o efeito fotovoltaico a partir da junção PN, o elemento do tipo P está carregado positivamente (lacunas), já o elemento do tipo N apresenta excesso de elétrons. Quando esta junção é exposta a radiação luminosa os elétrons livres do semiconductor do tipo N migraram para o semiconductor do tipo P para ocuparem os espaços vazios (lacunas). Essa migração não ocorre indefinidamente, pois forma-se um campo elétrico na área de junção que impede que os elétrons continuem fluindo.

Ao receber fotos de luz visíveis, os elétrons são energizados, mas não conseguem fluir da camada N para a camada P. Quando as duas camadas externas são conectadas, a corrente elétrica gerada pela passagem dos elétrons de uma camada para outra pode ser aproveitada. Esse é o princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.

Figura 6: Efeito Fotovoltaico



Fonte: BlueSol energia solar, 2022.

2.3 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos responsáveis por converter a energia presente na luz do sol em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico.

Para a fabricação dos painéis fotovoltaicos, utilizam-se diversas células solares interligadas em série, formando os módulos fotovoltaicos, popularmente conhecidos como placas solares.

Atualmente, existem diversos tipos de células fotovoltaicas, e sua classificação é feita com base no material e no processo de refinação. Os principais tipos são confeccionados em silício cristalizado, podendo ser monocristalino (mono-Si) ou policristalino (multi-Si).

Existem diferentes materiais e técnicas empregados na fabricação das células fotovoltaicas. A primeira geração de células solares começou a ser desenvolvida e comercializada na década de 1950, e o principal material utilizado como semicondutor foi o silício cristalizado, que ainda é a tecnologia mais empregada no mundo devido à sua alta eficiência em comparação com outras tecnologias.

A partir da década de 1990, iniciou-se a segunda geração de células solares, baseadas na tecnologia de filme fino. No entanto, essa geração não obteve grande aceitação devido à sua menor eficiência.

Atualmente, com o desenvolvimento de novos materiais e técnicas de fabricação, começou-se a terceira geração de células fotovoltaicas, que apresenta maior eficiência em comparação com as gerações anteriores. No entanto, essas tecnologias ainda não conseguiram alcançar resultados satisfatórios para a produção em larga escala.

2.3.1 Células Fotovoltaicas de Silício Cristalino: Primeira Geração

2.3.1.1 Células de Silício Mono Cristalino (Mono-SI)

São as mais eficientes, pois são fabricadas a partir de um único cristal de silício. Por isso o prefixo mono, cujo significado se origina do grego que quer dizer único.

O silício purificado acha-se em um estado policristalino e precisa ser mono cristalizado por uma cultura de cristais antes de ser utilizado na fabricação da célula fotovoltaica de silício mono cristalino.

O método de Czochralski, batizado em homenagem ao seu criador, o químico polonês Jan Czochralski é o mais utilizado para obtenção do silício mono cristalino. O

silício purificado é derretido em um forno de fundição a uma temperatura aproximada de 1420°C. Nessa poça de fusão de silício, é adicionado uma semente de mono cristal de silício. Por consequência, à medida que forno de fundição gira lentamente e a poça de fusão vai esfriando, a semente de cristal de silício é vagarosamente erguida e orienta os átomos de silício da poça de fusão, que se cristalizam de forma única.

Logo, é formado um novo lingote de um mono cristal, medindo cerca de 30 cm de diâmetro e podendo chegar a vários metros de comprimento. Esse lingote cilíndrico de silício mono cristalino é cortado para formar uma barra de forma quadrada, em seguida realiza-se o fatiamento desta barra, gerando lâminas com a espessura de cerca de três décimos de milímetro de espessura, as quais dão origem as células fotovoltaicas. Seguidamente, as lâminas passam pelo processo de dopagem para a criação das camadas Tipo-P e Tipo-N e recebem uma camada antirreflexiva e os contatos frontais e traseiros.

As células solares de mono – Si, são facilmente identificadas pois apresentam uma cor uniforme e estas células apresentam uma eficiência de 15% a 18%. Por último, são realizados cortes nas extremidades das células, fornecendo as mesmas um formato octogonal ou arredondado para evitar a ocorrência de curtos-circuitos.

Figura 7: Processo de produção da Célula Mono-Si.



Fonte: Portal Solar, 2014.

2.3.1.2 Células de Silício Policristalino (Multi-SI)

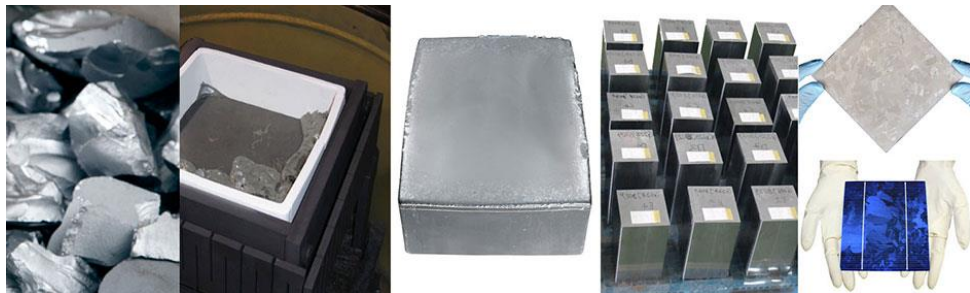
As células solares policristalinas também são produzidas a partir do silício purificado, porém há uma diferença no seu processo de fabricação. O silício é derretido em um forno de fundição e moldado em forma de lingotes. Com o processo de aquecimento e resfriamento, o bloco se torna sólido, adquirindo uma estrutura cristalina bastante homogênea. Como o silício se cristaliza livremente durante esse processo, surgem diversos cristais, o que explica o nome "policristalino". Devido à presença de múltiplos cristais, as células policristalinas se tornam um

pouco menos eficientes, pois esses cristais permitem que os elétrons dos átomos se recombinem mais facilmente.

O processo de fabricação das células policristalinas é semelhante ao das células monocristalinas, incluindo o corte do lingote e das lâminas, dopagem, e a aplicação da camada antirreflexiva e dos contatos. Uma das diferenças é que, nas células policristalinas, não é necessário cortar as bordas finais dos lingotes. Como resultado, a produção das células policristalinas tem um custo de fabricação mais baixo, tornando o seu preço mais competitivo.

Por esse motivo, os painéis fotovoltaicos com células policristalinas são os mais comercializados. A eficiência das células de silício policristalino varia entre 13% e 15%.

Figura 8: Processo de produção da Célula Multi-Si.



Fonte: Portal Solar, 2014.

2.3.2 Células Fotovoltaicas de Fime Fino: Segunda Geração

2.3.2.1 Célula solar de Silício Amorfo (a-SI)

O silício amorfo, que significa "sem forma", possui uma rede irregular em vez de uma estrutura cristalina. Sua produção é realizada a partir do silano gasoso (SiH_4), que, ao ser submetido ao calor nos reatores de plasma, forma o silício hidrogenado (a-Si:H). O processo de dopagem do silício amorfo ocorre com a utilização de gases, sendo o Hidreto de Boro (B_2H_6) usado na camada Tipo-P e a fosfina (PH_3) aplicada na camada Tipo-N.

A fabricação da célula de silício amorfo é realizada por meio do depósito de uma finíssima camada de cada tipo de material dopado sobre um substrato de vidro, plástico ou metal. Entre as camadas, é depositada uma camada de silício intrínseco (não dopado, Tipo-I), responsável por captar a passagem de elétrons entre as partes positiva e negativa.

A eficiência das células de silício amorfo é baixa, variando entre 5% e 9%. Isso se deve à hidrogenação do material, causada pela degradação induzida pela luz, conhecida

como efeito Staebler-Wronski. Para melhorar essa eficiência, aplica-se uma técnica de empilhamento de camadas Tipo-P e Tipo-N dopadas com diferentes materiais, como o germânio (a-SiGe). Essa técnica permite uma maior captação da radiação solar, mas também aumenta o custo de produção dessas células. Essas células são conhecidas como células de múltiplas junções.

2.3.2.2 Célula de Seleneto de Cobre Índio (CIS)

As células fotovoltaicas de seleneto de cobre índio (CIS) são produzidas a partir de uma fina camada de cobre, índio e selênio (CuInSe_2) depositada sobre um substrato, que pode ser vidro ou metal flexível. A fabricação da célula CIS começa com a aplicação de uma fina camada de molibdênio por meio do processo de pulverização catódica. A camada Tipo-P é aplicada por meio do processo de vaporização simultânea de CuInSe_2 em uma câmara de vácuo. Para a camada Tipo-N, utiliza-se óxido de zinco dopado com alumínio (ZnO:Al).

Por fim, entre as camadas Tipo-P e Tipo-N, aplica-se uma camada de sulfato de cádmio dopado com alumínio (CdS:Al), com o objetivo de reduzir as perdas provocadas pela combinação entre o óxido de zinco e o CIS.

Em geral, as células CIS apresentam boa durabilidade e uma eficiência superior à das demais células de filme fino, variando entre 11% e 14%, e não sofrem degradação pela luz. No entanto, sua operação é instável em ambientes úmidos e quentes, o que exige uma boa selagem dos módulos.

2.3.2.3 Células de Disseleneto de Cobre Índio e Gálio (CIGS)

São células constituídas pelos mesmos elementos das células CIS mais a adição de gálio, o qual forma uma liga com o índio, proporcionando melhor desempenho às células. Porém, a sua eficiência é um pouco menor: 10%. Na fabricação das células CIGS, a camada de Cu (In, Ga) Se_2 - disseleneto de cobre, índio e gálio é aplicada sobre o substrato previamente revestido com o molibdênio. Sobre elas, são aplicadas, respectivamente, as camadas de sulfato de cádmio (CdS - Al) e óxido de zinco dopado com alumínio (ZnO - Al).

2.3.2.4 Células de Telureto de Cádmio (CdTe)

O substrato de vidro das células de Telureto de cádmio, recebem em sua parte traseira uma camada de Oxido Transparente condutivo (TCO), que age como contato frontal. Da mesma forma que as células de CIS/CIGS, as células solares de CdTe não se degradam sob a luz. Porém, sua fabricação apresenta riscos ambientais devido à toxicidade do cádmio e necessita de processos rigorosos de controle. Embora as células solares de CdTe já tenham alcançado eficiência de 16,5% em laboratório, a sua eficiência em módulos comercializados é de 6% a 9%.

