OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE *TRACKER* SOLAR DE DOIS EIXOS UTILIZANDO ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA

José Ramon Nunes Ferreira [1] (joseramonnunes@gmail.com), Kelly Cristiane Gomes [1][2] (gomes@cear.ufpb.br).

[1] Universidade Federal da Paraíba (UFPB); Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
[2] Universidade Federal da Paraíba (UFPB); Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis

RESUMO: *Este artigo aborda o desenvolvimento e a avaliação de um algoritmo de Aprendizado de Máquina – ML (do inglês Machine Learning) para otimizar o posicionamento de um tracker solar de dois eixos. O objetivo central deste trabalho é maximizar a eficiência de captação de energia solar, superando as limitações de sistemas convencionais e contribuindo para a geração de energia renovável. A metodologia envolveu a implementação do algoritmo na plataforma eletrônica de prototipagem OpenSource Arduino Uno, utilizando quatro sensores LDR para detecção de luz e servomotores para ajuste de posição. Um protótipo em escala, fabricado com impressão 3D em plástico ABS, foi construído para validação. O algoritmo incorpora um mecanismo de busca adaptativa e um sistema de memória para aprender e armazenar posições ótimas ao longo do tempo, refinando continuamente o rastreamento. Os resultados demonstram uma melhoria significativa na eficiência de posicionamento, evidenciada por análises comparativas do desempenho do algoritmo, indicando um método robusto e eficaz para aprimorar a performance de sistemas de rastreamento solar em diversas aplicações. Conclui-se que a abordagem proposta oferece um avanço promissor para a otimização da energia solar em pequena e média escala.*

Palavras-chave: *Tracker solar, Aprendizado de máquina, Arduino, Otimização de posicionamento, Energia renovável, Sensores LDR.*

OPTIMIZATION OF TWO-AXIS SOLAR TRACKER POSITIONING USING A MACHINE LEARNING ALGORITHM

ABSTRACT: *This article addresses the development and evaluation of a Machine Learning (ML) algorithm to optimize the positioning of a two-axis solar tracker. The central objective is to maximize solar energy capture efficiency, overcoming the limitations of conventional systems and contributing to renewable energy generation. The methodology involved implementing the algorithm on the OpenSource Arduino Uno electronic prototyping platform, utilizing four LDR sensors for light detection and servomotors for position adjustment. A scaled prototype, fabricated using 3D printing with ABS plastic, was constructed for validation. The algorithm incorporates an adaptive search mechanism and a memory system to learn and store optimal positions over time, continuously refining the tracking. The results demonstrate a significant improvement in positioning efficiency, evidenced by comparative analyses of the algorithm's performance, indicating a robust and effective method to enhance the performance of solar tracking systems in various applications. It is concluded that the proposed approach offers a promising advancement for optimizing solar energy on a small to medium scale..*

keywords: *Solar Tracker, Machine Learning, Arduino, Positioning Optimization, Renewable Energy, LDR Sensors.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energias renováveis tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias que otimizem a captação de energia limpa, sobretudo a energia solar fotovoltaica que se destaca como uma das fontes mais promissoras. Contudo, uma forma de otimização da captação da energia solar é essencial para maximizar o retorno sobre o investimento e a sustentabilidade desses sistemas.

Entre as diversas abordagens, os sistemas de rastreamento solar, ou *trackers* solares, destacam-se por sua capacidade de aumentar significativamente a eficiência dos painéis fotovoltaicos ao mantê-los perpendicularmente orientados em relação aos raios solares ao longo do dia. Tradicionalmente, esses sistemas utilizam mecanismos baseados em cálculos astronômicos ou em sensores de luz para seguir o movimento aparente do sol (Patel, et al., 2021). No entanto, a precisão e a adaptabilidade desses métodos podem ser limitadas por fatores como condições climáticas variáveis, sombreamento parcial e imprecisões na calibração dos sensores.

Com o advento da tecnologia, atualmente estão integrados com tecnologias avançadas, como a Inteligência Artificial (IA) para aumentar a eficiência da geração de energia. Nesse contexto, a integração de algoritmos de aprendizado de máquina – ML emerge como uma solução promissora para aprimorar a performance dos *trackers* solares (Garg et al., 2021).

A capacidade do ML de aprender padrões complexos a partir de dados e de se adaptar a ambientes dinâmicos permite o desenvolvimento de sistemas de rastreamento mais inteligentes e eficientes. Ao invés de depender de modelos predefinidos, um algoritmo de ML pode otimizar continuamente o posicionamento do *tracker*, considerando as variações diárias e sazonais da trajetória solar, bem como as condições ambientais específicas do local de instalação.

