

DISPOSITIVO DE VARREDURA E RASTREAMENTO DA TRAJETÓRIA SOLAR PARA MAXIMIZAR A CONVERSÃO FOTOVOLTAICA DE ENERGIA

CIMINO, Welbert Wagner¹
MAGRI, Luis Paulo²
PICCININI, Marco Aurélio³
LOPES, Charlie Hudson Turette⁴

Linha de pesquisa: Eficiência Energética

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise para controlar sistemas de rastreamento solar em aplicações de geração fotovoltaica, com ênfase na otimização do ângulo de captação ideal da radiação solar nos painéis, maximizando sua eficiência. A posição do Sol no horizonte varia ao longo do dia, causando alterações nos ângulos de azimute e altitude solar, o que reduz a eficiência dos sistemas fotovoltaicos tradicionais. Essas variações são uma consequência da trajetória solar, resultando em mudanças contínuas no ângulo de influência direta da luz sobre os painéis. Para maximizar a geração de energia elétrica através de painéis solares verificamos que um dispositivo que permita que a placa fotovoltaica acompanhe a trajetória do sol, seria de 25% a 45% mais eficiente que um sistema estático normal no painel solar que seria de 17%, este estudo avaliou as previsões de implementação de sistemas de controle que ajustam automaticamente a posição dos módulos solares através de um controlador lógico programável (PLC), garantindo um desempenho otimizado e eficiente ao longo do tempo. Com isso será descontado os gastos energéticos que o rastreador vai gastar e veremos se vale a pena implementar o protótipo

Palavras-chave: Energia solar. Energia renovável. Sistemas fotovoltaicos. Eficiência energética

¹ Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia - UniAcademia

² Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia - UniAcademia.

³ Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia - UniAcademia.

⁴ Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia - UniAcademia.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o uso de fontes renováveis de energia tem aumentado significativamente. Nesse contexto para tentarmos aumentar a eficiência de captação de energia solar pelos módulos, sistemas de rastreamento solar têm sido propostos, sendo apresentados com várias estratégias de controle, pois esses sistemas têm um impacto direto na geração de energia útil. Por outro lado, esses sistemas podem consumir energia para fazer o rastreamento do sol e impactar negativamente a geração de energia. Visto isso, estudar e desenvolver estratégias eficientes de rastreamento solar pode ser uma estratégia que aumente a eficiência de campos solares, compensando, em parte, a eficiência limitada que os módulos comerciais ainda apresentam. Falaremos sobre a energia solar convertida em energia elétrica, que está cada vez mais sendo usada globalmente, aliado a isso métodos mais eficientes de transmissão e consumo se fazem necessários. Com isso muitos estudos são feitos para melhorar cada vez mais a maior eficiência energética com menores perdas.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo avaliar uma estratégias de rastreamento solar na prática, e falar de outras estratégias buscando maneiras de melhorar a eficiência de geração dos sistemas solares através da movimentação dos módulos, visando maximizar a conversão fotovoltaica de energia

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Utilizar um PLC para controlar um Rastreador Solar
- Implementar algoritmos para o rastreamento via software
- Montar o protótipo, da estrutura mecânica e parte eletroeletrônica
- Analisar o desempenho do sistema dos módulos fotovoltaicos móvel com o sistema fixo se é viável.

1.3 MOTIVAÇÃO

Desde a descoberta do efeito fotovoltaico em 1839, pelo físico Edmond Becquerel, a busca por fontes de energia renováveis e sustentáveis tem se intensificado. Esse contexto tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias inovadoras voltadas à otimização da eficiência dos sistemas de geração fotovoltaica, como é o caso dos rastreadores solares.

Com o aumento exponencial da população, com as queimadas, as secas estamos enfrentando uma crise energética, estamos em busca por fontes de energia renováveis para suprir a falta que as hidrelétricas não estão gerando, pensando nesse cenário os rastreadores solares se destacam com uma solução inovadora permitindo que os módulos fotovoltaicos ajustem sua posição de acordo com a movimentação do sol proporcionando mais energia captadas nos módulos e gerando mais energia elétrica ao longo do dia.

1.4 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO

Na primeira seção, são apresentados a introdução, a motivação e a estrutura do trabalho.

A segunda seção traz uma breve descrição sobre as fontes de energia renovável e seu panorama no cenário mundial.

Na terceira seção, aborda-se a história da energia fotovoltaica, os painéis solares, seu funcionamento, a influência dos pontos cardeais e a geração de energia.

A quarta seção descreve os seguidores solares, explicando seus tipos e modos de funcionamento.

A quinta seção trata dos diferentes tipos de controle aplicáveis aos rastreadores solares, como os sistemas de malha aberta, malha fechada e controles estáticos.

Na sexta seção, são apresentados os métodos e modelos adotados no desenvolvimento do projeto.

A sétima seção detalha os materiais utilizados e as conexões realizadas.

A oitava seção contempla os testes aplicados, bem como a apresentação e análise dos resultados obtidos.

A nona seção discute as vantagens e a viabilidade da proposta desenvolvida.

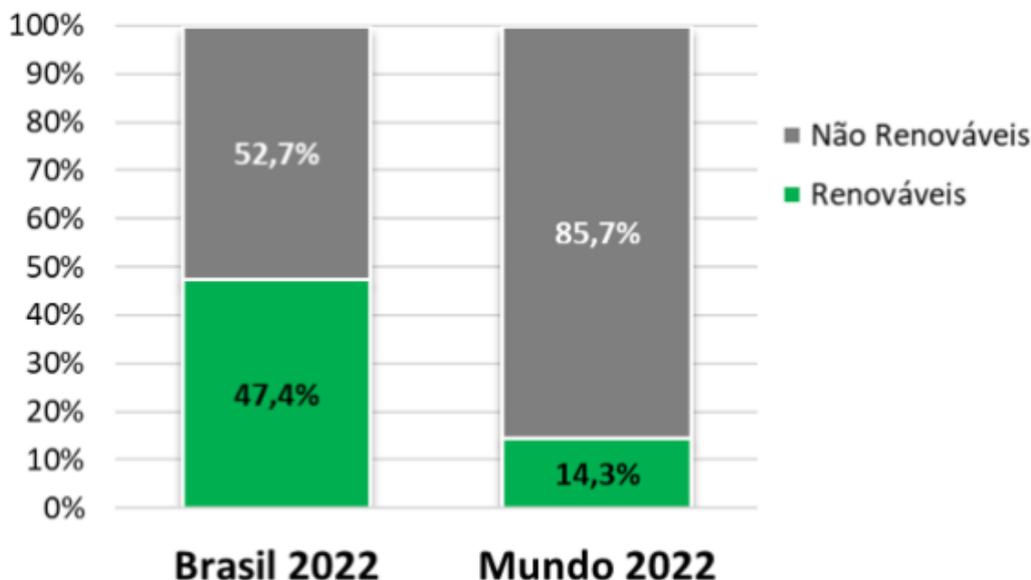
Por fim, a última seção traz as conclusões finais do trabalho.

2 ENERGIA RENOVÁVEIS

Energia renovável é aquela em que os recursos não se esgotam, pelo menos num período que abranja a existência da vida na Terra como atualmente a conhecemos. A radiação solar é considerada uma energia renovável, visto que o Sol poderá fornecer energia para a Terra por mais 5 bilhões de anos. (Mei,2024, p.77).

O gráfico indica que a matriz energética brasileira é mais renovável do que a mundial EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 47,4% da energia elétrica que consumimos são renováveis, em detrimento de 14,3% no restante do mundo como a Figura 1. (Epe, 2022).

FIGURA 1 - Comparação matriz elétrica renovável Brasil X Mundo



Fonte: Epe, 2022 (Adaptado pelo Autor).⁵

Esses resultados estão diretamente ligados ao uso predominantemente de hidrelétricas na geração de eletricidade, que são responsáveis por mais de 58,9 % da produção. (Epe, 2023).

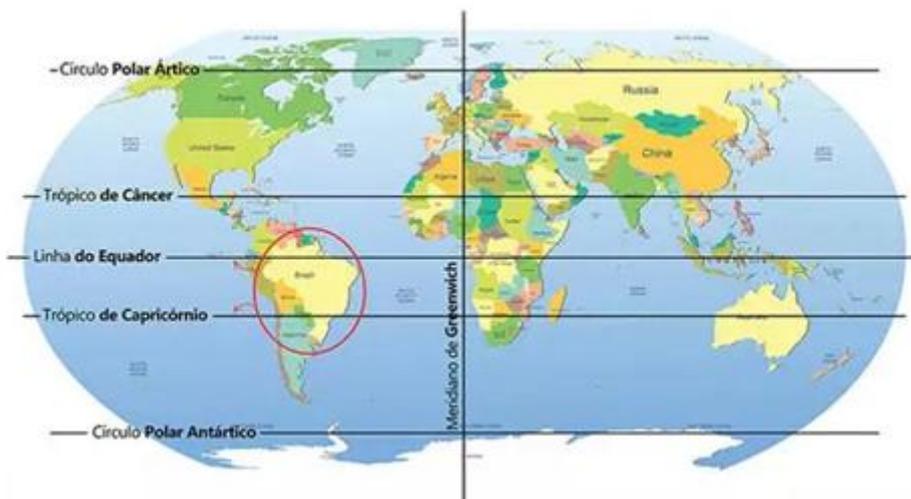
Embora a maior parte da energia produzida no Brasil venha de fontes

⁵ Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 03 maio 2025.

renováveis, a matriz elétrica nacional enfrenta desafios, principalmente devido à forte dependência de uma única fonte de energia: as hidrelétricas. Essa concentração representa um risco, já que variações climáticas podem impactar diretamente a produção energética do país (Epe, 2020).

