



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM

COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Defesa de mestrado

Modelo computacional para controle de sistemas de rastreamento solar de eixo duplo com utilização de técnicas de aprendizado profundo

Apresentada por: Alexandre Menezes da Silva

Orientador: Dr. Alex Álisson Bandeira Santos

Co-orientador: Dr. Oberdan Rocha Pinheiro

Dr. José Bione de Melo Filho

Agosto de 2023

Alexandre Menezes da Silva

Modelo computacional para controle de sistemas de rastreamento solar de eixo duplo com utilização de técnicas de aprendizado profundo

Defesa de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, Curso de Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**.

Área de conhecimento: Interdisciplinar

Orientador: Dr. Alex Álisson Bandeira Santos

Co-orientador: Dr. Oberdan Rocha Pinheiro

Dr. José Bione de Melo Filho

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

S586m Silva, Alexandre Menezes da

Modelo computacional para controle de sistemas de rastreamento solar de eixo duplo com utilização de técnicas de aprendizado profundo / Alexandre Menezes da Silva. – Salvador, 2023.

69 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Oberdan Rocha Pinheiro.

Coorientador: Prof. Dr. José Bione de Melo Filho.

Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2023.

Inclui referências.

1. Energia solar. 2. Rastreador solar. 3. Controle avançado. 4. Aprendizado de máquina. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Santos, Alex Álisson Bandeira. III. Pinheiro, Oberdan Rocha. IV. Melo Filho, José Bione de. V. Título.

CDD 620.00113

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Mestrado Acadêmico em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada “**Modelo computacional para controle de sistemas de rastreamento solar de eixo duplo com utilização de técnicas de aprendizado profundo**” apresentada no dia 10 de agosto de 2023, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Assinado eletronicamente por:
Alex Álisson Bandeira Santos
CPF: ***.191.765-**
Data: 11/08/2023 09:14:00 -03:00



Orientador:

Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Oberdan Rocha Pinheiro
CPF: ***.073.705-**
Data: 11/08/2023 11:29:12 -03:00



Coorientador:

Prof. Dr. Oberdan Rocha Pinheiro
FIEB

Assinado eletronicamente por:
José Bione de Melo Filho
CPF: ***.655.604-**
Data: 11/08/2023 11:13:20 -03:00



Coorientador:

Prof. Dr. Jose Bione de Melo Filho
CHESF

Assinado eletronicamente por:
Roberto Luiz Souza Monteiro
CPF: ***.881.935-**
Data: 14/08/2023 10:01:27 -03:00



Membro Interno:

Prof. Dr. Roberto Luiz Souza Monteiro
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Josemar Rodrigues de Souza
CPF: ***.040.605-**
Data: 23/08/2023 13:42:57 -03:00



Membro Externo:

Prof. Dr. Josemar Rodrigues de Souza
UNEB

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos pela orientação, incentivo, sugestões e auxílio na condução desta pesquisa.

Também agradeço ao Prof. Dr. Oberdan Rocha Pinheiro pela orientação, questionamentos e pontuações importantes para o andamento deste trabalho,

À minha esposa, família e amigos pelo auxílio e compreensão pela minha ausência devido à dedicação a este trabalho

À instituição Centro Universitário SENAI CIMATEC e os professores que fizeram parte do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu MODELAGEM COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL (MCTI) pela oportunidade de desenvolver este trabalho

Salvador, Brasil

Alexandre Menezes da Silva

10 de agosto de 2023

Resumo

A energia solar é a forma de energia mais limpa e abundante que pode ser obtida do Sol. Painéis solares convertem essa energia para gerar energia solar, que pode ser utilizada para diversos fins elétricos, em áreas rurais, industriais e residenciais. A energia solar máxima pode ser gerada apenas quando o Sol está perpendicular a placa fotovoltaica, o que pode ser alcançado apenas por algumas horas ao usar um sistema de painel solar fixo. Ao longo dos anos, diferentes sistemas de rastreamento solar foram propostos e desenvolvidos, e alguns foram revisados na literatura. No entanto, essas revisões não consideraram sistemas de rastreamento solar de dois eixos baseado em aprendizado de máquina profundo utilizando redes neurais recorrentes. Nesse sentido, objetivo geral desse trabalho é desenvolver um modelo computacional baseado em aprendizado de máquina profundo para controlar um sistema de rastreamento solar de dois eixos para determinar o melhor ângulo solar de posicionamento dos painéis fotovoltaicos para melhoria de desempenho de painéis fotovoltaicos em sistemas de geração de energia através da radiação solar. O modelo foi desenvolvido utilizando a arquitetura das redes neurais recorrentes do tipo *Long Short-Term Memory*, os dados utilizados para criação do dataset de treinamento e validação do modelo computacional foram obtidos a partir de um sistema implementado em ambiente de simulação composto por quatro LDR's para captação da radiação solar, um servo mecanismo para controle de dois motores com a finalidade de posicionar as placas fotovoltaicas nos eixos horizontal e vertical. O modelo proposto apresenta resultado de predição dos valores de posicionamento dos dois motores com um erro médio entre as previsões e os valores reais de 0.02, indicando que o modelo para controle do sistema de rastreamento solar de dois eixos baseado em aprendizado de máquina profundo é promissor.

Palavras-chaves: Energia solar, Rastreador solar, Controle avançado, Aprendizado de máquina.