Desta forma, a relevância deste trabalho consiste na demonstração de como técnicas de inteligência artificial podem ser aplicadas para superar as limitações dos sistemas de rastreamento convencionais, contribuindo para a otimização da geração de energia solar em pequena e média escala, bem como o uso da prototipação utilizando materiais de baixo custo podem auxiliar do desenvolvimento de solução viáveis para o setor.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo de ML, em plataforma de baixo custo e amplamente acessível (Arduino), para um *tracker* solar de dois eixos utilizando sensores de luz (LDR) para a detecção da intensidade luminosa e servomotores para o ajuste da posição do painel.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O rastreamento solar é uma técnica empregada para otimizar a captação de energia solar por painéis fotovoltaicos ou coletores solares. No contexto da literatura científica sobre captação da energia fotovoltaica, a premissa fundamental é que a eficiência de conversão de energia solar é

maximizada quando a superfície do painel está perpendicular à incidência dos raios solares (Abdullah et al., 2023). Devido ao movimento aparente do sol no céu ao longo do dia e das estações do ano, um painel fixo não consegue manter essa perpendicularidade ideal, resultando em perdas significativas de energia. Sistemas de rastreamento solar são projetados para ajustar continuamente a orientação dos painéis, seguindo a trajetória solar e, consequentemente, aumentando a produção de energia em comparação com sistemas fixos.

Existem dois tipos principais de sistemas de rastreamento solar: de eixo único e de dois eixos Singh et al. (2022). Os *trackers* de eixo único ajustam a posição do painel em torno de um único eixo de rotação, que pode ser horizontal, vertical ou polar. Embora mais simples e menos custosos, sua capacidade de otimização é limitada, pois não conseguem compensar completamente o movimento solar em todas as direções. Uma revisão abrangente sobre sistemas de rastreamento solar destaca as diversas abordagens e tecnologias empregadas para maximizar a eficiência, desde os sistemas de eixo único até os de dois eixos (Singh et al., 2022).

A geração de eletricidade por painéis fotovoltaicos depende diretamente do ângulo de incidência da luz solar, sendo máxima quando a superfície do painel está em um ângulo de 90 graus em relação aos raios solares (Mirzabekov et al., 2023). Neste contexto, os *tracker*s de dois eixos permitem o movimento em torno de dois eixos perpendiculares, geralmente um eixo azimutal (horizontal) e um eixo de elevação (vertical). Essa configuração oferece maior flexibilidade e precisão, permitindo que o painel siga o sol com maior exatidão e, assim, maximize a captação de energia ao longo do dia. A complexidade mecânica e de controle é maior em sistemas de dois eixos, mas o ganho de eficiência energética geralmente justifica o investimento adicional, especialmente em aplicações de maior escala ou onde a otimização do espaço é essencial.

Os métodos de controle para *trackers* solares podem ser classificados em passivos e ativos. Os sistemas passivos utilizam a expansão térmica de fluidos ou gases para mover o painel em resposta ao calor solar, sendo simples e de baixa manutenção, mas com precisão limitada. Os sistemas ativos, por outro lado, empregam motores e sensores para ajustar a posição do painel. Dentro dos sistemas ativos, há duas abordagens principais: baseadas em algoritmos e baseadas em sensores. Os sistemas baseados em algoritmos utilizam cálculos astronômicos precisos para determinar a posição do sol em qualquer momento e local, sendo altamente precisos e não afetados por condições climáticas como nuvens. No entanto, exigem calibração inicial precisa e não se adaptam a condições locais imprevistas, como sombreamento.

Já os sistemas baseados em sensores utilizam fotossensores (como LDRs ou fotodiodos) para detectar a direção da luz solar mais intensa e ajustar o painel em conformidade (Hasan, 2023). A literatura sugere que, embora os sistemas de rastreamento por sensores sejam eficazes, sua performance pode ser afetada por condições climáticas desfavoráveis, como dias nublados, e que algoritmos de controle adaptativos, como a lógica fuzzy, podem ser uma solução para otimizar o

desempenho nessas condições (Ramadan et al., 2021). A combinação de ambas as abordagens, utilizando algoritmos para o rastreamento principal e sensores para ajuste fino, tem se mostrado uma estratégia eficaz para otimizar o desempenho.

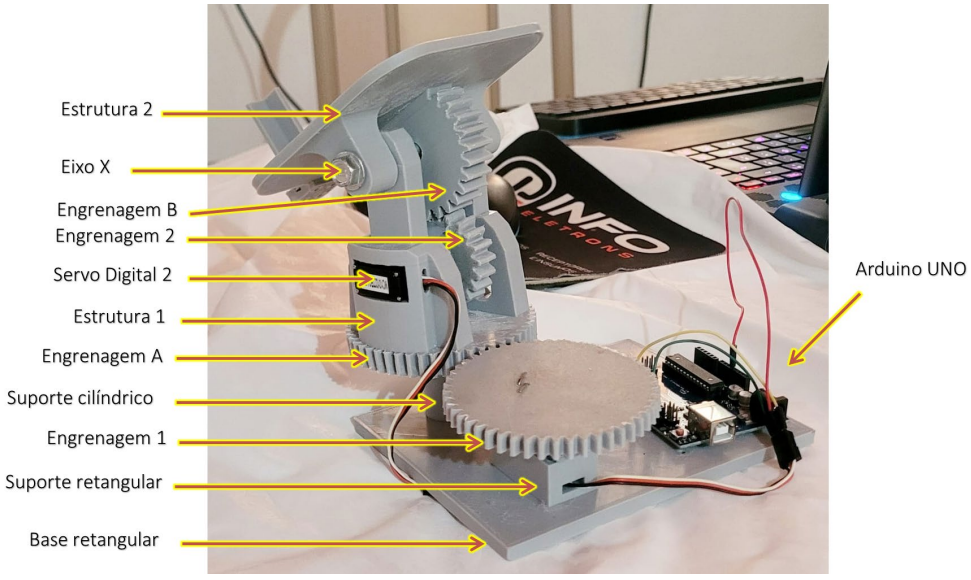
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Prototipagem do *Tracker* Solar