Entre as fontes renováveis, a energia solar destaca-se pelo seu grande potencial em países como o Brasil. Graças à sua extensa área territorial e localização geográfica, grande parte do território brasileiro encontra-se entre a linha do Equador e o Trópico de Capricórnio, o que garante uma alta incidência solar durante todas as estações do ano, conforme demonstrado na Figura 2

FIGURA 2 – Posição geográfica do Brasil



Fonte: Polon, 2022 (Adaptado pelo Autor).⁶

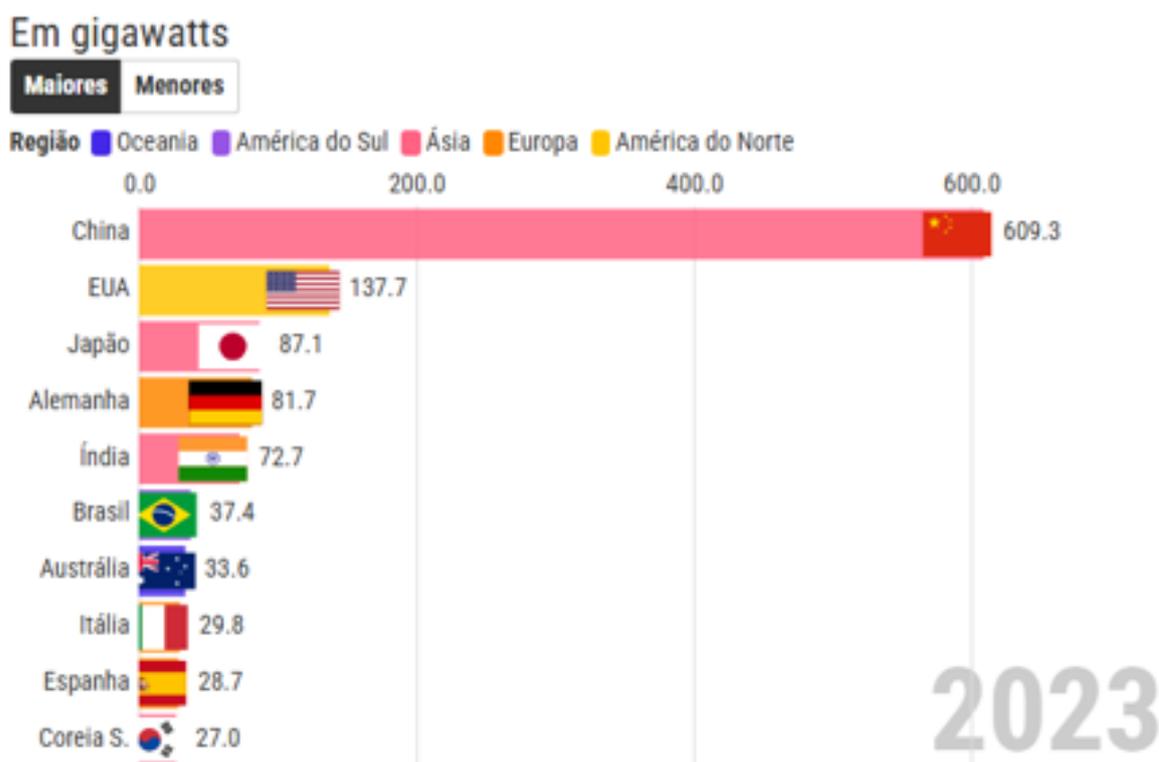
Apesar do grande potencial solar existente no Brasil, o país ainda não explora esse recurso de forma suficiente para aumentar sua participação na matriz elétrica nacional. Investir mais nessa fonte poderia contribuir para diversificar o uso de energias renováveis e tornar a matriz energética mais sustentável. (Lemos Júnior, 2020).

Podemos ver na Figura 3, a china domina a produção de energia solar no

⁶ Disponível em: <https://www.geokratos.ggf.br/2021/05/area-territorial-do-brasil.html>. Acesso em: 07 jul. 2025.

mundo , o Brasil adicionou 12GW de potência só em 2023, com isso ele salta duas posições para o sexto lugar. (Absolar,2023)

FIGURA 3 – Capacidade instalada acumulada



Fonte: Irena, 2023 (Adaptado pelo Autor).⁷

3 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

3.1 HISTÓRIA

O Efeito fotovoltaico foi descoberto pelo francês Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, que produziu corrente expondo à luz 2 eletrodos recobertos com AgCl (Cloreto de prata) ou AgBr (Brometo de prata) e imersos numa solução ácida (Becquerel, 1839).

A Criação da primeira célula fotovoltaica foi 1883, por Charles Fritzsche, um inventor de Nova York, originou a primeira célula fotovoltaica produzida por selênio

⁷ Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

revestido de ouro. Este marco da tecnologia permitiu gerar uma corrente contínua e constante para a conversão elétrica máxima de 1%, enquanto, hoje em dia, contamos com 20% de eficiência. Existem, mais de uma centena de materiais semicondutores inorgânicos, que podem ser constituídos de um único elemento, mas vamos nos concentrar na placa de silício pois existem células fotovoltaicas multijunção que chegam a mais de 40% de eficiência, como as células GaInP; GaAs; GaInAs; GaInAs, obtidas no National Renewable Energy Laboratory (NREL) que chegam a 45% (Green, 2018).

Entretanto, o custo de uma célula de alta eficiência chega a ser 300 vezes maior que uma célula monojunção de silício, assim, essas só são utilizadas em aplicações especiais, como nos satélites espaciais, onde a relação entre eficiência de conversão e peso precisa ser maximizada.

O silício por ser o elemento químico mais abundante na crosta terrestre, depois do oxigênio, não ser tóxico para o ser humano, seu custo é menor que outros materiais e a necessidade de suprir a demanda das indústrias eletrônica e fotovoltaica, que consumiram, em 2022, 1 milhão de toneladas de silício de alta pureza. Somente ele está disponível em abundância suficiente para produzir tamanha quantidade de material para a fabricação de células orgânicas. (Mei, 2024, p.82).

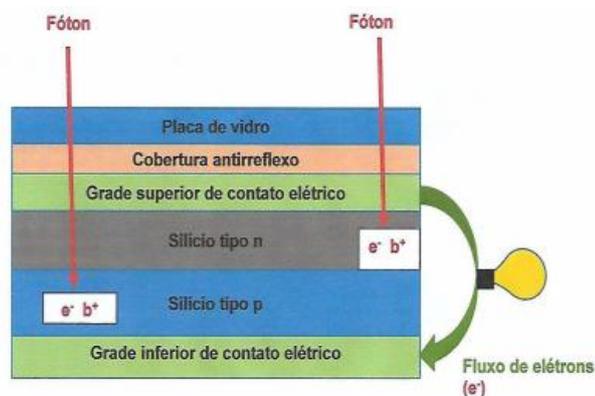
O aproveitamento da energia solar dá-se de três formas (Cantoni, 2017): a. Arquitetura Bioclimática: baseia-se em maneiras de usufruir da luz e calor solares por meio da integração arquitetônica da construção ao clima local. Desta forma, pode-se economizar energia elétrica ao se dispensar o uso da iluminação artificial durante o dia; b. Efeito Foto-térmico: trata-se da absorção da irradiação solar e sua transformação em calor. Este princípio é usado em sistemas de aquecimento solar. É um bom complemento aos sistemas fotovoltaicos, pois gera de forma eficaz e barata, a energia necessária ao aquecimento da água; c. Efeito Fotovoltaico: trata-se da transformação da energia luminosa do sol em energia elétrica. Ele consiste no surgimento de uma diferença de potencial nos terminais de um semicondutor, quando a luz é absorvida. Este é o funcionamento de uma célula fotovoltaica, a unidade básica de todo sistema fotovoltaico.

3.2 PAINEL FOTOVOLTAICO

A seguir observaremos um esquema de funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício. Como o silício é um material muito brilhante, um revestimento antirreflexo é aplicado na parte superior da célula para reduzir perdas por reflexão para menos de 5%. As placas solares de silício, especificamente as células fotovoltaicas, geralmente utilizam silício intrínseco como material base, zona p (positiva) e uma zona n (negativa). O silício intrínseco refere-se ao silício puro, que não possui impurezas adicionais. Para proteger as células das intempéries uma placa de vidro é colocada sobre a mesma. Num módulo várias células são interligadas em série ou paralelo para se produzir a voltagem e a corrente elétrica desejada. Em uma célula solar de silício, o silício puro (intrínseco) é dopado com elementos como boro (para criar a região p) ou fósforo (para a região n), formando o chamado silício dopado. (MEI,2024, p.83).

Na Figura 4 observam-se células fotovoltaicas experimentais feitas com silício monocristalino e policristalino (ou multicristalino), os monocristalino são os mesmo usados na fabricação de circuitos integrados, elas são comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade, suas células são formadas em fatia de um unico só cristal. Já as policristalino (ou multicristalino), são fabricadas pelo mesmo material ao invés de formarem um unico só cristal, é solidificado e em forma de um bloco composto de muitos cristais (MEI, p.82).

