

Análise de eficiência de um sistema fotovoltaico com o seguidor solar de 2 eixos em comparação ao sistema fixo

Bruno Veloso Dantas da Silva

Fillipe de Souza Marques

**Análise de eficiência de um sistema fotovoltaico
com o seguidor solar de 2 eixos em comparação ao
sistema fixo**

Aluno(s): Bruno Veloso Dantas da Silva

Fillipe de Souza Marques

Orientador(es): Daniel Ramos Louzada

Agradecimentos

Com imensa gratidão em nossos corações, queremos expressar nosso profundo agradecimento a todos que contribuíram pela conclusão desta longa jornada acadêmica. Este trabalho de conclusão de curso representa não apenas o encerramento de uma etapa importante em nossas vidas, mas também um tributo àqueles que estiveram ao nosso lado, nos apoiando incondicionalmente.

Em primeiro lugar, gostaríamos de expressar nossa gratidão a Deus por guiar nossos passos ao longo dessa jornada. Sua orientação e força foram fundamentais para que chegássemos até aqui.

Nossas famílias têm sido o nosso pilar ao longo de todos esses anos. Seu amor, apoio e incentivo têm sido a luz que iluminou os nossos caminhos. Cada esforço que empreenderam e cada palavra de encorajamento que nos dedicaram foram fundamentais para a nossa trajetória acadêmica.

Aos nossos amigos, colegas da PUC, professores e equipe técnica, queremos expressar nossa gratidão por caminharem conosco nesta jornada. Vocês tornaram cada desafio mais acessível de ser vencido e cada conquista mais significativa. Seus conhecimentos, apoio mútuo e amizade fizeram desta jornada uma experiência inesquecível.

Em resumo, queremos destacar que o mérito desta conquista não é apenas nosso, mas sim de todos vocês. Cada um desempenhou um papel fundamental nesse sucesso, e somos eternamente gratos por isso.

Levaremos conosco as valiosas lições aprendidas, o apoio oferecido e a eterna gratidão que residirá em nossos corações. Agradecemos profundamente por fazerem parte desta jornada incrível.

Com sincera gratidão,

Bruno Veloso Dantas da Silva e Fillipe de Souza Marques.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal a concepção e construção de um protótipo de seguidor solar, com uma análise comparativa da geração de energia elétrica considerando (i) um sistema fixo de referência direcionado para o norte (*baseline*) e (ii) um sistema com um dispositivo de seguidor solar de dois eixos independentes. Ao longo deste documento, são apresentados os conceitos sobre o efeito fotovoltaico, incluindo sua definição e exemplos. É realizada uma breve descrição dos componentes dos associados aos painéis (ou módulos) fotovoltaicos, além de uma discussão sobre a radiação solar, insolação e estratégias de orientação dos painéis fotovoltaicos para otimização da eficiência na geração de energia elétrica. Foram realizados ensaios experimentais com os dois sistemas e os dados gerados ao longo deste estudo foram obtidos por meio de um protótipo dimensionado para uma produção de energia em pequena escala, visando a viabilidade do projeto. O protótipo desenvolvido incorporou os seguintes componentes: Arduino Uno, sensores LDR, resistores, uma placa solar de 1 W, dois servos motores e conectores jumper. Além disso, será apresentado o código utilizado na automação do sistema como parte integral deste trabalho. Os resultados obtidos reforçam a conclusão de que o sistema móvel, equipado com rastreador solar, supera consistentemente o sistema fixo em termos de potência média, revelando um ganho substancial, destacando a eficácia do rastreamento solar em proporcionar uma captação mais eficiente da energia solar incidente.

Palavras-chave: seguidor solar; sistema fixo; painéis fotovoltaicos; radiação; eficiência.

Efficiency analysis of a photovoltaic system with a two-axis solar tracker compared to a fixed system

Abstract

Experimental tests were conducted with both systems, and the data generated during this study were obtained through a prototype dimensioned for small-scale energy production, aiming to assess the project's feasibility. The developed prototype incorporated the following components: Arduino Uno, LDR sensors, resistors, a 1 W solar panel, two servo motors, and jumper connectors. Additionally, the code used for system automation will be presented as an integral part of this work. The results obtained reinforce the conclusion that the mobile system, equipped with a solar tracker, consistently outperforms the fixed system in terms of average power. This underscores a substantial gain, highlighting the effectiveness of solar tracking in providing a more efficient capture of incident solar energy.

Keywords: solar tracker; fixed system; photovoltaic panels; radiation; efficiency.

Sumário

1. Introdução.....	9
2. Fundamentação Teórica.....	10
2.1 Energia solar fotovoltaica	10
2.2 Célula fotovoltaica	10
2.2.1 Dopagem	10
2.2.2 Semicondutor Tipo N	10
2.2.3 Semicondutor Tipo P.....	11
2.2.4 Junção PN	12
2.3 Módulos fotovoltaicos do mercado	12
2.3.1 Silício Monocristalino	12
2.3.2 Silício Policristalino	13
2.3.3 Célula fotovoltaica PERC	14
2.3.4 Célula fotovoltaica orgânica.....	14
2.4 Conceitos básicos	15
2.4.1 Irradiação [W/m^2].....	15
2.4.2 Ângulo azimutal	15
2.4.3 Declinação solar.....	16
2.4.4 Altura solar	16
2.4.5 Ângulo de incidência.....	17
2.5 Curvas características de corrente, tensão e potência.....	18
3. Apresentação do Projeto.....	20
3.1 Propostas e desafios	20
3.2 Componentes do projeto	20
3.2.1 Arduino UNO	20
3.2.2 Módulo Fotovoltaico.....	21
3.2.3 LDRs.....	22
3.2.4 Resistores	23
3.2.5 Servomotores	23
3.2.6 Jumpers.....	23

3.2.7 Suporte com 2 eixos giratórios	24
3.2.8 Resumo de componentes e preços	25
3.3 Integração dos componentes	25
3.4 Código do Arduino UNO.....	27
4. Resultados.....	35
5. Conclusão	37
6. Bibliografia	38

Lista de figuras

Figura 1. Estrutura cristalina tipo N. Fonte: Energia solar fotovoltaica, conceitos e aplicações	11
Figura 2. Estrutura cristalina tipo P. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica, conceitos e aplicações	11
Figura 3. Movimento de elétrons e buracos na junção PN Fonte: Energia Solar Fotovoltaica, conceitos e aplicações	12
Figura 4. Lingote de silício monocristalino. Fonte: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/illustr/i6_1_2.html	13
Figura 5. Célula fotovoltaica de Silício Policristalino. Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sil%C3%ADcio_policristalino	14
Figura 6. Incidência de raio solar em uma célula monocristalina e PERC. Fonte: Solar Power World.....	14
Figura 7. Célula fotovoltaica orgânica. Fonte: https:// itsolar. com.br/energia-solar/o-que-e-opv-paineis-solares-fotovoltaicos-organicos/	15
Figura 8. Ângulo Azimutal. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica, conceitos e aplicações	16
Figura 9. Declinação solar nas 4 estações do ano. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica, conceitos e aplicações	16
Figura 10. Ângulo zenital e altura solar. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica, conceitos e aplicações	17
Figura 11. Ângulo de inclinação do módulo e ângulo de incidência dos raios solares. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica - conceitos e aplicações.....	17
Figura 12. Curva característica I - V de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico. Fonte: Energia solar - Conceitos	18
Figura 13. Curva característica P - V de potência e tensão de um módulo fotovoltaico	19
Figura 14. Arduino UNO	21
Figura 15. Módulo fotovoltaico usado no projeto	22
Figura 16. Sensor LDR	22
Figura 17. Resistor de 330 Ω	23
Figura 18. Jumpers de conexão.....	24
Figura 19. Suporte com rotação em 2 eixos.....	25
Figura 20. Projeto em funcionamento no dia 28/11/2023.....	26
Figura 21. Tensão (Fixo e Móvel) x Tempo.....	35
Figura 22. Corrente (Móvel e Fixo) x Tempo.....	35
Figura 23. Potência (Móvel e Fixo) x Tempo	36

1. Introdução

Atualmente com o mundo impulsionado por contínuas inovações e constante avanço tecnológico, é inegável o aumento significativo por demanda por energia. Por outro lado, uma parcela significativa da geração de energia ainda está baseada fontes poluidoras. Diante da necessidade de se mitigar os efeitos de degradação do nosso planeta, diversos atores (cientistas, instituições e governos) tem se preocupado cada vez mais com os danos que estamos causando ao nosso ambiente, sobretudo no que diz respeito ao aquecimento global.