Para a validação do algoritmo de ML proposto, foi desenvolvido um protótipo funcional de um *tracker* solar de dois eixos. A estrutura mecânica do protótipo foi concebida para replicar o movimento de rastreamento solar em pequena escala, utilizando técnicas de fabricação aditiva (impressão 3D) para a construção de componentes estruturais. A escolha da impressão 3D permitiu a rápida iteração do design e a utilização de materiais de baixo custo, tornando o projeto replicável e acessível. O material principal empregado na impressão foi 500g de plástico ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), selecionado por sua durabilidade, resistência mecânica e facilidade de processamento.

A arquitetura do *tracker* é composta por uma base retangular que serve como fundação para todo o sistema. Nesta base, foram fixados dois suportes fundamentais: um suporte cilíndrico e um suporte retangular. O suporte cilíndrico é projetado para encaixar o eixo vertical da Estrutura 1, permitindo sua rotação em torno do eixo Z. O suporte retangular, por sua vez, aloja o Servo Digital 1, que é responsável pelo movimento horizontal (azimutal) do *tracker*. A Engrenagem 1, acoplada ao Servo Digital 1, possui a capacidade de girar em 360 graus, transmitindo o movimento para a Estrutura 1.

FIGURA 1. Protótipo do Tracker Solar de dois eixos.



Fonte: Autores (2025)

A Estrutura 1 é a componente intermediária do sistema, girando no eixo Z em 360 graus. Ela possui uma engrenagem (Engrenagem A) que está conectada e nivelada com a Engrenagem 1 do Servo Digital 1, localizada a 3cm de altura da base. Ambas as engrenagens possuem a mesma quantidade de dentes, garantindo uma transmissão de movimento precisa. A Estrutura 1 é conectada ao suporte cilíndrico da base retangular através de seu eixo vertical. Acima da Engrenagem A, a Estrutura 1 incorpora duas bases laterais que formam uma espécie de mancal. Em uma dessas bases laterais, está fixado o Servo Digital 2, juntamente com sua Engrenagem 2. Este servo é responsável pelo movimento vertical (elevação) do *tracker*, girando em 180 graus no eixo X. A Engrenagem 2 está conectada à Engrenagem B da Estrutura 2.

A Estrutura 2 é a parte superior do *tracker*, projetada para apoiar a placa solar (não especificada nos materiais, mas implícita no contexto de um *tracker* solar). Esta estrutura possui um eixo que gira 180 graus no eixo X, e neste eixo está a Engrenagem B, que se conecta à Engrenagem 2 do Servo Digital 2. A Estrutura 2 também integra dois sensores LDR digitais em sua parte superior, apontando para o eixo Z. Esses sensores são fundamentais para a detecção da intensidade luminosa e a determinação da posição solar.

3.2 Componentes Eletrônicos e Conexões

O sistema de controle do *tracker* solar foi implementado utilizando um microcontrolador Arduino Uno, selecionado por sua versatilidade, baixo custo e vasta comunidade de suporte, o que facilita o desenvolvimento e a depuração. O uso de microcontroladores de baixo custo como o Arduino Uno para a construção de sistemas de rastreamento de dois eixos tem se mostrado uma solução eficaz para aumentar a produção de energia, combinando baixo custo e desempenho (Siddique et al., 2023). A lista de materiais eletrônicos e de conexão utilizados no protótipo inclui:

- 1 Arduino UNO: Microcontrolador principal responsável por processar os dados dos sensores, executar o algoritmo de ML e controlar os servomotores.
- 2 Servomotores Digitais: Utilizados para realizar os movimentos de rotação horizontal (eixo Z) e vertical (eixo X) do *tracker*. A escolha de servomotores digitais garante maior precisão e estabilidade no posicionamento.
- 4 Sensores LDR (*Light Dependent Resistor*): Dispostos na Estrutura 2 para detectar a intensidade luminosa e a direção do sol. A configuração com quatro sensores permite a triangulação da posição solar, otimizando o rastreamento.
- 1m de cabos: Utilizados para realizar as conexões elétricas entre o Arduino, os sensores LDR e os servomotores.
- 10 Conexões: Conectores diversos (jumpers, terminais) para garantir a integridade e a organização das ligações elétricas.