FIGURA 4 – Composição placa fotovoltaica



Fonte: MEI, 2024 (Adaptado pelo autor).⁸

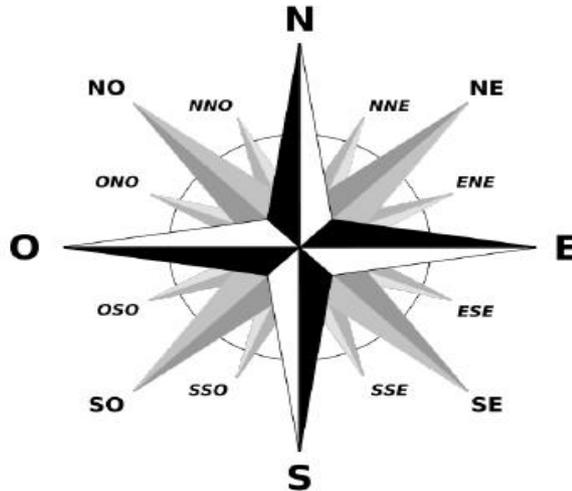
⁸ MEI, Paulo Roberto. Energia solar fotovoltaica, 2024, p. 82.

De acordo com dados recentes, a eficiência dos painéis solares feitos de silício cristalino, a tecnologia mais amplamente usada na indústria de energia solar, normalmente varia entre 14% e 20%, pensando nisso o trabalho consiste em aumentar significativamente o ganho da eficiência dos painéis solares, para gerar mais energia durante o dia, como por exemplo, a produção de energia por metro quadrado de um painel solar está compreendida entre 150 a 200 watts por hora em condições ideais de sol. Isso se traduz em aproximadamente 0,15 a 0,2 kWh por dia. Por exemplo, em regiões com boa radiação solar, como o Brasil, um painel solar de 1 metro quadrado pode gerar até 1 kWh por dia ou até 365 kWh por ano. (MEI, p.84).

3.3 PONTOS CARDEAIS E SUA IMPORTÂNCIA

Os quatro pontos cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste) são muito importantes para o desenvolvimento deste estudo, foram muito usados nas grandes navegações, como podemos ver na Figura 5, uma das mais conhecidas formas dos quatro pontos cardeais é o lugar aonde estamos, é através do sol. O método é aplicado tendo em mente a direção da nascente do Sol, a Leste, e seu poente, a Oeste. No entanto, é bom frisar que o Sol não nasce e nem se põe sempre no mesmo ponto do horizonte, existem também os pontos colaterais (nordeste, sudeste, noroeste e sudoeste) e os subcolaterais (norte nordeste, norte-noroeste, leste-nordeste, leste-sudeste, sul-sudeste, sul-sudoeste, oeste-sudoeste e oeste-noroeste). Esses outros conjuntos auxiliam na obtenção de uma medida com um índice ainda maior de exatidão em relação aos pontos no espaço.

FIGURA 5 - Rosa dos Ventos



Fonte: Portal Pixers, 2025.⁹

3.4 A GERAÇÃO

Diversos fatores podem influenciar a geração de energia em módulos solares, incluindo o sombreamento, causado por obstruções próximas, o posicionamento dos módulos, que pode ser limitado pelas condições geográficas do local de instalação, e a intensidade de radiação solar disponível. Em áreas urbanas com árvores, por exemplo, é fundamental realizar um planejamento estratégico para evitar que o sistema entre em conflito com o ambiente ao redor e maximizar a captura. (Fraccanabbia; Mariani, 2021)

Os sistemas de captação de energia solar podem ser configurados com módulos fotovoltaicos estáticos, mais usados geralmente ou com sistemas de rastreamento solar. Estes últimos acompanham o movimento aparente do sol, posicionando o módulo para maximizar sua eficiência. (Lemos Júnior et al.,2020).

⁹ Disponível em: <https://pixers.com.pt/murais-de-parede/compass-wind-rose-33683248>. Acesso em: 07 jul. 2025.

4 SEGUIDORES SOLARES

De acordo com Pinho e Galdino (2014), um rastreador solar (ou seguidor solar) é um “suporte mecânico ativo que permite o alinhamento da superfície do gerador fotovoltaico na direção do Sol, maximizando a produção de energia”. Eles acrescentam que “idealmente, esse dispositivo deve manter o ângulo de incidência da luz solar sempre próximo da perpendicular à superfície do gerador”. Conforme recomendado por Mousazadeh (2009, apud Lira, 2014), o primeiro rastreador solar foi desenvolvido por Finster, em 1962, e desde então, diversos modelos de seguidores solares têm sido criados.

O ângulo de azimute é definido como a medida entre o Norte Geográfico e a projeção, no plano horizontal, da linha perpendicular ao módulo fotovoltaico. Em outras palavras, ele indica o ângulo entre o Norte e a direção para a qual o módulo está orientado, conforme mostrado na Figura 6. O norte é considerado como o ponto de origem, com valores positivos no sentido horário até 180° e valores negativos. (Rodrigues et al., 2021).

FIGURA 6 - Ângulo de inclinação de uma placa solar fotovoltaica

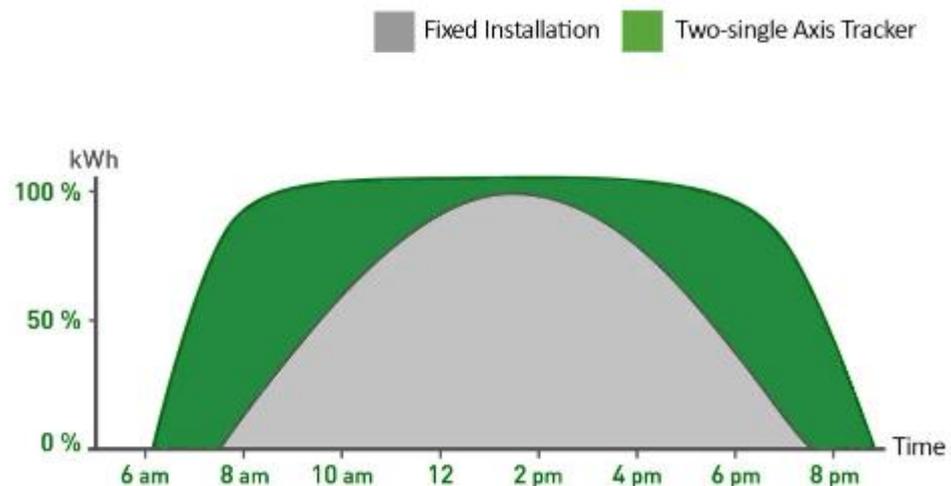


Fonte: Neosolar, 2002 (Adaptado pelo autor)¹⁰

¹⁰ Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em: 07 jul. 2025.

Dessa forma, é de se esperar que o índice de geração ao longo do dia seja variável, com seu pico ao meio-dia, pois será o momento em que a incidência solar estará perpendicular ao módulo. Esse tipo de posicionamento apresenta um rendimento satisfatório anual na geração de energia elétrica, mas, visando obter uma maior geração, uma opção é fazer com que os módulos possam se movimentar, acompanhando a dinâmica solar. Assim, será possível manter uma geração mais constante ao longo de mais horas do dia, aumentando a eficiência do sistema, conforme mostrado na Figura 7. No gráfico, observe a diferença na geração entre os dois sistemas ao longo do dia enquanto o sistema estático exibe um comportamento parabólico, com um pico em torno das 12 horas, o sistema móvel apresenta uma geração uniforme, atingindo valores mais elevados por um período mais longo. (Lemos Júnior et al., 2020).

FIGURA 7 - Gráfico comparativo de geração Sistema Estático X Sistema Móvel

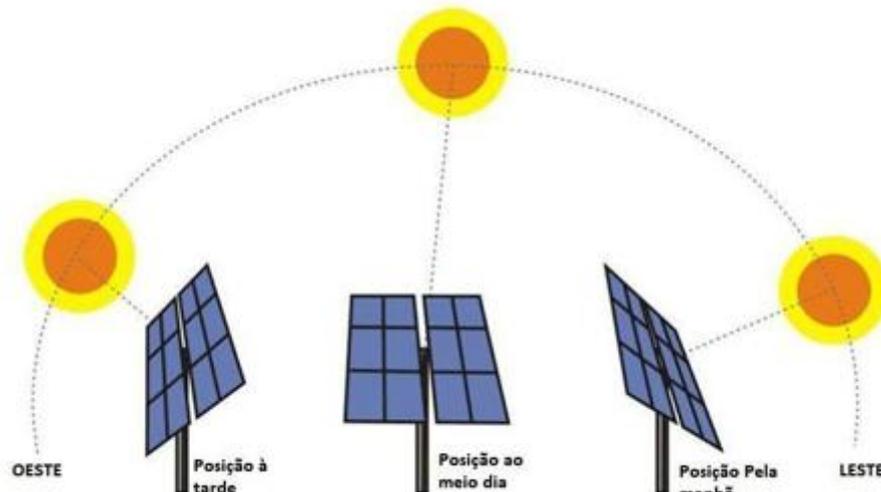


Fonte: Ecoa, 2020¹¹

Em sistemas de rastreamento ativos, são utilizados dispositivos mecânicos e eletromecânicos, controlados por sistemas eletrônicos, para automatizar o processo de rastreamento ao longo do dia, como ilustra a Figura 8. (Debastiani et al., 2022).

