

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE SISTEMAS DE RASTREAMENTO SOLAR PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

"SOLAR TRACKING SYSTEM CONTROL STRATEGIES FOR PHOTOVOLTAIC GENERATION"

João Paulo Ferreira de Castilho¹

Orientador: Illa Beghine Soncin²

RESUMO

Este trabalho avalia possíveis estratégias de controle de sistemas de rastreamento solar para geração fotovoltaica, através de mecanismos que rastreiam o melhor ângulo de aceitação da radiação solar dos módulos. Em razão dos diferentes posicionamentos do sol no horizonte, a variação azimutal do movimento solar ao longo do dia, assim como diferente altura solar ao longo do ano, os sistemas de geração fotovoltaica convencionais podem apresentar redução da eficiência. Para solucionar este problema é possível aplicar sistemas de controle capazes de movimentar a estrutura do módulo solar, a fim de que o sistema se mantenha com alta eficiência ao longo de todo o ano. Durante o desenvolvimento do trabalho, foram revisados dezenas de artigos e estudos teóricos sobre o tema, buscando avaliar vantagens e desvantagens, como também os desafios a serem enfrentados para a realização dos testes. Para a avaliação da estratégia de rastreamento, foram utilizados 3 protótipos. O primeiro utilizando uma estratégia de controle em malha fechada com sua movimentação e posicionamento baseado em sensores de luminosidade. O segundo empregando uma estratégia de controle em malha aberta com sua movimentação baseada na variação horária ao longo do dia. E o terceiro método, usado como padrão de comparação, foi utilizado um sistema estático, com a face do módulo apontada para o norte e com inclinação igual à latitude local. Os experimentos para a avaliação de eficiência foram realizados buscando sempre o mesmo cenário, ou seja, todos os sistemas foram expostos ao sol ao mesmo tempo e nos mesmos dias e foram posicionados na melhor orientação, minimizando, desse modo, variações de resultados durante os dias de realização dos testes. Como principais resultados, foi identificado que os sistemas de rastreamentos automáticos aumentam de malha fechada e malha aberta o ganho médio de energia em 29% e 17%, respectivamente em relação ao sistema estático. Porém, ao descontar a energia utilizada pelos sistemas de movimentação, tem-se uma redução de rendimento de 4% para malha fechada e 2% para malha aberta, em relação ao sistema estático. Com isso, conclui-se que os sistemas de rastreamento, apesar de apresentarem um ganho superior de geração, inviabiliza a sua utilização, em decorrência do gasto energético do sistema, assim como o custo de implementação destes sistemas.

Palavras-chave: energia solar; energia renovável; sistemas fotovoltaicos - controle; eficiência energética.

¹ Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora, MG. joaopaulocastilho2010@live.com – Graduando em Engenharia Elétrica.

² Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora, MG. prof.illa.soncin@doctum.edu – Orientador.

ABSTRACT

This work evaluates possible control strategies for solar tracking systems for photovoltaic generation, through mechanisms that track the best acceptance angle of solar radiation from modules. Due to the different positions of the sun on the horizon, the azimuthal variation of solar movement throughout the day, as well as different solar heights throughout the year, conventional photovoltaic generation systems may present reduced efficiency. To solve this problem, it is possible to apply control systems capable of moving the structure of the solar module, so that the system remains highly efficient throughout the year. During the development of the work, dozens of articles and theoretical studies on the subject were reviewed, seeking to assess advantages and disadvantages, as well as the challenges to be faced in carrying out the tests. For the evaluation of the tracking strategy, 3 prototypes were used. The first using a closed-loop control strategy with its movement and positioning based on light sensors. The second employs an open-loop control strategy with its movement based on hourly variation throughout the day. And the third method, used as a standard of comparison, used a static system, with the face of the module facing north and with an inclination equal to the local latitude. The experiments for evaluating efficiency were carried out always looking for the same scenario, that is, all systems were exposed to the sun at the same time and on the same days and were positioned in the best orientation, thus minimizing variations in results during the days. of carrying out the tests. As main results, it was identified that the automatic tracking systems increase the average energy gain in closed loop and open loop by 29% and 17%, respectively, in relation to the static system. However, when discounting the energy used by the movement systems, there is a yield reduction of 4% for closed loop and 2% for open loop, in relation to the static system. With this, it is concluded that the tracking systems, despite having a higher generation gain, make their use unfeasible, due to the energy expenditure of the system, as well as the cost of implementing these systems.

Keywords: solar energy; renewable energy; photovoltaic systems - control; energy efficiency.

1. Introdução

Com a crescente demanda energética pelo mundo, novas alternativas de geração de energia elétrica se fazem necessárias para atender a esta procura. Aliado a isso, métodos mais eficientes de transmissão e consumo também se fazem necessários. Neste sentido, muitos estudos são desenvolvidos objetivando melhorar a forma da humanidade se relacionar com a energia.

Do ponto de vista da produção energética, as demandas por fontes renováveis de energia ocorrem devido a limitação do nosso planeta em suprir todo o consumo energético global indefinidamente, uma vez que os combustíveis fósseis usados por séculos e sem moderação podem se esgotar no futuro. Fontes de energia como o petróleo necessitam de milhões de anos para serem transformadas na matéria prima para a geração de energia elétrica, que passa por diversos processos até a sua utilização final.

Além disso, o homem não consegue alterar o processo de formação do petróleo, fazendo com que haja a completa dependência das fontes petrolíferas que já existem no planeta. Por outro lado, fontes de energia como as geradas através de hidroelétricas, têm ciclos de aproximadamente um ano entre períodos de seca e cheia, tornando assim uma opção viável de ser utilizada em ambientes com grandes volumes de água, sendo inclusive o principal responsável pela matriz elétrica do Brasil.

Pensando em uma produção mais sustentável de energia, a utilização de fontes renováveis é de grande importância para mitigar os impactos negativos da geração de energia no mundo. Dentre tais fontes se destacam a energia dos ventos, a energia da biomassa, a energia oceânica proveniente da movimentação das marés, e a mais abundante no planeta, a energia solar. Os estudos e pesquisas têm crescido acerca dos temas relacionados a estas alternativas energéticas, cada um com seus métodos e particularidades. Embora possuam diferenças, todas as fontes alternativas de energia citadas apresentam características positivas em se tratando de redução dos impactos ambientais decorrente do processo de geração de energia elétrica.

A energia solar pode ser convertida diretamente em energia elétrica com o uso dos módulos fotovoltaicos, chamado popularmente de painel solar, traz grandes vantagens para essa rota de conversão, uma vez que não demanda implementação de grandes estruturas para a geração de energia quando comparada a outras fontes

de energia. Isso faz com que a energia solar fotovoltaica seja ideal para a aplicação na geração distribuída, expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima dos consumidores, possibilitando sua aplicação em pequena, média e grande escala. Apesar disso, alguns fatores influenciam a geração de energia utilizando módulos fotovoltaicos, como o posicionamento da face dos módulos em relação ao sol, a presença de sujeiras, resíduos e sombreamento, entre outros.

Para tentar aumentar a eficiência de captação de energia solar pelos módulos, sistemas de rastreamento solar têm sido propostos, sendo apresentados com várias estratégias de controles possíveis, uma vez que esses sistemas têm um impacto direto na geração de energia útil, ou seja, a energia final. Por outro lado, esses sistemas podem consumir energia para fazer o rastreamento do sol e impactar negativamente no processo de geração de energia. Logo, estudar e desenvolver estratégias eficientes de rastreamento solar pode ser uma alternativa que aumente a eficiência de campos solares, compensando, em parte, a eficiência limitada que os módulos comerciais podem ainda apresentar.