A interconexão dos componentes foi realizada de forma a permitir a comunicação eficiente entre os sensores, o microcontrolador e os atuadores. Os quatro sensores LDR foram conectados às entradas analógicas do Arduino (A0, A1, A2, A3), permitindo a leitura de suas resistências variáveis. Os dois servomotores digitais foram conectados aos pinos digitais PWM do Arduino (pinos 9 e 10), que são capazes de gerar os sinais de controle de largura de pulso necessários para o posicionamento preciso dos servos. A alimentação dos componentes foi fornecida pelo próprio Arduino, garantindo a portabilidade e a simplicidade do sistema.

3.3 Desenvolvimento do Algoritmo de ML

O algoritmo de ML foi desenvolvido em linguagem C para a plataforma Arduino IDE. O objetivo central do algoritmo é otimizar o posicionamento do *tracker* solar para maximizar a intensidade de luz captada pelos sensores LDR. A lógica do algoritmo incorpora um mecanismo de busca adaptativa e um sistema de memória para aprender e armazenar as posições ótimas ao longo do tempo. A seguir, são detalhados os principais componentes e a lógica de funcionamento do algoritmo:

3.3.1. Leitura dos Sensores LDR

O algoritmo inicia realizando a leitura dos quatro sensores LDR (determinado pelas funções LDR_TOP, LDR_BOTTOM, LDR_LEFT, LDR_RIGHT) conectados às portas analógicas do Arduino. A função calcularIntensidadeLuz() processa essas leituras para determinar a intensidade total da luz e as diferenças de intensidade nas direções vertical e horizontal. A intensidade total é calculada como a soma das leituras dos LDRs, subtraindo as diferenças absolutas vertical e horizontal para priorizar a uniformidade da luz sobre os sensores, indicando um alinhamento mais preciso com o sol.

3.3.2. Busca da Melhor Posição (Varredura e Ajuste Fino)

Quando o sistema não possui uma posição aprendida para a hora atual ou a intensidade de luz é baixa, o algoritmo executa uma rotina de busca para encontrar a melhor posição. Esta rotina consiste em duas fases:

- Varredura Inicial: O *tracker* realiza uma varredura em um range angular prédefinido (0-180 graus para horizontal e 45-135 graus para vertical, com incrementos de 10 graus). Para cada posição testada, a intensidade de luz é calculada, e a posição que resulta na maior intensidade é registrada como a melhor posição inicial.
- Ajuste Fino: Após a varredura inicial, o algoritmo realiza um ajuste fino em torno da melhor posição encontrada. Este ajuste é feito em um range menor (±10 graus da melhor posição, com incrementos de 2 graus), permitindo que o *tracker* refine seu posicionamento para maximizar ainda mais a captação de luz. A função moverSuave() é utilizada para transições de posição graduais, evitando movimentos bruscos e garantindo a estabilidade mecânica do protótipo.

3.3.3. Aprendizado e Memória de Posições:

Um dos aspectos inovadores do algoritmo é a sua capacidade de aprendizado e armazenamento de posições ótimas. O sistema mantém uma matriz de memória armazenado pela função memoriaPosicoes(), onde cada linha corresponde a uma hora do dia (0 a 23) e armazena a posição horizontal ótima, a posição vertical ótima e a intensidade de luz máxima registrada para aquela hora. A função atualizarMemoriaPosicao() é responsável por este processo:

Se a intensidade de luz atual for maior do que a intensidade armazenada para a hora correspondente, a memória é completamente atualizada com a posição e intensidade atuais. Caso contrário, é realizada uma média ponderada entre a posição e intensidade atuais e os valores armazenados, utilizando a função taxaAprendizado(). Isso permite que o sistema se adapte gradualmente a novas condições e refine suas memórias ao longo do tempo, sem descartar completamente o conhecimento prévio.

3.3.4. Movimento para Posição Aprendida:

Periodicamente (a cada intervalo de leitura), o algoritmo verifica a hora atual. Se houver uma posição aprendida e com intensidade significativa para aquela hora, o *tracker* se move para essa posição utilizando a função moverParaPosicaoAprendida(). Isso permite que o sistema antecipe a trajetória solar com base em seu aprendizado histórico, reduzindo a necessidade de varreduras constantes e otimizando o consumo de energia dos servomotores. Uma função MARGEM_ERRO () é utilizada para determinar se um movimento é necessário, evitando micro ajustes desnecessários.

3.3.5. Funções Auxiliares

As funções MoverSuave(fromH, fromV, toH, toV): Realiza o movimento dos servomotores de forma gradual, dividindo o trajeto em pequenos passos e introduzindo um *Delay* entre cada incremento. Isso assegura um movimento fluido e minimiza o estresse mecânico. Uma Função de depuração foi implementada para imprimir no *Serial Monitor* do Arduino informações sobre a hora atual, posição dos servos, leituras dos LDRs e o estado da memória de posições, essencial para monitoramento e análise do comportamento do algoritmo.

O algoritmo proposto, ao combinar a detecção em tempo real da posição solar com um mecanismo de aprendizado e memória, visa aprimorar a eficiência do rastreamento, tornando o sistema mais autônomo e adaptável a diferentes condições ambientais e horários do dia. A implementação em Arduino Uno demonstra a viabilidade de sistemas inteligentes de rastreamento solar com recursos computacionais limitados.

4. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da implementação e teste do protótipo de *tracker* solar com o algoritmo de ML. A análise foca em demonstrar a melhoria

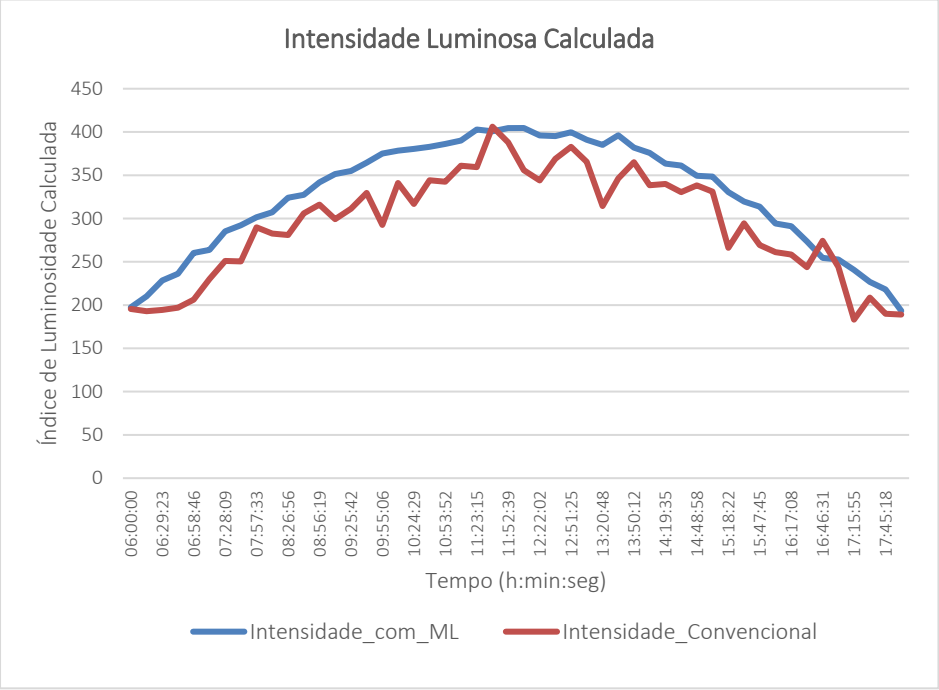
de eficiência no posicionamento e em avaliar o comportamento do algoritmo em diferentes cenários. A eficiência de um sistema de rastreamento solar pode superar a de um sistema estático, com um aumento na produção de energia que pode variar de 10% a 40%, dependendo da configuração do rastreador (Sadeghi et al., 2025).

4.1 Desempenho do Algoritmo de Rastreamento

Para avaliar a eficácia do algoritmo de ML, foi realizada uma análise comparativa entre o *tracker* com o algoritmo ativado e um sistema de rastreamento convencional, que se baseia apenas na detecção em tempo real da intensidade luminosa (sem o componente de aprendizado). A métrica de desempenho utilizada foi a intensidade de luz captada pelos sensores LDR, que serve como um proxy para a eficiência de captação de energia solar. Os dados foram coletados ao longo de um dia simulado, com o sistema operando em condições ideais de céu claro.

O Gráfico 1 ilustra a intensidade luminosa captada pelo *tracker* com o algoritmo de ML (curva azul) em comparação com um *tracker* convencional (curva vermelha) ao longo de um dia. A curva azul demonstra uma maior estabilidade e uma intensidade média superior, especialmente durante as horas de pico de insolação. Isso se deve à capacidade do algoritmo de antecipar a posição solar com base em seu aprendizado histórico, realizando ajustes mais suaves e precisos. Em contraste, a curva vermelha apresenta maior volatilidade, refletindo a constante busca pela posição ideal, o que pode levar a oscilações e a um menor tempo de exposição ótima.

GRÁFICO 1. Comparativo de Intensidade Luminosa calculada pelo *tracker*



Fonte: Autores (2025).