2.3.2.5 Célula Solar de Arseneto Gálio (GaAS)

São as células solares que apresentam a maior eficiência entre as células fotovoltaicas de filme fino de única junção. Chegando a ultrapassar os 30%. São resistentes ao calor, possuem boas propriedades elétricas e maior desempenho. Isso é proporcionado pelo semicondutor GaAS, que tem melhores propriedades eletrônicas se comparado ao silício. Porém devido ao seu oneroso processo de fabricação, que não permitiu a sua popularização, acabaram ficando restritas, as indústrias aeroespacial e militar, que as utilizações na confecção de satélites, espaçonaves e aeronaves.

2.3.2.6 Células Solares de Multijunção

As células solares de multijunção são células de filme fino formadas pelo empilhamento de múltiplas camadas do tipo-P e N ou dopadas com diferentes tipos de materiais semicondutores. Dessa forma, a célula obtém maior eficiência ao aproveitar uma parte mais ampla do espectro eletromagnético da radiação solar, pois cada material absorve fótons de diferentes frequências, tanto altas quanto baixas.

Para o seu processo de fabricação, utilizam-se duas técnicas. A primeira é o empilhamento mecânico, no qual cada camada (Tipo-P e N) é tratada como um dispositivo separado e recebe contatos próprios para a captação de elétrons. Na segunda, as camadas semicondutoras são ligadas em série, de modo que toda a célula possua apenas dois terminais, um na parte frontal e outro na traseira. Essa configuração é conhecida como monolítica.

Ambas as formas de fabricação das células de multijunção demandam processos complexos, o que torna essa tecnologia cara e sofisticada. As maiores eficiências em

células solares em laboratório foram alcançadas com células multijunção. Uma célula com quatro junções pode ultrapassar os 46,0% de eficiência.

2.3.3 Células Solares de Terceira Geração

As células fotovoltaicas de terceira geração, são as mais recentes na indústria e utilizam tecnologias ainda em desenvolvimento. Dentre as células de terceira geração se destacam a PERC, células híbridas de heterojunção, células de perovskita, células orgânicas e células sensibilizadas por corantes.

2.3.3.1 Células PERC

As células fotovoltaicas PERC (Passivated Emitter and Rear Contact, em inglês, ou Emissor Passivado e Contato Traseiro, na tradução livre) são células de silício cristalino mais finas, fabricadas com uma camada adicional de passivação. Uma das características desse tipo de célula fotovoltaica é a economia de matéria-prima, pois sua fabricação é feita a partir de lâminas de silício mais finas (menores que 200 micrômetros), o que contribui para a redução dos custos de fabricação. No entanto, devido à redução da espessura do semicondutor, ocorre uma diminuição na eficiência da célula, similar ao que acontece com as células de filme fino, devido à recombinação de elétrons na área de junção.

Para resolver esse problema, as células PERC recebem uma camada de passivação muito fina na parte traseira, o que reduz a velocidade de recombinação dos elétrons na superfície do silício, aumentando sua eficiência. A camada de passivação também tem outra função: refletir a luz na parte de trás da célula, fazendo com que os raios solares atravessem novamente o silício, o que aumenta a captação de elétrons e, conseqüentemente, a eficiência na geração de energia do dispositivo

2.3.3.2 Célula Solar Híbrida de Heterojunção (HJT/HIT)

As células solares de heterojunção são compostas por duas células fotovoltaicas de silício cristalino, desenvolvidas com camadas de silício amorfo, uma pura (intrínseca) e duas dopadas, nas suas duas superfícies. A fabricação da célula de heterojunção é realizada pela deposição de silício amorfo sobre a célula de silício cristalino por meio de um processo chamado Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition (Deposição de Vapor Químico Intensificada por Plasma, na tradução livre).

Uma das vantagens desse tipo de célula é seu coeficiente de temperatura menor, ou seja, elas são menos influenciadas pelo aumento da temperatura, sendo indicadas para aplicações em locais mais quentes. Outra vantagem é que, devido à combinação da tecnologia tradicional de silício cristalino com a de silício amorfo, há um aumento de 20% na eficiência das células. Esses fatores oferecem a essa tecnologia um grande potencial de crescimento em sua aplicação.

Porém, seus custos de fabricação são elevados, devido ao maior consumo de matéria-prima e à complexidade no processo de produção dos painéis.

2.3.3.3 Célula Solar de Perovskita

A perovskita é um mineral composto por óxido de cálcio e titânio, com estrutura cristalina e fórmula química CaTiO_3 , descoberta nos Montes Urais, na Rússia, pelo mineralogista alemão Gustav Rose em 1839. Uma das propriedades físicas desse material é a supercondutividade. Atualmente, existem perovskitas totalmente inorgânicas, mas, em geral, as células solares fabricadas com esse material são híbridas, ou seja, combinam perovskita inorgânica com compostos orgânicos.

A família de perovskitas com capacidade de produzir o efeito fotovoltaico apresenta uma estrutura composta por um cátion inorgânico (como chumbo ou estanho), um cátion orgânico e um halogênio, que pode ser iodo, cloro ou bromo.

Células solares à base de perovskita têm se mostrado uma grande aposta na indústria fotovoltaica, pois apresentam baixos custos de produção e alcançaram alta eficiência em poucos anos de pesquisa, já superando os 25%, o que é mais alto do que a eficiência das células de silício cristalino. No entanto, existem alguns desafios na tecnologia dessas células, como a curta durabilidade e a instabilidade em ambientes quentes e úmidos, além da presença de chumbo na estrutura desses materiais, o que os torna altamente tóxicos ao meio ambiente.

2.3.3.4 Célula Fotovoltaica Orgânica (OPV)

As células solares orgânicas são obtidas a partir de polímeros conjugados, que apresentam propriedades semelhantes às dos metais e dos semicondutores. Essas células são compostas por um eletrodo transparente, responsável por absorver a luz incidente, uma

camada fotossensível, conhecida como camada ativa, e um eletrodo metálico (OPV - Organic Photovoltaic, ou Fotovoltaica Orgânica).

A fabricação dessas células é realizada por meio de técnicas como impressão por serigrafia, impressão por lâminas, pintura com pincel, impressão por jato de tinta, rotogravura, flexografia e revestimento por pulverização. Essa tecnologia possui um baixo custo de produção, mas apresenta alguns desafios, como a instabilidade na operação devido à degradação ambiental, quando não há uma proteção eficaz, além de seu desempenho ser influenciado pela espessura das camadas dos materiais semicondutores.

2.3.3.5 Célula solar sensibilizada por corante (Dye – sensitized solar cell – DSSC)

As células solares sensibilizadas por corante, também conhecidas como células de Grätzel, pertencem a um subgrupo de células fotovoltaicas híbridas, pois são formadas por materiais orgânicos e inorgânicos. Seu sistema de funcionamento é composto por um ânodo fotossensibilizado, baseado em um material semicondutor, um eletrólito e um cátodo fotoeletroquímico. Surgiram a partir de estudos realizados pelos químicos Michael Grätzel e Brian O'Regan.

As células DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells) são tipicamente construídas a partir de um substrato com alta condutividade e mais de 80% de transparência, sobre o qual são aplicadas duas folhas de materiais transparentes condutores, que agem como coletores de corrente. Junto a essa estrutura, são depositados o semicondutor e o catalisador.

Essas células apresentam uma eficiência média entre 8% e 14%, mas, como desvantagens, apresentam instabilidade em climas adversos, risco de toxicidade e corrosão quando fabricadas com chumbo, além de uma baixa vida útil, inferior a 10 anos.

2.4 Aspectos Astrômicos

Como uma das propostas deste trabalho é desenvolver um sistema eletrônico capaz de seguir o movimento do Sol, faz-se necessário um pequeno estudo sobre o comportamento desse astro e as características que influenciam a radiação solar na Terra.

O Sol é a estrela central do sistema solar, com uma massa 332.900 vezes maior do que a da Terra e um volume 1.300.000 vezes maior que o do nosso planeta. Ele está situado a uma distância de cerca de 150 milhões de quilômetros, ou uma unidade astronômica (UA), da Terra. Essa distância varia ao longo do ano, sendo a menor distância de 147,1

milhões de quilômetros, no periélio, e a maior cerca de 152,1 milhões de quilômetros, no afélio, que ocorre em torno do dia 4 de julho. A luz do Sol demora aproximadamente 8 minutos e 18 segundos para chegar à Terra.

A superfície visível do Sol, conhecida como fotosfera, é a parte na qual o Sol se torna completamente opaco à luz visível. Estima-se que a espessura da fotosfera seja de dezenas a centenas de quilômetros, e a temperatura média nessa camada é de aproximadamente 5775 K. A transmissão de energia do Sol para a Terra ocorre por meio da radiação eletromagnética de ondas curtas, pois 97% da radiação solar está compreendida no comprimento de onda na faixa de 0,3 a 3,0 μm (REIS, 2000).

A luz do Sol é a principal fonte de energia da Terra. A quantidade de potência que o Sol deposita por unidade de área exposta à luz solar é de aproximadamente 1368 W/m² a uma unidade astronômica do Sol, ou seja, na órbita terrestre, com o planeta recebendo por segundo o equivalente a 50.000.000 GW. No entanto, a atmosfera terrestre atenua a quantidade de luz que chega à superfície da Terra, reduzindo a potência por unidade de área recebida para aproximadamente 1000 W/m² no zênite, em um dia de céu claro. Tal atenuação ocorre devido às flutuações climáticas, que fazem com que a radiação solar incidente no limite superior da atmosfera sofra diversas reflexões, dispersões e absorções até chegar ao solo (REIS, 2000). Apenas cerca de 25% da radiação solar chega à superfície da Terra sem interação; a essa radiação dá-se o nome de radiação solar direta. A incidência total da radiação solar sobre um corpo no solo é a soma das componentes direta, difusa e refletida. A radiação direta é a proveniente diretamente do disco solar, sem sofrer alterações em sua direção, além da resultante da refração atmosférica.

A radiação difusa é aquela que sofre alguma mudança na direção dos raios solares, por reflexão ou espalhamento na atmosfera. Por fim, a radiação refletida depende das características do solo e da inclinação do dispositivo captador (REIS, 2000).