1.1 Objetivos

Desta forma, este trabalho tem por objetivo avaliar diferentes estratégias de rastreamento solar, buscando maneiras de melhorar a eficiência de geração dos sistemas solares através da movimentação dos módulos fotovoltaicos.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Levantar as principais estratégias de controle de sistemas de rastreamento solar;
- Implementar os algoritmos de rastreamento;
- Montar os sistemas mecânicos e eletrônicos dos rastreadores solares;
- Avaliar as estratégias de rastreamento em comparação com um posicionamento estático dos módulos fotovoltaicos.

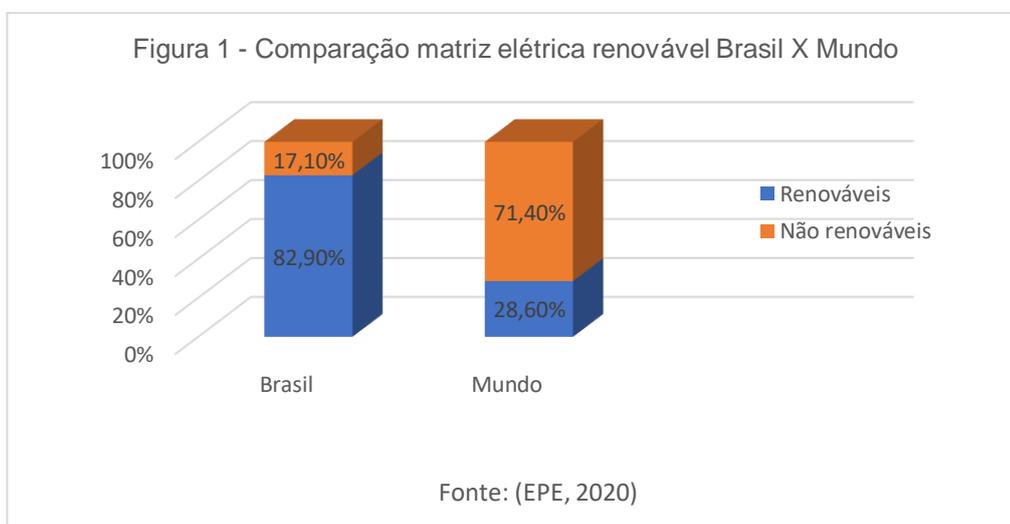
2. Referencial Teórico

2.1 Geração Renovável

As fontes renováveis são aquelas em que o período de renovabilidade acontece em ciclos curtos de tempo. Um exemplo de uma fonte muito utilizada para produção de eletricidade, é a energia proveniente de hidroelétricas, pois, mesmo durante períodos de baixo volume de água, este recurso pode ser naturalmente restabelecido, considerando o ciclo hidrológico da água nos diferentes períodos do ano. Apesar dos pontos positivos, a energia hidráulica também apresenta desvantagens; além de ser necessário alagar uma grande extensão de terra, prejudicando a fauna e flora local, a decomposição da vegetação alagada dá origem a gases poluentes, como o metano, gás carbônico e óxido nitroso, podendo causar, além de tudo, mudanças climáticas significativas (PÔJO; MOURA, 2021).

Os sistemas fotovoltaicos, assim como a energia eólica, geotérmica, biomassa e hidráulica consiste em fontes de energia renováveis. Com algumas normativas que facilitam a inserção de fontes renováveis no sistema elétrico brasileiro, algumas dessas tecnologias têm aumentado sua participação na matriz elétrica nacional (PINHEIRO et al., 2020).

Ao comparar o Brasil com o restante do mundo, é possível notar que o país está à frente no que diz respeito à geração e consumo de energia renovável, segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), cerca de 83% da energia elétrica que consumimos proveniente de fontes renováveis, enquanto no restante do mundo esse percentual cai para somente 28% conforme pode ser observado na Figura 1.

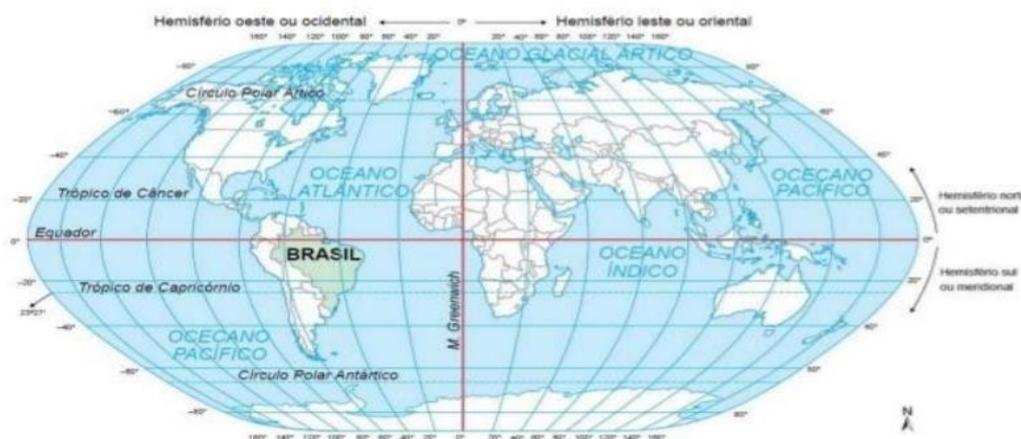


Esses resultados estão relacionados, principalmente, à grande utilização de hidrelétricas para produção de energia elétrica no país, que são responsáveis por mais de 55% do potencial de geração nacional (EPE, 2020).

Contudo, apesar de grande parte da energia produzida no Brasil ser proveniente de sistemas renováveis, existem problemas relacionados à matriz elétrica nacional, principalmente pela grande dependência de uma única fonte de energia (EPE, 2020).

Dentre as fontes de energia renováveis existentes, a energia solar apresenta um grande potencial em países como o Brasil. Devido a dimensão continental e localização geográfica, a maior parte do território brasileiro fica localizada entre a linha do equador e trópico de capricórnio, regiões que proporcionam grande incidência solar em todas as estações do ano, conforme mostrado na Figura 2. Além de ser uma tecnologia modularizada, que é um modelo de desenvolvimento tecnológico que se baseia na construção de sistemas ou produtos a partir de módulos, o que facilita a instalação descentralizada (ABSOLAR, 2020).

Figura 2 – Posição geográfica do Brasil



Fonte: (POLON, 2022)

Mesmo com o grande potencial existente no Brasil, ainda há muito a se explorar em tratando de energia solar, logo, novos estudos devem ser realizados, visando aumentar sua participação na matriz elétrica nacional de forma a diversificar a utilização das fontes renováveis de energia (MOREIRA JÚNIOR; SOUZA, 2020).

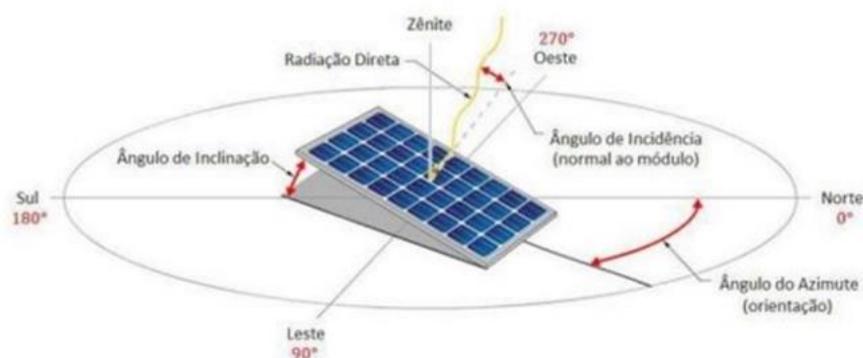
2.2 Geração Fotovoltaica

Alguns dos fatores que podem interferir na geração dos módulos solares são: sombreamento, causado por alguma obstrução do módulo fotovoltaico, posicionamento, ocorrido por alguma limitação geográfica na instalação ou até mesmo baixa radiação solar. Em regiões urbanas arborizadas, por exemplo, deve-se fazer um planejamento estratégico para que não haja conflito do sistema com o ambiente externo (FRACCANABBIA; MARIANI, 2021).