Frente a esse contexto desafiador e seguindo o princípio de "produzir mais, degradando menos", é imperativo buscar soluções que maximizem tanto a geração de energia por fontes renováveis quanto a eficiência energética dessas fontes. Nesse contexto, as fontes de energia como a energia solar e eólica, emergem como soluções interessantes para a promoção de um futuro mais sustentável. Nesse contexto, o presente trabalho se insere com o objetivo de investigar soluções que aumentem a eficiência na geração de energia elétrica por meio do uso de módulos fotovoltaicos.

A abordagem adotada nesta pesquisa envolve a implementação de um seguidor solar de dois eixos, capaz de ajustar continuamente a orientação do módulo fotovoltaico, garantindo que este esteja sempre alinhado de forma perpendicular à radiação solar incidente. Esta iniciativa visa não apenas otimizar a captação de energia solar, mas também reduzir o desperdício, maximizando assim a eficiência na conversão de luz solar em eletricidade.

Neste trabalho, foi explorado em detalhes o fundamento teórico por trás dessa tecnologia, seu desenvolvimento prático por meio de um protótipo, bem como os resultados obtidos a partir da comparação com sistemas fixos convencionais. Este estudo busca contribuir para o avanço das soluções sustentáveis na produção de energia, oferecendo uma visão prática e promissora sobre a aplicação de seguidores solares de dois eixos como uma estratégia eficaz na busca por um futuro energético mais limpo e eficiente.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Energia solar fotovoltaica

O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico pelo qual determinados materiais são capazes de gerar energia elétrica quando expostos à luz solar (radiação eletromagnética). Esse efeito é resultado da interação entre a luz e os elétrons presentes nos materiais semicondutores utilizados nos dispositivos fotovoltaicos, como as células solares. Quando a luz incide sobre a superfície de um material semicondutor, os fótons contidos na luz transferem sua energia para os elétrons do material. Esse processo provoca a excitação dos elétrons, permitindo que eles se movimentem, criando assim uma diferença de potencial elétrico representado pelo desequilíbrio de cargas elétricas no material. Essas cargas desequilibradas são então coletadas e conduzidas por meio de uma estrutura condutora, promovendo uma corrente elétrica. Dessa forma, o efeito fotovoltaico possibilita a conversão direta da energia luminosa em energia elétrica, sem a necessidade de processos mecânicos ou térmicos intermediários. Essa propriedade torna as células solares baseadas no efeito fotovoltaico uma opção promissora e sustentável para a geração de energia renovável.

2.2 Célula fotovoltaica

2.2.1 Dopagem

O processo de dopagem é um procedimento realizado em materiais semicondutores com o objetivo de modificar suas propriedades elétricas e permitir a ocorrência do efeito fotovoltaico de forma mais eficiente. Consiste na introdução controlada e deliberada de impurezas no material, que são átomos de elementos diferentes dos componentes principais da estrutura cristalina do semicondutor. Existem dois tipos de dopagem: a dopagem doadora e a dopagem aceitadora. Na dopagem doadora, impurezas são adicionadas ao semicondutor, fornecendo elétrons extras. Isso cria uma região carregada negativamente (N) no material dopado. Já na dopagem aceitadora, impurezas são adicionadas para criar uma região carregada positivamente (P), gerando "lacunas" onde elétrons estão ausentes. A dopagem é essencial para a criação de uma junção PN, que é a estrutura básica de uma célula solar fotovoltaica. A junção PN é formada pela união de duas regiões semicondutoras, uma dopada tipo P e outra dopada tipo N. Nessa junção, ocorre uma área de transição onde os elétrons da região N e as lacunas da região P se recombinam, criando uma camada de carga neutra chamada de região de depleção. Quando a luz incide sobre essa junção, os fótons são absorvidos pelos elétrons do material, gerando pares elétron-lacuna. A região de depleção atua como uma barreira elétrica, separando as cargas positivas e negativas e criando um campo elétrico interno. Esse campo elétrico induz a separação das cargas e cria uma diferença de potencial, resultando em uma corrente elétrica que pode ser coletada e utilizada como energia.

2.2.2 Semicondutor Tipo N

Semicondutores do tipo N tem uma característica de ser eletricamente negativo, já que a sua dopagem apresenta mais elétrons na camada de valência em relação a matriz original. Dessa forma pode-se nomear esse tipo de semicondutor como doador, já que ele tem excesso de elétrons. Essa dopagem é comumente feita com dois tipos de elementos: Fósforo e Arsênio, junto a matriz de silício.

Ambos os elementos (Fósforo e Arsênio) possuem cinco elétrons na camada de valência, quando ligados ao elemento de silício, apenas 4 elétrons são conectados na ligação covalente e esse elétron livre é quem irá viajar pela camada da dopagem (Figura 1).

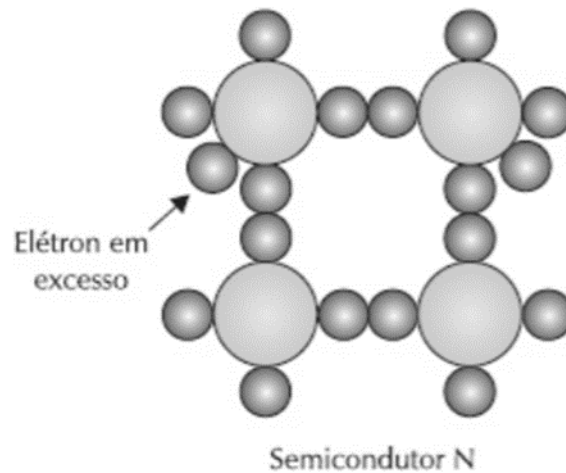


Figura 1. Estrutura cristalina tipo N. Fonte: Energia solar fotovoltaica, conceitos e aplicações

2.2.3 Semicondutor Tipo P

Semicondutores do tipo P tem característica de ser eletricamente positivo, visto que em sua camada há uma presença menor de elétrons em relação a matriz original, sendo assim podendo ser chamado de aceitador. Essa dopagem é comumente feita com dois tipos de elementos: Alumínio ou Boro, junto a matriz de silício.

Ambos os elementos (Boro e Alumínio) possuem 3 elétrons na camada de valência, que ao se ligar com o elemento de silício, irá ficar sobrando uma ligação chamado de lacuna (Figura 2).

A dopagem do tipo P resulta na formação de uma região semicondutora com uma maior concentração de lacunas em relação aos elétrons. Essa região é chamada de semicondutor P, e é caracterizada por uma carga positiva líquida. Essas lacunas podem se mover através do material como portadores de carga positiva.

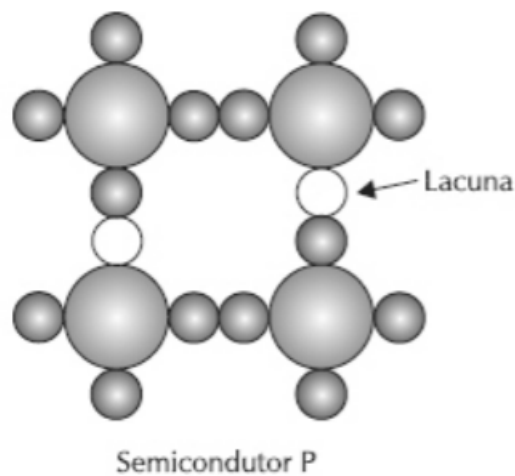


Figura 2. Estrutura cristalina tipo P. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica, conceitos e aplicações

Porém, para o efeito fotovoltaico ocorrer, ambos os materiais devem ser conectados entre si para que ocorra o fluxo de elétron, gerando assim a corrente elétrica e essa conexão é chamada de junção PN.

2.2.4 Junção PN

A junção PN é um elemento chave no funcionamento de dispositivos semicondutores e desempenha um papel fundamental no fenômeno do efeito fotoelétrico fotovoltaico. Neste contexto, o processo de junção PN cria uma barreira de potencial devido às diferenças de concentração de cargas elétricas entre as regiões P e N. Quando a junção PN é exposta à luz, os fótons incidentes possuem energia suficiente para liberar elétrons na região N. Esses elétrons podem atravessar a junção PN e se recombinar com as lacunas na região P, gerando uma corrente elétrica (Figura 3). A intensidade da corrente gerada depende da intensidade da luz incidente. Além disso, a eficiência do processo pode ser aprimorada pela otimização dos materiais semicondutores e do projeto da junção PN.