¹¹ Disponível em: <https://ecoaenergias.com.br/blog/tracker-rastreador-solar-vantagens-desvantagens/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

FIGURA 8 – Esquema de movimentação Módulos com Rastreador Solar



Fonte: Energia Solar Master, 2022.¹²

Usualmente, para uma maior eficiência do sistema fotovoltaico, os módulos devem estar orientados em direção à linha do equador, logo, para instalações localizadas no Hemisfério Sul como aqui no Brasil, os módulos fotovoltaicos devem estar preferencialmente orientados em direção ao Norte Geográfico. (Rodrigues et al., 2021)

Após o ângulo de azimute, aborda-se o ângulo de inclinação que é formado entre a superfície do módulo fotovoltaico e o plano horizontal. No cenário da geração fotovoltaica comumente sugere-se que, para uma geração próxima à máxima, o ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico deve ser próximo ao valor da latitude local (ABNT, 2019) (Pinho e Galdino, 2014).

Assim, espera-se que o índice de geração varie ao longo do dia, atingindo seu pico ao meio-dia, momento em que a incidência solar será perpendicular ao módulo. Embora esse tipo de posicionamento proporcione um rendimento anual na geração de energia elétrica, uma alternativa para aumentar a produção é permitir que os módulos se movam para acompanhar a trajetória do sol. Desta forma, será possível garantir uma geração mais constante ao longo de um período maior do dia,

¹² Disponível em: <https://energiasolarmaster.com.br/2022/06/20/energia-solar-o-que-sao-rastreadores-solares/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

umentando a eficiência do sistema, como ilustrado na Figura 7. No gráfico, observe-se a diferença na geração entre os dois sistemas ao longo do dia: enquanto o sistema estático segue um comportamento parabólico, com pico por volta das 12 horas, o sistema com movimento apresenta uma geração mais uniforme, alcançando valores mais altos e durante um período mais longo. (Lemos Júnior et al., 2020)

Nos sistemas de rastreamento será abordado dois tipos de controle, um deles é malha aberta, esse sistema faz uso da variável de tempo como referência com base na hora do dia e a localização geográfica, o sistema calcula a posição estimada do sol e ajusta o seguidor conforme necessário. E o outro sistema de malha fechada depende da retroalimentação dos sensores para detectar a direção de maior intensidade solar e orientar os módulos fotovoltaicos de acordo com a posição do sol e esse tipo de sistema de retroalimentação continua permite que o sistema adapte a mudanças de luz como o movimento das nuvens.

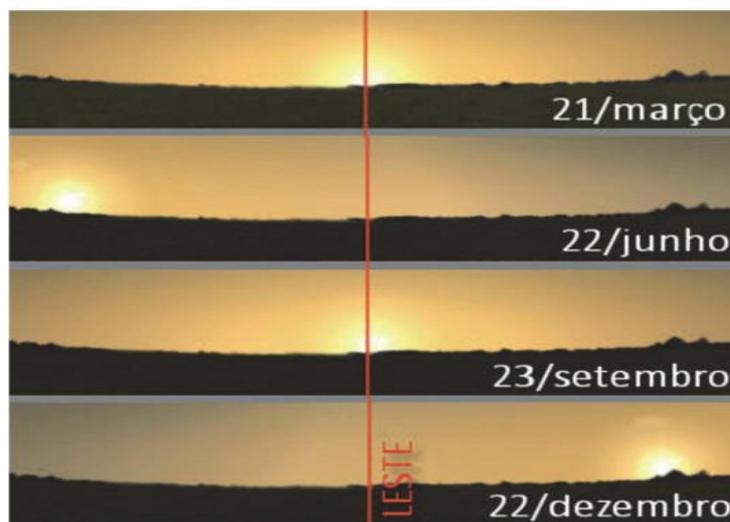
O algoritmo de controle em malha aberta pode ser desenvolvido considerando o movimento azimutal do sol em relação à Terra. Com base na localização dos módulos, a estrutura pode ser instalada em um ponto que recebe boa intensidade solar ao longo do dia. Conhecendo a posição do nascer do sol no horizonte e o horário em que ocorre, é possível iniciar a parametrização do módulo.

É muito importante ser registrado o local e a programação do pôr do sol. Com essas informações iniciais, é possível determinar a amplitude do movimento em graus e o tempo necessário para completá-lo. Por exemplo, considerando uma amplitude de 150° ao longo de 12 horas, o sistema rotacionará $12,5^\circ$ por hora. Devido à variação significativa a cada hora, e para obter um maior rendimento, o algoritmo pode ser configurado para realizar ajustes em intervalos menores de tempo. Assim, se o sistema for ajustado a cada 5 minutos, a entrega corresponderá a $1,04^\circ$ a cada intervalo.

O ângulo de inclinação da estrutura sofre pequenas variações ao longo do ano, isso se deve por alguns fatores como o solstício de verão, no hemisfério sul, data que inicia o verão, o sol descreve sua trajetória mais alta, enquanto no solstício de inverno, a mais baixa, sofrendo as variações durante o ano como na Figura 9. Também na primavera, o sol nasce exatamente a leste e, ao longo da estação, seu ponto de nascimento se desloca gradualmente em direção ao sul, alcançando o extremo sul no dia da transição para o verão. Durante o verão, o ponto de nascente começa a se

mover no sentido oposto, retornando ao leste no início do outono. No outono, o local de nascimento do sol se desloca para o norte, atingindo o ponto máximo no início do inverno. Em seguida, o sol volta a nascer no Leste, completando o ciclo anual do ponto de nascente, que é acompanhado pelo mesmo movimento na direção oeste ao pôr do sol. Além disso, a trajetória diária do sol no céu também varia ao longo do ano (Figura 9).

FIGURA 9 - Diferença anual da posição de nascimento do sol, observadores no hemisfério sul



Fonte: Energia Arion, 2020.¹³

Assim, ocorre uma variação ao longo das estações, o que pode reduzir a eficiência do sistema em determinadas épocas dos anos.

Com esse dispositivo teremos um modelo mais simplificado, e para suprir essa variação terrestre em determinada época do ano podemos movimentar manualmente a estrutura, sem a necessidade de componentes elétricos e eletrônicos.

Será ajustado o ângulo de orientação com base na altura solar do local de instalação, direcionando o módulo para o norte e inclinando-o de acordo com a latitude do local. Desta forma, é possível configurar um sistema de entrega independente com uma programação simples, ou de eixo único, que maximize sua eficiência.

Esse método devido essas questões de meteorológica, os custo da parte mecânica

¹³ Disponível em: <https://energiaarion.com.br/2020/09/22/posicionamento-do-sol-e-a-geracao-solar/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

e elétrica e alta complexibilidade da sua lógica, não se mostra um sistema eficiente ao que se diz respeito ao seu movimento solar de forma autônoma. (Melo et al., 2017).

5 CONTROLE DE RASTREAMENTOS

O controle de rastreamento consiste em fazer uma lógica, podendo ser simples como no sistema de malha aberta, ou ter alta complexibilidade no sistema de malha fechada, ambas têm o intuito de buscar a movimentação solar e buscar aonde tenha mais radiação solar, para que as placas solares sejam mais eficientes energeticamente.

Os chamados sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema. Isso quer dizer que, em um sistema de controle de malha aberta, o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada. (Ogata,2010).

Esse sistema como já descrito, baseada na variação horária ao longo do dia, feito com uma equação do movimento solar, e esses por sua vez por não serem retroalimentados com a incidência solar sobre eles são bem suscetíveis a qualquer variação como sombreamento.

Outras opções aos sistemas de controle em malha aberta são os modelos de sistema com controle em malha fechada, que podem utilizar estratégias de controle *on-off*, lógica *fuzzy*, PID, PI, cada uma apresentando diferentes características. Estes 4 modelos representam quase 80% dos algoritmos destinados aos sistemas ativos de geração fotovoltaica. (Fuentes-Morales et al., 2020).

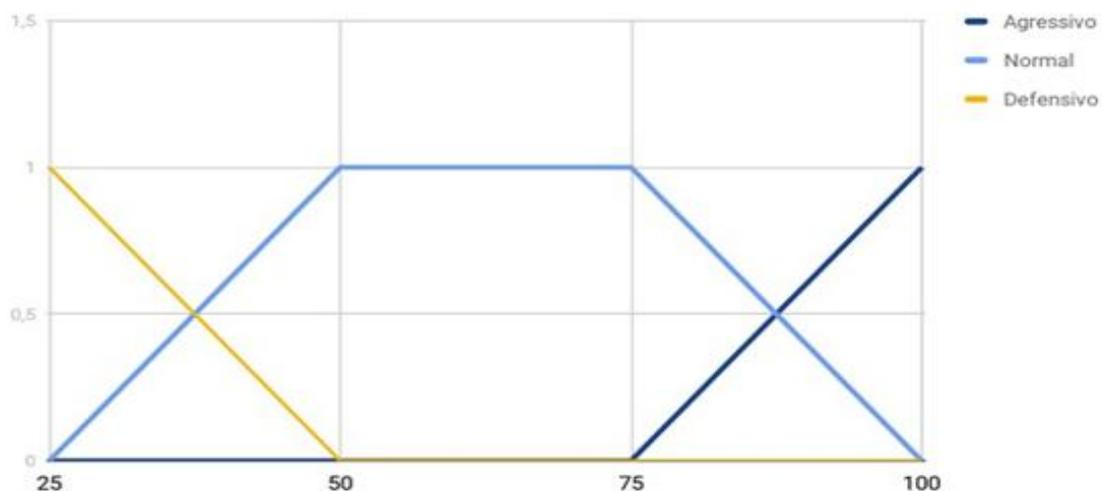
Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e suas derivadas e/ou integrais), realimenta o controlador, de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado. O termo 'controle de malha fechada' sempre implica a utilização do controle com realimentação para reduzir o erro do sistema. (Ogata,2010).