A quantidade de radiação solar recebida por um determinado ponto na superfície da Terra está diretamente relacionada com a duração do dia, além de ser influenciada por dois ciclos: o ciclo anual e o ciclo diário (ENIO BUENO PEREIRA ET AL., 2024).

2.4.1 Posicionamento e movimentação do Sol

A Terra realiza dois movimentos principais. O primeiro é chamado de translação, que é a órbita realizada pela Terra ao redor do Sol. O segundo é o giro em seu próprio eixo, conhecido como rotação. Cada volta ao redor do Sol representa um ano, enquanto a rotação em torno de seu próprio eixo representa um dia. A translação da Terra ao redor do Sol ocorre devido ao campo gravitacional gerado pela massa do Sol, o que faz com que a Terra permaneça presa à sua órbita. O giro completo da Terra ao redor do Sol tem uma duração média de 365 dias, 5 horas, 47 minutos e 36 segundos. A Terra se move no espaço a uma velocidade orbital média de 29,78 km/s. A trajetória descrita pela órbita da Terra ao redor do Sol é muito semelhante a um círculo, mas, por não ser um círculo perfeito, é chamada de elíptica.

Diferente do que muitas pessoas acreditam, as estações do ano não ocorrem devido à distância da Terra em relação ao Sol. Os fenômenos responsáveis pelas mudanças de estação são os solstícios, que correspondem à posição de cada hemisfério em relação ao Sol. Os solstícios ocorrem duas vezes por ano, em junho e dezembro. Quando ocorre o solstício de verão, significa que a duração do dia é a mais longa do ano. Já no solstício de inverno, a duração da noite é a mais longa do ano. No hemisfério norte, o solstício de verão ocorre por volta do dia 21 de junho, e o solstício de inverno, por volta do dia 21 de dezembro. Essas datas marcam o início das respectivas estações do ano nesse hemisfério. No hemisfério sul, o fenômeno é simétrico: o solstício de verão ocorre em dezembro e o solstício de inverno ocorre em junho.

Outro movimento principal da Terra é o de rotação. Cada giro da Terra ao redor de si mesma tem uma duração de 23 horas, 56 minutos, 4 segundos e 9 centésimos. O eixo imaginário da Terra transpassa o planeta do polo norte ao sul e possui uma inclinação de aproximadamente $23,5^\circ$. À medida que a Terra realiza o movimento de rotação (no sentido anti-horário), parte de sua superfície fica exposta ao Sol, o que dá origem ao dia e à noite. Considerando o diâmetro da linha do equador, pode-se afirmar que o movimento de rotação da Terra ocorre a uma velocidade média de 1674 km/h. Como podemos ver, tais variações na posição da Terra em relação ao Sol influenciam a intensidade da radiação solar em um plano horizontal na superfície terrestre (REIS, 2000).

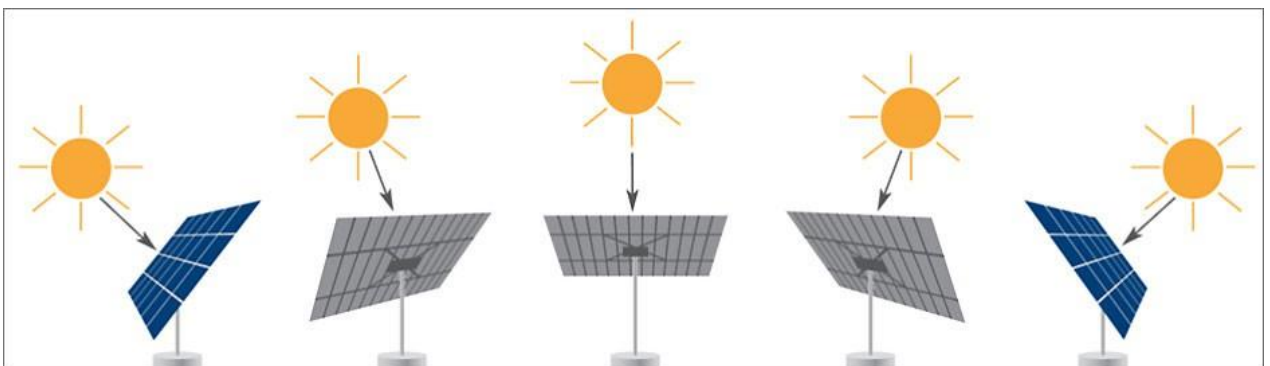
2.4.2 Sistema para Geração de Energia Fotovoltaica

A eficiência dos painéis solares é relativamente baixa se comparada à quantidade de energia disponibilizada pelo Sol que chega à Terra todos os dias. Como já se conhece bem o movimento do Sol e como a direção dos raios solares afeta diretamente a captação da energia radiante, impactando ainda mais a eficiência dos painéis, sistemas de rastreamento solar vêm sendo desenvolvidos como uma forma de extrair o máximo de eficiência dos painéis (SILVA, 2017).

Em todas as formas de instalação dos painéis, a elevação do conjunto deve ser ajustável. Para os sistemas em que as placas ficam fixas, esse ajuste deve ser realizado quatro vezes ao ano, conforme as estações. Outra forma eficiente de ajustar os painéis em relação ao Sol é utilizando a técnica de rastreamento da posição solar. Isso pode ser feito por meio de um sistema de controle com configurações pré-determinadas, que seguirá o movimento do Sol. Assim, é possível garantir que a face dos painéis fotovoltaicos fique sempre o mais próxima possível de uma perpendicular aos raios solares incidentes, maximizando a exposição (LOPEZ, 2012).

Dessa forma, o sistema de rastreamento solar (Solar Trackers) tem a função de realizar ajustes autônomos na posição dos painéis ao longo do dia, permitindo que os painéis permaneçam sempre perpendiculares aos raios solares incidentes. Isso resulta em uma maior eficiência na conversão energética por unidade de tempo (MARINESCU, 2006).

Figura 9– Seguidor Solar.



Fonte: Portal Solar, 2014.

2.4.2.1 Sistema Residencial

No Brasil a forma correta de se posicionar os painéis fotovoltaicos instalados sobre os telhados das residências e comércios é voltado para o norte, possibilitando que os painéis produzam uma maior quantidade de energia (EDUARDO AQUINO, 2024).

2.4.2.2 Sistema Fixo

Para sistemas fotovoltaicos fixos, conectados à rede elétrica, o ângulo de inclinação é igual à latitude do local para o melhor aproveitamento da radiação solar. Devem ser feitos ajustes quatro vezes ao ano relativo às estações climáticas (LOPEZ, 2012).

2.4.3 Rastreamento do Máximo Ponto de Potencia

O rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês Maximum Power Point Tracking) é um método utilizado em sistemas de energia solar para maximizar a produção de energia elétrica a partir dos painéis solares. O objetivo é encontrar o ponto de operação ótimo dos painéis solares, que é o ponto onde a potência gerada é a máxima possível para uma dada condição de iluminação.

O princípio de funcionamento do MPPT é baseado no fato de que a potência gerada pelos painéis solares é diretamente proporcional à corrente e à tensão de saída do painel. A partir da curva característica tensão-corrente (V-I) dos painéis solares, é possível determinar o ponto de operação ótimo, que corresponde ao ponto onde a potência é máxima. O MPPT utiliza algoritmos para ajustar a tensão e a corrente de saída dos painéis solares, de forma a manter a operação no ponto de máxima potência.

Existem diversos algoritmos utilizados para implementar o MPPT, como o Perturba e Observa, Incremental Conductance e Ripple Control. Todos eles visam encontrar o ponto de máxima potência por meio da medição da tensão e da corrente de saída dos painéis solares e realizando ajustes constantes na tensão ou corrente de saída, de acordo com o algoritmo utilizado, até que o ponto de máxima potência seja alcançado (ESRAM;CHAPMAN, 2007).

O uso do MPPT tem se mostrado eficiente para melhorar a eficiência e a produção de energia dos sistemas solares. Isso porque, sem o MPPT, os painéis solares operam em pontos de baixa potência, o que resulta em menor eficiência e produção de energia. Com o

MPPT, é possível ajustar a operação dos painéis solares para o ponto de máxima potência, o que resulta em maior eficiência e produção de energia (FEMIA et al., 2005).

Porém, o uso do MPPT pode apresentar alguns desafios, como o aumento de custos do sistema e a complexidade da implementação. Além disso, a eficiência do MPPT pode ser influenciada por fatores como temperatura, sombreamento e orientação dos painéis solares (SERA; TEODORESCU; RODRIGUEZ, 2007).

Apesar dos desafios, o MPPT é uma técnica fundamental para maximizar a produção de energia elétrica em sistemas solares. Com o uso de algoritmos eficientes e o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais avançadas, o MPPT pode se tornar ainda mais eficiente e acessível, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas solares mais eficientes e sustentáveis (ZHOU; YANG; FANG, 2008).

3 MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão descritos os materiais utilizados na montagem do seguidor solar, bem como os métodos utilizados na coleta e análise dos dados. O protótipo do seguidor solar foi desenvolvido com uma estrutura metálica, sustentando dois painéis fotovoltaicos em um eixo inclinado. Conectado ao eixo estão dois atuadores eletromecânicos, um responsável pela correção do ângulo conforme as estações do ano e o outro para realizar o movimento de rastreamento do sol. Todo o controle do movimento do painel é realizado por uma central de comando. A coleta dos dados foi realizada por um medidor de consumo, PZEM-025 NFE DC, com uma faixa de medição de tensão de 0 a 300 volts e corrente de 0 a 100 amperes.

Neste projeto utilizou-se um sistema off-grid, um sistema autônomo de geração e armazenamento de energia, que funciona independentemente da rede elétrica pública (rede de distribuição).

Esse tipo de sistema é essencialmente autossuficiente, sem a necessidade de conexão com a infraestrutura elétrica convencional, e é amplamente utilizado em áreas remotas ou em locais onde o fornecimento de energia elétrica da rede é inacessível ou inadequado.

Em sua essência, o sistema off-grid visa capturar, armazenar e gerenciar a energia gerada localmente (geralmente a partir de fontes renováveis, como energia solar ou energia eólica) e utilizá-la conforme a necessidade, mantendo um balanceamento entre a produção e o consumo de energia.