Abstract

Solar energy is the cleanest and most abundant form of energy that can be obtained from the Sun. Solar panels convert this energy to generate solar energy, which can be used for various electrical purposes, in rural, industrial and residential areas. Maximum solar energy can be generated only when the Sun is perpendicular to the photovoltaic array, which can only be achieved for a few hours when using a fixed solar panel system. Over the years, different solar tracking systems have been proposed and developed, and some have been reviewed in the literature. However, these reviews did not consider two-axis solar tracking systems based on deep machine learning using recurrent neural networks. In this sense, the general objective of this work is to develop a computational model based on deep machine learning to control a two-axis solar tracking system to determine the best solar angle for positioning photovoltaic panels to improve the performance of photovoltaic panels in generation systems. energy through solar radiation. The model was developed using the architecture of recurrent neural networks of the Long Short-Term Memory type, the data used to create the training dataset and validation of the computational model were obtained from a system implemented in a simulation environment composed of four LDR's to capture solar radiation, a servo mechanism to control two motors in order to position the photovoltaic panels on the horizontal and vertical axes. The proposed model presents a prediction result for the positioning values of the two engines with an average error between the predictions and the actual values of 0.02, indicating that the model for controlling the two-axis solar tracking system based on deep machine learning is promising. .

Keywords: Solar Power, Solar Tracker, Advanced Control, Machine Learning.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Definição do problema	2
1.2	Objetivo	2
1.3	Importância da pesquisa	2
1.4	Organização da Defesa de mestrado	3
2	Revisão bibliográfica	4
2.1	Sistema de rastreamento solar de eixo único	7
2.2	Sistema de rastreamento solar de eixo duplo	11
2.3	Sistema híbrido de rastreamento solar	16
2.4	Sistema de rastreamento solar ativo	22
2.4.1	Sistema de rastreamento solar ativo de eixo único	23
2.4.2	Sistema de rastreamento solar ativo de eixo duplo	23
2.5	Sistema de rastreamento solar passivo	25
2.5.1	Sistema de rastreamento solar passivo de eixo duplo	26
2.5.2	Sistema de rastreamento solar passivo de eixo híbrido	27
2.6	Sistema de rastreamento solar baseado em aprendizado de máquina	27
3	Projeto e desenvolvimento da pesquisa	37
3.1	Preparação de dados	39
3.2	Modelo computacional	40
3.3	Método de avaliação dos resultados	41
4	Avaliação e resultados experimentais	43
4.1	Função de ativação sigmoid	43
4.2	Função de ativação linear	45
4.3	Função de ativação tangente hiperbólica	46
5	Considerações finais	49
5.1	Conclusões	49
5.2	Contribuições	49
5.3	Atividades Futuras de Pesquisa	50
	Referências	51

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre o Sistema de Rastreamento Solar baseado na rotação do Eixo. Fonte: Autor.	21
2.2	Taxonomia do Modelo Baseado em Aprendizagem para Sistemas de Rastreamento Solar. Fonte: Autor.	36
4.1	Erro absoluto médio e valor da função de perda por função de atiação. Fonte: Autor.	48

Lista de Figuras

2.1	Comparação entre sistemas fixos e simples de rastreamento solar.	5
2.2	Ângulos solares.	7
2.3	Sistemas de rastreamento solar de eixo único: (a) HSAT; (b) VSAT; (c) PASAT; (d) TSAT.	8
2.4	sistemas de rastreamento solar de eixo duplo: (a) TTDAT; (b) AADAT.	11
2.5	Sistema híbrido de rastreamento solar.	17
2.6	Sistema de rastreamento Solar ativo.	22
2.7	Sistema de rastreamento solar passivo.	25
3.1	Circuito do rastreamento solar.	37
3.2	Diagrama de blocos do projeto do sistema.	38
3.3	Processo de aprendizado de máquina do modelo.	39
3.4	Composição dos dados do <i>dataset</i>	39
3.5	<i>Dataset</i> normalizado.	40
3.6	Arquitetura da rede neural utilizada.	41
4.1	Perda nos conjuntos de dados de treinamento e teste.	44
4.2	Gráfico de dispersão de erros.	44
4.3	Perda nos conjuntos de dados de treinamento e teste.	45
4.4	Gráfico de dispersão de erros.	46
4.5	Perda nos conjuntos de dados de treinamento e teste.	47
4.6	Gráfico de dispersão de erros.	47

Lista de Siglas

AADAT	....	<i>Azimuth-Altitude Dual-Axis Trackers</i>
CSP	.....	<i>Concentrated solar power</i>
CSV	.....	<i>Commma-separated values</i>
ENEA	.....	<i>Energy and Sustainable Economic Development</i>
FOV	.....	<i>Field of view</i>
HSAT	.....	<i>Horizontal Single-Axis Trackers</i>
MAE	.....	<i>Mean Absolute Error</i>
MPPT	.....	<i>Maximum power point tracking</i>
PASAT	.....	<i>Polar-Aligned Single-Axis Trackers</i>
PPGMCTI	..	Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial
PV	.....	<i>Photovoltaic</i>
RMSE	.....	<i>Root Mean Square Error</i>
RNA	.....	Redes Neurais Artificiais
SPA	.....	<i>Sun Position Algorithm</i>
TSAT	.....	<i>Tilted Single-Axis Trackers</i>
TTDAT	.....	<i>Tip-Tilt Dual-Axis Trackers</i>
VSAT	.....	<i>Vertical Single-Axis Trackers</i>

Introdução

A energia é uma parte essencial para sustentar o desenvolvimento da humanidade. O combustível fóssil tem sido a forma de energia mais usada no planeta. No entanto, como consequência do rápido aumento populacional, aumento dos padrões de vida e a disseminação de atividades que consomem energia em países desenvolvidos e emergentes, o consumo global de energia foi colocado sob grande pressão (El Hammoumi et al., 2022). Segundo REN21 et al. (2017), essa tendência levantou duas preocupações importantes: o esgotamento dos suprimentos de energia mais facilmente disponíveis (principalmente petróleo) e o problema do aquecimento global resultante do rápido aumento das emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e metano. O desafio mundial é combater as mudanças climáticas e o aquecimento global, empregando fontes de energia renovável limpas e econômicas, que devem ser gerenciadas e utilizadas adequadamente.