O algoritmo de malha aberta adotada no trabalho, é um tipo de controle ligado-desligado *on-off*. Seu resultado de saída é binário, o que torna um dos modelos de controle mais simples, embora com algumas limitações. No entanto, oferece uma alternativa econômica para diversas aplicações quotidianas, como termostatos de

frigorífico ou controlo de nível de água em caixas d'água. Esse sistema vai consistir em uma lógica bem simples, ele terá uma lógica que movimentará a cada hora no dia a um grau calculado, por exemplo se durante o dia a terra movimentar em torno do sol a 180° , e o sol estará presente umas 12 horas, basta dividir os 180 pelas 12 horas, e chegaremos em 15° de movimento a cada hora. E ao chegar no limite criar uma lógica para o mesmo voltar para posição zero, para começar outro dia. Esse tipo de projeto é bem mais barato por não ter sensores avançados, alta complexibilidade da sua lógica o custo em si é mais em conta que outros, único problema que ele não faz ajustes contínuos durante ao dia e quando não ter muita incidência solar ele não buscará o lugar ótimo de mais eficiência.

A lógica fuzzy, como mostrada na Figura 8 é um modelo que permite uma gama mais ampla de resultados. Ao contrário de sistemas que operam apenas com os estados "ligado" e "desligado", o algoritmo da lógica fuzzy entende valores intermediários (Figura 10). Por exemplo, em dias nublados, o sistema não buscará um posicionamento ótimo de forma pesquisada, mas sim analisará os dados recebidos pelos sensores de entrada. A partir dessa análise, o sistema determina o lugar melhor para se posicionar em cada ocasião. (Cantoni, 2017).

FIGURA 10 - Tomada de decisão Lógica Fuzzy



fonte: Energia Arion,2020¹⁴

¹⁴ ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

Para isso é usado sensores conhecidos com LDR, esses por sua vez vão fazer a leitura aonde se encontra a maior radiação solar e vão transmitir esses dados na entrada de Arduino, que fica responsável pela lógica e mandar sinal para movimentar a estrutura. Ele vai pegar sua posição atual e a posição de maior incidência solar, após verificar os dois parâmetros o mesmo irá mandar sinal para o servo motor acoplado no mesmo e movimentar o painel. E toda vez que o Arduino verificar maior radiação solar em um ponto o mesmo fará essa movimentação, até o final do dia.

Neste cenário, o sistema On-Off se colocarmos os sensores fotossensíveis se moveria para um posicionamento onde o módulo não estivesse diretamente obstruído, permitindo a captura da radiação difusa emitida pelo sol. Após a passagem da nuvem, o sistema retornaria à posição inicial voltada para o sol, consumindo energia em ambos os movimentos, que não é interessante por conta dos gastos energéticos. Em contraste, um algoritmo baseado em lógica fuzzy detectaria a queda de luminosidade no sensor, mas, ao comparar com a luminosidade dos outros sensores, calcularia as previsões de variação e a viabilidade, antes de ajustar o mecanismo (Cantoni, 2017).

O controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é uma das abordagens mais utilizadas para implementação de rastreadores solares, devido à sua precisão e capacidade de resposta. No contexto de um rastreador solar, o controle PID ajusta continuamente a posição dos painéis para manter um ângulo de incidência ideal em relação ao sol, otimizando assim a geração de energia (Ogata, 2010).

Esse controle tem que ter um alto conhecimento, para ajustar os valores PID, pois um P muito alto, que se refere ao sinal de saída e deve ser proporcional amplitude do erro o sistema pode prejudicar o sistema, devido o controle ser feito com o sinal de saída, e P mais baixo impossibilitar o movimento (Fuentes-Morales et al., 2020).

Derivativa (D) gera um sinal de saída proporcional à velocidade de variação do erro, proporcionando uma correção antecipada e ajustada ao tempo de resposta, o que otimiza a estabilidade do sistema (Fuentes-Morales et al., 2020).

6 MÉTODOS E MODELOS

O modelo desenvolvido (Figura 11), em sua forma estática (ET) — ou seja, que não se movimenta ao longo do dia, como ocorre nas instalações convencionais fixas, como os painéis fotovoltaicos instalados em telhados — tem como objetivo a coleta de dados de corrente e tensão ao longo do dia.

FIGURA 11 - Protótipo do rastreador solar

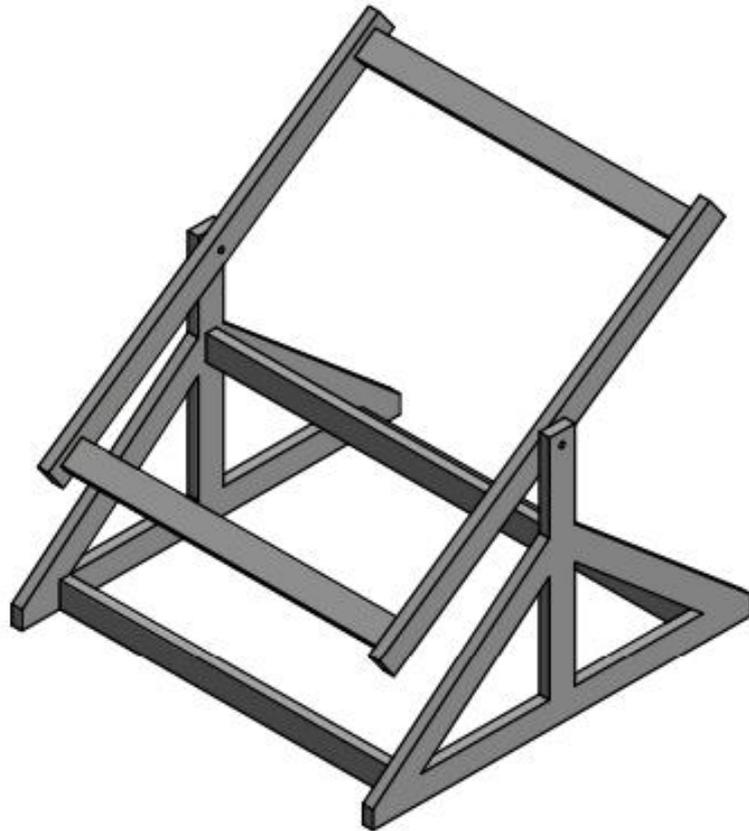


Fonte: Autor, 2025.

A partir dos valores de geração obtidos, será possível compará-lo com outro modelo, analisando o ganho energético proporcionado em relação ao sistema

estático. Para isso devemos posicionar o módulo no ângulo ideal de orientação, seguindo as instruções de orientação recomendadas. A estrutura foi projetada para manter um ângulo de inclinação correspondente à latitude da região de testes, que, neste caso, é Juiz de Fora, em Minas Gerais – Brasil. A latitude aproximada de Juiz de Fora é $21^{\circ}41'40''$ (Prefeitura de Juiz de Fora, 2006). O ângulo de azimute foi ajustado para o norte, no eixo Z. . Sua estrutura foi confeccionada utilizando madeiras pareadas de pinus de 2 centímetros, com um furo no centro para realizar o encaixe do módulo, além de 4 cantoneiras de alumínio para fixar o modulo fotovoltaico. E foi planejado no software invetor 2020, como pode ser visto nas Figuras 12 e 13.