Os materiais utilizados na construção do sistema estão listados e detalhados a seguir:

- Duas placas solar fotovoltaica de 155w – Resun RS6E155M;
- Uma central de comando;
- Um medidor de consumo de energia – PZEM-025;
- Um controlador de carga MPPT – XTRA2210N-XDS2;
- Um medidor de energia solar Modelo MES-100;
- Quatro chaves de fim de curso;
- Um anemômetro;
- Dois atuadores eletromecânico;
- Uma bateria de automóvel de 12v 60Ah;
- Cabos e conectores;

3.1 Painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos utilizados são da marca Resun RSM que possuem 36 células, com potência máxima de 155 Watts cada, tensão de pico de 24,46 volts, corrente de pico 8,31 amperes e eficiência de 18,5% (NEOSOLAR, 2024).

Figura 10 – Paineis fotovoltaicos.



Fonte: NeoSolar, 2010.

3.2 Central de comando

Para a realização do comando de movimento dos painéis utilizou-se uma central composta por duas placas de circuito impresso, estas placas estão equipadas com o CI D2822A, sendo uma responsável por realizar o controle da posição dos painéis conforme as estações do ano e a outra responsável por realizar o rastreamento da posição do sol ao longo do dia.

Utilizou-se também nesta central dois receptores para controle remoto, o que permite ao usuário posicionar o painel conforme a sua necessidade e um programador horário, programado para realizar o retorno do painel à sua posição inicial ao final do dia.

O **CI D2822A** é utilizado para controlar o motor que ajusta a posição do painel solar. O CI recebe sinais de direção, que determinam a rotação do motor de forma precisa. Esse controle de movimento é baseado nas diferenças de intensidade dos sensores de luz, que indicam qual direção o motor deve mover o painel. O **D2822A** envia sinais de controle para o motor, ajustando sua posição de forma contínua e suave ao longo do dia.

Os ajustes são feitos de maneira autônoma, ou seja, o sistema é capaz de realizar os ajustes na posição do painel solar sem intervenção humana. O feedback dos sensores de luz é crucial para o funcionamento autônomo do sistema. Quando um sensor detecta mais

luz do que o outro, o sistema realiza o ajuste necessário automaticamente.

Figura 11– Central de Comando.



Fonte: Do Autor.

3.3 Medidor de Consumo PZEM – 025

Para monitorar a potência gerada pelo sistema fotovoltaico, foi utilizado o medidor de consumo PZEM-025 (ROBOBUILDERS, 2024), que possui especificações que permitem a medição precisa de tensão e corrente em sistemas de energia de corrente contínua (DC).

O PZEM-025 é capaz de medir tensões na faixa de 0 a 300V e correntes de até 100A, o que o torna adequado para aplicações em sistemas fotovoltaicos, fornecendo informações detalhadas sobre o consumo e a geração de energia do sistema.

O uso deste equipamento foi fundamental para coletar dados precisos sobre a potência gerada em duas condições distintas do sistema: com as placas fotovoltaicas instaladas em uma posição fixa e em uma configuração com um seguidor solar. Com o PZEM-025, foi possível monitorar em tempo real a produção de energia em ambas as condições, permitindo a análise e comparação do desempenho dos sistemas em relação à eficiência energética.

Figura 12: Medidor de consumo PZEM-25



Fonte: Do Autor

3.4 Controlador de carga

Neste projeto utilizou-se o Controlador de Carga MPPT (Maximum Power Point Tracking) 20A 12/24V - Epever XTRA 2210N (NEOSOLAR,2024).

A utilização do controlador de carga MPPT (Maximum Power Point Tracking) é fundamental em sistemas fotovoltaicos, pois ele otimiza a extração de energia dos painéis solares, garantindo que o sistema opere no ponto de máxima potência. O MPPT ajusta continuamente a resistência elétrica vista pelos painéis, adaptando-se às variações de condições ambientais, como a intensidade da radiação solar e a temperatura. Isso é particularmente importante, pois a eficiência dos painéis solares é altamente dependente dessas variáveis, e operar no ponto de máxima potência maximiza a quantidade de energia capturada e convertida em eletricidade utilizável.

Comparado a outros tipos de controladores de carga, como o PWM (Pulse Width Modulation), o MPPT pode aumentar a eficiência do sistema em até 30%, especialmente em condições de baixa irradiância ou temperaturas mais frias. Além disso, ele permite que os painéis solares operem em uma faixa de tensão mais ampla, garantindo maior flexibilidade e eficiência na captação de energia (FEMIA et al., 2005).

A aplicação do MPPT torna os sistemas fotovoltaicos mais eficientes e capazes de fornecer energia de forma mais estável e confiável, tornando-se uma escolha essencial para instalações que buscam maximizar a produção energética, seja para uso residencial, comercial ou industrial.

Figura 13: Controlador de carga MPPT



Fonte: NeoSolar, 2010.

3.5 Medidor de Energia Solar

Para a obtenção da eficiência das placas solares foi necessário encontrar os valores da potência, da área útil do painel e da irradiância. Para a obtenção da irradiância utilizou-se o medidor de energia solar, modelo MES-100, da Marca Instrutherm. Um dispositivo projetado para monitorar e registrar a produção de energia de sistemas fotovoltaicos.

Figura 14: Medidor de Energia Solar



Fonte: Do Autor

3.6 Bateria

No contexto dos sistemas fotovoltaicos, a escolha da bateria para armazenamento de energia desempenha um papel crucial na eficiência, durabilidade e custo do sistema. Entre as opções disponíveis, as baterias automotivas (geralmente de chumbo-ácido) e as baterias LiFePO₄ (Lítio Ferro Fosfato) destacam-se como algumas das mais utilizadas. No entanto, essas duas tecnologias apresentam diferenças significativas que afetam seu desempenho e sua viabilidade econômica em sistemas fotovoltaicos.

Neste projeto optou-se por utilizar uma bateria automotiva de 12V de 60Ah por possuir um baixo custo comparado a bateria LifePO₄.

A seguir, será realizada uma comparação detalhada entre as duas, abordando aspectos como tecnologia, durabilidade, eficiência, segurança, custo e manutenção.

3.6.1 Baterias Automotivas de Chumbo-Ácido

As baterias automotivas de chumbo-ácido são amplamente utilizadas em aplicações de armazenamento de energia devido ao seu baixo custo inicial e grande disponibilidade no mercado. No entanto, essas baterias possuem algumas limitações para uso em sistemas fotovoltaicos, como a vida útil relativamente curta e a menor eficiência em ciclos profundos de descarga. De acordo com Chen et al. (2020), as baterias de chumbo-ácido têm uma vida útil média de 3 a 5 anos quando usadas em sistemas fotovoltaicos, devido à degradação do material ativo com os ciclos de carga e descarga.

Além disso, as baterias automotivas não são projetadas para suportar ciclos profundos constantes, o que pode comprometer sua longevidade quando utilizadas em sistemas fotovoltaicos, que frequentemente exigem ciclos de carga e descarga mais profundos (Li et al., 2015). Esse tipo de bateria também sofre uma considerável perda de eficiência com o tempo e exige manutenção regular, o que pode aumentar o custo total de operação do sistema (Yu et al., 2021).

3.6.2 Baterias LiFePO₄ (Lítio Ferro Fosfato)

As baterias LiFePO₄, uma das variantes das baterias de lítio, têm ganhado popularidade em sistemas fotovoltaicos devido à sua maior eficiência, durabilidade e menor necessidade de manutenção. Elas são mais caras inicialmente, mas oferecem uma vida útil significativamente maior, chegando a até 10 anos ou mais, dependendo das condições de operação (Shu et al., 2017).

De acordo com Yu et al. (2021), as baterias LiFePO₄ têm uma capacidade superior de suportar ciclos profundos de carga e descarga sem perda significativa de eficiência, o que as torna ideais para o uso em sistemas solares fotovoltaicos. Elas também têm uma maior densidade de energia e, portanto, permitem um armazenamento mais compacto e leve em comparação com as baterias de chumbo-ácido. Além disso, as LiFePO₄ têm um desempenho muito melhor em temperaturas extremas, o que é um fator importante para aplicações em ambientes com grandes variações de temperatura (Li et al., 2015).

3.6.3 Comparação de Custo

O custo inicial das baterias LiFePO₄ ainda é um dos maiores desafios para sua adoção em larga escala, sendo consideravelmente mais alto do que o das baterias de chumbo-ácido. Chen et al. (2020) apontam que, apesar do custo elevado, o retorno sobre investimento das baterias de **LiFePO₄** ocorre devido à sua maior vida útil e menor necessidade de manutenção, resultando em um custo total de propriedade (TCO) mais baixo ao longo do tempo.

Em termos de custo por ciclo de vida, as baterias de lítio ferro fosfato se mostram mais vantajosas, pois elas podem suportar entre 3.000 a 5.000 ciclos de carga e descarga, enquanto as baterias de chumbo-ácido normalmente não ultrapassam 500 a 1.000 ciclos sem uma perda significativa de capacidade (Solar Power Europe, 2020). Isso implica que, embora o custo inicial das **LiFePO₄** seja mais elevado, o custo por ciclo de vida torna-se mais competitivo, especialmente para sistemas fotovoltaicos off-grid que exigem longos períodos de operação (Battery University, 2020).

3.7 Itens de Segurança do projeto

Para dar ao projeto uma maior confiabilidade foram inseridos alguns itens para fornecer ao mesmo uma maior segurança em sua operação. São eles:

3.7.1 Anemômetro

O uso de anemômetros é uma prática importante em sistemas fotovoltaicos, principalmente quando combinados com seguidores solares. O anemômetro é um dispositivo que mede a velocidade e a direção do vento, e essas informações são essenciais para a proteção e eficiência do sistema. Em áreas com alta incidência de ventos fortes, o anemômetro pode fornecer dados em tempo real que permitem ao sistema ajustar a orientação dos painéis ou até mesmo retornar os painéis a uma posição segura para evitar danos estruturais (BURESCH, 1983). O uso de anemômetros, portanto, aumenta a durabilidade e a segurança do sistema fotovoltaico, tornando-se um componente essencial para instalações que buscam maximizar o rendimento e minimizar riscos.

Figura 15: Anemômetro



Fonte: Ivo elétrica, 2018.

3.7.2 Chaves de fim de curso

As chaves de fim de curso foram utilizadas para delimitar o movimento do seguidor solar, impedindo danos na estrutura dos mesmos.

Figura 16: Chave fim de Curso



Fonte: Ivo elétrica, 2018.