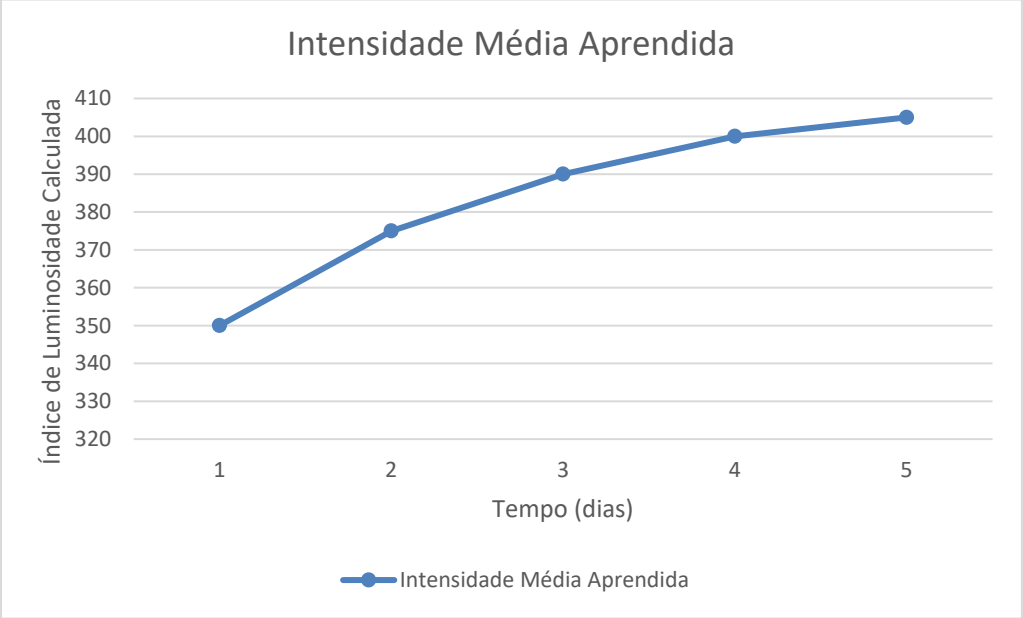
A superioridade do algoritmo de ML é evidente na redução das flutuações de posicionamento. Enquanto o *tracker* convencional reage a cada pequena variação de luz, o que pode ser ineficiente em dias com nuvens passageiras, o algoritmo de ML utiliza sua memória de posições para manter um rastreamento mais estável e preditivo. A função moverParaPosicaoAprendida() permite que o sistema se posicione de forma proativa, minimizando o tempo de busca e maximizando a exposição direta ao sol. A função taxaAprendizado() garante que o sistema se adapte gradualmente a mudanças sazonais na trajetória solar, sem ser excessivamente influenciado por anomalias diárias.

4.2 Análise do Processo de Aprendizado

O processo de aprendizado do algoritmo é fundamental para o seu desempenho a longo prazo. Para visualizar a evolução do aprendizado, foi monitorada a intensidade de luz armazenada na matriz memoriaPosicoes ao longo de vários dias simulados. O Gráfico 2 mostra o aumento da intensidade média armazenada na memória, indicando que o sistema está refinando continuamente suas posições ótimas.

O Gráfico 2 apresenta o valor da intensidade média de luz armazenada na memória do algoritmo ao longo de cinco dias simulados. A curva ascendente demonstra que, a cada dia, o sistema consegue encontrar e armazenar posições que resultam em uma maior captação de luz. A taxa de melhoria diminui gradualmente, sugerindo que o sistema está convergindo para um conjunto de posições ótimas para a trajetória solar simulada.

GRÁFICO 2. Intensidade Média aprendida em 5 dias



Fonte: Autores (2025).

O comportamento observado no Gráfico 2 valida a eficácia do mecanismo de aprendizado implementado. A função '*atualizarMemoriaPosicao()*' desempenha um papel essencial neste

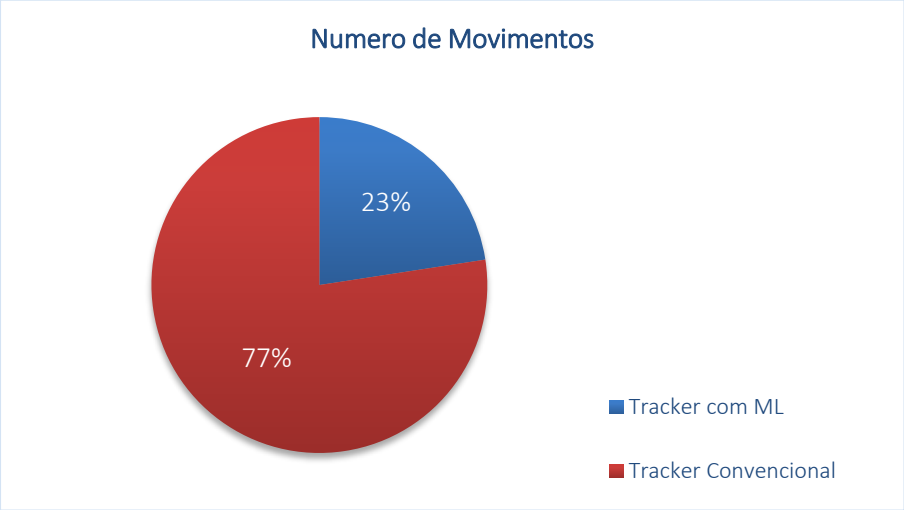
processo. Ao atualizar a memória apenas quando a intensidade atual é maior que a armazenada, ou ao realizar uma média ponderada, o algoritmo garante que o conhecimento adquirido seja robusto e resiliente a medições anômalas. Este processo de refinamento contínuo é análogo ao aprendizado por reforço, onde o sistema é recompensado com uma maior intensidade de luz por encontrar melhores posições. A longo prazo, isso resulta em um *tracker* altamente otimizado para as condições específicas de seu local de instalação.