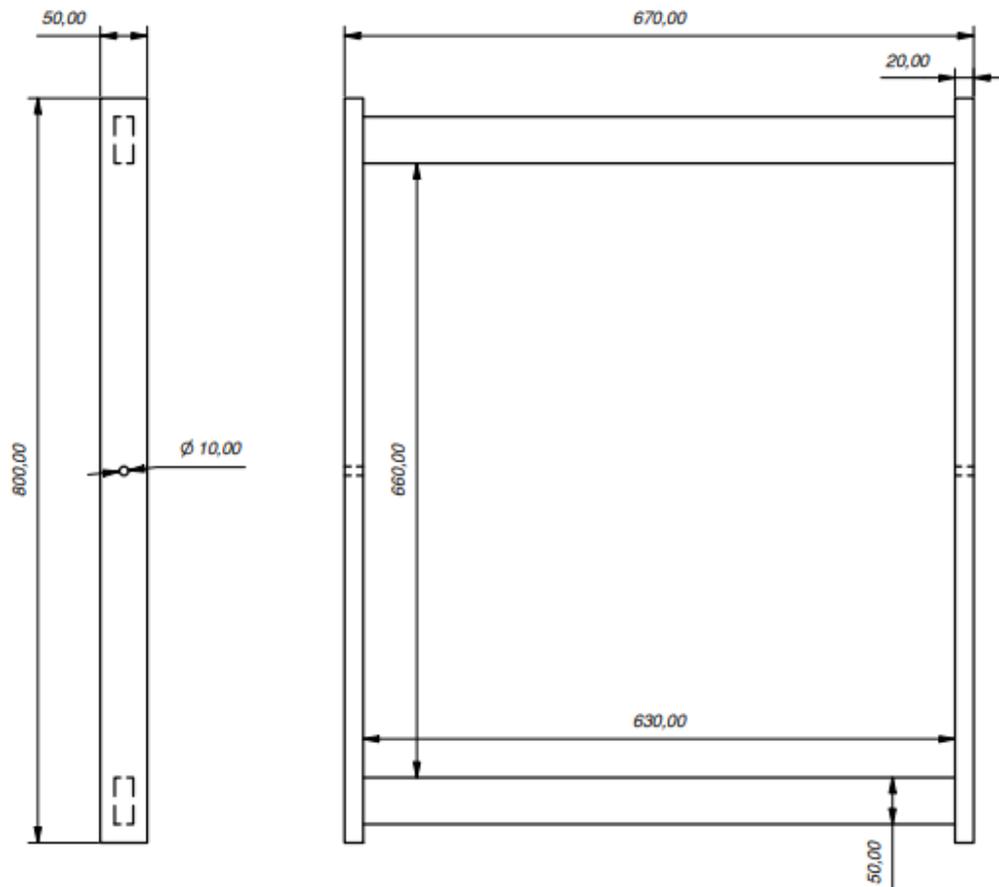
FIGURA 12 - Desenho 3D



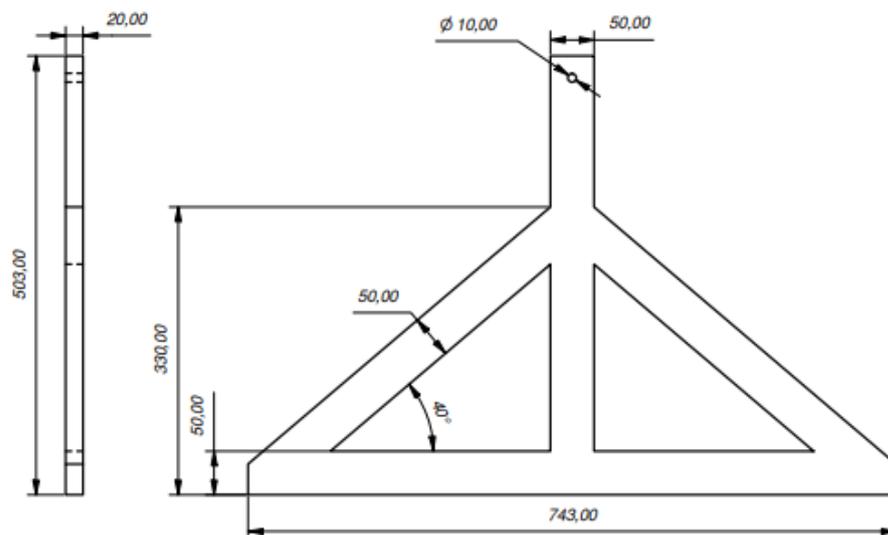
Fonte: Autor, 2025.

FIGURA 13 - Vistas do desenho

Placa Base



Cavalete



Para o Segundo modelo, o sistema em malha aberta, escolhido por ser mais viável financeiramente para montagem do rastreador, exemplificado na mesma Figura 9, foi utilizada a estrutura do modelo estático, mas com um sistema automatizado para rastrear o sol por tempo durante o dia.

Ao comparando os dois modelos em dias diferentes uma semana teremos os dados suficientes para ver se o nosso modelo de rastreador solar vai ser eficaz, tanto mais eficiente energeticamente quanto financeiramente.

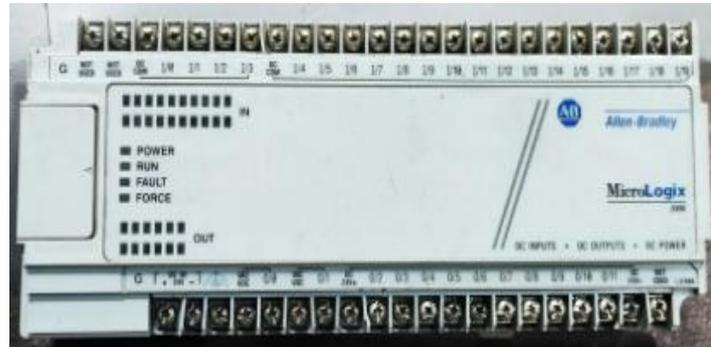
O funcionamento de malha aberta obedecerá ao fluxograma, como descrito na Figura 14.

FIGURA 14 - Fluxograma funcionamento Controle em Malha Aberta



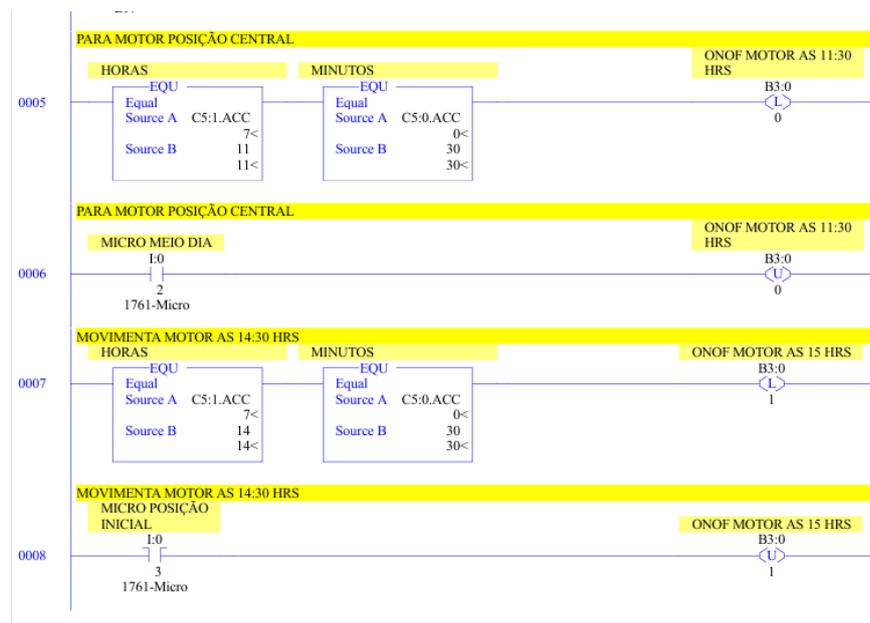
Fonte: Autor, 2025.

Toda a parte lógica dos sistemas que envolvem controle foi implementada com o uso de um PLC da Allen Bradley Micrologix 1000 como pode ser visto na Figura 15, responsável pela análise dos dados e pelo acionamento do motor.

FIGURA 15 - PLC

Fonte: Autor, 2025.

Para a lógica ladder foi criada no software RS Logix 500 da Rockwell, que pode ser vista na Figura 16, uma parte da programação

FIGURA 16 - PLC

Fonte: Autor, 2025.

Foi feito a lógica de um relógio Figura 17, pois o micrologix 1000 não possui relógio interno e também usado um timer externo da exatron LETM4004 Figura 18 para poder sempre que o sistema for desligado e ao ser reiniciado dar um set na hora do PLC.

FIGURA 17 - Timer

Fonte: Autor, 2025.

FIGURA 18 - Lógica relógio

Fonte: Autor, 2025.

O objetivo era posicionar a estrutura de forma a acompanhar a maior incidência de radiação solar, durante o tempo maximizando assim o ganho energético do sistema. Em comum entre os sistemas, foram utilizados módulos fotovoltaicos, que

pode ser visto na Figura 19, de 660 x 630 x 25 mm, com as seguintes especificações: Tensão nominal: 22,1V Corrente máxima de operação: 3,28 A Potência máxima: 55W.

FIGURA 19 - Módulo fotovoltaico



Fonte: Autor, 2025.

Foi usado um controlador de carga SR-HP 2420 que é um dispositivo do tipo PWM (Modulação por Largura de Pulso), utilizado para regular a energia proveniente dos painéis solares antes de ser armazenada em baterias. Ele é compatível com sistemas de 12V ou 24V, com detecção automática da tensão do banco de baterias. No modo PWM, o controlador regula a tensão de carga em pulsos rápidos, reduzindo progressivamente o tempo de condução à medida que a bateria se aproxima da carga total. Isso resulta em: Maior eficiência no carregamento, Menor aquecimento do sistema, e Vida útil prolongada das baterias. O mesmo pode ser visto na Figura 20. No mesmo foi colocado uma resistência de 100 ohm e 5W (Figura 21), em paralelo com o módulo para coletar em tempo real a tensão gerada pela placa. Para garantir a extração máxima de potência dos módulos fotovoltaicos, o resistor possui uma

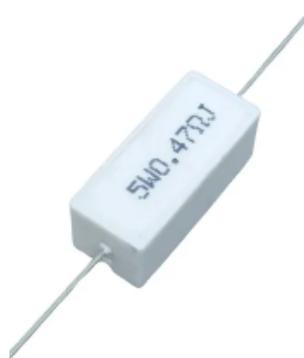
característica fundamental para o experimento. Quando exposto a baixa potência, ele se mantém operando, porém com intensidade reduzida de tensão. Dessa forma, mesmo em dias nublados e com baixas intensidades luminosas, foi possível gerar e quantificar os resultados obtidos, o que se mostrou excelente para realização de testes em dia com grandes diferenças meteorológicas.

FIGURA 20 - Controlador fotovoltaico



Fonte: Autor, 2025.