Em relação ao posicionamento dos módulos fotovoltaicos, os sistemas de captação de energia solar podem ser estáticos ou apresentarem sistemas de rastreamento solar, que têm como função seguir o movimento aparente do sol sempre colocando a face do módulo na posição de maior incidência de radiação (LEMOS JÚNIOR et al., 2020).

Nos sistemas estáticos, usados na maioria das usinas instaladas no Brasil, que ficam no hemisfério sul da Terra, os módulos são posicionados com sua face apontada para o norte, com um ângulo de inclinação equivalente a latitude de onde será instalado, Figura 3. Se esse tipo de posicionamento for usado em um país no hemisfério norte, a face do módulo deve ser apontada para o sul (RODRIGUES et al., 2021).

Figura 3 – Posicionamento do módulo fotovoltaico

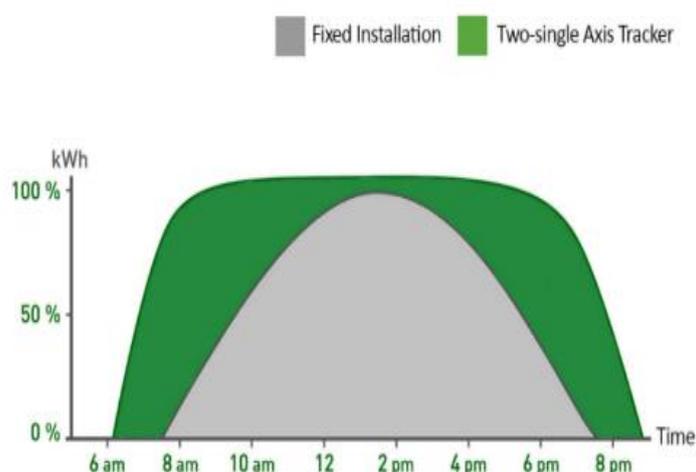


Fonte: (NEOSOLAR, 2019)

Desse modo, é de se esperar que o índice de geração ao longo do dia seja variável, com seu pico ao meio-dia, visto que 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. Dessa forma, será possível manter uma geração constante ao longo de mais horas do dia, tornando o sistema mais eficiente, como pode ser visto no gráfico 4. No gráfico, é possível notar a diferença de geração de ambos os sistemas ao longo do dia, enquanto o sistema estático apresenta um comportamento parabólico, com seu pico por volta das 12 horas, o sistema móvel apresenta uma geração uniforme, atingindo valores mais altos e por um período maior (LEMOS JÚNIOR et al., 2020).

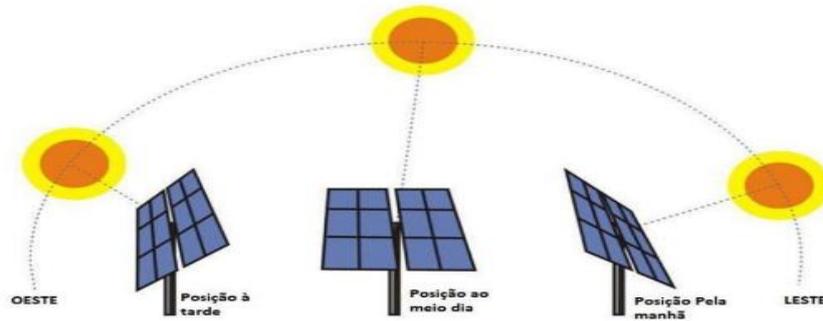
Figura 4 - Gráfico comparativo de geração Sistema Estático X Sistema Móvel



Fonte: (ECO, 2020)

Em sistemas de rastreamentos ativos, processo de monitoramento ocorre em tempo real, dispositivos mecânicos e eletromecânicos comandados por sistemas de controle eletrônico são utilizados para automatizar esse rastreamento ao longo do dia, como pode ser observado na Figura 5 (DEBASTIANI et al. 2022).

Figura 5 – Esquema de movimentação Módulos com Rastreador Solar



Fonte: (ENERGIA SOLAR MASTER, 2022)

Para o rastreamento da dinâmica solar em sistemas de rastreamento ativos, podem ser utilizados sistemas de controle em malha aberta, que é um tipo de sistema de controle em que a saída não é comparada com a entrada para correção do desempenho do sistema, o qual tem a possibilidade o uso da variável tempo para o posicionamento do módulo. Ou sistemas em malha fechada, esse tipo de sistema que compara a saída do processo com o valor de referência (ou setpoint) e calcula o erro entre esses valores, utilizando a retroalimentação de um sensor para indicar onde está o ponto de maior incidência solar. Por fim, cada uma das estratégias apresenta suas vantagens e desvantagens (MELO et al., 2017).

O algoritmo de controle em malha aberta pode ser construído considerando a movimentação azimutal do sol em relação à Terra. Conhecendo o posicionamento de instalação dos módulos é possível fixar a estrutura em local que apresenta boa intensidade solar ao longo de todo o dia. Determinando o ponto do nascer do sol no horizonte, assim como o horário que este evento ocorre, é possível iniciar a parametrização do movimento.

Outro dado importante de se capturar é o local e horário do pôr do sol. Com essas informações preliminares, é possível identificar a amplitude do movimento em graus, como também o tempo necessário para este movimento. Dessa forma, considerando uma amplitude de 150° em um movimento ao longo de 12 horas, a cada hora o sistema irá se rotacionar $12,5^\circ$. Por ser uma variação considerável a cada hora e, visando obter maior rendimento, o algoritmo pode ser programado para movimentar o sistema em intervalos menores de tempo. Assim, caso o modelo seja movimentado a cada 5 minutos, a movimentação será equivalente a $1,04^\circ$ a cada intervalo.

O ângulo de inclinação da estrutura sofre pequenas variações ao longo do ano,

sendo ocasionadas, principalmente, por conta da mudança de posicionamento da Terra no sistema solar. Com isso, tem-se uma alteração ao longo de diferentes estações, o que pode gerar uma queda de eficiência do sistema em determinadas épocas do ano.

Objetivando ter um modelo de movimentação autônomo mais simplificado, uma escolha é fixar o ângulo de inclinação com a altura solar do local de instalação, posicionando o módulo direcionado ao norte e o inclinando o equivalente à latitude local. Deste modo, é possível obter um sistema autônomo de movimentação com uma programação simples, ou de único eixo, que aumenta a eficiência do sistema.

Uma alternativa para compensar as variações provenientes da rotação terrestre, é realizar uma mudança na angulação da estrutura de forma manual, de modo que o próprio usuário movimente seu sistema em determinadas datas do ano, sem necessidade de outros componentes elétricos e mecânicos para exercer este trabalho.

Apesar de ser uma opção possível, não é viável que esta movimentação seja realizada pelo usuário de forma autônoma. Então, extrapolando os sistemas de controle em malha aberta, é possível ampliar a eficiência movimentando, não só o ângulo azimutal de forma automatizada, mas também o ângulo de inclinação dos módulos. Deste modo, se tem um sistema de movimentação em dois eixos.

Pode ser realizada também, uma análise de movimento e posicionamento do sol em diferentes dias e horários, obtendo-se um mapeamento mais preciso e eficiente. Com isso, o sistema passa a considerar, para se posicionar, não apenas o horário, mas também o dia do ano para se referenciar. Assim, considerando o mesmo horário de análise, 12 horas, tem-se o mesmo posicionamento azimutal e uma diferente angulação para os meses de junho e dezembro.