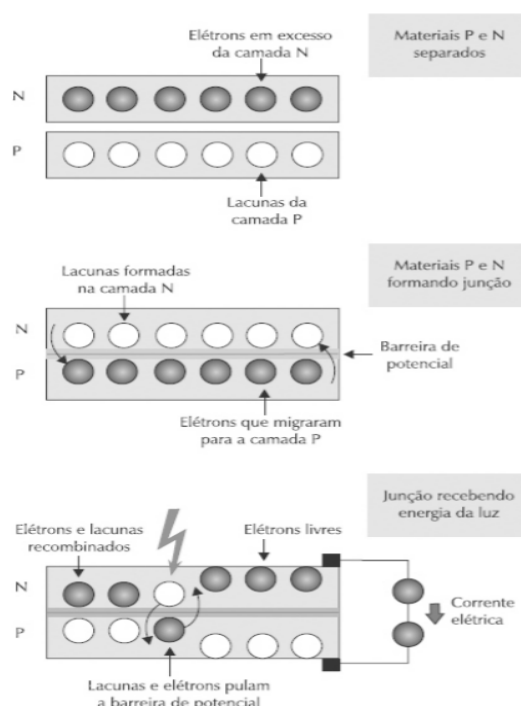


Figura 3. Movimento de elétrons e buracos na junção PN Fonte: Energia Solar Fotovoltaica, conceitos e aplicações

2.3 Módulos fotovoltaicos do mercado

Atualmente existem diversas tecnologias de células fotovoltaicas. Entre elas, as 2 principais por conta de seu método fabril e valor são: Silício monocristalino e policristalino.

2.3.1 Silício Monocristalino

Blocos de silício ultrapuro são aquecidos em altas temperaturas e submetidos a um processo de cristalização chamado Czochralski. Como resultado desse processo, surge um lingote de silício monocristalino, como mostrado na figura 4. O lingote possui uma rede cristalina homogênea o que faz esse tipo de célula fotovoltaica possua uma melhor eficiência energética. Assim o lingote é fatiado para ser produzidas finas camadas para futuramente serem dopadas e resultar no efeito fotovoltaico. Uma desvantagem desse tipo de tecnologia é seu alto valor de mercado por conta do seu processo fabril.

As células de silício monocristalino são as mais eficientes produzidas em larga escala e disponíveis comercialmente. Elas alcançam eficiências sob condições controladas que variam de 15 % a 18 %. Em contrapartida esse tipo de tecnologia têm um custo de produção mais elevado do que outros tipos de células, em virtude das altas temperaturas exigidas para a sua fabricação. Outra característica desse tipo de tecnologia de células é que elas são mecanicamente rígidas e quebradiças, precisando ser montadas em módulos metálicos para aumentar a sua resistência mecânica no uso diário.



Figura 4. Lingote de silício monocristalino. Fonte: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/illustr/i6_1_2.html

2.3.2 Silício Policristalino

A tecnologia de módulo fotovoltaico de silício policristalino, apresenta os cristais de silício agrupados em domínios, resultando em regiões de cristais aglomerados com diferentes tamanhos e orientações. O processo de fabricação das células fotovoltaicas policristalina é muito similar ao realizado para a fabricação das células monocristalina, se diferenciando sobretudo na menor temperatura para a fabricação dos lingotes de silício policristalino. Quando este lingote é cortado, é possível observar esta formação múltipla de cristais (Figura 5). Comparando o desempenho em termos de eficiência as células monocristalinas apresentam um valor ligeiramente maior que as obtidas com a tecnologia policristalina (monocristalina entre 15 % e 18 % e policristalina entre 13 % e 15 %). Já com relação a degradação com o tempo de uso e exposição à radiação solar, eles são muito semelhantes. Entretanto, seu custo de fabricação é menor do que o das células monocristalinas e isso compensa a redução de eficiência.

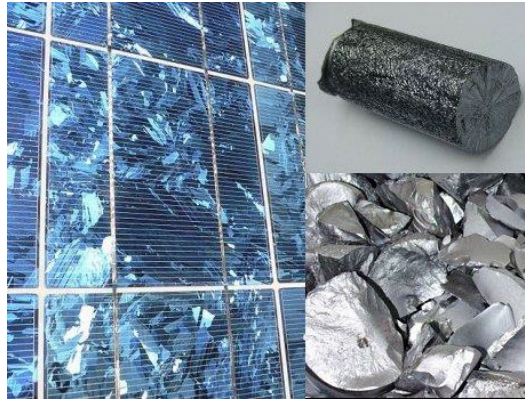


Figura 5. Célula fotovoltaica de Silício Policristalino. Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sil%C3%ADcio_policristalino

2.3.3 Célula fotovoltaica PERC

O significado da sigla PERC é Passivated Emitter Rear Cell, que em tradução livre significa célula com emissor passivo na parte traseira. Esse procedimento possibilita a fabricação de células fotovoltaicas com metade da espessura de células monocristalinas convencionais. A principal vantagem dessa abordagem é a passivação, que permite o aumento da eficiência da célula ao reduzir a velocidade da recombinação de elétrons da superfície do silício que existe em todos os painéis fotovoltaicos. A passivação tem também um efeito óptico, possibilitando a reflexão da luz no fundo da célula, o que faz com que os raios solares passem mais vezes pelo silício, otimizando a potência do sistema.

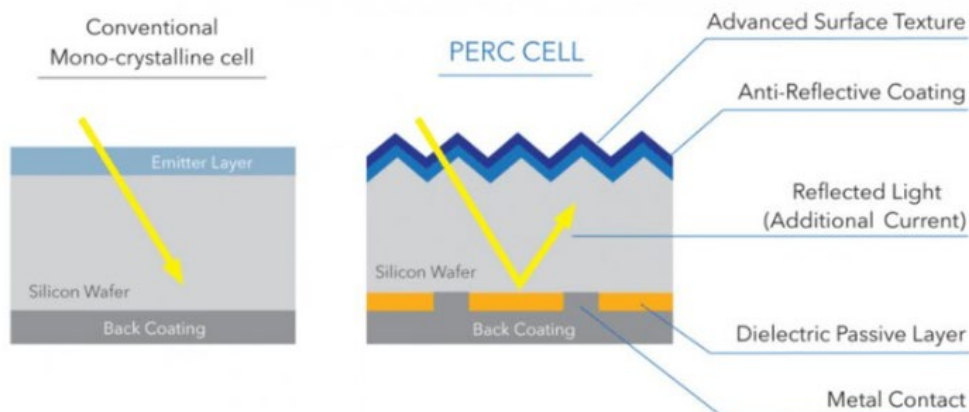


Figura 6. Incidência de raio solar em uma célula monocristalina e PERC. Fonte: Solar Power World

2.3.4 Célula fotovoltaica orgânica

As células fotovoltaicas orgânicas (OPV), assim como as de Silício Amorfo, caracterizam-se por sua fina espessura e notável elasticidade, permitindo que essas células se fixem em praticamente qualquer tipo de superfície (Figura 7).

Ao contrário das células tradicionais que usam Silício como material semicondutor para a geração de eletricidade, as células orgânicas utilizam compostos derivados da indústria petroquímica, os quais são impressos em camadas de vidro ou PET (Politereftalato de etileno).

O processo de fabricação das células OPV requer menos energia do que a tecnologia tradicional, resultando em menores custos associados. No entanto, a principal desvantagem dessa tecnologia é a redução significativa no rendimento energético devido à degradação dos compostos poliméricos e

orgânicos quando expostos continuamente à radiação solar. Além disso, o seu custo ainda é muito alto no mercado, inviabilizando o seu uso em muitos projetos. Por essa razão, ainda não são produzidos em grande escala.



Figura 7. Célula fotovoltaica orgânica. Fonte: [https:// itsolar. com.br/energia-solar/o-que-e-opv-paineis-solares-fotovoltaicos-organicos/](https://itsolar.com.br/energia-solar/o-que-e-opv-paineis-solares-fotovoltaicos-organicos/)

2.4 Conceitos básicos

Ao longo do ano, junto com a movimentação da Terra em relação ao Sol, a posição do aparente do sol varia. Esse efeito é decorrente tanto dos movimentos diários (rotação da Terra) quanto do movimento anual (translação da Terra). Tendo em vista essa situação, alguns é necessário se discutir alguns conceitos a fim de mitigar os efeitos de redução na geração de energia em virtude de uma má relação entre a posição relativa do Sol e o painel fotovoltaico. Entre esses conceitos, os 3 de maior relevância para a presente pesquisa são: Irradiação, inclinação solar e ângulo de incidência.