3.7.3 Atuador Eletromecânico

O atuador eletromecânico é um utensílio de grande peso na automação: É um dispositivo provido de um motor elétrico que converte o movimento rotativo em linear através de engrenagens ou fusos rotativos. Neste projeto, eles têm a função de realizar o posicionamento do painel de acordo com as estações do ano e o movimento de rastreamento do sol. Em função do custo deste item, para este projeto foi confeccionado dois atuadores lineares utilizando motores de limpador de parabrisa (Motor CC, Tensão de alimentação 12 V, Potência 30 W, Corrente 2,5 A, Alta rotação 57 rpm, Baixa rotação 48 rpm), uma barra roscada de diâmetro de 5/8" de polegada, uma porca de 5/8" de polegada e um tubo de aço de 3/4" de polegada.

Figura 17: Atuador eletromecânico



Fonte: Do Autor.

3.7.4 Dispositivo de Proteção Contra Surtos – DPS

A utilização de Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) em sistemas fotovoltaicos é de extrema importância para garantir a segurança e a longevidade do sistema. Esses dispositivos protegem os equipamentos contra sobretensões transitórias causadas por raios, descargas atmosféricas ou variações repentinas na rede elétrica, que podem danificar componentes como inversores, controladores de carga e os próprios painéis solares. A instalação do DPS contribui para evitar danos, reduzindo custos de manutenção e garantindo a continuidade da geração de energia, principalmente em regiões com alta incidência de de descargas atmosféricas (NEOSOLAR, 2024c).

Figura 18: Dispositivo de Proteção contra Surto - DPS



Fonte: Do Autor.

3.7.5 Disjuntor

A utilização de disjuntores em sistemas fotovoltaicos é fundamental para garantir a segurança e a proteção de todo o sistema. Os disjuntores atuam como dispositivos de proteção que interrompem o fluxo de corrente elétrica em caso de curtos-circuitos, sobrecargas ou falhas nos componentes do sistema, prevenindo danos aos equipamentos e reduzindo o risco de incêndios. Eles também facilitam a manutenção e o isolamento de diferentes partes do sistema, permitindo que os técnicos realizem reparos de forma segura. A escolha adequada do disjuntor, levando em consideração a tensão e a corrente do sistema fotovoltaico, é crucial para o funcionamento seguro e eficiente do sistema (NEOSOLAR, 2024b).

Figura 19: Disjuntor



Fonte: Do Autor.

3.7.6 Estrutura do Seguidor Solar

Para a confecção da estrutura do seguidor solar realizou-se a modelagem da estrutura utilizando o programa Fusion 360, na versão estudantil, para determinar a quantidade de material necessário, para definir o grau de liberdade de articulação da estrutura de apoio dos painéis e como seriam instalados os atuadores eletromecânicos.

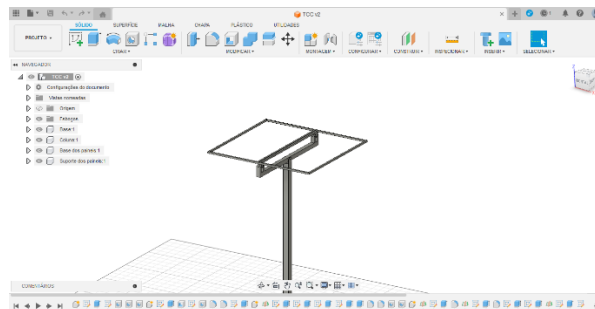
A tabela 1 apresenta o material utilizado na confecção da estrutura e suas dimensões.

Tabela 1 - Tabela de Materiais

ITEM	QUANTIDADE	MATERIAL	DIMENSOES (mm)
Eixo Principal	1	Metalon	70 x 70 x 950
Eixo estações do Ano	1	Metalon	50 x 50 x 1270
Eixo de rastreamento	1	Metalon	50 x 50 x 600
Base do eixo de rastreamento	6	Metalon	50 x 50 x 100
Suporte dos paineis	1	Metalon	20 x 20 x 5240
Suporte dos motores	1	Barra chata	50 x 1000
Base dos motores	2	Perfil U simples	70 x 100

Fonte: Do autor.

Figura 20: Estrutura do Seguidor Solar



Fonte: Do Autor

3.8 Custo do Projeto

A tabela 2 apresenta os valores dos componentes utilizados no projeto, bem como o valor total.

Tabela 2 - Tabela de Itens e Valores

ITEM	QUANTIDADE	VALOR EM REAIS	VALOR EM DOLAR
Estrutura móvel	1	R\$1.360,00	U\$226,60
Estrutura fixa	1	R\$800,00	U\$133,30
Placa solar de 155W	2	R\$556,20	U\$92,70
Central de comando com Chaves fim de curso e anemômetro	1	R\$1.200,00	U\$200,00
Medidor de consumo PZEM - 025	1	R\$171,67	U\$28,60
Controlador de carga	1	R\$417,52	U\$69,58
Medidor de Energia Solar	1	R\$768,50	U\$128,00
Atuador Eletromecânico	2	R\$400,00	U\$66,67
Dispositivo de Proteção Contra Surtos - DPS	1	R\$104,00	U\$17,30
Disjuntores	2	R\$102,70	U\$17,11
Cabos	100 metros	R\$120,00	U\$20,00
Total	-	R\$6.000,59	U\$999,86

Fonte: Do autor

3.9 Experimento

Neste projeto realizaram-se dois experimentos com especificidades diferentes no intuito de colher o máximo de dados, avaliando o desempenho de cada técnica aplicada.

3.9.1 Caracterização do Local

O experimento foi realizado em Antônio Pereira, distrito da cidade de Ouro Preto, no estado de Minas Gerais, que possui localização geográfica de 20° 18' 14'' Sul e 43° 28' 53'' Oeste. Este local apresenta um índice médio diário de irradiância conforme a Tabela 3, de acordo com dados fornecidos pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB, 2024).

Tabela 3 - Irradiação solar diária média mensal para diferentes ângulos de inclinação

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
Plano Horizontal	0 ° N	5,46	5,73	4,82	4,45	3,96	3,84	4,07	4,96	5,15	5,18	4,83	5,32	4,81	1,89
Ângulo igual a latitude	20 ° N	4,99	5,48	4,92	4,92	4,73	4,81	5,02	5,75	5,43	5,05	4,48	4,82	5,03	1,26
Maior média anual	20 ° N	4,99	5,48	4,92	4,92	4,73	4,81	5,02	5,75	5,43	5,05	4,48	4,82	5,03	1,26
Maior mínimo mensal	16 ° N	5,12	5,57	4,93	4,86	4,61	4,65	4,86	5,63	5,41	5,11	4,58	4,95	5,02	1,05

Fonte: CRESESB.

3.9.2 Experimento com os Painéis Fixo

Neste experimento, os painéis solares foram mantidos em uma posição fixa, simulando o tipo de instalação mais comumente adotado em residências. É importante destacar que, para esse tipo de instalação, é fundamental observar certas premissas que devem ser seguidas para garantir que o painel opere na máxima potência possível. A primeira premissa é que os painéis solares devem estar orientados em direção ao norte, no caso do hemisfério sul, para receber a maior incidência de luz solar ao longo do dia. A segunda premissa é que o ângulo de inclinação dos painéis deve ser ajustado de modo que a incidência dos raios solares ocorra de forma perpendicular à superfície dos painéis, a fim de maximizar a captação de energia solar. Para a obtenção deste ângulo utilizou-se as informações fornecidas pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (SÉRGIO DE SALVO BRITO, 2024), inserindo os dados de localização da residência.

Figura 21: Sistema Solar com painéis Fixo



Fonte: Do autor

3.9.3 Experimento com os painéis instalado no Seguidor Solar

Neste experimento, os painéis solares foram instalados em um sistema de seguidor solar. Para controlar o posicionamento dos painéis durante os testes, utilizou-se uma central de controle composta por um programador horário e duas placas de circuito integrado. A primeira placa foi responsável por controlar o atuador eletromecânico que ajusta a inclinação dos painéis de acordo com as diferentes estações do ano, enquanto a

segunda placa controlava o atuador eletromecânico responsável pelo rastreamento do movimento do sol ao longo do dia. Essas placas de circuito integrado realizavam os comandos com base nas informações fornecidas por sensores instalados na parte superior dos painéis. Além disso, na central de comando foram instaladas duas placas adicionais para ativação dos atuadores eletromecânicos por controle remoto, permitindo o posicionamento manual dos painéis conforme a necessidade. Foram também instalados sensores de fim de curso para limitar o movimento dos painéis e garantir sua integridade. Por fim, um anemômetro foi integrado ao sistema para posicionar automaticamente os painéis em uma posição de segurança em caso de ventos fortes, protegendo o equipamento contra possíveis danos.

Figura 22: Painéis instalados no Seguidor solar



Fonte: Do autor.

3.9.4 Eficiência das placas Solares

Para a obtenção da eficiência das placas solares, foi necessário encontrar os valores de potência gerada, a irradiância e a área útil do painel. Com esses dados em mãos é possível calcular a eficiência das placas solares, através da equação 1.

A eficiência de um painel solar pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{solar}} \times 100 \quad (1)$$

Onde P_{el} é a potência elétrica gerada pelo painel e P_{solar} é a potência solar incidente na área do painel.

No caso de a irradiância solar ser conhecida, P_{solar} pode ser calculado como:

$$P_{solar} = G \times A \quad (2)$$

Onde G é a irradiância solar (em W/m^2) e A é a área do painel (em m^2).

4 RESULTADOS

4.1 Resultados e Discussão

Neste capítulo, são apresentados os resultados da análise da eficiência energética de painéis fotovoltaicos equipados com sistemas de seguidores solares. O estudo busca compreender como esses dispositivos influenciam a geração de energia em comparação aos sistemas fixos, contribuindo para a otimização do uso de fontes renováveis. Os achados são essenciais para evidenciar os benefícios e as limitações do uso de seguidores solares, proporcionando insights valiosos para futuras implementações e pesquisas na área de energia solar. A seguir, os resultados serão apresentados de forma organizada, utilizando gráficos para comparar a potência gerada entre o painel fixo e o painel móvel.

As medições de corrente, tensão e potência foram registradas por meio do medidor de consumo a cada 30 minutos das 6 horas da manhã até as 17 horas, no período de 08/09/2024 a 12/09/2024 e tiveram seus dados salvos em um arquivo CSV, que posteriormente foram convertidos em um arquivo Excel para gerar um banco de dados, resultando na elaboração dos Gráficos.