Energia renovável é comumente definida como energia gerada a partir de recursos naturais, incluindo luz solar, vento, chuva, marés e calor geotérmico. Ao contrário das fontes de energia tradicionais (como carvão, petróleo e gás natural), as energias renováveis têm impactos negativos mínimos, se houver, no meio ambiente, sem resíduos de gases de efeito estufa. As energias renováveis, portanto, parecem ser a melhor e mais eficaz maneira de abordar as questões ambientais e as preocupações com a sustentabilidade energética (CHOUDHARY; SRIVASTAVA, 2019). A maioria das energias renováveis são derivadas direta ou indiretamente do sol. Recentemente, a energia solar apareceu como a fonte de energia renovável mais atraente devido à sua abundância, versatilidade e facilidade de implementação com efeito ambiental mínimo em termos de uso da terra (REN21 et al., 2017).

A energia solar, pode ser gerada por um painel solar, que depende muito da quantidade de luz solar a que está exposto. A energia solar fotovoltaica tem uma capacidade instalada muito maior do que outros conceitos e tecnologias de energia renovável devido à sua abundância, versatilidade e facilidade de implementação com impacto ambiental negativo mínimo em termos de uso da terra (El Hammoumi et al., 2022). A potência solar máxima pode ser obtida apenas quando o Sol está diretamente no painel. Devido à variação da posição do Sol ao longo do dia, existe a necessidade de ajustar o painel solar para que fique sempre apontado precisamente para o Sol. Um rastreador solar é um dispositivo empregado para operar um painel solar fotovoltaico, particularmente em aplicações de células solares, e requer um alto nível de precisão para garantir que a luz solar seja direcionada com precisão para o dispositivo de energia (RAY; TRIPATHI, 2016).

1.1 Definição do problema

Para aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, vários sistemas de rastreamento solar foram desenvolvidos ao longo dos anos, por exemplo, [Hafez, Yousef e Harag \(2018\)](#), [Nadia, Isa e Desa \(2018\)](#), [Muhammad et al. \(2019\)](#), [Amelia et al. \(2020\)](#), [Seme et al. \(2020\)](#). No entanto, essas revisões não consideraram sistemas de rastreamento solar de eixo duplo baseados em aprendizado de máquina profundo, pois a maioria dessas revisões é limitada à modelos baseados em aprendizado de máquina para controlar sistemas de rastreamento solar, que incluem regressão logística, regressão vetorial de suporte, lógica *fuzzy*, sistema de inferência neural *fuzzy* adaptável, multicamadas *perceptron* e algoritmo genético. Com o intuito de cobrir esta lacuna, este projeto de pesquisa visa desenvolver um modelo computacional baseado em aprendizado de máquina profundo que, a partir de um *dataset* contendo leituras de quatro resistor dependente de luz (LDR), determinará a posição dos motores do sistemas de rastreamento solar de eixo duplo.

1.2 Objetivo

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver um modelo computacional baseado em aprendizado de máquina profundo para controlar um sistema de rastreamento solar de dois eixos para determinar o melhor ângulo solar de posicionamento dos painéis fotovoltaicos.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um sistema de rastreamento solar de dois eixos de rotação em ambiente simulado.
- Criar um dataset baseado nos dados do sistema simulado para desenvolvimento do modelo computacional baseado em aprendizado de máquina profundo.
- Avaliar a viabilidade técnica do modelo computacional baseado em aprendizado de máquina profundo para controlar o sistema de rastreamento solar.

1.3 Importância da pesquisa

Segundo [Choudhary e Srivastava \(2019\)](#), existe uma grande e crescente demanda de energia elétrica. Para atender as necessidades da população os sistemas de geração de energia elétrica precisam ser aprimorados de forma gradativa, para que possam substituir as matrizes energéticas não renováveis ([REN; ORTEGA; CASIMIS, 2017](#)). De acordo com [Páramo,](#)

Rivera e López (2018), a utilização de seguidores solares pode aumentar a captação de radiação solar em painéis fotovoltaicos (FV) e desta forma aumentar sua eficiência. Nesse contexto, esse trabalho de investigação apresenta um modelo computacional que visa contribuir para a área de controle de sistemas de rastreamento solar de dois eixos utilizando técnicas de aprendizado de máquina profundo.

1.4 Organização da Defesa de mestrado

O presente trabalho está dividido em quatro capítulos, conforme apresentado a seguir:

- Capítulo II: Revisão bibliográfica - apresenta uma revisão sobre os sistemas de rastreamento solar fotovoltaico ;
- Capítulo III: Projeto e desenvolvimento da pesquisa - é apresentado o desenvolvimento do projeto do modelo computacional;
- Capítulo IV: Avaliação e resultados experimentais - são apresentados os resultados experimentais do modelo computacional proposto;
- Capítulo V: Considerações finais.

Revisão bibliográfica

A quantidade de luz solar recebida varia ao longo do ano como resultado dos movimentos da Terra; no entanto, a quantidade de energia solar recebida durante um certo período em uma superfície perpendicular ao caminho de propagação da radiação fora da atmosfera na distância média terra-sol é conhecida como constante solar (MAATALLAH; ALIMI; NASSRALLAH, 2011). De acordo com Nadia, Isa e Desa (2018), a quantidade substancial de irradiação solar diária levou ao uso de energia solar para geração de energia em uma variedade de aplicações, como bombeamento de água, telecomunicações e iluminação. Isso resultou na concepção e implementação de painéis solares fotovoltaicos, que podem coletar energia solar e convertê-la em outras formas de energia, como a energia elétrica. No entanto, a quantidade de energia que pode ser produzida é diretamente proporcional à intensidade da luz solar que incide sobre o painel. Como resultado, surgiu a necessidade de construir um sistema que pudesse acompanhar a posição do Sol ao longo do tempo (sistema de rastreamento solar). Um sistema de rastreamento solar pode rastrear o movimento e a localização do Sol ao longo do tempo para aumentar a captação de radiação solar, que por sua vez aumenta a geração de energia elétrica. A Figura 2.1 mostra a diferença e as limitações do sistema de rastreamento solar fixo em comparação com um sistema de rastreamento solar simples.