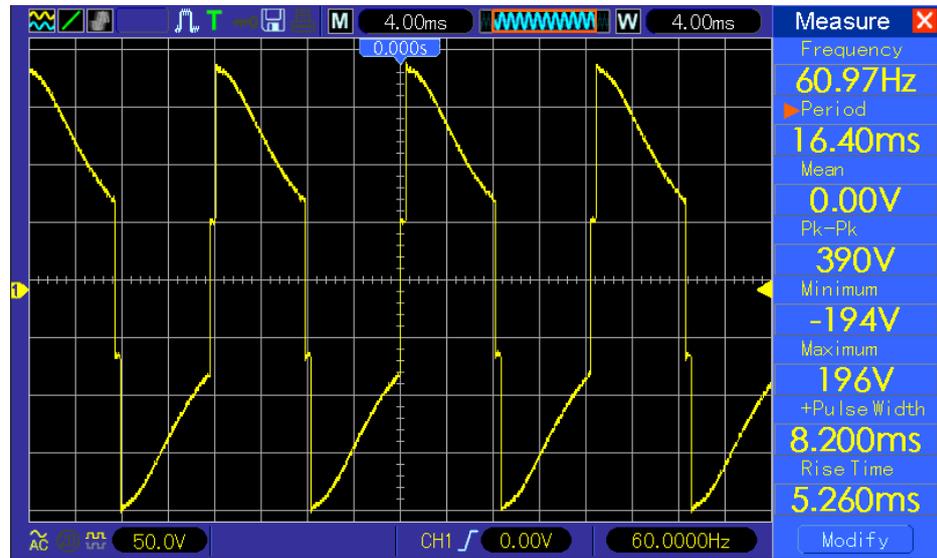
FIGURA 21 - Carga



Fonte: Autor, 2025.

Para efeito de testes com o sistema funcionado na prática, foi colocado uma lâmpada na saída do inversor e visto a forma de onda expressa na Figura 22.

FIGURA 22 - Forma de onda no inversor



Fonte: Autor, 2025.

Logo a seguir, tem-se a Figura 23 do inversor usado e bateria.

FIGURA 23 - Bateria e inversor



Fonte: Autor, 2025.

Com o objetivo de garantir maior acuracidade nos dados obtidos, foi definido um local padrão para a realização dos testes experimentais. A escolha do local levou em consideração critérios fundamentais para evitar interferências externas na

medição dos parâmetros do sistema. O local ideal não deve apresentar sombreamento em nenhum momento do dia, uma vez que sombras mesmo que parciais podem comprometer a geração fotovoltaica e, conseqüentemente, distorcer os resultados obtidos. Além disso, é essencial que o ponto de instalação receba incidência solar direta ao longo de todo o período diurno, preferencialmente durante as 12 horas de maior disponibilidade solar. Na Figura 24, é possível visualizar o posicionamento adotado para o local padrão de testes, escolhido estrategicamente para garantir exposição solar ideal e consistência nos experimentos.

FIGURA 24 - Local de realização do teste



Fonte: Autor, 2025.

Para garantir o posicionamento ideal dos módulos fotovoltaicos, o sistema era diariamente posicionado no ambiente de testes com a devida aferição dos ângulos de inclinação e de azimute. Esses ajustes foram realizados antes de cada ciclo de operação, assegurando que o painel estivesse sempre corretamente orientado em relação à trajetória solar. Além da orientação espacial, outro parâmetro monitorado foi o horário de funcionamento do sistema.

Os testes foram padronizados para iniciar às 6h da manhã e finalizar às 18h, totalizando um ciclo completo de 12 horas, correspondente ao período de maior disponibilidade de radiação solar. O sistema de rastreamento solar era configurado para iniciar perpendicular ao nascer do sol. Por volta das 11h30, o rastreador iniciava o movimento de orientação do módulo, finalizando o ajuste aproximadamente ao meio-dia, quando atingia uma angulação de 180 graus validado por um micro. Às 14h30, o sistema retomava o movimento em direção ao segundo micro, completando a rotação. Por volta das 19h, o rastreador retornava à posição inicial, preparando-se para reiniciar o processo no dia seguinte. Como nem sempre era possível acompanhar presencialmente a verificação da tensão, foi utilizada uma câmera IP, configurada para capturar os dados remotamente a cada uma hora, permitindo o monitoramento em tempo real do desempenho do sistema. Nas Figuras 25, 26 e 27 podemos ver o protótipo funcionando

FIGURA 25 - Teste realizado no dia 25/05/2025 às 09:00



Fonte: Autor, 2025.

FIGURA 26 - Teste realizado no dia 25/05/2025 às 12:00



Fonte: Autor, 2025.

FIGURA 27 - Teste realizado no dia 25/05/2025 às 15:00



Fonte: Autor, 2025.

7 RESULTADOS

Após o início dos testes, os dados obtidos de cada sistema foram organizados em tabelas, com o objetivo de facilitar a visualização e análise comparativa dos resultados. O primeiro parâmetro analisado foi o tempo de funcionamento de cada sistema. Como todos os modelos estavam fixados na mesma plataforma, a exposição à radiação solar ocorreu em dias diferentes e alternados pois não havia outra placa solar para ocorrer a radiação em forma simultânea. No entanto, conforme apresentado na Tabela 1, é possível observar uma diferença significativa no tempo de operação entre os módulos com rastreamento solar e o módulo estático.

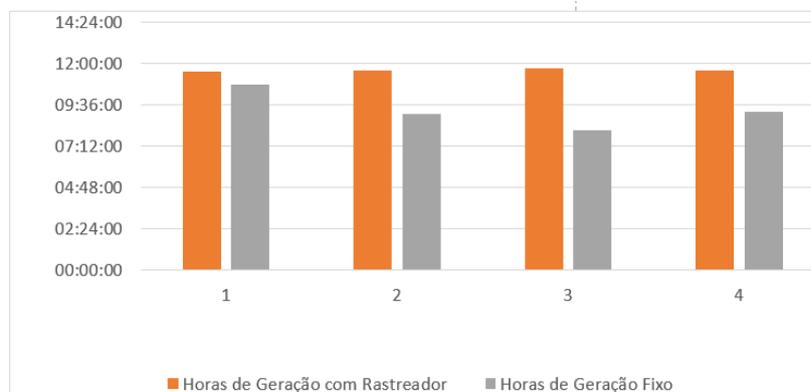
TABELA 1 - Horas de geração

Medição	Horas de Geração com Rastreador	Horas de Geração Fixo
1	11:30:55	10:46:10
2	11:34:55	09:03:56
3	11:40:55	08:07:13
4	11:32:35	09:11:04

Fonte: Autor, 2025.

Para podermos deixar comparativo de horas de geração mais visuais, podemos ver na Figura 28 logo abaixo.

FIGURA 28 - Comparação horas geração



Fonte: Autor, 2025.

Ao analisar os resultados, fica claro que a diferença entre os dois sistemas com rastreamento é muito pequena. No entanto, quando comparamos esses dois com o modelo fixo, a diferença se torna bastante significativa — em um dos dias, por exemplo, o sistema com rastreamento conseguiu gerar energia por mais de 3 horas a mais do que o sistema estático. Isso acontece porque os sistemas com rastreamento conseguem acompanhar o movimento do sol, ajustando sua posição para manter os painéis sempre voltados diretamente para a luz solar. Essa mobilidade garante uma melhor captação da radiação ao longo do dia. Já o sistema fixo, por não se mover, perde eficiência nas últimas horas do dia, quando o sol está mais baixo no horizonte. Nesses momentos, os raios solares chegam de lado, o que dificulta (ou até impede) a geração de energia.

Na Tabela 2, logo a seguir, você pode ver a comparação da tensão gerada (em Volts) por cada sistema medidas no dia 18/05/2025 com sistema fixo e no dia 21/05/2025 com o sistema móvel, foi escolhido esses dias, pois as condições climáticas estavam favoráveis e quase idênticas, a tabela ajuda a visualizar ainda melhor essa diferença de desempenho.

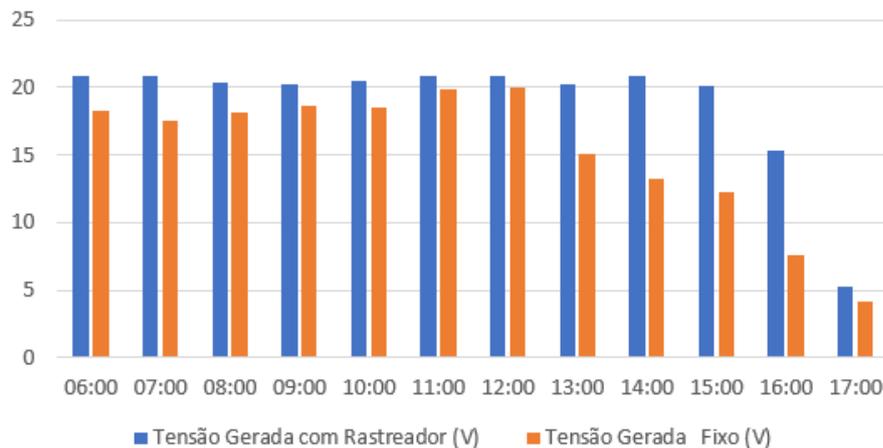
TABELA 2 - Comparação horas e tensão gerada

Medição	tensão Gerada com Rastreador (V)	tensão Gerada Fixo (V)
1	20,9	18,3
2	20,8	17,5
3	20,4	18,2
4	20,3	18,6
5	20,5	18,5
6	20,9	19,9
7	20,9	20
8	20,3	15,1
9	20,9	13,2
10	20,1	12,3
11	15,36	7,6
12	5,2	4,2

Fonte: Autor, 2025.

Pode-se observar que o sistema de rastreamento apresenta desempenho significativamente superior ao sistema fixo, considerando as horas em que foram realizadas as medições de tensão. O ganho chega a ser 75% maior em relação ao sistema estático, como pode ser visualizado na Tabela 2 e melhor visto na Figura 29.