2.4.1 Irradiação [W/m^2]

É uma grandeza para quantificar a potência por área de radiação solar. Na superfície terrestre a irradiância da luz solar é em torno de 1000 W/m^2 , já no espaço terrestre é cerca de 1353 W/m^2 . A irradiância de 1000 W/m^2 é adotada como padrão na indústria fotovoltaica para a especificação e avaliação de células e módulos fotovoltaicos. [1]

2.4.2 Ângulo azimutal

O azimutal é o ângulo de orientação dos raios solares em relação ao norte geográfico [1]. A sua variação vai de 0 a 180° durante as horas do dia desde o Leste até o Oeste. Nesse caso, esse seria um dos eixos livres do projeto do seguidor solar, ou seja, acompanhar o sol de acordo em que ele varia o ângulo azimutal.

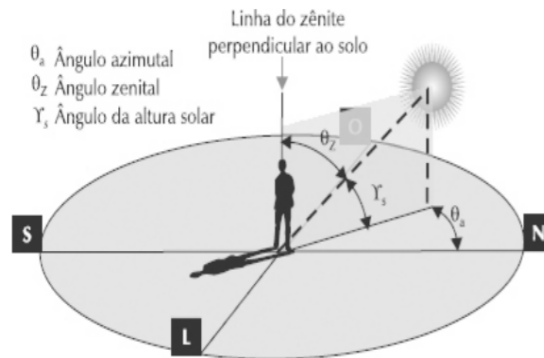


Figura 8. Ângulo Azimutal. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica, conceitos e aplicações

2.4.3 Declinação solar

A declinação solar é o ângulo dos raios solares com relação ao plano do equador. Esse ângulo é consequência da inclinação do eixo da terra, e varia ao longo do ano de acordo com a posição do sol. [1].

Nos solstícios, período em que marca o inverno e verão, é quando ocorrer o ângulo de declinação máxima. Já nos equinócios, é o momento em que o ângulo de declinação é nulo, ou seja, os raios solares incidem de forma paralela ao plano equador terrestre. Note que na figura 9, δ é o ângulo de declinação.



Figura 9. Declinação solar nas 4 estações do ano. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica, conceitos e aplicações

2.4.4 Altura solar

Como foi visto no subcapítulo anterior, durante as estações do ano a declinação solar varia, e consequentemente, a altura solar também. No verão podemos perceber que a altura do sol é máxima, enquanto no inverno é mínima. Com isso, temos 2 novos nomes de ângulos: ângulo zenital e ângulo da altura solar.

Ângulo zenital: É o ângulo entre a linha perpendicular do zênite e o raio solar.

Ângulo da altura solar: É o ângulo entre o solo e o raio solar.

Portanto, quanto maior for o ângulo zenital, menor será o ângulo da altura do sol. O mesmo ocorre inversamente.

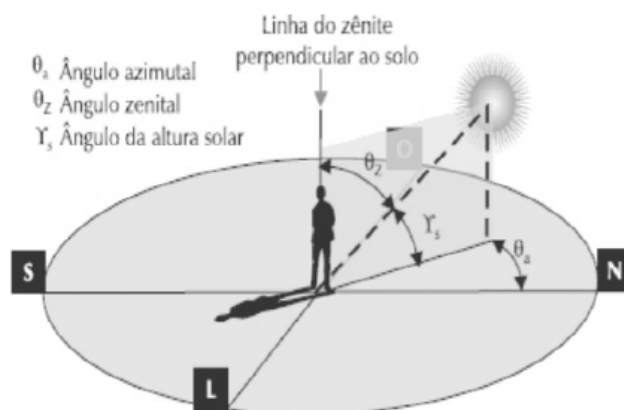


Figura 10. Ângulo zenital e altura solar. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica, conceitos e aplicações

2.4.5 Ângulo de incidência

A incidência dos raios solares na superfície terrestre varia conforme a posição aparente do Sol no céu, a qual é determinada pelos ângulos azimutal e zenital, juntamente com a altura solar. Essa posição varia ao longo do dia e do ano. Na figura 11, é possível ver um desenho que representa a direção de propagação de um raio solar incidindo num módulo fotovoltaico com um determinado ângulo de incidência (β).

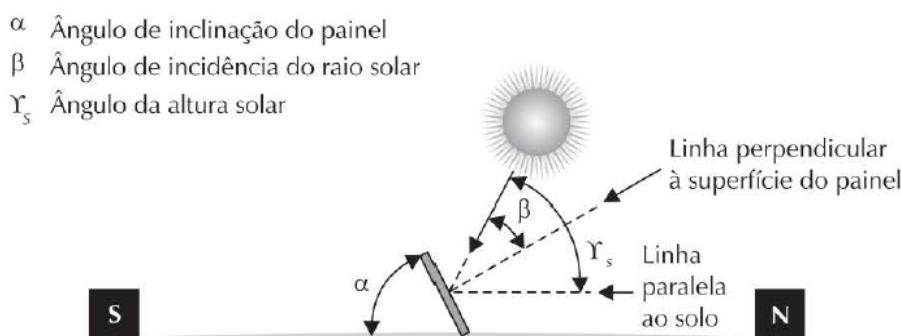


Figura 11. Ângulo de inclinação do módulo e ângulo de incidência dos raios solares. Fonte: Energia Solar Fotovoltaica - conceitos e aplicações

Os raios solares atingem a superfície do módulo com um ângulo de incidência β , referente à reta perpendicular à superfície do módulo. A variação da altura solar a cada dia do ano resulta em raios solares incidindo no módulo com diferentes ângulos de inclinação.

A máxima eficiência na captação de energia solar é obtida quando os raios incidem perpendicularmente à superfície do módulo, com um ângulo β igual a 0. Ou seja, para se obter uma maior quantidade de irradiância em um módulo fotovoltaico, e consequentemente maior geração de energia, é necessário que o módulo fotovoltaico esteja perpendicular aos raios solares. Para isso, é necessário que o ângulo de incidência (ângulo com qual a luz solar incide no módulo) seja sempre ou aproximadamente 90° , em relação ao plano da face do painel solar.

Com isso se cria um desafio: Como manter o módulo sempre perpendicular aos raios solares? Conceitos para mitigar esse problema serão vistos a seguir.

2.5 Curvas características de corrente, tensão e potência

Um módulo fotovoltaico opera de maneira distinta de uma fonte de energia convencional, como uma bateria, pois não mantém uma tensão constante em seus terminais. A tensão de saída de um módulo fotovoltaico é fortemente influenciada pela corrente e vice-versa. O ponto de operação de um módulo fotovoltaico, representado pelos valores de tensão e corrente nos terminais, varia dependendo das condições de conexão e utilização.

Essa relação entre a tensão e a corrente de saída de um módulo fotovoltaico é representada pela curva I-V (corrente-tensão). Todos os módulos fotovoltaicos exibem uma característica semelhante ao gráfico apresentado na figura 12. Para cada curva I-V, há uma correspondente curva P-V (potência-tensão), como mostrado no gráfico da figura 13.

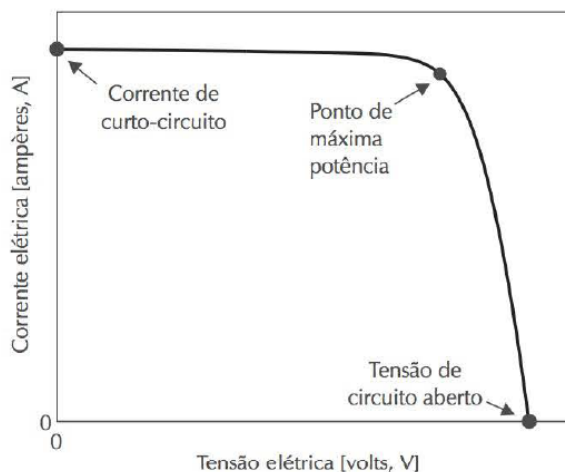


Figura 12. Curva característica I - V de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico. Fonte: Energia solar - Conceitos e Aplicações

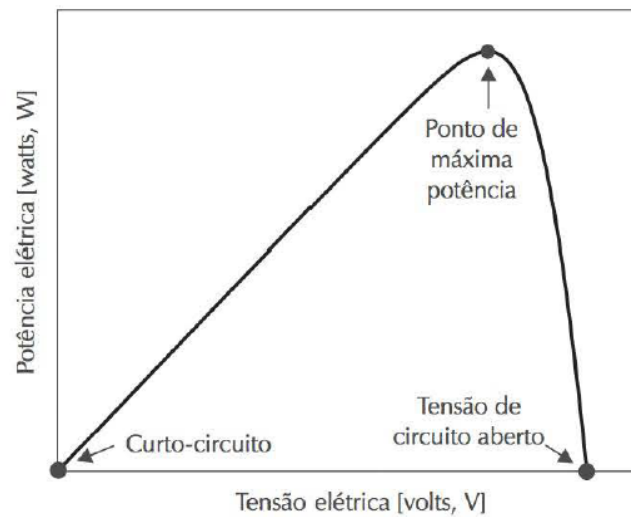


Figura 13. Curva característica P - V de potência e tensão de um módulo fotovoltaico

A análise comparativa entre o sistema fotovoltaico fixo e o sistema do seguidor solar utilizará as curvas I-V e P-V como critérios fundamentais de comparação. Essas curvas são essenciais para avaliar e contrastar o desempenho dos sistemas, fornecendo informações sobre a variação de corrente, tensão e potência gerada em cada configuração. Essa análise permitirá entender como o sistema fixo se comporta em relação ao sistema com seguidor solar, identificando diferenças em termos de eficiência e produção de energia.