Devido à grande complexidade de aquisição dos dados meteorológicos locais e, conseqüentemente, para a construção desse algoritmo, aliado ao custo extra para montagem e manutenção de toda a parte mecânica e elétrica, tal modelo não se mostra eficiente no que diz respeito a sistemas de movimentação de módulos solares de forma autônoma (MELO et al.,2017).

2.3 Controle de Rastreamento

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 proporcional-Integral-derivativo, PI proporcional-Integral, 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).

O Algoritmo On-Off, como o próprio nome sugere, se refere a um controle Ligado-Desligado. Seu resultado de saída é binário e, por isso, é um dos modelos de controle mais básicos, embora apresente limitações. Em contrapartida, apresenta uma alternativa econômica para aplicações no dia a dia como termostato de geladeira, ou mesmo um controle de nível de água em uma caixa, por meio de boias.

Embora o controle On-Off possa apresentar alguns pontos negativos, se mostra promissor para implementação no movimento de módulos solares. Para este caso de geração de energia solar, tem-se uma liberdade de movimento devido há grande distância do ponto focal do sol até os módulos, o que faz com que os painéis tenham uma certa liberdade angular de movimento, não sendo necessário um posicionamento exato para atingir máxima potência, fazendo com que uma das principais desvantagens, o fato de não ter uma calibração tão exata, não afete de forma significativa o projeto de movimentação dos painéis (FUENTES-MORALES et al., 2020).

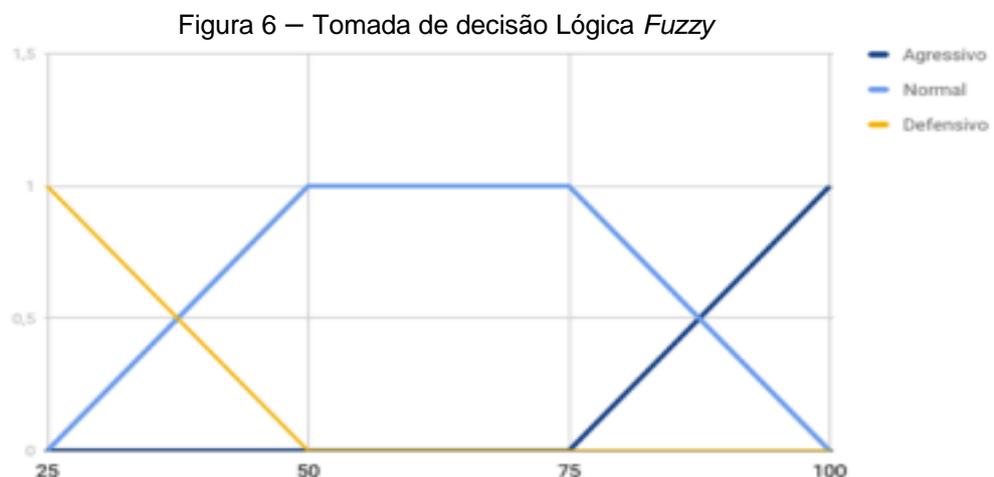
Para implementação deste algoritmo, é possível utilizar sensores fotossensíveis, como sensores LDR (Resistor Dependente de Luz), que fazem a captação da radiação solar e transmitem os dados captados a um Arduino, responsável por realizar a parte de comando da estrutura.

Para este modelo, assim como o sistema de malha aberta, é possível trabalhar com um ou dois graus de liberdade: azimute e/ou inclinação. Porém, neste caso, por se tratar de um sistema autônomo, a movimentação em dois eixos se torna mais viável, devido a interação que ocorre com o meio externo. Diferentemente do que ocorre no primeiro modelo, caso o sistema detecte uma obstrução, sombra ou até mesmo dias nublados em que as radiações solares não chegam de forma direta na

superfície do planeta, os dois graus de liberdade do sistema lhe conferem uma capacidade adaptativa.

Entretanto, devido principalmente a simplicidade da programação envolvida no modelo, ele está suscetível a dados falsos que corroboram para uma menor eficiência do sistema, sendo o principal obstáculo justamente os fatores externos, que podem confundir os sensores em dias nublados, direcionando o modelo para uma superfície branca ou espelhada que reflète a iluminação solar, e ao invés de captar a radiação solar direta, a qual tem um ganho energético superior, direciona para as superfícies reflexivas, uma vez que estes pontos concentram uma maior claridade, porém prejudica a geração por captar apenas a radiação solar difusa, radiação solar que é espalhada ou refletida (FUENTES-MORAL 2020).

Semelhante ao controle On-off, tem-se a lógica Fuzzy que, em tradução livre, seria lógica difusa, ramo da lógica que lida com a incerteza e a imprecisão. Este modelo trabalha com uma gama maior de resultados, e, em vez de haver apenas ligado e desligado, para este controle o algoritmo entende valores intermediários, ou seja, em dias nublados o sistema não buscará um posicionamento ótimo de forma aleatória, e sim fará uma verificação dos dados captados pelos inputs de dados, e a partir destes dados irá exprimir os parâmetros que devem ser buscados pelo sistema, lógica expressa na figura 6. Em outras palavras, a lógica Fuzzy não possui um valor ótimo de referência, e sim um valor ótimo em cada ocasião (CANTONI, 2017).



Fonte elaborado pelo próprio autor 2023

Para o sistema de análise, será utilizado o mesmo conceito apresentado anteriormente, os sensores LDR identificam a incidência solar, porém, ao invés do algoritmo buscar sempre um posicionamento ótimo, o modelo se moverá para o ponto com melhor eficiência, não necessariamente o ponto ótimo.

A principal vantagem deste modelo em detrimento do controle On-off, seria a redução do gasto energético do sistema, uma vez que a estrutura tende a se movimentar apenas quando for detectado um ponto estável com maior geração. Dado que em dias nublados, é comum haver nuvens bloqueando a luz do sol por alguns instantes ao longo de vários períodos do dia.

Nesta situação, o sistema On-off se movimenta para um posicionamento em que o módulo não estivesse diretamente obstruído, captando, assim, a radiação difusa emitida pelo sol. Após a passagem da nuvem, o sistema voltaria para a posição inicial, voltada ao sol, tendo um gasto energético em ambos os movimentos. Por outro lado, um algoritmo utilizando a lógica Fuzzy identificaria a queda de luminosidade no sensor, porém, em comparação com luminosidade dos demais sensores, iria calcular a viabilidade de movimentação. Caso seja identificada uma queda de luminosidade, o sistema permanecerá estático, economizando assim a energia responsável por tal movimentação (CANTONI, 2017). Cabe ainda destacar que o controle Proporcional Derivativo, conhecido também como PD, é uma técnica utilizada quando se necessita de um controle mais preciso.

O termo Proporcional (P), se refere ao sinal de saída, que deve ser proporcional a amplitude do erro do sistema, um ganho P muito alto pode ser prejudicial ao sistema devido ao controle que deverá ser feito com este sinal de saída para mantê-lo nos parâmetros desejados, enquanto um ganho P muito baixo pode tornar impossível o controle, seu objetivo é corrigir o valor da variável manipulada.

E por último a ação Derivativa (D), produz um sinal de saída que é proporcional a velocidade de variação do erro, ou seja, ela fornece a correção antecipada do erro e diminui o tempo de resposta, otimizando a estabilidade do sistema (FUENTES-MORALES et al.,2020).

Tendo como norte estes conceitos apresentados, buscou-se fazer uma comparação quantitativa por meio de análises experimentais de estratégias de controle de movimentação e sistemas de posicionamento de módulos fotovoltaicos.