Para o projeto, implementação e instalação precisos de um sistema de rastreamento solar, vários parâmetros devem ser considerados, como latitude, ângulo de incidência, irradiância solar, ângulo de inclinação, ângulo de declinação, ângulo de elevação, ângulo zenital, ângulo de orientação, azimute solar e ângulo de inclinação.

A latitude é uma medida usada para calcular a distância angular (sul ou norte) do equador em qualquer local da Terra. O ângulo de latitude pode ser medido em graus. O ângulo de incidência é o fator mais crítico a ser considerado ao instalar sistemas de rastreamento solar. É o ângulo formado pelos raios do Sol que incidem sobre a superfície e os raios perpendiculares a essa superfície.

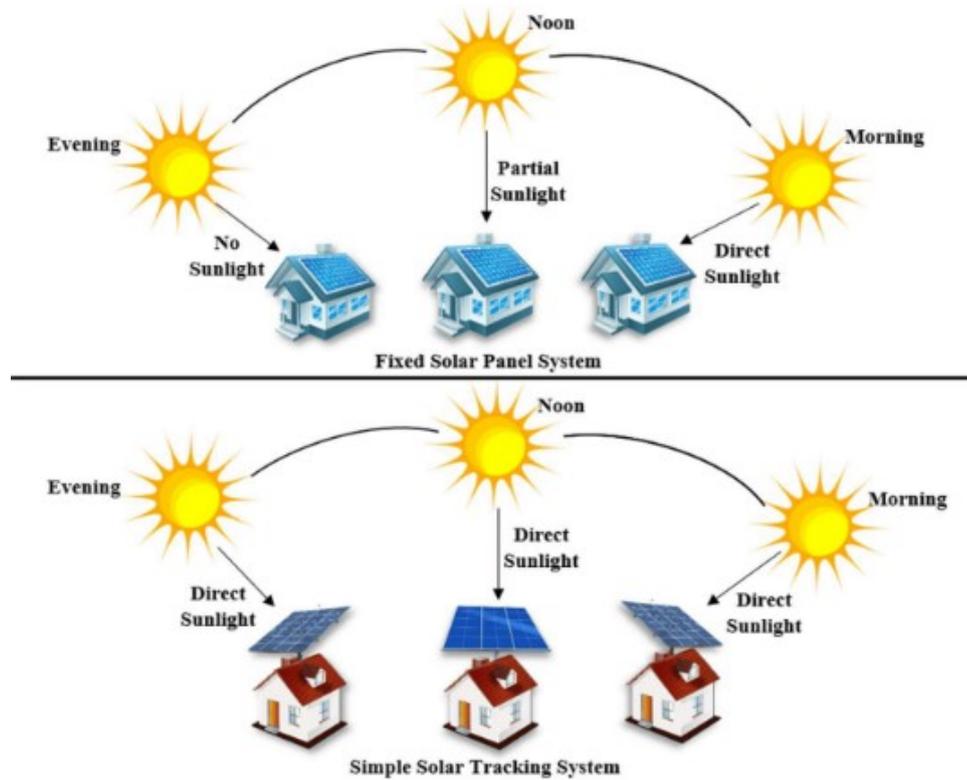


Figura 2.1: Comparação entre sistemas fixos e simples de rastreamento solar.

Fonte: [Awasthi et al. \(2020\)](#)

A irradiância solar é outro parâmetro importante a ser considerado e pode ser calculada medindo-se a potência da fonte de luz ou o fluxo luminoso. O ângulo formado pelo sistema de rastreamento solar e o eixo horizontal é conhecido como ângulo de inclinação. O ângulo de incidência é uma variedade de ângulos de inclinação. O ângulo de declinação é o ângulo formado entre o equador e uma linha traçada do centro do Sol ao centro da Terra. Pode ser expresso matematicamente como dado na Equação 2.1:

$$\delta = -23,45x \cos\left(\frac{360}{365}x(n+10)\right) \quad (2.1)$$

Os ângulos de elevação e zênite são semelhantes ao ângulo de declinação: o ângulo de elevação é o ângulo entre o centro do Sol e o horizonte, enquanto o ângulo de zênite é o ângulo formado pelo centro do Sol e a vertical. Ambos são medidos em graus e expressos matematicamente conforme mostrado nas Equações 2.3 e 2.3, respectivamente:

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad (2.2)$$

$$\theta_z = \cos^{-1} \sin L_{st} \sin \delta + \cos L_{st} \cos \delta \cos ST \quad (2.3)$$

onde α é o ângulo de elevação, θ_z é o ângulo zênite, L_{st} é a longitude padrão que é positiva para a região leste e negativa para a oeste, δ é o ângulo de declinação, e ST é o tempo padrão.