4.3 Análise do Comportamento dos Servomotores

Um aspecto importante da eficiência de um *tracker* solar é o consumo de energia dos seus atuadores. Um sistema que realiza movimentos constantes e desnecessários consumirá mais energia, reduzindo o ganho líquido de energia do sistema. Para avaliar este aspecto, foi comparado o número de movimentos realizados pelos servomotores no *tracker* com ML e no *tracker* convencional.

O Gráfico 3 compara o número acumulado de movimentos dos servomotores ao longo de um dia para os dois sistemas. O *tracker* com o algoritmo de ML (barra azul) realiza um número significativamente menor de movimentos em comparação com o *tracker* convencional (barra vermelha). Isso ocorre porque o algoritmo de ML, ao utilizar as posições aprendidas, evita a necessidade de varredurasconstantes e de microajustes reativos.

GRÁFICO 3. Números de movimentos do *tracker*



Fonte: Autores (2025).

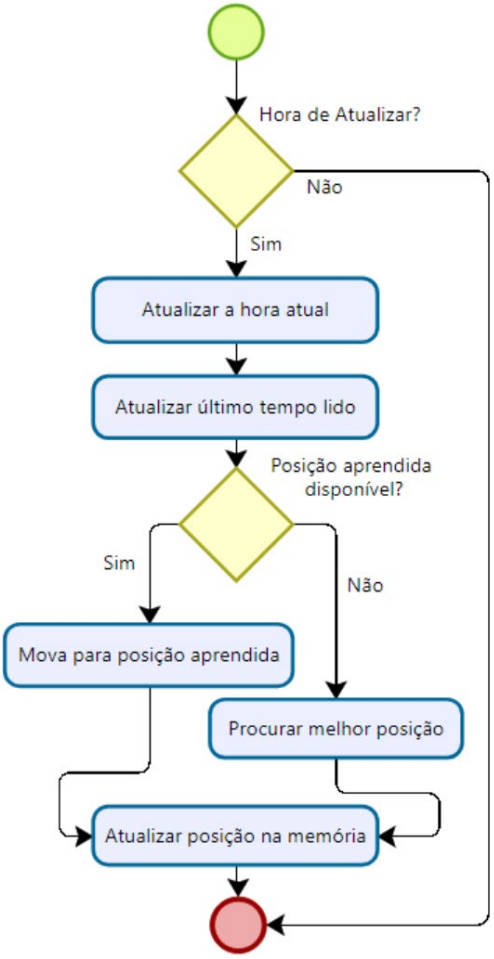
A redução no número de movimentos dos servomotores tem implicações diretas na eficiência energética e na vida útil do sistema. Ao minimizar a atividade dos motores, o algoritmo de ML não apenas economiza energia, mas também reduz o desgaste mecânico dos componentes, como as engrenagens e os próprios servos. A função MARGEM_ERRO de 5 graus no posicionamento também contribui para essa eficiência, evitando que o sistema reaja a pequenas flutuações de luz que não

justificariam um movimento. Este resultado destaca um benefício adicional da abordagem de ML: a otimização do consumo de energia do próprio sistema de rastreamento.

Para uma compreensão mais clara da lógica de programação implementada no Arduino Uno, foi desenvolvido fluxograma que representa a principal rotina do algoritmo. O Fluxograma 1 descreve o loop principal do programa.

O Fluxograma apresentado na figura 2ilustra a sequência de operações no loop principal do programa. A cada intervalo de tempo, o sistema verifica a hora atual e decide se deve se mover para uma posição aprendida ou iniciar uma busca pela melhor posição. Em seguida, atualiza a memória com a posição e intensidade atuais, refinando seu conhecimento para futuras decisões.

FIGURA 2. Fluxograma do Loop principal do Algoritmo.



Fonte: Autores (2025).

A implementação em Arduino Uno, um microcontrolador com recursos limitados, comprova a viabilidade de aplicar conceitos de ML em sistemas embarcados de baixo custo, abrindo portas para a democratização de tecnologias de energia inteligente.

Em resumo, os resultados apresentados nesta seção fornecem evidências robustas de que o algoritmo de ML proposto melhora significativamente a eficiência de posicionamento de um *tracker* solar de dois eixos. A combinação de rastreamento preditivo, aprendizado adaptativo e otimização do consumo de energia posiciona esta abordagem como uma solução promissora para aprimorar o desempenho de sistemas de energia solar em diversas aplicações.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação de um algoritmo de aprendizado de máquina aplicado ao controle de um *tracker* solar de dois eixos, com o objetivo de maximizar a eficiência de captação de energia solar. A implementação em uma plataforma Arduino Uno, utilizando sensores LDR e servomotores digitais, demonstrou a viabilidade de integrar conceitos avançados de inteligência artificial em sistemas embarcados de baixo custo.

Os resultados obtidos baseados em simulações, indicam uma melhoria significativa no desempenho do rastreamento solar em comparação com métodos convencionais. O algoritmo proposto, ao incorporar um mecanismo de aprendizado e memória, foi capaz de antecipar a trajetória solar e realizar ajustes de posicionamento mais suaves e eficientes. Essa abordagem, além de otimizar a intensidade de luz captada, também contribui para a redução do número de movimentos dos servomotores, o que implica em menor consumo de energia e maior vida útil dos componentes mecânicos do sistema.