3. Metodologia

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi necessário a utilização de três estruturas para avaliar o posicionamento dos módulos fotovoltaicos e para verificar a eficiência dos modelos. Na figura 7 é possível ver o modelo de referência adotado.

Figura 7 – Protótipo da estrutura de rastreamento



Fonte: (USINAINFO, 2020)

Inicialmente, tem-se o modelo Estático (ET), exemplificado na Figura 8. Este é o módulo de referência, ou seja, a partir dos valores de geração de energia obtidos nele é que se pode quantificar a eficiência dos demais. Para tanto, este deve estar em seu posicionamento ideal, portanto, seguindo os conceitos de posicionamento de tais módulos fotovoltaicos, este teve sua estrutura confeccionada para manter um ângulo de inclinação equivalente a latitude da região onde está sendo realizado os testes.

Desse modo, foi utilizada a latitude da cidade de Juiz de Fora, situada no estado de Minas Gerais – Brasil. No caso, a Latitude corresponde a, aproximadamente, 21°41'40' (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 2006), enquanto, no eixo Z, eixo vertical

do sistema de coordenadas cartesianas tridimensional, seu posicionamento de ângulo de azimute foi direcionado ao Norte. Sua estrutura foi confeccionada utilizando cantoneira de ferro de meia polegada por um oitavo de polegada e 6 milímetros de espessura, com um corte longitudinal para realizar o encaixe com o módulo fotovoltaico, chapa de ferro de 1 milímetro de espessura, barra quadrada de meia polegada por um oitavo de polegada e 6 milímetros de espessura, responsáveis por fazer a fixação dos componentes.

Figura 8 – Estrutura do protótipo Estático



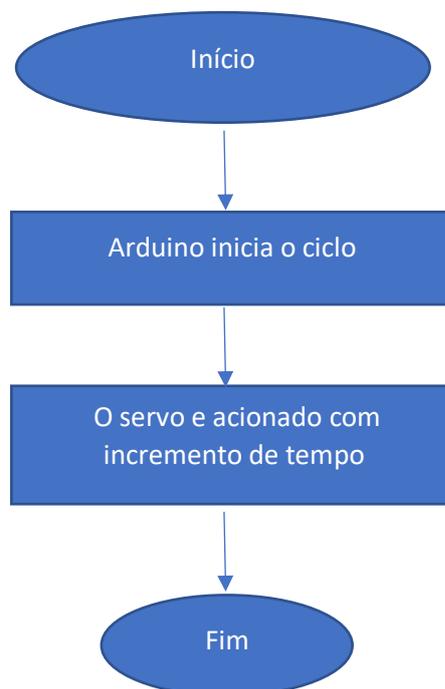
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Para o segundo modelo sistema em Malha Aberta (MA), foi usado a mesma estrutura do modo estático, exemplificado também na figura 8, utilizou-se uma estrutura de cantoneira de ferro de meia polegada por um oitavo de polegada e 6 milímetros de espessura, com um corte longitudinal para realizar o encaixe com o módulo fotovoltaico, chapa de ferro de 1 milímetro de espessura, barra quadrada de meia polegada por um oitavo de polegada e 6 milímetros de espessura e chaves fim de curso.

Nesta estrutura, tem-se a opção de variar o posicionamento do módulo a longo do seu eixo, que permite a variação de sua inclinação. Para isso, é realizada a fixação

de um servo motor, que é um tipo de motor elétrico projetado para fornecer um controle mais preciso sobre o movimento, modelo usado (Micro Servo 9g – SG90 180°), o servo motor se encaixa diretamente na estrutura. O microcontrolador utilizado para monitorar o funcionamento da estrutura de geração de energia constitui em um sistema Arduino Uno, fixado na base da estrutura. Este dispositivo tem a função de controlar a movimentação do servo motor, lógica de programação adotada para esse tipo de modelo On-Off. Para executar a interligação do sistema de controle foram utilizados, ainda, jumpers de conexão, que são pequenos conectores elétricos utilizados em eletrônica para estabelecer uma conexão temporária ou permanente entre componentes eletrônicos, e foi utilizado uma fonte genérica de 5V para alimentação do protótipo, conforme exposto na Figura 9, abaixo.

Figura 9 – Fluxograma do funcionamento Controle em Malha Aberta



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

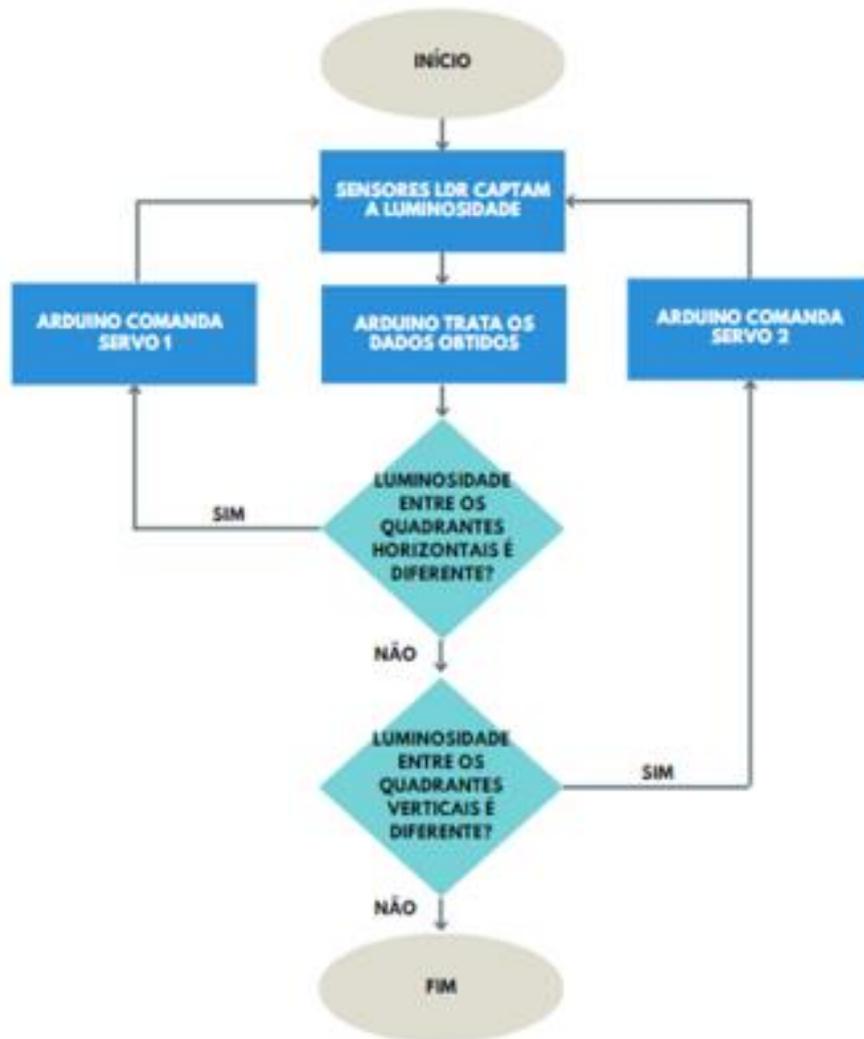
Finalmente para o terceiro Modelo, ou Sistema em Malha Fechada (MF), Figura 10, foi utilizada toda a parte estrutural citada, contendo ainda o mesmo modelo de servo, assim como o mesmo modelo de Arduino, a lógica de programação adotada para esse modelo foi a lógica Fuzzy. Porém, para este modelo, a estrutura confeccionada em MDF apresenta quatro lacunas próximas à região onde é fixado o módulo fotovoltaico. Nessas lacunas, serão instalados 4 sensores LDR (Light Dependent Resistor) é um tipo de sensor que varia sua resistência elétrica de acordo com a quantidade de luz que incide sobre ele. Estas lacunas têm a função de isolar a luminosidade em cada quadrante, local de posicionamento dos sensores LDR, a fim de identificar o ponto de maior incidência luminosa. Além destes dispositivos, foi utilizado um extensor de portas 0 a 6V, circuito eletrônico que é usado para estender o intervalo de tensão de um sinal de entrada, 4 resistores de 330 Ω , jumpers de conexão e uma fonte de alimentação chaveada de 5V. Esta fonte chaveada é um tipo de fonte de alimentação eletrônica que usa um circuito de chaveamento para converter a tensão de entrada de energia elétrica em uma tensão de saída desejada