4.1.1 Comportamento do 1º dia 08/10/2024

Conforme o gráfico da figura 21 observou-se que, o painel móvel obteve uma melhora de 35,17% na potência média. Notou-se a presença de algumas nuvens no início do dia e após às 9h30min da manhã, causando a diminuição da irradiância e como consequência a redução da potência. A eficiência média do painel fixo e do painel móvel foi de 2,86% e 3,87%, respectivamente. Para obtenção do valor da melhora na potência média do painel instalado no seguidor solar em comparação com o painel fixo, utilizou-se a média da soma das potências do painel fixo e do painel instalado no seguidor solar no intervalo das 6h às 17h, sendo estas respectivamente 14,5 W e 19,6 W.

Com esses dados, agora é possível calcular a melhora na potência média gerada pelo painel após a implementação do sistema de rastreamento solar, utilizando as seguintes equações:

$$\Delta P_{\text{média}} = P_{\text{média do seguidor solar}} - P_{\text{média painel fixo}} \quad (3)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta P_{\text{média}} = 19,6 - 14,5 = 5,1 \text{ W}$$

A melhoria relativa em termos percentuais pode ser calculada como:

$$\Delta \eta_{\text{média}} = \frac{P_{\text{média do seguidor solar}} - P_{\text{média painel fixo}}}{P_{\text{média painel fixo}}} \times 100 \quad (4)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta \eta_{\text{média}} = \frac{19,6 - 14,5}{14,5} \times 100 = 37,5\%$$

Para o cálculo da eficiência média do painel fixo e do painel móvel, utilizou-se o valor médio da potência de 14,5 W para o painel fixo e de 19,6 W para o painel móvel, a radiância média igual a 589,22 W/m² registrada no intervalo das 6h às 17h e o valor da área do painel igual a 0,86 m². Aplicando esses valores a equação 1 obtém-se os seguintes resultados:

Eficiência do painel fixo:

$$\eta = \frac{14,5}{(589,22 \times 0,86)} \times 100 = 2,86\%$$

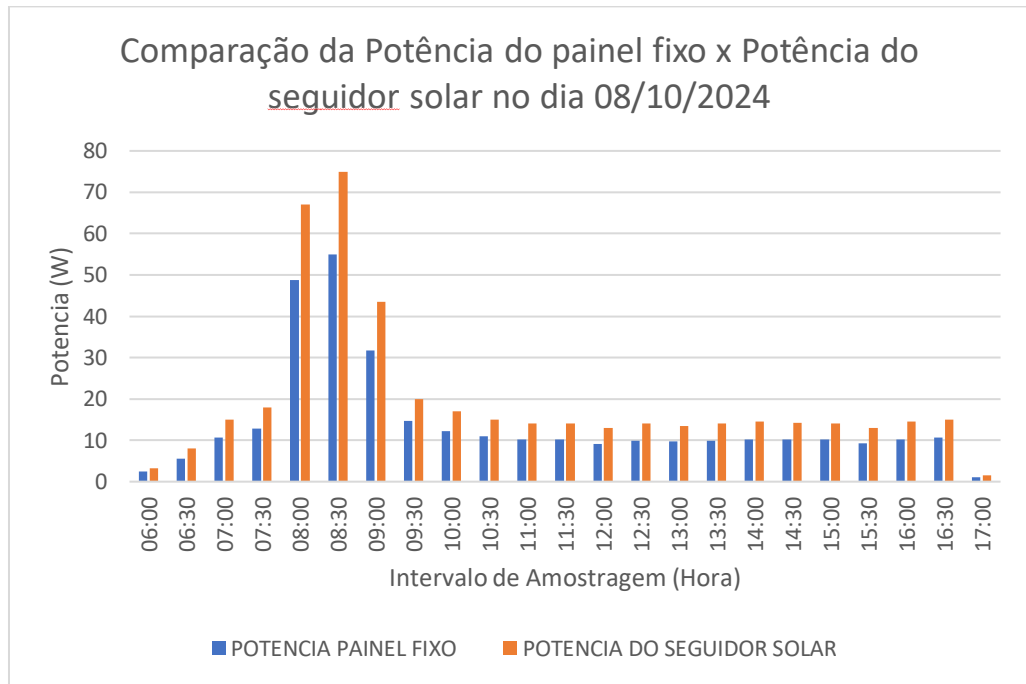
Portanto, a eficiência do painel solar fixo é de $\eta = 2,86\%$.

Eficiência do painel com seguidor solar:

$$\eta = \frac{19,6}{(589,22 \times 0,86)} \times 100 = 3,87\%$$

Portanto, a eficiência do painel solar instalado no seguidor solar é de $\eta = 3,87\%$.

Figura 23– 1º Dia - Comparação da Potência do painel fixo x Potência do seguidor solar



Fonte: Do Autor.

4.1.2 Comportamento do 2º Dia 09/10/2024

Conforme o gráfico da figura 22, observou-se que, o painel móvel obteve uma melhora de 47,24% na potência média. No segundo dia de análise teve pouca presença de nuvens e observado pouca variação na radiação, o que contribuiu para uma maior estabilidade na geração de energia. A eficiência média do painel fixo e do painel móvel foi de 1,72% e 2,54% respectivamente.

Para obtenção do valor da melhora na potência média do painel instalado no seguidor solar em comparação com o painel fixo, utilizou-se a média da soma das potências do painel fixo e do painel instalado no seguidor solar no intervalo das 6h às 17h, sendo estas respectivamente 13,9 W e 9,44 W.

Com esses dados, agora é possível calcular a melhora na potência média gerada pelo painel após a implementação do sistema de rastreamento solar, utilizando as seguintes equações:

$$\Delta P_{\text{média}} = P_{\text{média do seguidor solar}} - P_{\text{média painel fixo}} \quad (5)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta P_{\text{média}} = 13,9 - 9,44 = 4,46 \text{ W}$$

A melhoria relativa em termos percentuais pode ser calculada como:

$$\Delta \eta_{\text{média}} = \frac{P_{\text{média do seguidor solar}} - P_{\text{média painel fixo}}}{P_{\text{média painel fixo}}} \times 100 \quad (6)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta \eta_{\text{média}} = \frac{13,9 - 9,44}{9,44} \times 100 = 47,24\%$$

Para o cálculo da eficiência média do painel fixo e do painel móvel, utilizou-se o valor médio da potência de 13,9 W para o painel fixo e de 9,44 W para o painel móvel, a radiância média igual a 635,5 W/m² registrada no intervalo das 6h às 17h e o valor da área do painel igual a 0,86 m². Aplicando esses valores a equação 1 obtém-se os seguintes resultados:

Eficiência do painel fixo:

$$\eta = \frac{9,44}{(635,5 \times 0,86)} \times 100 = 1,72\%$$

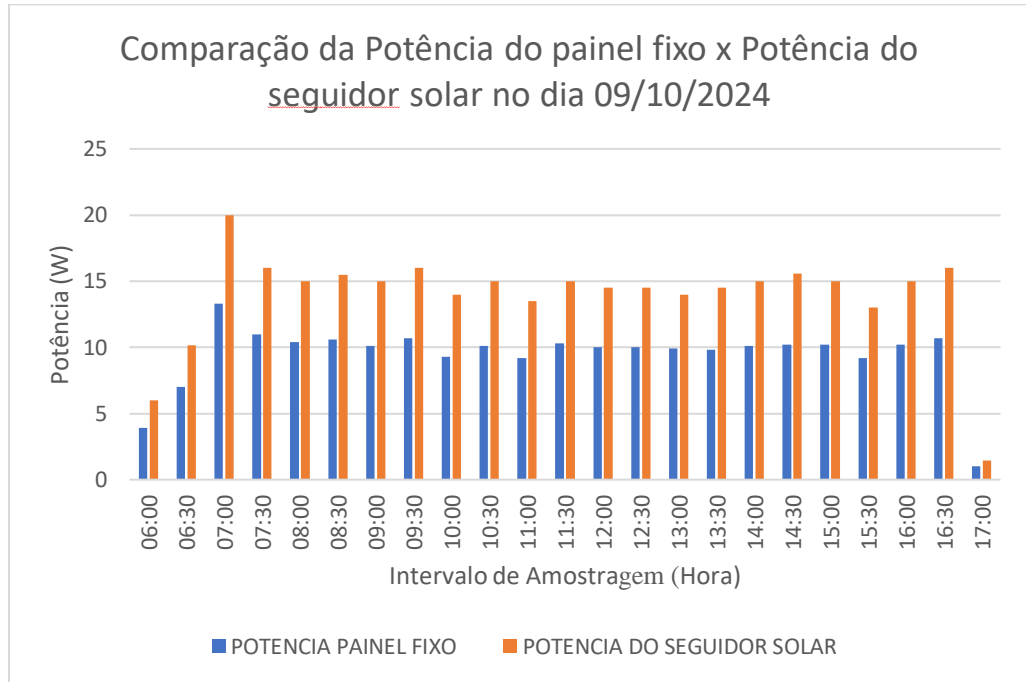
Portanto, a eficiência do painel solar fixo é de $\eta = 1,72\%$.

Eficiência do painel com seguidor solar:

$$\eta = \frac{13,69}{(635,5 \times 0,86)} \times 100 = 2,54\%$$

Portanto, a eficiência do painel solar instalado no seguidor solar é de $\eta = 2,54\%$.

Figura 24 - 2º Dia - Comparação da Potência do painel fixo x Potência do seguidor solar



Fonte: Do Autor.

4.1.3 Comportamento do 3º dia 10/10/2024

O dia começou com poucas nuvens e uma alta radiância. Porém após as 8h30min o céu começou a ficar nublado, provocando a diminuição da radiância impactando na geração de energia, mas mesmo com a diminuição da radiância, observou-se conforme o gráfico da figura 23 que o painel móvel obteve uma melhora 35,32% na potência média. A eficiência média do painel fixo e do painel móvel foi de 2,38% e 3,22% respectivamente.

Para obtenção do valor da melhora na potência média do painel instalado no seguidor solar em comparação com o painel fixo, utilizou-se a média da soma das potências do painel fixo e do painel instalado no seguidor solar no intervalo das 6h às 17h, sendo estas respectivamente 12,06 W e 16,32 W.