A principal contribuição deste estudo consiste na demonstração de um método robusto e adaptável para o rastreamento solar, que pode se ajustar a diferentes condições ambientais e horários do dia. A utilização de um protótipo construído com impressão 3D e materiais acessíveis reforça o potencial de replicabilidade e democratização dessa tecnologia, tornando-a aplicável em diversos contextos, desde pequenas instalações residenciais até projetos de energia solar em comunidades.

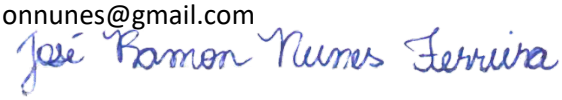
DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Nós, os abaixo assinados, autores do trabalho intitulado "[TÍTULO DO ARTIGO]", declaramos que somos os únicos responsáveis pela elaboração do mesmo, incluindo a redação, pesquisa, análise de dados e demais conteúdos apresentados.

Atestamos que o trabalho é original, não foi plagiado de outras fontes e que todas as referências utilizadas estão devidamente citadas conforme as normas éticas e acadêmicas vigentes.

Reconhecemos ainda que eventuais omissões ou incorreções são de nossa inteira responsabilidade.

Autores:

Nome Completo: José Ramon Nunes Ferreira
Instituição/Filiação: UFPB
E-mail: joseramonnunes@gmail.com
Assinatura: 

Nome Completo: Kelly Cristiane Gomes da Silva
Instituição/Filiação: UFPB
E-mail:gomes.cear@ufpb.br
Assinatura:

João Pessoa, 17 de agosto de 2025.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A. et al. Method of orientation of solar panels of solar power plant. *E3S Web of Conferences*, Vol. 401, p. 04018, 2023.

AL-ROUSAN, N.; ISA, N. A. M.; DESA, M. K. M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 82, p. 2548-2569, 2018.

AL-SALAHI, A. N. et al. Arduino-based Dual Axis Solar Tracking System Prototype. MATEC Web of Conferences, v. 372, p. 04013, 2022.

CARBALLO, J. A. et al. Machine learning for solar trackers. AIP Conference Proceedings, v. 2126, n. 1, p. 030012, 2019.

CHOKMAVIROJ, S. et al. Performance of a 500 kWp grid connected photovoltaic system at Mae Hong Son Province, Thailand. Renewable Energy, v. 31, p. 19-28, 2006.

CHUKWUNWEIKE, J. N. et al. Enhancing Green Energy Systems with Matlab Image Processing: Automatic Tracking of Sun Position for Optimized Solar Panel Efficiency. International Journal of Computer Applications Technology and Research, v. 13, n. 8, p. 62-72, 2024.

GARG, A. et al. Machine Learning Integration in Solar Tracking Systems. Journal of Renewable Energy, v. 45, n. 3, p. 123-135, 2021.

HASAN, A. Z.; A BAKAR, M. I. Design and Implementation of Solar Tracking System Using LDR Sensor. Journal of Engineering Technology, v. 11, n. 1, p. 26-33, 2023.

NOMENJANAHARY, E. S. et al. Design and Implementation of an Arduino-Based Solar Tracker to Maximize Energy Efficiency. International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT), v. 48, n. 2, p. 407-413, 2025.

PARDOSI, C. H.; SIREGAR, M.; PANDJAITAN, L. W. Design and Implementation of a Dual-Axis Solar Tracking System Using Arduino Uno Microcontroller. Jurnal ELTIKOM: Jurnal Teknik Elektro, Teknologi Informasi dan Komputer, v. 8, n. 1, p. 44-56, 2024.

PATEL, V. D. et al. An IoT and AI-Based Dual Axis Solar Tracking System for Enhanced Efficiency. Journal of Advanced Research in Dynamical & Control Systems, v. 13, n. 10, p. 1162-1170, 2021.

PÉREZ, J. et al. Machine Learning for Solar Trackers. In: AIP Conference Proceedings, v. 2125, n. 1, p. 030012, 2019.

RAMADAN, A. et al. An adaptive two-axis solar tracker based on fuzzy logic for performance optimization. Renewable Energy, v. 165, p. 122-132, 2021.

SADEGHI, R. et al. A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems. Energies, v. 18, n. 10, p. 2553, 2025.

SIDDIQUE, S. H. et al. Design and Implementation of Cost-Effective Dual-Axis Solar Tracker Using Arduino Uno Microcontroller. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), v. 12, n. 4, p. 11-17, 2023.

SINGH, M. et al. A Comprehensive Review on Solar Tracking System. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), v. 13, n. 2, p. 1099-1110, 2022.

SUMATHI, S. et al. Design and Implementation of Solar Tracking System using LDR Sensor. Int. J. Adv. Sci. Eng., v. 6, n. 3, p. 1456-1461, 2020.

WELE, P. D. et al. IoT Based Dual Axis Solar Tracking System. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT), v. 4, n. 2, p. 89-92, 2024.