3. Apresentação do Projeto

Com os conhecimentos prévios e necessários para o sistema de seguidor solar, serão apresentados os componentes e seus valores, ideias, desafios, a linha de código e o resultado.

3.1 Propostas e desafios

Durante o desenvolvimento do projeto, várias propostas foram concebidas e adaptadas para a sua conclusão. A ideia principal empregou quatro sensores LDRs (Resistores Dependentes de Luz) para captar luz incidentes de diferentes direções (de cima, de baixo, da esquerda e da direita) em relação ao suporte do módulo fotovoltaico. Com base nas medições coletados por esses sensores, foi feita uma comparação entre as medições para se determinar onde há maior incidência de luz entre os quatro sensores. Através do Arduino, foi feita uma análise desses resultados por meio de um código específico, o qual acionava os servos motores para reposicionar a placa fotovoltaica de forma a deixá-la perpendicular aos raios solares.

No entanto, durante o desenvolvimento do projeto, foram observados alguns desafios. Em primeiro lugar, o problema do sombreamento. Na hipótese de se ocorrer um sombreamento no módulo fotovoltaico, o sistema corria o risco de falhar, pois a presença desse efeito (como o causado por nuvens) pode fazer com que o Arduino interprete erroneamente que há maior incidência de luz em uma direção onde o sol não está presente, levando a placa a não retornar à posição ideal ou fazendo com que os motores sejam acionados de forma descontrolada.

Analisando este desafio, e considerando as reduzidas dimensões do módulo fotovoltaico utilizado nesse projeto, foi considerado que o problema de sombreamento sobre o comportamento do sistema de rastreamento do Sol era mínimo, dessa forma, não tendo impacto relevante à presente proposta.

3.2 Componentes do projeto

3.2.1 Arduino UNO

O Arduino é um microcontrolador versátil e acessível comercialmente, amplamente utilizado em uma variedade de projetos tecnológicos, incluindo sistemas de automação, robótica, dispositivos interativos e controle de sensores. Desenvolvido para ser amigável e de fácil utilização, o Arduino oferece uma plataforma de hardware e software flexível que permite o desenvolvimento de projetos.

No projeto em questão, o Arduino foi escolhido como a plataforma central de controle devido a uma sua versatilidade, facilidade de uso e ampla aceitação na comunidade de desenvolvimento de hardware. A capacidade do Arduino de integrar-se facilmente a uma variedade de sensores, motores e outros componentes eletrônicos foi crucial para a implementação do sistema de controle do seguidor solar. Além disso, a sua flexibilidade e a vasta disponibilidade de recursos, incluindo documentação extensiva, códigos abertos e uma comunidade ativa de usuários, proporcionaram uma base sólida para o desenvolvimento e implementação bem-sucedida do projeto. Assim, o Arduino foi selecionado como a plataforma principal devido à sua capacidade de oferecer um ambiente de desenvolvimento acessível, adaptável e com suporte robusto para a concepção e operacionalização do sistema de controle do seguidor solar. No estudo foi utilizado o microcontrolador Arduino UNO (figura 14), responsável por fazer a movimentação dos servomotores, permitindo a rotação nos dois eixos para melhorar captação de luz. Além disso, o Arduino é responsável pela leitura e gravação dos dados de corrente e tensão, que serão usados para comparação entre os sistemas móvel e fixo.



Figura 14. Arduino UNO

3.2.2 Módulo Fotovoltaico

Neste projeto, optou-se por integrar dois módulos fotovoltaicos de baixa potência (1 W) com uma tensão de alimentação de 5 Volts e uma corrente máxima de 200 mA (Figura 15). A escolha por módulos de pequena potência foi estratégica, visando compatibilidade direta com o Arduino, que opera em níveis de tensão e corrente semelhantes. O Arduino é capaz de operar com dispositivos de baixa tensão e corrente, e ao empregar módulos fotovoltaicos compatíveis com essa faixa de energia, garantimos uma interação satisfatória entre os componentes.

Esses módulos de pequena potência, embora gerem uma quantidade limitada de energia, oferecem uma adequação ideal para a aplicação desse sistema em particular, permitindo que o Arduino colete e utilize a energia de maneira eficaz para o funcionamento do seguidor solar. A compatibilidade direta entre os módulos fotovoltaicos e o Arduino foi crucial para garantir a eficiência e o desempenho adequado do sistema como um todo. Essa abordagem proporcionou um sistema otimizado e coerente com os requisitos e capacidades do Arduino, permitindo o desenvolvimento de um seguidor solar funcional e adaptável.



Figura 15. Módulo fotovoltaico usado no projeto

3.2.3 LDRs

O LDR (*Light Dependent Resistor*), também conhecido como resistor dependente de luz, é um componente eletrônico sensível à luz, cuja resistência varia de acordo com a intensidade luminosa incidente sobre ele. Na figura 16 é mostrado a foto de um sensor LDR.

A utilização do LDR nesse projeto é especialmente relevante, já que o componente é capaz de captar e reagir às variações na intensidade da luz solar. Quando exposto à luz, o LDR apresenta uma menor resistência, enquanto em ambientes com menor luminosidade, a resistência do LDR aumenta.

A capacidade do LDR em fornecer informações sobre a luminosidade em várias posições é fundamental para o funcionamento eficaz do seguidor solar, permitindo que o sistema tome decisões precisas sobre a direção na qual a placa solar deve ser orientada para obter a melhor eficiência na captação de energia solar. A sua utilização proporciona ao sistema a capacidade de se adaptar dinamicamente às mudanças na luz solar ao longo do dia, otimizando a eficiência do painel solar.

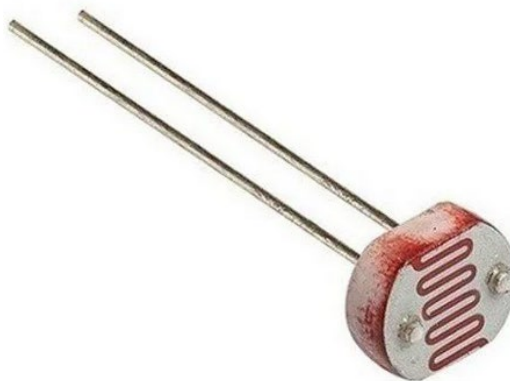


Figura 16. Sensor LDR

3.2.4 Resistores

Nesse projeto foram utilizados resistores (Figura 17) para limitar a corrente que flui através de componentes eletrônicos. Isso é crucial para proteger os componentes contra correntes excessivas que poderiam danificá-los.

Adicionalmente, os resistores desempenham um papel importante na interação entre os sensores, como os LDRs, e o sistema de controle, ajudando a garantir que os dados sejam lidos com precisão, assegurando uma resposta adequada e ajustando a sensibilidade dos sensores à luz solar.



Figura 17. Resistor de 330 Ω

Foram utilizados 4 resistores de 330 Ω , criando dois circuitos de divisor de tensão, para que o Arduino possa ler a tensão e corrente gerada pela mini placa solar.

3.2.5 Servomotores

Os servomotores desempenham um papel crucial no funcionamento do seguidor solar. Suas funções principais estão relacionadas ao direcionamento do módulo fotovoltaico para otimizar a captação de luz solar. Os servomotores são responsáveis por controlar os movimentos do suporte onde se encontra a placa. Um servomotor é atribuído ao eixo horizontal, permitindo a rotação da placa para seguir a trajetória do sol ao longo do dia. O segundo servomotor controla o eixo vertical, possibilitando a inclinação da placa, a fim de maximizar a exposição aos raios solares.

Com base nos dados coletados pelos sensores (LDRs), os servomotores direcionam a placa solar de forma dinâmica para acompanhar a posição do sol. Eles ajustam continuamente o ângulo da placa para garantir a máxima eficiência na captação de energia solar, permitindo que a placa permaneça alinhada com a fonte de luz durante todo o dia.