O ângulo de orientação pode ser usado para ajustar um sistema de rastreamento solar para manter o módulo solar fotovoltaico perpendicular ao Sol e gerar a potência máxima. O ângulo de azimute solar é definido como o ângulo formado projetando o centro do Sol no plano horizontal e apontando para o sul. É representado com um sinal positivo para a posição leste do sul, e a posição oeste do sul é representada com um sinal negativo. Pode ser representado matematicamente como dado na Equação 2.4:

$$\gamma_s = \sin^{-1} \left(\frac{\sin h \cos \delta}{\sin \theta_z} \right) \quad (2.4)$$

onde γ_s é o ângulo de azimute solar, δ é o ângulo de declinação, θ_z é o ângulo zenital e h é o ângulo horário expresso conforme dado na Equação 2.5:

$$h = 15^\circ(\text{solartime} - 12) \quad (2.5)$$

O ângulo de inclinação é o ângulo entre um módulo fotovoltaico e o eixo x positivo, medido em graus. Conforme mostrado na Figura 2.2, essas variáveis podem ser usadas para determinar o local ideal para a instalação de um sistema de rastreamento solar ou para estabelecer a melhor orientação para que tais sistemas obtenham a potência solar máxima.

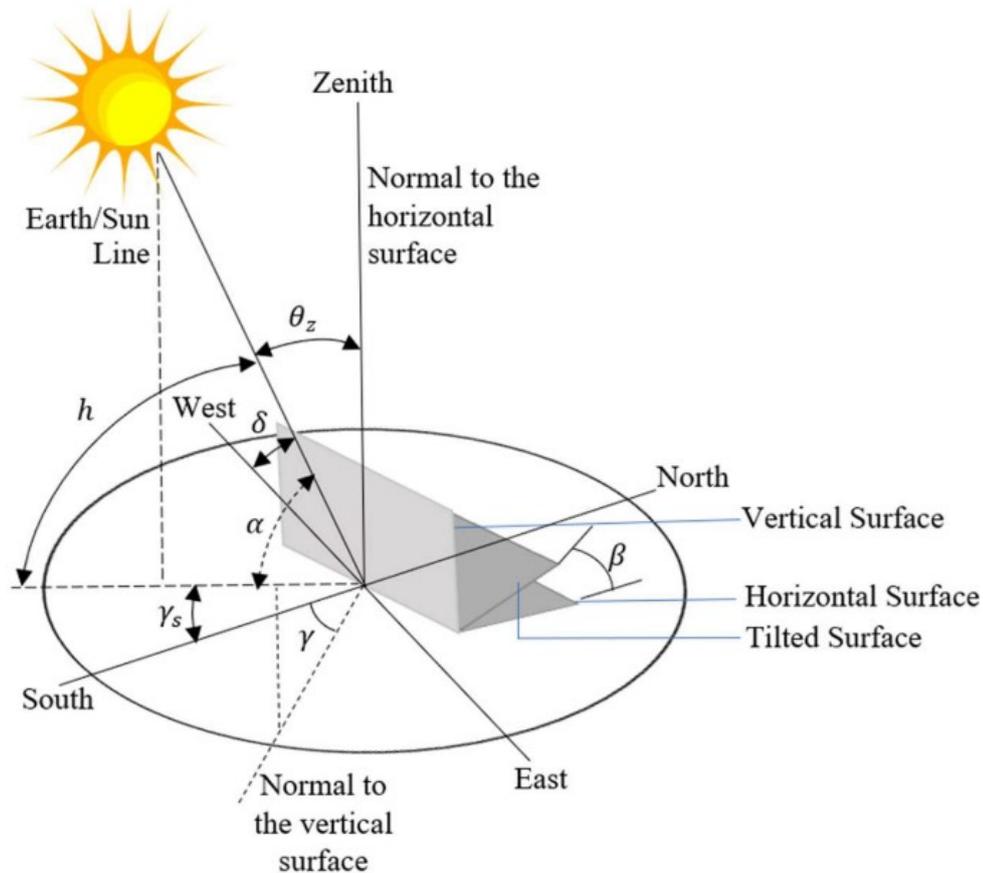


Figura 2.2: Ângulos solares.

Fonte: Awasthi et al. (2020)

De acordo com o movimento do eixo de rotação, dois tipos de rastreadores solares foram projetados e implementados na literatura. Isso inclui rastreadores de eixo único e rastreadores de eixo duplo. Além disso, alguns autores projetaram e desenvolveram sistemas de rastreamento com três ou mais eixos categorizados em rastreadores solares de eixo híbrido.

2.1 Sistema de rastreamento solar de eixo único

Este sistema de rastreamento solar compreende apenas um eixo, seja vertical ou horizontal, e não pode girar para ambos. Exemplos deste tipo de sistema de rastreamento solar na literatura incluem Rastreadores de Eixo Único Horizontal (HSAT, do inglês *Horizontal Single-Axis Trackers*), Rastreadores de Eixo Único Vertical (VSAT, do inglês *Vertical Single-Axis Trackers*), Rastreadores de Eixo Único Inclinado (TSAT, do inglês *Tilted Single-Axis Trackers*) e Rastreadores de Eixo Único Alinhados Polarmente (PASAT, do inglês *Polar-Aligned Single-Axis Trackers*) (KAUR et al., 2016). A Figura 2.3 mostra os vários rastreadores solares de eixo único existentes.