Figura 10 - Estrutura Protótipo em Malha Fechada



Por se tratar de um Sistema em Malha Fechada, com realimentação de sinal de comando, o fluxograma a seguir descreve o controle realizado pelo sistema de geração de energia que pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma de funcionamento do Controle do sistema em Malha Fechada



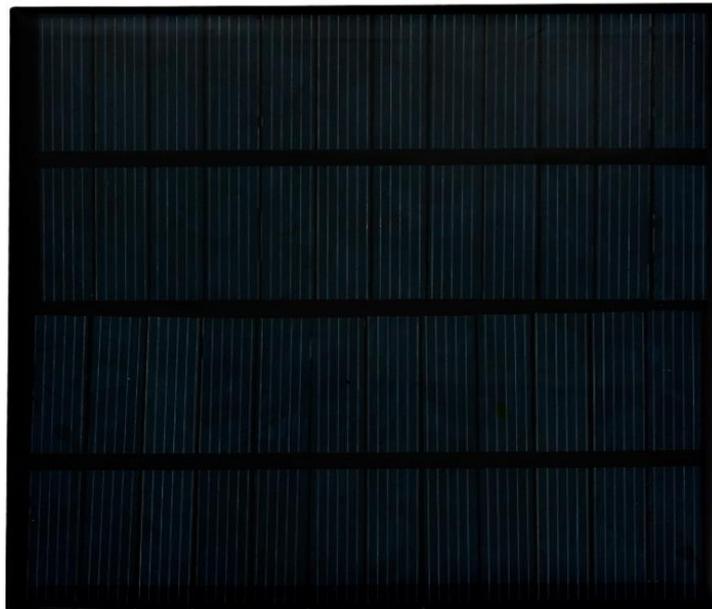
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Toda a parte lógica nos sistemas que apresentam algum tipo de controle. Foram realizadas por um Arduino, que é responsável por executar a análise dos dados para comandar os servos motores, a fim de posicionar toda a estrutura para a orientação com maior radiação solar e, conseqüentemente, a posição que permitir, um maior ganho energético.

Como os dados gerados não possuem muita complexidade, um Arduino Uno foi utilizado para ambos os modelos, sendo modificado apenas a programação aplicada em cada modelo estudado.

Em comum, todos os sistemas contaram com módulos fotovoltaicos de 145x145mm, com tensão nominal de 12V e corrente máxima de operação de 250 mA, com potência máxima de 3 W (Figura 12). Sendo soldado aos polos positivo e negativo do módulo um fio de 33cm de comprimento e conectado a ele um plug USB fêmea.

Figura 12 – Módulo Fotovoltaico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A partir da utilização do conector no padrão USB, foi possível utilizar medidores de grandezas elétricas, Figura 13, os quais apresentam conexão no mesmo formato. Estes dispositivos apresentam as seguintes informações em seu Display e seguintes amplitude.

- Tensão (4 – 30 V);
- Corrente (0 – 5 A);
- Carga Elétrica (0 – 9.999 mAh);
- Energia (0 – 9.999 mWh);
- Tempo (0 – 99 h);

- Potência (0 – 150 W);
- Número da medição (0 – 9 n);

Figura 13 – Medidor de Energia



Fonte: Elaborado pelo auto, 2022

Para que seja possível extrair a máxima potência nos módulos, o ideal é aplicar uma carga com resistência variável, pois, dessa forma, a corrente consumida será equivalente a energia do sistema.

A melhor opção encontrada para atender a esta demanda foram fitas de LED, conforme a Figura 14. Foram utilizados pedaços de 1 metro de fita para cada módulo. Realizando algumas medições, foi possível perceber que este comprimento consome uma potência de aproximadamente 4 W, ou seja, atende a um dos requisitos. Além disso, o LED possui uma característica fundamental para o experimento. Quando exposto a baixa potência, ele se mantém operando, porém com intensidade reduzida. 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 variações meteorológicas.

Figura 14 – Fita de LED



Fonte: Elaborado pelo auto, 2022

Buscando a maior acuracidade dos dados obtidos, foi estabelecido um local padrão para realização dos testes. O local ideal não deve possuir sombras em nenhum momento do dia, pois isto poderia prejudicar a leitura dos dados. Além disso o sistema, deve ser posicionado em um local que apresente radiação solar ao longo das 12 horas de duração do dia. Na Figura 15, pode-se observar o posicionamento do local padrão definido.

Figura 15 – Localização de realização dos testes



Fonte: Elaborado pelo auto, 2023

Buscando o posicionamento ideal, todos os dias o sistema de geração de energia é deixado no ambiente e tem o ângulo de inclinação, assim como o ângulo de

azimute, aferido. Outro ponto observado em todos os testes é o horário de inicialização e finalização de ciclo. Sendo assim, o sistema é inicializado às 06 horas da manhã, e tem seu ciclo completo às 18 horas.

4. Resultados

Após iniciados os testes, os resultados obtidos em cada sistema foram inseridos em tabelas, a fim de facilitar a visualização e avaliação dos dados coletados.

O primeiro dado coletado consistiu no tempo e potência de funcionamento de cada sistema. Como todos os modelos estão fixados na mesma plataforma, todos foram expostos à radiação solar no mesmo instante. Porém, pode-se observado na Tabela 1, que há uma grande diferença entre o tempo de funcionamento dos módulos com rastreador e o módulo estático.

Tabela 13 Comparação das Horas(h) e Potência(mWh) de Geração de Energia dos Sistemas

Medição	Malha Fechada (h – mWh)	Malha Aberta (h-mWh)	Estático (h – mWh)
1	10:48:55h - 11.650mWh	10:49:20h - 11.462mWh	08:46:10h - 10.080mWh
2	10:33:55h - 12.653mWh	10:37:30h - 13.416mWh	09:03:56h - 8.444mWh
3	08:40:55h - 9.939mWh	08:39:50h - 10.535mWh	07:07:13h - 8.477mWh
4	10:32:35h - 13.171mWh	10:36:05h- 15.008mWh	09:11:04h - 15.225mWh
5	06:30:55h - 6.336mWh	06:30:55h - 4.968mWh	05:17:32h - 6.213mWh
6	10:34:35h - 12.691mWh	10:36:15h - 12.149mWh	09:03:49h - 9.979mWh
7	07:19:01h - 8.316mWh	07:17:53h - 8.766mWh	06:25:26h - 8.421mWh
8	06:03:22h - 6.003mWh	06:09:55h - 5.339mWh	05:00:08h - 5.593mWh
9	10:59:50h - 13.846mWh	09:35:25h - 14.844mWh	09:11:18h - 14.455mWh
10	11:14:55h - 10.871mWh	11:14:05h - 11.237mWh	09:51:21h - 12.604mWh
11	10:15:50h - 12.224mWh	10:16:05h - 11.044mWh	09:04:37h - 13.048mWh
12	11:22:55h - 11.500mWh	11:22:55h - 9.814mWh	09:39:34h - 10.710mWh
13	11:17:50h - 11.962mWh	11:17:40h- 12.253mWh	09:47:49h - 11.242mWh
14	11:40:10h - 13.160mWh	11:41:20h - 11.852mWh	08:43:43h - 12.110mWh