FIGURA 29 - Comparação horas e tensão gerada



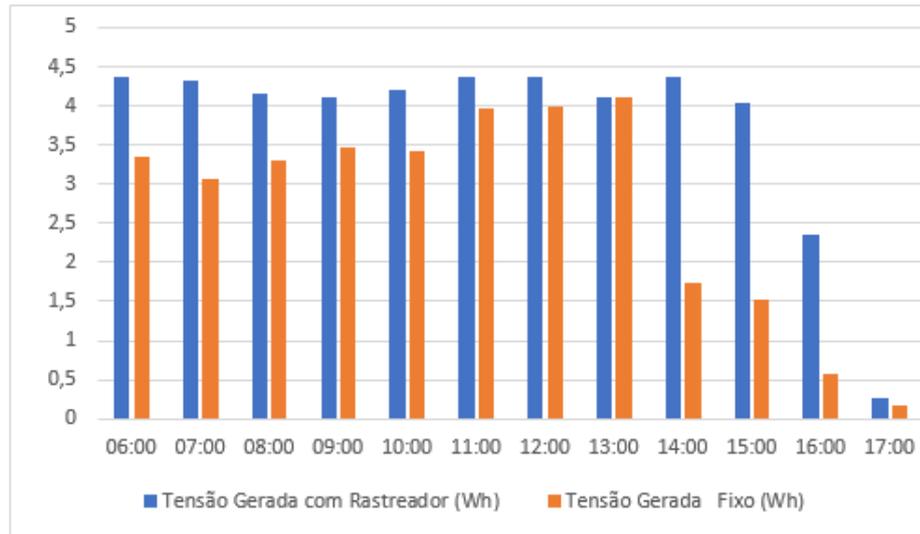
Fonte: Autor, 2025.

Logo a seguir na Tabela 3 e na Figura 30 teremos a potência gerada em Wh, dos dois sistemas para efeitos de comparação. Lembrando que para tal medição usamos um resistor de 100 Ohm.

TABELA 3 - Comparação da Energia gerada

Medição (horas)	Energia Gerada com Rastreador (Wh)	Energia Gerada Fixo (Wh)
06:00	4,3681	3,3489
07:00	4,3264	3,0625
08:00	4,1616	3,3124
09:00	4,1209	3,4596
10:00	4,2025	3,4225
11:00	4,3681	3,9601
12:00	4,3681	4
13:00	4,1209	4,12
14:00	4,3681	1,7424
15:00	4,0401	1,5129
16:00	2,359296	0,5776
17:00	0,2704	0,1764

Fonte: Autor, 2025.

FIGURA 30 - Comparação da energia gerada


Fonte: Autor, 2025.

Esses últimos dados demonstram de forma clara o ganho expressivo na geração de energia elétrica que os sistemas com controle de rastreamento apresentam em comparação com os modelos fixos, de estrutura convencional. Ao calcular a geração por dia do sistema fixo foi de **32,69 Wh/d** e já o rastreador foi de **45,07 Wh/d**. Ao calcular a média de eficiência com base nas medições realizadas, é possível observar essa diferença de desempenho de forma objetiva. O resultado desse cálculo está apresentado na Tabela 4, que resume a superioridade dos sistemas com rastreamento em termos de aproveitamento da radiação solar.

TABELA 4 - Média da eficiência gerada com rastreador

Geração do rastreador
29%

Fonte: Autor, 2025.

Gastos na montagem na Tabela 5.

TABELA 5 - Gasto de materiais

Componentes	Gastos
Estrutura	R\$ 120,00
CLP	R\$ 1.500,00
Timer digital	R\$ 82,00
Painel de pvc	R\$ 75,00
Total	R\$ 1.777,00

Fonte: Autor, 2025.

No entanto, para que os protótipos realizem a movimentação de rastreamento, há um consumo adicional de energia, necessário para alimentar o CLP e os demais componentes eletrônicos do sistema. Por esse motivo, torna-se essencial calcular o gasto energético do próprio sistema de controle, a fim de avaliar se o ganho na geração compensa o consumo extra envolvido na operação. Feito o cálculo consumo de todos componentes foi visto que CLP e as horas de funcionamento do motor por para fazer o ciclo durante o dia foi de 91,1 Wh por dia. Como demonstrado na Tabela 6.

TABELA 6 - Energia gerada x gastos

Energia gerada (Wh/d)	Gasto (Wh/d)
45,07	91,1

Fonte: Autor, 2025.

8 CONCLUSÃO

Após a realização dos testes e a análise dos resultados obtidos, foi possível confirmar que os sistemas com controle de movimento realmente apresentam um aumento na geração de energia elétrica. No entanto, ao considerar o consumo de energia necessário para o funcionamento do sistema de rastreamento, o ganho líquido

se mostrou relativamente baixo, o que indica que, no protótipo avaliado, a eficiência adicional não foi tão expressiva quanto o esperado.

Considerando o custo extra para implementação, assim como gastos com manutenção das estruturas móveis ao longo da vida útil do sistema fotovoltaico, esta estratégia para melhorar a eficiência da geração solar fotovoltaica não é viável de ser implementada em Juiz de Fora devido à localização geográfica e às condições climáticas da cidade. Vale ressaltar que foi utilizada uma escala reduzida de geração devido aos custos elevados e espaço necessário para a implementação de um sistema de escala real. Logo, para analisar a viabilidade de um sistema de grande porte, é indicado a avaliação dessas estratégias de rastreamento em uma escala maior, visto que a eficiência de sistemas eletromecânicos para movimentação pode variar com a potência nominal.

ABSTRACT

This work presents an analysis of controlling solar tracking systems in photovoltaic generation applications, focusing on optimizing the ideal angle of solar radiation capture on the panels to maximize their efficiency. The position of the sun on the horizon varies throughout the day, causing changes in the solar azimuth and altitude angles, which reduce the efficiency of traditional photovoltaic systems. These variations result from the solar trajectory, causing continuous changes in the angle of direct light incidence on the panels. To maximize electrical energy generation through solar panels, it was verified that a device allowing the photovoltaic panel to follow the sun's path can be 25% to 45% more efficient than a fixed system, which typically has an efficiency of around 17%. This study evaluated the projected implementation of control systems that automatically adjust the position of solar modules via a Programmable Logic Controller (PLC), ensuring optimized and efficient performance over time. Additionally, the energy consumption of the tracking system is considered to assess the feasibility of implementing the prototype.

Keywords: Solar energy. Renewable energy. Photovoltaic systems. Energy efficiency

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690:2019** – Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABSOLAR. Energia solar fotovoltaica no Brasil. **Infográfico ABSOLAR**, n. 39, 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2022/01/2022.01.11-Infografico-ABSOLAR-nº-39.pdf>. Acesso em: 03 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Economia. Secretaria Especial de Produtividade, Emprego e Competitividade. **Manual do Microempreendedor Individual – MEI**. Brasília: Ministério da Economia, 2024.

CANTONI, A. **Avaliação do desempenho de um algoritmo fuzzy para posicionamento de placas fotovoltaicas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8166/1/CT_COEAU_2017_2_2.pdf. Acesso em: 04 maio 2025.

DEBASTIANI, G. et al. Comparação do impacto da temperatura no desempenho de módulos fotovoltaicos estáticos e com sistemas de rastreamento solar (LO, LO + NS). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/27220>. Acesso em: 04 maio 2025.

ECO.A. **Energias renováveis**. Tracker (rastreador solar): vale a pena seguir o sol? Entenda as vantagens e desvantagens! 2020. Disponível em: <https://ecoenergias.com.br/blog/tracker-rastreador-solar-vantagens-desvantagens/>. Acesso em: 04 maio 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz energética e elétrica**, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 03 maio 2025.

FRACCANABBIA, N.; MARIANI, V. C. Avaliando aprendizado de máquina na previsão de curto prazo de séries temporais de energia solar. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, v. 13, n. 2, p. 105–112, 2021. Acesso em: 04 maio 2025.

FUENTES-MORALES, R. F. et al. **Control algorithms applied to active solar tracking systems: a review**. Solar Energy, 2020. Disponível em: <https://seer.upf.br/index.php/rbca/article/view/12581/114116007>. Acesso em: 04 maio 2025.

GREEN, M. A. Solar cell efficiency tables (version 52). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 26, n. 7, p. 427–436, 2018. DOI: 10.1002/pip.3040.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Capacity Statistics 2023**. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>. Acesso em: 04 maio 2025.

LEMOS JÚNIOR, A. C. et al. Rastreador solar e comparação de eficiência na geração fotovoltaica. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ano 05, ed. 08, v. 13, p. 44–62, 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreador-solar>. Acesso em: 04 maio 2025.

MEI, Paulo Roberto. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos, tecnologias e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2024.

MELO, A. G. et al. Development of a closed and open loop solar tracker technology. **Acta Scientiarum – Technology**, v. 39, n. 2, p. 1–7, 2017. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/actascitechnol/index.php/ActaSciTechnol/article/view/69814>. Acesso em: 04 maio 2025.

MOUSAZADEH, H. et al. A review of the maximum efficiency of solar trackers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 1–10, 2009.

NEOSOLAR. **Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes**, 2022. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em: 04 maio 2025.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. p. 263–267.

PIXERS. **Mural de parede compass wind rose**. Disponível em: <https://pixers.com.pt/murais-de-parede/compass-wind-rose-33683248>. Acesso em: 04 maio 2025.

POLON, Luana. **Países cortados pela linha do equador**, 2022. Disponível em: <https://www.geokratos.ggf.br/2021/05/area-territorial-do-brasil.html>. Acesso em: 04 maio 2025.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. **A cidade**: características gerais, 2006.
Disponível em: https://pjf.mg.gov.br/cidade/caracteristicas_gerais.php. Acesso em:
04 maio 2025.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.