Com esses dados, agora é possível calcular a melhora na potência média gerada pelo painel após a implementação do sistema de rastreamento solar, utilizando as seguintes equações:

$$\Delta P_{\text{média}} = P_{\text{média do seguidor solar}} - P_{\text{média painel fixo}} \quad (7)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta P_{\text{média}} = 16,32 - 12,06 = 4,26 \text{ W}$$

A melhoria relativa em termos percentuais pode ser calculada como:

$$\Delta \eta_{\text{média}} = \frac{P_{\text{média do seguidor solar}} - P_{\text{média painel fixo}}}{P_{\text{média painel fixo}}} \times 100 \quad (8)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta \eta_{\text{média}} = \frac{16,32 - 12,06}{12,06} \times 100 = 35,32\%$$

Para o cálculo da eficiência média do painel fixo e do painel móvel, utilizou-se o valor médio da potência de 12,06 W para o painel fixo e de 16,32 W para o painel móvel, a radiância média igual a 589,22 W/m² registrada no intervalo das 6h às 17h e o valor da área do painel igual a 0,86 m². Aplicando esses valores a equação 1 obtém-se os seguintes resultados:

Eficiência do painel fixo:

$$\eta = \frac{12,06}{(589,22 \times 0,86)} \times 100 = 2,38\%$$

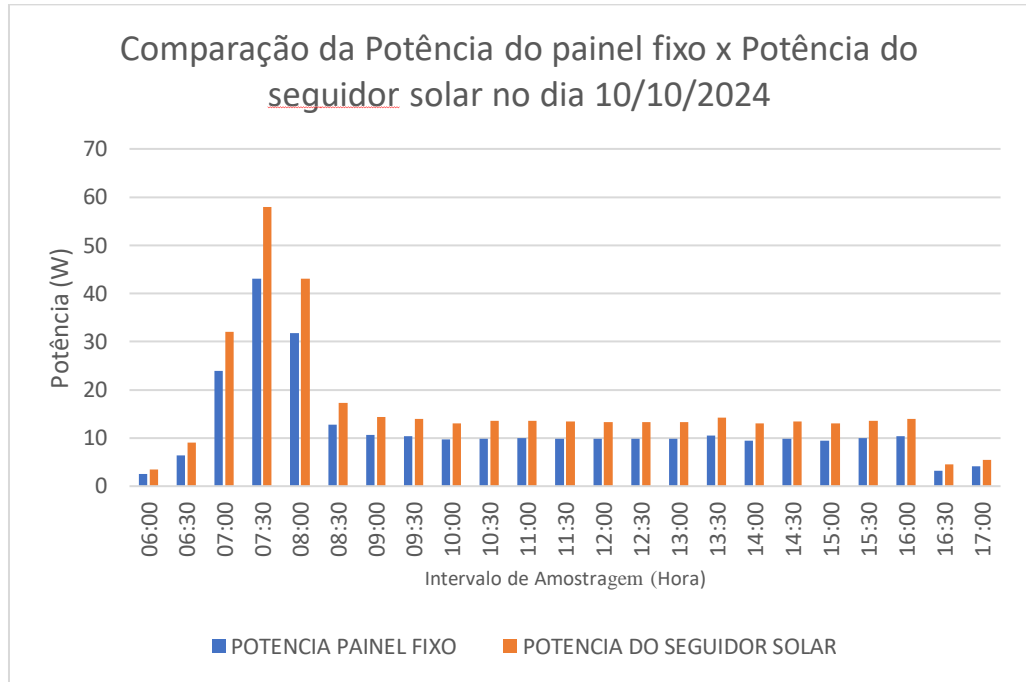
Portanto, a eficiência do painel solar fixo é de $\eta = 2,38\%$

Eficiência do painel com seguidor solar:

$$\eta = \frac{16,32}{(589,22 \times 0,86)} \times 100 = 3,22\%$$

Portanto, a eficiência do painel solar instalado no seguidor solar é de $\eta = 3,22\%$.

Figura 25– 3º Dia - Comparação da Potência do painel fixo x Potência do seguidor solar



Fonte: Do Autor.

4.1.4 Comportamento do 4º Dia 11/10/2024

O dia amanheceu nublado com a presença de bastantes nuvens até às 7h, após este horário as nuvens se dissiparão um pouco permitindo um aumento na geração de energia. Após às 9h30min o céu tornou a ficar nublado, impactando novamente na geração de energia, mas mesmo com a diminuição da radiância pode-se observar, conforme o gráfico da figura 24 que o painel móvel obteve uma melhora 43,08% na potência média. A eficiência média do painel fixo e do painel móvel foi de 3,1% e 4,44% respectivamente.

Para obtenção do valor da melhora na potência média do painel instalado no seguidor solar em comparação com o painel fixo, utilizou-se a média da soma das potências do painel fixo e do painel instalado no seguidor solar no intervalo das 6h às 17h, sendo estas respectivamente 14,9 W e 21,32 W.

Com esses dados, agora é possível calcular a melhoria na potência média gerada pelo painel após a implementação do sistema de rastreamento solar, utilizando as seguintes equações:

$$\Delta P_{\text{média}} = P_{\text{média do seguidor solar}} - P_{\text{média painel fixo}} \quad (9)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta P_{\text{média}} = 21,32 - 14,9 = 6,42 \text{ W}$$

A melhoria relativa em termos percentuais pode ser calculada como:

$$\Delta \eta_{\text{média}} = \frac{P_{\text{média do seguidor solar}} - P_{\text{média painel fixo}}}{P_{\text{média painel fixo}}} \times 100 \quad (10)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta \eta_{\text{média}} = \frac{21,32 - 14,9}{14,9} \times 100 = 43,08\%$$

Para o cálculo da eficiência média do painel fixo e do painel móvel, utilizou-se o valor médio da potência de 14,9 W para o painel fixo e de 21,32 W para o painel móvel, a radiância média igual a 558,25 W/m² registrada no intervalo das 6h às 17h e o valor da área do painel igual a 0,86 m². Aplicando esses valores a equação 1 obtém-se os seguintes resultados:

Eficiência do painel fixo:

$$\eta = \frac{14,9}{(558,25 \times 0,86)} \times 100 = 3,1\%$$

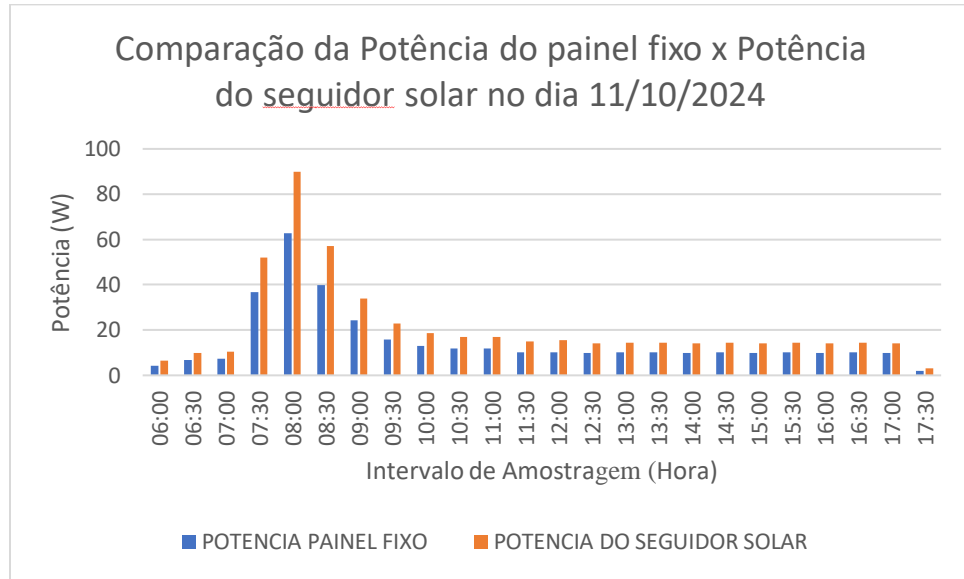
Portanto, a eficiência do painel solar fixo é de $\eta = 3,1\%$

Eficiência do painel com seguidor solar:

$$\eta = \frac{21,32}{(558,25 \times 0,86)} \times 100 = 4,44\%$$

Portanto, a eficiência do painel solar instalado no seguidor solar é de $\eta = 4,44\%$.

Figura 26– 4º Dia - Comparação da Potência do painel fixo x Potência do seguidor solar



Fonte: Do Autor.

4.1.5 Comportamento do 5º Dia 12/10/2024

Analisando o gráfico da figura 24, pode-se observar que a potência do painel móvel se manteve acima dos 14 W entre às 8h30min e 17h com certa regularidade devido a pouca variação na radiância. Observa-se um aumento na geração de energia apenas no intervalo das 7h às 7h30min. O dia permaneceu parcialmente nublado. A maior diferença de potência foi às 7h30min, que foi de 46,6 W. No gráfico da figura 24 pode-se observar que o painel móvel obteve uma melhora 46,2% na potência média. A eficiência média do painel fixo e do painel móvel foi de 1,8% e 2,62% respectivamente.

Para obtenção do valor da melhora na potência média do painel instalado no seguidor solar em comparação com o painel fixo, utilizou-se a média da soma das potências do painel fixo e do painel instalado no seguidor solar no intervalo das 6h às 17h, sendo estas respectivamente 11,06 W e 16,17 W.