Assim, os servomotores desempenham um papel crucial no controle preciso da posição da placa solar, garantindo que ela esteja sempre orientada de maneira ideal para captar a maior quantidade de luz solar possível, maximizando a eficiência do sistema fotovoltaico.

3.2.6 Jumpers

Os jumpers (Figura 18) são pequenos componentes utilizados para estabelecer conexões ou configurações específicas em placas de circuito impresso (PCBs) ou em sistemas eletrônicos. Sua função principal é criar conexões temporárias entre diferentes pontos de um circuito ou para alterar a configuração do sistema.

Nesse projeto, os jumpers foram utilizados para conectar sensores, módulos e componentes ao circuito do seguidor solar, permitindo a troca de dados ou sinais entre os componentes do sistema. Eles desempenham um papel essencial no projeto, oferecendo flexibilidade na configuração do circuito, permitindo ajustes e facilitando o teste de diferentes configurações ou modos de operação sem a necessidade de alterações estruturais ou permanentes no sistema.



Figura 18. Jumpers de conexão

3.2.7 Suporte com 2 eixos giratórios

O suporte utilizado neste projeto (Figura 19) é um dispositivo que permite a rotação da placa solar em dois eixos distintos, possibilitando um controle preciso da sua orientação em relação à fonte de luz solar. Esse suporte é um componente chave do seguidor solar, viabilizando o acompanhamento do movimento do sol ao longo do dia e durante as estações do ano.

Ele é composto por mecanismos de rotação nos eixos horizontal e vertical, também conhecidos como azimutal e de altitude, respectivamente. Essa estrutura oferece a capacidade de movimentação em duas direções:

1. Rotação Horizontal (Azimutal): Este movimento possibilita a rotação da placa solar de um lado para o outro, ao longo do plano horizontal. Essa rotação horizontal permite que a placa acompanhe a trajetória do sol no céu ao longo do dia, ajustando-se de leste a oeste para capturar a máxima exposição aos raios solares.
2. Rotação Vertical (Altitude): Esse movimento permite a inclinação da placa solar para cima ou para baixo, ajustando a sua inclinação em relação ao plano horizontal. Esta ação é crucial para otimizar a captação de energia solar, permitindo ajustes conforme a altura do sol no céu varia ao longo do dia.

A capacidade de rotação em ambos os eixos possibilita que a placa solar se mova dinamicamente para acompanhar a posição do sol, otimizando continuamente sua orientação para obter a máxima eficiência na captação de energia solar. Esse suporte oferece uma solução precisa e ajustável, contribuindo significativamente para a funcionalidade do seguidor solar.



Figura 19. Suporte com rotação em 2 eixos

3.2.8 Resumo de componentes e preços

Na tabela 1 é apresentado um quadro contendo os componentes do projeto e seus respectivos preços.

Tabela 1. Inventário de componentes utilizados no projeto.

Componente	Quantidade	Preço (R\$)
Arduino uno	1	80,00
Jumpers	40	13,97
Resistores de 330 Ω	4	3,00
Servo motor	2	15,00
Light Dependent Resistance (LDR)	4	3,00
Suporte de MDF	2	89,90
Mini placa solar de 1 W	2	35,00

3.3 Integração dos componentes

A integração de todos os componentes no projeto do seguidor solar foi essencial para o funcionamento eficiente do sistema como um todo. A união de cada parte, desde os sensores até os motores e o módulo fotovoltaico, foi fundamental para garantir que o sistema funcione de maneira coordenada e responsiva às condições de iluminação solar.

O circuito operou de maneira integrada, atendendo plenamente ao objetivo do projeto da seguinte maneira:

1. Sensores (LDRs): Os sensores de luz (LDRs) são instalados estrategicamente para captar a intensidade luminosa em diferentes pontos. Esses dados são transmitidos para o microcontrolador Arduino.

2. Microcontrolador (Arduino): O Arduino recebe os dados dos sensores e os processa usando um código pré-programado. Com base nessas informações, o Arduino aciona os servomotores para mover a placa solar.

3. Placa Solar: A placa solar é montada no suporte com movimento em dois eixos, permitindo a movimentação horizontal e vertical para seguir a trajetória do sol durante o dia.

4. Servomotores: Os servomotores, controlados pelo Arduino, ajustam a posição da placa solar conforme as informações recebidas dos sensores, alinhando-a de forma otimizada para a captação de energia solar.

5. Jumper e outros componentes auxiliares: Os jumpers, resistores e outros componentes elétricos são utilizados para configurar o circuito, ajustar a sensibilidade dos sensores e facilitar a comunicação entre os dispositivos.

A integração eficaz desses componentes envolve a interconexão precisa e a sincronização adequada entre os elementos do sistema. Isso é crucial para assegurar que o seguidor solar possa captar energia solar de maneira otimizada, ajustando dinamicamente a posição da placa para acompanhar o movimento do sol, maximizando a eficiência na geração de energia elétrica a partir da luz solar. Na figura 20 é mostrado o sistema fotovoltaico montado.