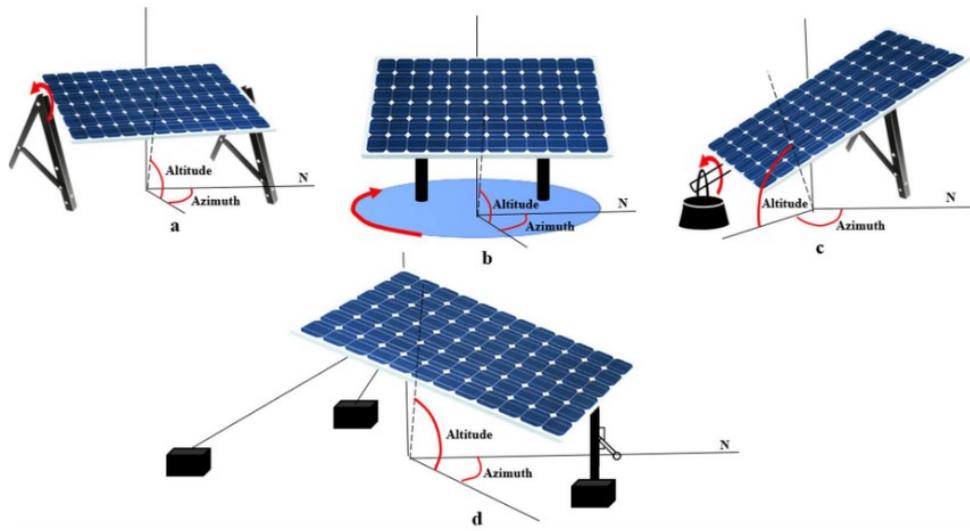


Figura 2.3: Sistemas de rastreamento solar de eixo único: (a) HSAT; (b) VSAT; (c) PASAT; (d) TSAT.

Fonte: [Awasthi et al. \(2020\)](#)

O HSAT gira de norte a sul em um eixo fixo paralelo ao solo, conforme mostrado na Figura 2.3 a, ao longo do dia e é considerado a configuração de rastreador mais econômica em muitas aplicações fotovoltaicas ([RACHARLA; RAJAN, 2017](#)). O VSAT, por outro lado, gira verticalmente em relação ao solo, conforme mostrado na Figura 2.3 b, e pode ser montado na orientação norte/sul ou leste/oeste para rastrear o movimento do Sol para cima e para baixo no céu; tais sistemas são mais comuns em áreas de alta altitude/montanhasas ou latitudes mais severas ([RACHARLA; RAJAN, 2017](#)). O PASAT, conforme mostrado na Figura 2.3 c, foi derivado alinhando o rastreador solar de eixo único inclinado com a estrela polar ([RACHARLA; RAJAN, 2017](#)). Por fim, o TSAT, mostrado na Figura 2.3 d, possui eixos de rotação que se alternam entre horizontal e vertical, onde o módulo varre um cilindro rotacionalmente simétrico em torno do eixo de rotação para rastrear o Sol ([RACHARLA; RAJAN, 2017](#)). Os ângulos de azimuth solar de um sistema de rastreamento solar de eixo único variam de -100° a $99,87^{\circ}$ ([DAS; DURGAPRASAD, 2020](#)).

Em [Ponniran, Hashim e Joret \(2011\)](#), um sistema de rastreamento solar de eixo único de baixa potência foi projetado e desenvolvido para rastrear a posição do Sol independentemente da velocidade do motor e gerar energia solar maximizada. A implementação do sistema foi dividida em partes de *hardware* e *software*, e o sistema de rastreamento compreendeu dois sensores LDR, um microcontrolador PIC16F877A, um motor redutor DC bidirecional, um regulador de tensão, um circuito de acionamento e um painel solar. Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foi realizada uma comparação com um sistema de painéis solares fixos em que a tensão e a corrente de cada sistema foram medidas entre 8h e 18h, gerando maior potência. No entanto, o sistema não foi testado para diferentes condições climáticas.

[Ponniran, Hashim e Munir \(2011\)](#), desenvolveu um sistema de rastreamento solar de eixo único com base no LDR como sensor. A metodologia adotada para esta pesquisa foi dividida em duas partes, desenvolvimento de *hardware* e desenvolvimento de *software*. A parte de desenvolvimento de *hardware* estava preocupada com os componentes usados para desenvolver o rastreador solar, que inclui um painel solar, motor redutor DC bidirecional, circuito de acionamento, microcontrolador PIC16F667A, dois sensores LDR e regulador de tensão, enquanto a parte de desenvolvimento de *software* estava preocupada com o desenvolvimento do programa que seria alimentado no microcontrolador PIC16F667A. Para avaliar o desempenho do rastreador solar desenvolvido, foi realizada uma comparação com um painel solar fixo, e os resultados mostraram que o sistema desenvolvido recebeu mais luz solar e gerou maior potência solar que o sistema fixo. No entanto, um sistema de rastreamento solar de eixo único de alta eficiência foi projetado e desenvolvido em [Karthik e Kumar \(2013\)](#), onde o sistema era baseado em um microcontrolador focado principalmente em pequenas aplicações em áreas remotas. O sistema de rastreamento consiste em um circuito de fonte de alimentação, servo motor, resistor dependente de luz (LDR), painel solar, visor de cristal líquido (LCD), relógio em tempo real e dois tipos diferentes de reguladores de tensão. O sistema demonstrou ser uma solução econômica e aumentou a produção solar do painel em 30 a 40% em comparação com os painéis solares fixos.

Em [Akbar, Fathallah e Raoof \(2017\)](#), um rastreador solar de eixo único para rastrear o Sol no eixo azimutal usando um microcontrolador AVR foi projetado e implementado. O sistema implementado consistia principalmente no controlador ATmega328, motor DC, sensores de luz, relé e painel solar. Os resultados mostraram que o rastreador solar de baixo custo projetado aumentou o ganho de potência de saída entre 18% e 25% em comparação com o painel fixo localizado na cidade de Kirkuk, no Iraque. A potência de saída foi aumentada e melhorada com a adição de um painel lateral de um refletor em cerca de 65% a 80%, respectivamente. No entanto, o sistema geral é limitado a apenas um eixo, reduzindo a confiabilidade.