Com esses dados, agora é possível calcular a melhora na potência média gerada pelo painel após a implementação do sistema de rastreamento solar, utilizando as seguintes equações:

$$\Delta P_{\text{média}} = P_{\text{média do seguidor solar}} - P_{\text{média painel fixo}} \quad (11)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta P_{\text{média}} = 16,17 - 11,06 = 5,11 \text{ W}$$

A melhoria relativa em termos percentuais pode ser calculada como:

$$\Delta \eta_{\text{média}} = \frac{P_{\text{média do seguidor solar}} - P_{\text{média painel fixo}}}{P_{\text{média painel fixo}}} \times 100 \quad (12)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta \eta_{\text{média}} = \frac{16,17 - 11,06}{11,06} \times 100 = 46,2\%$$

Para o cálculo da eficiência média do painel fixo e do painel móvel, utilizou-se o valor médio da potência de 11,06 W para o painel fixo e de 16,17 W para o painel móvel, a radiância média igual a 716,54 W/m² registrada no intervalo das 6h às 17h e o valor da área do painel igual a 0,86 m². Aplicando esses valores a equação 1 obtém-se os seguintes resultados:

Eficiência do painel fixo:

$$\eta = \frac{11,06}{(716,54 \times 0,86)} \times 100 = 1,8\%$$

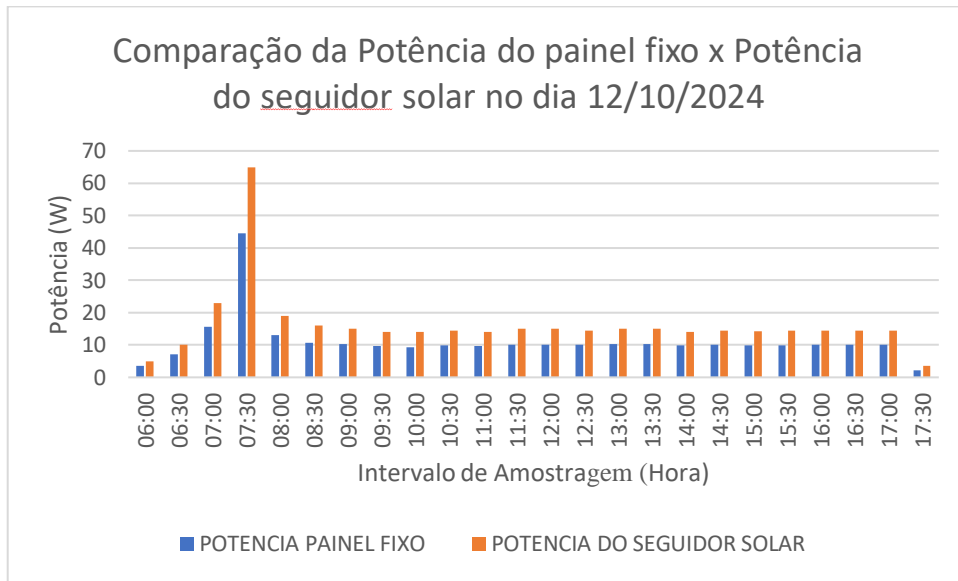
Portanto, a eficiência do painel solar fixo é de $\eta = 1,8\%$

Eficiência do painel com seguidor solar:

$$\eta = \frac{16,17}{(716,54 \times 0,86)} \times 100 = 2,62\%$$

Portanto, a eficiência do painel solar instalado no seguidor solar é de $\eta = 2,62\%$.

Figura 27– 5º Dia - Comparação da Potência do painel fixo x Potência do seguidor solar



Fonte: Do Autor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo geral a maximização da captação de energia em células fotovoltaicas, buscando aumentar a eficiência do sistema por meio da utilização de um seguidor solar, que ajusta os painéis para mantê-los posicionados perpendicularmente aos raios solares. A pesquisa revelou que o sistema com seguidor solar foi capaz de aumentar o tempo de exposição dos painéis à radiação solar, resultando em um aumento médio de 41,8% na produção de energia elétrica.

Os resultados obtidos indicam que o painel fotovoltaico com seguidor solar apresentou consistentemente maior potência em todos os dias analisados, confirmando que a perpendicularidade entre os raios solares e a superfície dos módulos fotovoltaicos é crucial para otimizar a geração de energia elétrica. No segundo dia do experimento, observou-se um desempenho superior, o que pode ser atribuído à escassez de nuvens e à baixa variação na radiação solar, fatores que contribuíram para a estabilidade e eficiência do sistema durante esse período.

Além disso, foi identificado que, em todos os testes realizados, houve maior produção de energia no início do dia. Esse comportamento pode ser explicado pelo funcionamento do controlador de carga, que, ao iniciar o ciclo diário, priorizava a reposição da energia consumida durante a noite pelos dispositivos conectados à bateria de 12 volts, além da carga solicitada pela lâmpada. Uma vez que a bateria atingia sua carga total, o controlador de carga passava a fornecer apenas a potência necessária para o funcionamento da lâmpada. Esse processo explicaria a estabilidade observada nos gráficos de produção de energia, que se manteve consistente ao longo do tempo, associada à baixa variação da radiação solar.

Em relação às limitações do estudo, vale ressaltar que a pesquisa se concentrou no uso de um protótipo de seguidor solar em um sistema de pequeno porte e em condições climáticas típicas. A pesquisa não considerou variáveis como as condições climáticas extremas ou a utilização de diferentes tipos de controladores de carga, o que limita a possibilidade de generalização dos resultados para sistemas fotovoltaicos de grande escala ou para diferentes contextos climáticos.

Por fim, pesquisas futuras poderiam explorar a implementação de seguidores solares em maior escala, a análise do comportamento do sistema em condições climáticas diversas e o estudo de novos materiais para os módulos fotovoltaicos que possam potencializar ainda mais a eficiência do processo de conversão de energia solar. A continuidade dessas

investigações pode levar ao aprimoramento das soluções fotovoltaicas, tornando-as ainda mais viáveis e eficientes.

Este estudo contribui para a compreensão dos benefícios do uso de seguidores solares, demonstrando seu potencial para aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos e, conseqüentemente, otimizar o aproveitamento da energia solar como uma fonte renovável e sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOYLESTAD, Robert L et al. *Electrónica: teoria de circuitos y dispositivos eletrónicos*. PEARSON educación, 2018. V.8.

BRAGA, Renata Pereira. Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

BURESCH, Matthew. *Photovoltaic Energy Systems: Design and Installation*. McGraw-Hill, 1983.

CRESESB. *Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito*. Acesso em: 22 set. 2024. 2024. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php#data>.

DANTAS NETO, Pedro Moises; OUTROS. Aumento de eficiência na captação de raios solares na produção de energia elétrica em células fotovoltaicas, por meio de um seguidor solar. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2018.

EDUARDO AQUINO. *Posicionamento Correto do Pannel solar*. 2024. Disponível em: <https://www.eduardoaquino.com.br/posicionamento-correto-do-pannel-fotovoltaico/>. Acesso em: 10 de Março 2024.

ENIO BUENO PEREIRA ET AL. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2024. Disponível em: https://mtc-m21b.sid.inep.br/col/sid.inep.br/mtc-21b/2017/08.15.18.20/doc/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_rev-01-compactado.pdf. Acesso em: 09 de Março 20124.

ESRAM, Trishan, CHAPMAN, Patrick L. Coparacion of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 439-449, 2007.

FEMIA, Nicola et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Transactions on Power Eletronics*, IEEE, v. 20, n. 4, p. 963-973, 2005.

FERREIRA, Antônio Domingos Dias. *Habitação autossuficiente: interligação e integração de sistemas alternativos*. Editora Interciência, 2014.

LOPEZ, Ricardo Audabó. *Energia Solar para Produção de Eletricidade*. Artibler, 2012.

MARINESCU. Control optimizing algorithm for soft sun-trackers. In: IEEE. 2006 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testin, Robotics. 2006. V. 1, p. 54-57.

NASCIMENTO, CA do. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. 2004. 21f. *Monografia (especialização em Fontes Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2022*.

NEOSOLAR. *Controlador de Carga MPPT 20A 12/24V Epever XTRA-2210N*. 2004.

Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/controlar-cara-mppt-20a-12-24v-epever-xtra-2210n.html>. Acesso em: 22 setembro de 2024.

NEOSOLAR. *Disjuntor para Sistemas Fotovoltaicos*. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/disjuntor-sistemas-fotovoltaicos>. Acesso em 22 setembro 2024.

NEOSOLAR. *Dispositivo de Proteção contra Surtos em Sistemas Fotovoltaicos*. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/protecao- contra-surto>. Acesso em 22 Setembro 2024.

NEOSOLAR. *Painel Solar Fotovoltaico 155W Resun RS9E-155M*. 2024. Disponível em: <https://www . neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-155w-resun-rs9e-155m.html>. Acesso em 22 de setembro de 2024.

REIS, L.B. dos. *Geração de energia elétrica*. PEA/EPUSP, 2000. ISBN 9788520445617. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=YpgDCwAAQBAJ>.

RIBEIRO, J. L. *Energias Renováveis: Uma Abordagem Integrada*. Rio de Janeiro, Brasil: Editora Ciência Moderna, 2020.

ROBOBUILDERS. *Medidor Energia Consumo DC 0 a 300V 100A PZEM-025*. 2024. Disponível em: <https://www.robobuilders.com.br/medidor-energia--consumo-dc-0-a-300v-100a-pzem-025-nfe>. Acesso em: 22 de setembro de 2024.

SARA, Dezso; TEODORESCU, Remus; RODRIGUEZ, Pedro. PV panel model based on datasheet values. In IEEE. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2007. P. 2392-2396.

SILVA, Ita Teodoro da. Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de um painel fotovoltaico e comparação com painel fixo. Instituto de Matemática, 2017.

ZHOU, Wei; YANG, Hongxing; FANG, Zhaohong. A novel model for photovoltaic array performance prediction. *Applied Energy*, Elsevier, v. 84, n. 10, p. 1187–1198, 2008.

Chen, W.; Liu, Y.; Zhang, J.; Li, F. (2020). *Review of Lithium-ion and Lead-Acid Batteries for Energy Storage in Solar Photovoltaic Systems: A Comparative Study*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109538.

Li, Y.; Wang, F.; Liu, X.; Yang, X.; Zhao, Y. (2015). *Comparative Study of Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries for Solar Energy Storage Applications*. *Journal of Power Sources*, 298, 142-149.

Yu, Z.; Li, X.; Li, Z.; Zhang, X. (2021). *Comparative Analysis of Lead-Acid, Lithium-Ion and Lithium Iron Phosphate Batteries for Solar Energy Storage*. *Energy Reports*, 7, 2174-2183.

Shu, S.; Wang, J.; Li, Z.; Xu, Y. (2017). *A Comparative Study of Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries for Off-Grid Solar Power Systems*. *Energy Procedia*, 105, 2154-2159.

Solar Power Europe (2020). *Solar+ Storage Market Report*. SolarPower Europe. Disponível em: www.solarpowereurope.org. Acesso em: 24 de dezembro de 2024.

Battery University (2020). *Lead Acid vs Lithium Ion Batteries: A Comparison*. Disponível em: www.batteryuniversity.com. Acesso em: 24 de dezembro de 2024.