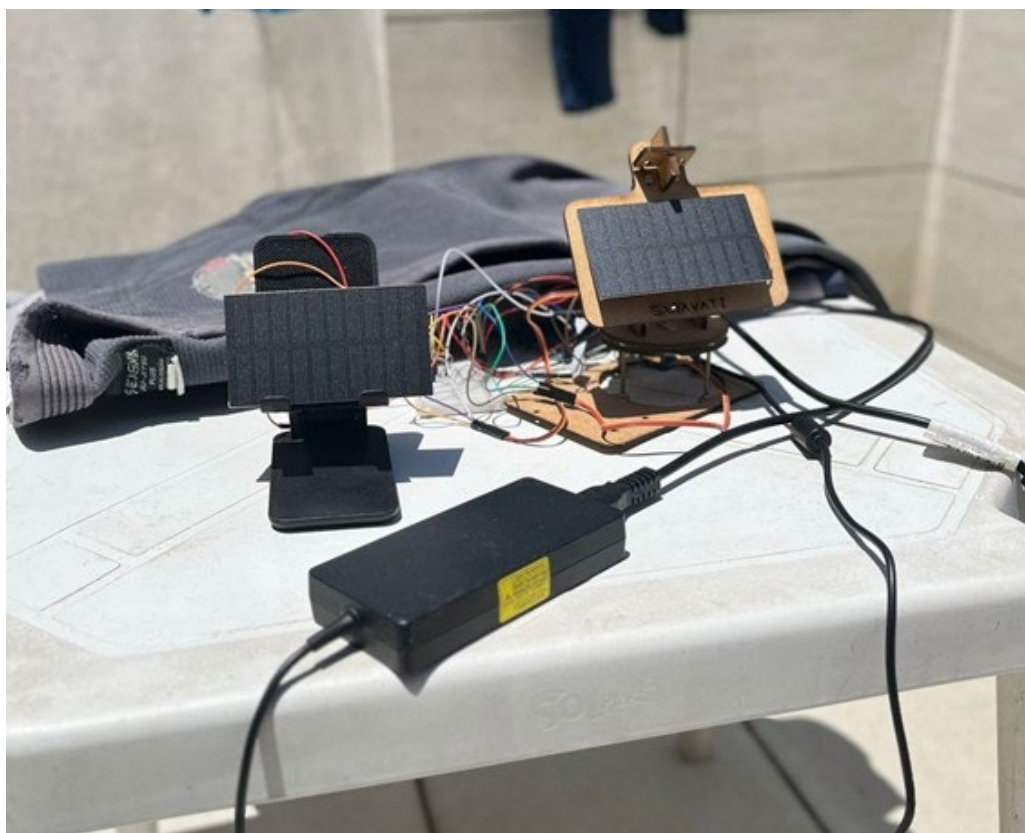


Figura 20. Projeto em funcionamento no dia 28/11/2023

3.4 Código do Arduino UNO

Sketch para o rastreador solar

```
#include <Servo.h>           // Inclui a Biblioteca

Servo Horizontal;           // Inicia o Servo da Horizontal
Servo Vertical;             // Inicia o Servo da Vertical

int ServoHorizontal = 90;   // Estabelece valor fixo à ServoHorizontal
int ServoVertical = 90;     // Estabelece valor fixo à ServoVertical

int LimiteServoHorizontalMax = 180; // Estabelece os limites de rotação
int LimiteServoHorizontalMin = 65;  // Estabelece os limites de rotação

int LimiteServoVerticalMax = 200;   // Estabelece os limites de rotação
int LimiteServoVerticalMin = 15;    // Estabelece os limites de rotação

int LDRDC = A0;                  // Inicia LDRDC no pino A0
int LDRDB = A1;                  // Inicia LDRDB no pino A1
int LDREC = A2;                  // Inicia LDREC no pino A2
int LDREB = A3;                  // Inicia LDREB no pino A3

void setup() {
    Horizontal.attach(3);        // Inicia servo Horizontal na porta D3
    Vertical.attach(5);          // Inicia servo Vertical na porta D5

    Horizontal.write(180);       // Inicia servo Horizontal na posição 180
    Vertical.write(45);          // Inicia servo Horizontal na posição 45
    delay(3000);                 // Aguarda 3 segundos
}
```

```

void loop() {

    int LDC = analogRead(LDRDC);    // Leitura Analógica do LDR Direita Cima
    int LEC = analogRead(LDREC);    // Leitura Analógica do LDR Esquerda Cima
    int LDB = analogRead(LDRDB);    // Leitura Analógica do LDR Direita Baixo
    int LEB = analogRead(LDREB);    // Leitura Analógica do LDR Esquerda Baixo


    int tol = 50;


    int ValorSup = (LDC + LEC) / 2;  // Média da leitura dos LDR superior
    int ValorInf = (LDB + LEB) / 2;  // Média da leitura dos LDR inferior
    int ValorDir = (LDC + LDB) / 2;  // Média da leitura dos LDR da direita
    int ValorEsq = (LEC + LEB) / 2;  // Média da leitura dos LDR da esquerda


    int DifSupInf = ValorSup - ValorInf;    // Diferença entre LED superior e inferior
    int DifDirEsq = ValorDir - ValorEsq;    // Diferença entre LED direita e esquerda


    /*-----*/


    // Realiza a leitura e executa os movimentos referente ao Servo Vertical
    if (-1 * tol > DifSupInf || DifSupInf > tol) {
        if (ValorSup > ValorInf) {
            ServoVertical = ++ServoVertical;
            if (ServoVertical > LimiteServoVerticalMax) {
                ServoVertical = LimiteServoVerticalMax;
            }
        }
        else if (ValorSup < ValorInf) {

```

```
ServoVertical = --ServoVertical;

if (ServoVertical < LimiteServoVerticalMin) {

    ServoVertical = LimiteServoVerticalMin;

}

}

Vertical.write(ServoVertical);

}

// Realiza a leitura e executa os movimentos referente ao Servo Horizontal

if (-1 * tol > DifDirEsq || DifDirEsq > tol) {

    if (ValorDir < ValorEsq) {

        ServoHorizontal = --ServoHorizontal;

        if (ServoHorizontal < LimiteServoHorizontalMin) {

            ServoHorizontal = LimiteServoHorizontalMin;

        }

    }

    else if (ValorDir > ValorEsq) {

        ServoHorizontal = ++ServoHorizontal;

        if (ServoHorizontal > LimiteServoHorizontalMax) {

            ServoHorizontal = LimiteServoHorizontalMax;

        }

    }

    else if (ValorDir = ValorEsq) {

    }

    Horizontal.write(ServoHorizontal);

}

delay(50); // Aguarda 0,1 segundo

}
```

```
#include <EEPROM.h>

#include <Wire.h>

unsigned long inicioTempo = 0;

unsigned long tempoAtual = 0;

int tensaofixo = A0;

int tensaomovel = A5;

float tensaoMax = 5.0;

float Vf = 0;

float If = 0;

float Pf = 0;

float Vm = 0;

float Im = 0;

float Pm = 0;

struct DataRegistro {

    unsigned long horas;

    unsigned long minutos;

    unsigned long segundos;

    float V;

    float I;

    float P;

    float V2;

    float I2;

    float P2;

};
```

```
unsigned long seg = 0; //Variável auxiliar

unsigned long minu = 0; //Variável auxiliar

unsigned long hor = 0; //Variável auxiliar


DataRegistro reg; // Crie uma estrutura para armazenar os dados

int enderecoEEPROM = 0; // Iniciando a Localização da memória para GRAVAR e LER

int endEEPROM = 0 ;


void setup() {

    inicioTempo = millis();

    Serial.begin(9600);

    Wire.begin();


    //pinMode(tensaofixo, INPUT);

    //pinMode(tensaomovel, INPUT);


    /*

    // ZERANDO OS VALORES DA STRUCT

    for (int enderecoEEPROM = 0; enderecoEEPROM < EEPROM.length(); enderecoEEPROM +=
sizeof(DataRegistro)) {

        EEPROM.write(enderecoEEPROM, 0);

    }

    Serial.println("Dados da EEPROM apagados.");


    */

}


void loop() {
```

```
tempoAtual = millis();

unsigned long tempoDecorrido = tempoAtual - inicioTempo;


// Criando a hora e minutos


seg = (tempoDecorrido / 1000) % 60;
minu = (tempoDecorrido / 60000) % 60;
hor = (tempoDecorrido / 3600000);


//Armazenando os valores de V, I e P


int ValorFixo = analogRead(tensaoFixo);
int ValorMovel = analogRead(tensaomovel);


Vf = (ValorFixo * tensaoMax) / 1023.0;
Vm = (ValorMovel * tensaoMax) / 1023.0;


If = (Vf * 1000) / 330;
Im = (Vm * 1000) / 330;


Pf = Vf * If;
Pm = Vm * Im;


reg.segundos = seg;
reg.horas = hor;
reg.minutos = minu;
reg.V = Vf ;
reg.I = If;
```

```
reg.P = Pf;
```

```
reg.V2 = Vm ;
```

```
reg.I2 = Im;
```

```
reg.P2 = Pm;
```

```
// Salvar a estrutura de texto na memória EPROM
```

```
EEPROM.put(enderecoEEPROM,reg);
```

```
enderecoEEPROM += sizeof(DataRegistro);
```

```
EEPROM.get(endEEPROM,reg);
```

```
endEEPROM += sizeof(DataRegistro);
```

```
Serial.print(reg.horas);
```

```
Serial.print(":");
```

```
Serial.print(reg.minutos);
```

```
Serial.print(":");
```

```
Serial.print(reg.segundos);
```

```
Serial.print("  ")
```

```
;
```

```
Serial.print("Vfixo = ");
```

```
Serial.print(reg.V);
```

```
Serial.print("; Ifixo = ");
```

```
Serial.print(reg.I);
```

```
Serial.print("; Pfixo = ");
```

```
Serial.print(reg.P);
```

```
Serial.print("  ");  
  
Serial.print("Vmovel = ");  
  
Serial.print(reg.V2);  
  
Serial.print("; Imovel = ");  
  
Serial.print(reg.I2);  
  
Serial.print("; Pmovel = ");  
  
Serial.print(reg.P2);  
  
  
Serial.println("");  
  
delay(60000);  
  
}
```

4. Resultados

A análise dos resultados provenientes da medição efetuada no dia 28/11/2023 é apresentada nas figuras 21 a 23. Estes gráficos comparativos ilustram as variações de tensão e potência nos sistemas fixo e móvel, proporcionando uma visão abrangente das diferenças observadas ao longo do dia analisado.