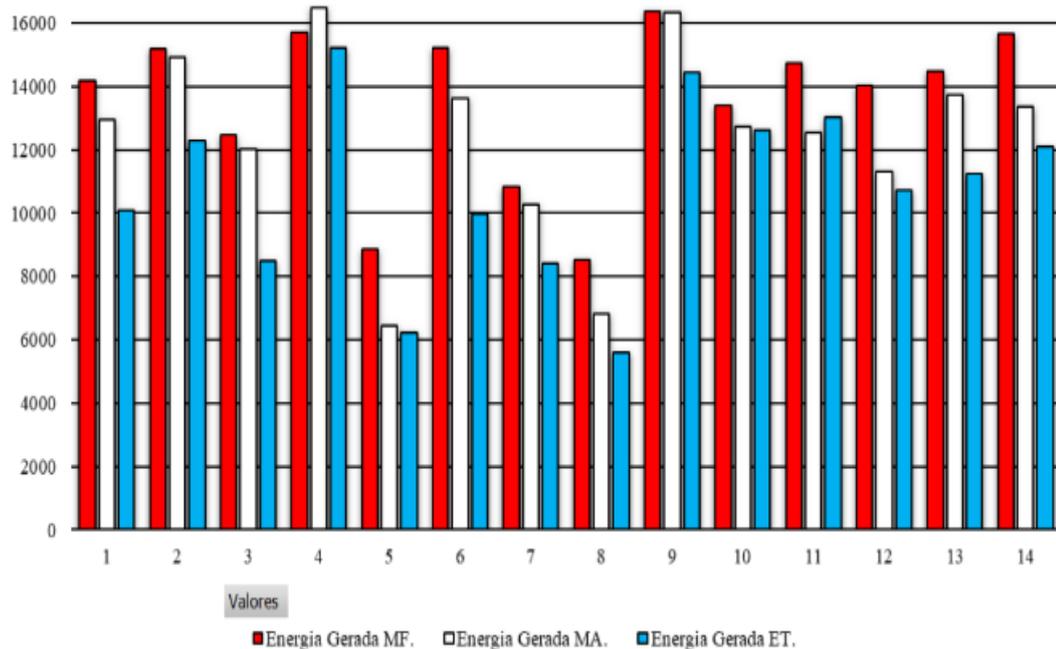
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Notou se que a diferença entre os dois sistemas com controle de posicionamento dos módulos é ínfima. Porém, se comparados com a estrutura

estática, há uma diferença significativa do tempo de geração, chegando a uma diferença de mais de 3 horas em um dos dias de análise (medição 14). Essa diferença se deve ao fato de os modelos com rastreamento conseguirem uma maior captação solar na posição onde foram instalados. Devido a sua mobilidade, a estrutura se rotaciona em direção ao sol mantendo a incidência perpendicular ao módulo. Já o modelo estático não apresenta geração nas primeiras e últimas horas do dia, pois os raios solares são paralelos à superfície do módulo, impossibilitando assim a captação solar e geração de energia em alguns horários.

Em seguida, exposto na Figura 16, pode-se ver a comparação da energia gerada em mWh para cada sistema.

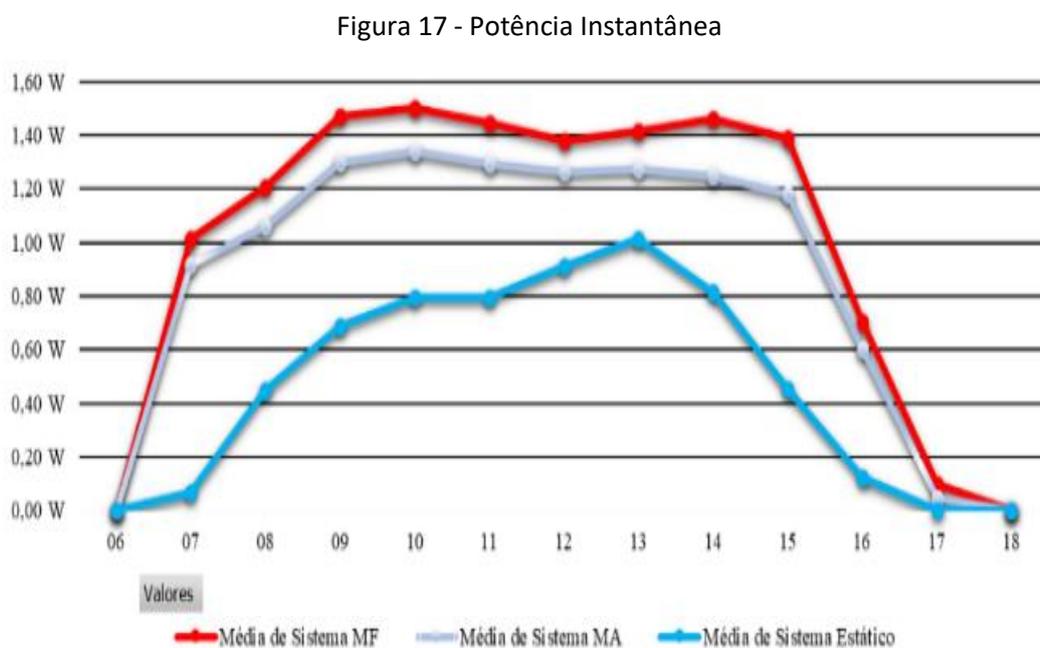
Figura 16 Comparação da Energia Gerada (mWh)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

É verdade que, em geral, os modelos autônomos apresentam vantagens em relação ao modelo estático, uma vez que são capazes de se ajustar ao longo do dia e maximizar a captação de energia solar. Assim, a fim de analisar o comportamento do sistema ao longo do dia, foi realizada a medição da potência instantânea de geração ao decorrer das horas de exposição à luz solar, dos primeiros raios solares pela

manhã até os últimos capturados à tarde. Também foram realizadas medições a cada 15 minutos, totalizando 4 medições por hora, buscando minimizar a interferência de possíveis condições adversas do dia, como nuvens passageiras. Para cada hora analisada, foi realizada uma média das potências obtidas com as quatro medições efetuadas, e as potências médias associadas a cada hora do dia (das 6h às 18h) para os três sistemas de geração de energia, os quais foram plotados no gráfico da Figura 17.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A partir da análise do gráfico, é possível notar o comportamento de cada um dos sistemas. O sistema de geração estático alcançou um pico de geração somente por volta das 13h, enquanto os sistemas móveis já atingem valores de geração elevados às 07 horas, mantendo uma geração mais uniforme ao longo de todo dia.

Entretanto, para realizar a movimentação dos modelos autônomos, ocorre um gasto energético, devido a energia necessária para alimentar o Arduino, servomotores e demais componentes eletrônicos desses sistemas, logo, se faz necessário calcular o gasto energético requerido para os modelos autônomos, a fim de observar se eles são significativos. Para esta análise foram utilizados os mesmos medidores de tensão, corrente e potência, citados anteriormente. Como a alimentação dos servos provem diretamente do Arduino, bastou remover a fonte externa que energiza o microcontrolador, e ligar diretamente no cabo de transferência

de dados, uma vez que este, além de ser utilizado para comunicação do computador com a placa, também fornece energia elétrica ao sistema. A energia necessária para a alimentação dos três sistemas pode ser observada na Tabela 2.