A análise e implementação de um sistema de rastreamento solar de eixo único foram realizadas por [Aung \(2019\)](#) para recuperar a demanda de eletricidade em áreas rurais. O sistema de rastreamento era formado por um microcontrolador, dois sensores de resistor dependente de luz (LDR), um motor de passo, uma bateria e um painel solar. O sistema foi projetado para comparar os dados dos LDRs e a sensibilidade de forma que o motor gire no sentido horário se a diferença medida entre o conjunto de sensores for maior que o valor da sensibilidade e o pino de direção do microcontrolador for alto; caso contrário, o motor gira no sentido anti-horário. Além disso, os dados dos dois sensores LDR foram obtidos e comparados para dias ensolarados e nublados, e o resultado não mostrou muitas mudanças nos níveis de tensão. Um protótipo de sistema de rastreamento solar de eixo único foi apresentado em [Gupta \(2019\)](#), que inclui simulação, modelagem, procedimentos

e resultados. O processo de desenvolvimento foi dividido em partes de *hardware* e *software*. A parte de desenvolvimento de *hardware* tratou dos componentes utilizados para a implementação do sistema de rastreamento que compreendeu dois sensores LDR, um microcontrolador, painel solar, regulador de tensão, driver IC L293D e motorreductor DC, enquanto o desenvolvimento do *software* foi focado na codificação do microcontrolador e o processo de operação onde foram utilizados o Arduino e Eagle. Para avaliar o desempenho do protótipo desenvolvido, foi realizada uma comparação com um sistema solar fixo, e os resultados mostraram que o sistema desenvolvido teve melhor desempenho.

[Nori e Mohammed \(2020\)](#) utilizaram um sistema de rastreamento solar que opera baseado em sensores de resistores dependentes de luz (LDR), um microcontrolador para controlar o sistema e motores DC. O estudo visa estabelecer um sistema rastreador solar econômico, identificando e removendo as partes que consomem energia desnecessária, reduzindo a perda de energia. Para conseguir isso, um circuito temporizador foi usado para desligar o sistema por 29 minutos após um minuto de trabalho durante o qual a quantidade de ganho e perda de energia do painel solar foi medida pelo temporizador. Foi realizada uma comparação do sistema de rastreamento com e sem temporizador, e os resultados mostraram que o sistema de rastreamento com temporizador é mais eficiente em termos de ganho e perda medidos.

Para otimizar um sistema de rastreamento solar de eixo único para funcionar em diferentes condições climáticas [Kuttybay et al. \(2020\)](#), dois sistemas de rastreamento solar de eixo único com um eixo vertical de rotação foram comparados com base nas leituras de fotossensores LDR e com base em cálculos astronômicos da posição do Sol. O sistema de rastreamento solar de base astronômica foi projetado e implementado usando um cartão SD integrado em tempo real que possui as coordenadas do movimento do Sol, onde o sistema define automaticamente o ângulo de azimute apropriado com base na data e hora, enquanto no LDR baseado em sistema de rastreamento solar, o microcontrolador só inicia quando o sensor detecta o nascer do sol. Os sistemas foram avaliados experimentalmente entre si, e a tensão e corrente geradas em diferentes condições foram medidas e usadas como fator comparativo. Os resultados indicaram que o rastreador solar baseado em astronomia teve um desempenho melhor do que o sistema baseado em LDR, com uma eficiência de 4,2%, e melhor que um sistema de painéis solares fixos, com uma eficiência de 57,4%. O rastreador baseado em astronomia desenvolvido pode ser utilizado em regiões com condições climáticas variadas. No entanto, o sistema pode estar sujeito a erros de rastreamento, pois depende das coordenadas do Sol no cartão SD, que podem estar erradas ou corrompidas.

O projeto, modelagem e experimento de um rastreador solar de eixo único que pode remover a sobreposição da luz solar incidente nos sensores dentro do sistema de rastreamento da luz solar são apresentados em [Nahar et al. \(2021\)](#). Pode ser determinado a

partir dos resultados que o painel fotovoltaico móvel pelo rastreador pode melhorar significativamente a eficiência energética. O sistema é composto por sensores LDR baseados em microcontroladores e LCDs para observar e receber sinais do Sol. Este sistema solar pode ser usado domesticamente para fornecer energia solar altamente eficiente. Para fins comerciais, pode ser fabricado na indústria porque os componentes do rastreador solar são recuperáveis e estão disponíveis a preços baixos. No entanto, uma limitação principal do sistema é que ele depende da intensidade da luz solar. O painel não se move quando a intensidade da luz solar é muito baixa e, portanto, não pode ser usado para outras condições meteorológicas e climáticas.

2.2 Sistema de rastreamento solar de eixo duplo

Este tipo de sistema tem dois graus de flexibilidade que atuam como eixo de rotação, ou seja, permite níveis maximizados de produção de energia solar devido à sua capacidade de rastrear o Sol vertical e horizontalmente. Duas implementações comuns são Rastreadores de eixo duplo Tip-Tilt (TTDAT, do inglês *Tip-Tilt Dual-Axis Trackers*) e Rastreadores de eixo duplo de altitude e azimute (AADAT, do inglês *Azimuth-Altitude Dual-Axis Trackers*). A Figura 2.4 representa a operação de um sistema de rastreamento solar de eixo duplo.