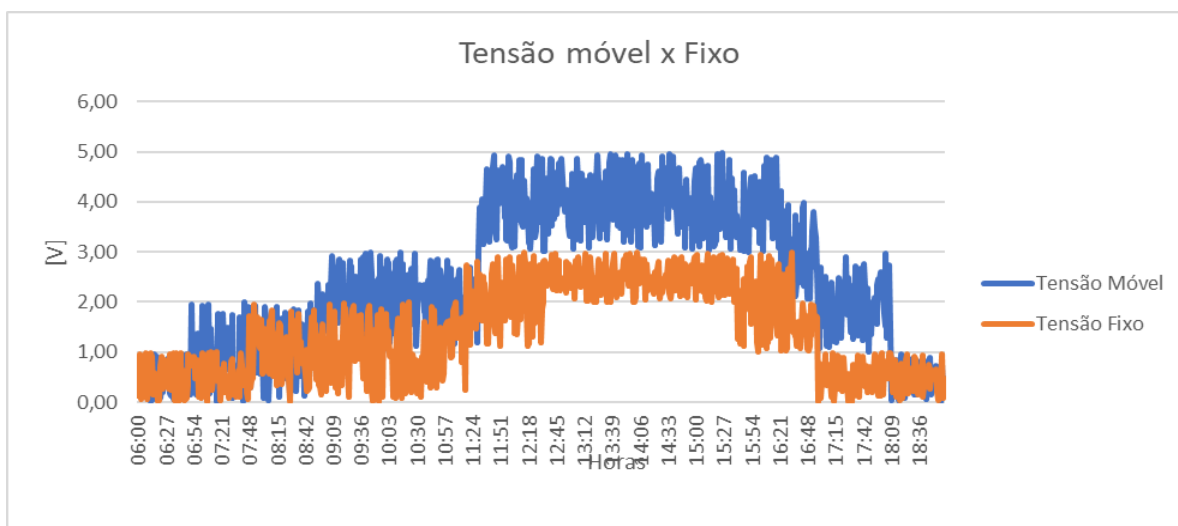


Figura 21. Tensão (Fixo e Móvel) x Tempo

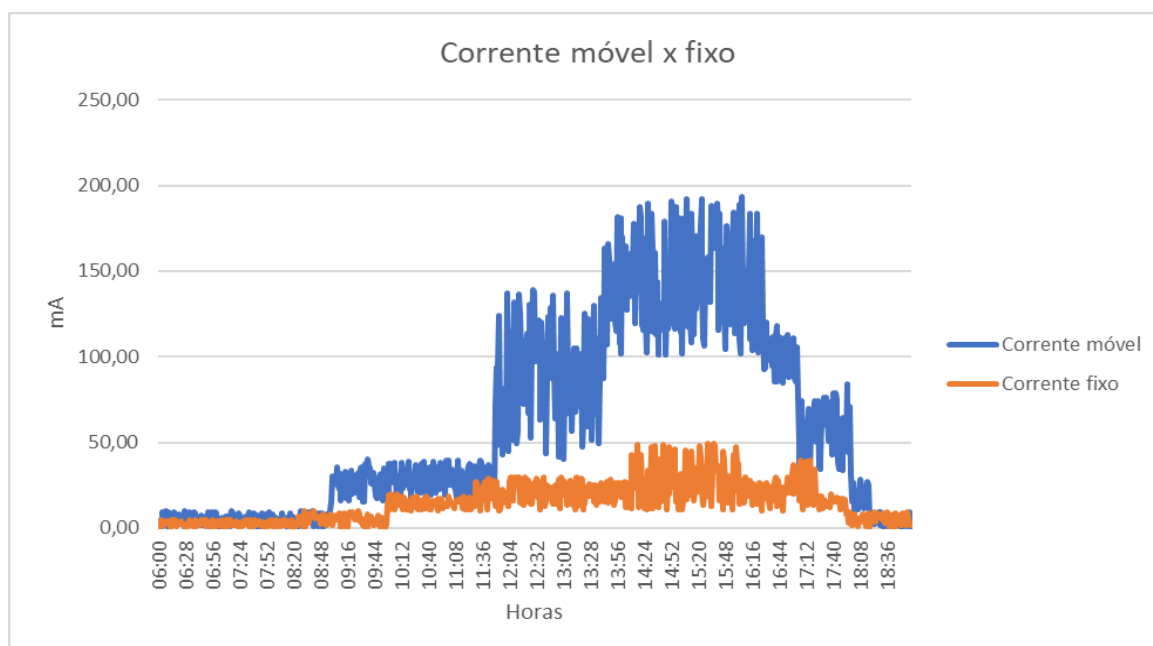


Figura 22. Corrente (Móvel e Fixo) x Tempo

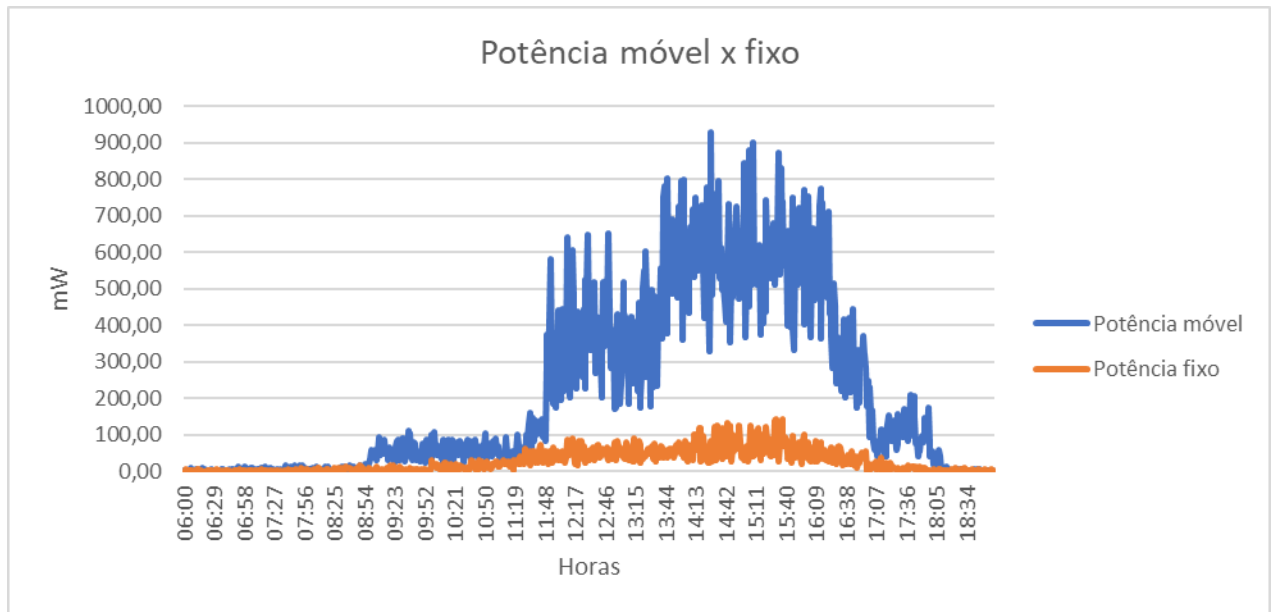


Figura 23. Potência (Móvel e Fixo) x Tempo

Os resultados obtidos são mostrados na tabela 2.

Tabela 2. Resultados obtidos

Dia	Sistema	Tensão média (V)	Potência média (mW)
09/11/2023	Fixo	1,41	26,70
09/11/2023	Com rastreador	2,44	210,6

5. Conclusão

Foi apresentado um estudo empírico para demonstrar a aplicação de um sistema seguidor solar e comparar a potência gerada entre este e um sistema sem seguidor solar. Para tanto, foi desenvolvido um protótipo de seguidor solar baseado em medições da radiação solar em tempo real, e ajustes de inclinação das placas solares de forma a maximizar a geração. O sistema desenvolvido usou dois circuitos com divisores de tensão, cada um composto por quatro resistores de $330\ \Omega$, para substituir os sensores convencionais de corrente e tensão. Esse design de medição foi utilizado para fornecer os dados de geração em tempo real, sendo válido ressaltar que essa abordagem pode introduzir uma margem de erro nos valores gerados, uma vez que a conexão dos fios soldados nas placas da protoboard não estava perfeitamente ajustada. Além disso, os resistores entraram em contato com a parte externa dos fios, e o Arduino, em sua porta analógica, registrou os valores gerados juntamente com ruídos, resultando em algumas imprecisões nas leituras.

A observação dos gráficos mostrados nas figuras 21 a 23 evidenciam uma variação mais expressiva na tensão e potência durante o dia 28/11/2023, atribuída à projeção de sombra sobre a mesa de apoio dos componentes eletrônicos. Esse fenômeno impactou diretamente a eficiência do sistema fixo, destacando a sensibilidade desse modelo a condições adversas. No entanto, ao longo do tempo e nos dias subsequentes, o sistema móvel manteve um desempenho mais consistente e eficiente.

Os resultados (Tabela 2) indicam uma média mais elevada de tensão, corrente e potência para o sistema com rastreador solar. Em particular, os valores de potência média para o sistema móvel são notavelmente superiores, evidenciando a eficácia do rastreamento solar em otimizar a captura de energia solar incidente.

Em síntese, os achados desta pesquisa sustentam a recomendação da implementação de seguidores solares como estratégia eficaz para maximizar a eficiência na geração de energia solar por meio de módulos fotovoltaicos. Apesar das ressalvas relacionadas às limitações experimentais, os resultados obtidos oferecem uma base para compreender as vantagens do sistema móvel, contribuindo assim para o avanço no desenvolvimento de soluções mais eficientes e sustentáveis no campo da energia solar.

6. Bibliografia

- [1] - Energia Solar fotovoltaica – Conceitos e Aplicações. Autor: Marcelo Gradella Villalva.
- [2] - Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em:
http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf.
- [3] - Solar Energy Experiments, for high school and college students. Autor Thomas W. Norton