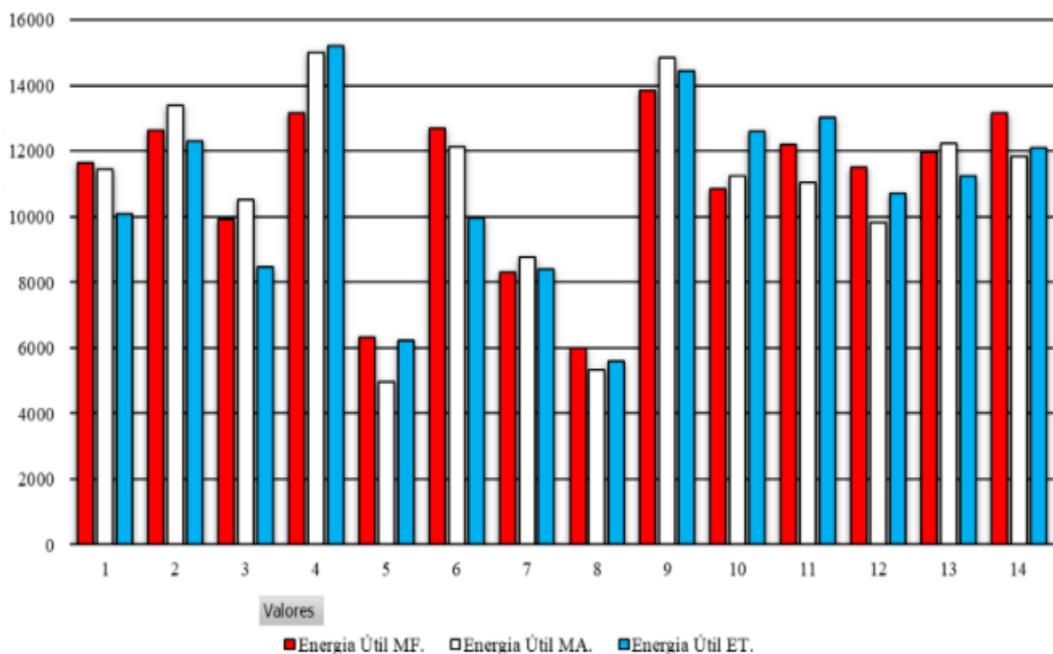
Tabela 2 – Comparação da Energia Gasta

Gasto Malha Fechada	Gasto Malha Aberta	Gasto Estático
2,519mWh	1,494mWh	0mWh

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Devido a necessidade de uso destes medidores para aferição da geração diária, foi capturado o gasto energético em apenas um dos dias de análise, e seu resultado usado como parâmetro para calcular a energia útil gerada, também foi preciso considerar vários fatores, como a potência do sistema, a radiação solar incidente, a eficiência dos painéis solares e as perdas do sistema para calcular energia útil gerada (Figura 18). Este resultado exposto mostra que, apesar de um ganho significativo dos sistemas móveis, ao considerar o gasto energético do próprio sistema, tal alternativa se torna menos viável. Além da diferença diminuir em alguns casos, foi possível observar dias em que o sistema estático apresenta melhor resultado de geração de energia útil.

Figura 18 - Comparação da Energia Útil Gerada (mWh)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Embora o modelo em malha fechada possa apresentar um desempenho superior em relação aos demais, é importante considerar os custos associados a esse modelo, como o gasto energético e o custo agregado dos equipamentos utilizados. Esses fatores devem ser ponderados em relação aos benefícios que o modelo em malha fechada pode trazer em termos de precisão e confiabilidade dos resultados.

O modelo em malha aberta é mais simples e requer menos equipamentos para a realização dos movimentos do módulo fotovoltaico, o que pode reduzir significativamente os custos envolvidos no projeto. No entanto, é importante lembrar que esse modelo pode ser mais suscetível a imprecisões e erros devido à falta de realimentação do sistema

A análise do sistema estático demonstrou que há uma grande perda de energia ao longo do dia, devido a vários fatores, como sombreamento, posicionamento paralelo do módulo solar em relação aos raios solares e baixa intensidade de geração nas primeiras e últimas horas do dia.

5. Conclusão

Após a realização dos testes e verificação dos resultados, foi possível concluir que os sistemas com controle de movimento apresentam ganho na geração de energia elétrica, porém, descontando o gasto de energia para movimentar o sistema, os protótipos tiveram resultados pouco significativos. O modelo com controle em malha fechada apresentou um ganho energético de somente 4% quando comparado ao sistema estático, já o modelo em malha aberta apresentou um ganho ainda menor, de somente 2% em comparação com o modelo estático de referência.

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 pode não ser a mais viável para a região de implementação analisada em juiz de fora, uma vez que a localização geográfica e as condições climáticas do local não permitem que a geração de energia seja maximizada através da utilização dos protótipos moveis.

Vale ressaltar que foi utilizada uma escala reduzida de geração devido aos custos elevados e espaço necessário para a implementação de um sistema em 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.

Por fim, cabe ressaltar que sistemas de geração de energia solar são uma ferramenta importante na busca pela utilização em larga escala de fontes de energia renováveis e não poluentes, logo, buscar novas formas de otimizar esse equipamento de geração de energia e de grande interesse e relevância, não só para as empresas que desenvolvem esses sistemas, mas para a população como um todo.

Para futuros trabalhos, é possível considerar a adição de mais placas para a geração de energia, a fim de proporcionar um aumento na geração de energia para sistemas com controle. Mesmo levando em conta os gastos associados aos movimentos a serem controlados, essa expansão no número de placas permitirá obter ganhos significativos na geração de energia.

REFERÊNCIAS

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-n%C2%B0-39.pdf](https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2022/01/2022.01.11-Infografico-ABSOLAR-n%C2%B0-39.pdf). Acesso em: 15 set. 2022.

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: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8166/1/CT_COEAU_2017_2_2.pdf. Acesso em: 15 dez. 2022.

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: 29 nov. 2022.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Matriz energética e elétrica*, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 29 jul. 2022.

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. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/rbca/article/view/12581/114116007> Acesso em: 29 nov. 2022.

FUENTES-MORALES, R. F. *et al.* Control algorithms applied to active solar tracking systems: a review. *solar energy*, 2020. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/rbca/article/view/12581>. Acesso em: 03 out. 2022.

LEMOS JÚNIOR, A. C. L. *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>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreador-solar. Acesso em: 15 out. 2022.

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/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/29306/pdf>. Acesso em: 29 out. 2022.

MOREIRA JÚNIOR, O.; SOUZA, C. C. DE. Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha. **Interações (Campo Grande)**, v. 21, p. 379-387, 2020. Acesso em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/t7NryC6KdCmwL4RXL4pjVfN/abstract/?lang=pt> Acesso em: 02 dez. 2022.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. **A cidade**: características gerais, 2006. Disponível em: https://pjf.mg.gov.br/cidade/caracteristicas_gerais.php. Acesso em: 04 mar. 2023.

PÔJO, B. C. DA C.; MOURA, P. M. S. Usinas hidrelétricas da Amazônia: adaptando o setor de energia para a segurança energética. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 4, p.1-16, 2021. Disponível em:

<https://scholar.archive.org/work/wp6hzvllcvb4zfw2ep4kdh4xu/access/wayback/https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/download/615/491/>. Acesso em: 30 jul. 2022
RODRIGUES, H. H. *et al.* Aumento de eficiência na captação energética de árvores solares. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO*, 2. **Anais[...]**, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354705105_Aumento_de_eficiencia_na_captao_energetica_de_arvores_solares. Acesso em: 07 set. 2022.

USINAINFO. ***Rastreador solar Arduino Solis completo***: manual de montagem, 2022, Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/robotica-educacional/rastreador-solar-arduino-solis-completo-manual-de-montagem-6023.html>. Acesso em: 19 jul. 2022.