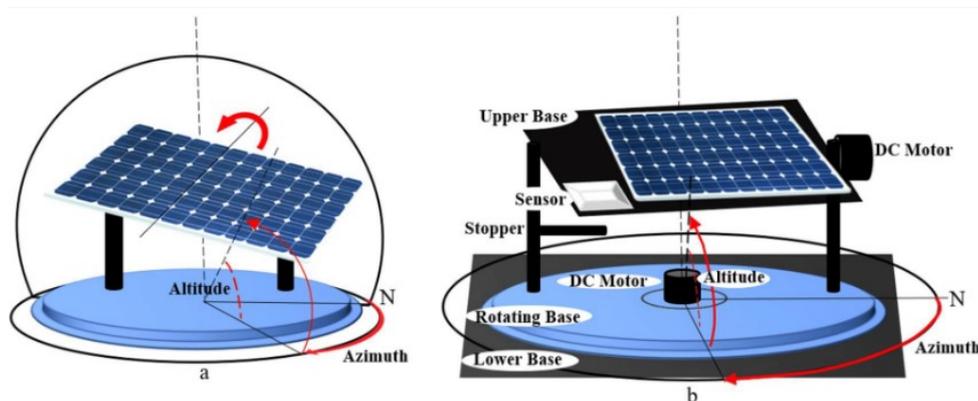


Figura 2.4: sistemas de rastreamento solar de eixo duplo: (a) TTDAT; (b) AADAT.

Fonte: [Awasthi et al. \(2020\)](#)

TTDAT, conforme mostrado na Figura 2.4 a, é assim denominado porque a matriz de painéis é posicionada no topo dos postes verticais. Normalmente, o movimento leste-oeste é causado pela rotação da matriz em torno do topo do pólo. Os postes em cada extremidade do eixo principal de rotação de um rastreador de eixo duplo de ponta-inclinação podem ser reutilizados entre os rastreadores para reduzir as despesas de instalação ([BALAJI; ARULVIZHI, 2017](#)). O eixo primário do AADAT, também conhecido como eixo azimutal, é paralelo ao solo, enquanto o eixo secundário, também conhecido como eixo de

elevação, é normal ao eixo primário (BALAJI; ARULVIZHI, 2017). Um servo motor para o eixo azimutal (horizontal) e um atuador linear para o eixo de elevação (vertical) são usados em um AADAT para rastrear o Sol. Os sistemas AADAT podem usar um enorme anel montado no solo com a matriz posicionada em uma série de rolos, em vez de girar a matriz em torno do topo do poste, conforme mostrado na Figura 2.4 b. Isso permite que o AADAT suporte matrizes muito maiores; no entanto, o sistema não pode ser posicionado mais próximo do que o diâmetro do anel, o que pode diminuir a densidade do sistema, especialmente quando o sombreamento entre rastreadores é incluído (BALAJI; ARULVIZHI, 2017). O azimute solar e os ângulos de altitude de um sistema de rastreamento solar de eixo duplo podem variar de $61,1^\circ$ a $299,1^\circ$ e $-10,1^\circ$ a $10,7^\circ$, respectivamente (SHUFAT; KURT; HANÇERLIOĞULLARI, 2019).

Para garantir um desempenho robusto do sistema, Wang e Lu (2013) propôs um novo projeto de sistema fotovoltaico de rastreamento solar de eixo duplo que aproveita a teoria de controle de *feedback*, um sensor de resistor dependente de luz (LDR) de quatro quadrantes e circuitos eletrônicos simples. O sistema proposto utilizou um motor CA de eixo duplo distinto e um inversor fotovoltaico autônomo para obter o rastreamento solar. A execução do controle foi uma inovação técnica com um *design* simples e eficaz que não exigia programação ou interface de computador. Além disso, um protótipo de laboratório em escala reduzida foi construído para testar a eficácia do esquema, e os resultados do experimento indicaram que o sistema desenvolvido aumentou o ganho de energia em até 28,31% para um dia parcialmente nublado. O sistema desenvolvido alcançou características atraentes, mas limita-se a um protótipo de laboratório sem implementação na vida real.

Em Wu e Huang (2013), foi proposto um sistema solar inteligente de eixo duplo, onde um controlador embarcado foi utilizado como o principal controlador do sistema que detecta a diferença de tensão e estima o ângulo de azimute solar com quatro grupos de sulfeto de cádmio (CDS) como elementos sensores. O sistema de controle compreende painéis solares, motores, sensores, um controlador A/D, um controlador embutido, um circuito de acionamento e módulos GSM. O sistema utilizava dois motores como atuador para regular a elevação e o azimute, enquanto o CDS rastreava a posição do Sol por meio do movimento do motor controlador embutido. O módulo GSM foi utilizado para notificar o pessoal de manutenção em caso de falha. Uma comparação entre o sistema proposto e um sistema de painéis solares fixos foi realizada em diferentes condições climáticas.

O projeto e a implementação de um sistema de rastreamento solar de eixo duplo foram apresentados por Munna et al. (2015) com base em uma técnica de malha fechada. O sistema foi dividido em duas partes, mecânica e elétrica. A parte mecânica, considerada a parte mais desafiadora do desenvolvimento, tratava principalmente dos movimentos azimutais e verticais do rastreador solar e consistia em servomotores e porta-painéis. A parte elétrica, que se preocupa em captar a luz solar e o movimento do painel nessa

direção, é composta por quatro sensores de luz e um microcontrolador ATmega328P. Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foi realizada uma comparação com outros sistemas, que incluíam o sistema de painel solar fixo e o sistema de rastreamento solar de eixo único, e os resultados mostraram que o sistema de rastreamento solar de eixo duplo desenvolvido sempre superou o outros sistemas.

Já em [Acakpovi, Asabere e Sunny \(2015\)](#), o projeto e a implementação de um sistema de rastreamento solar de dois eixos foram apresentados derivados de um sistema de controle de circuito fechado para rastrear o movimento do Sol e obter a potência ideal do painel solar. O sistema era composto de componentes que foram categorizados em cinco grupos, a saber: fonte de alimentação, sensor de luz, *driver* de motor de passo, *display* e unidades centrais de processamento. Para avaliar o desempenho do sistema, foi realizada uma comparação com um sistema de painel solar fixo, no qual as tensões de saída foram medidas a cada hora, das 6h às 16h, e os resultados mostraram um aumento médio na potência de saída de cerca de 10,7%. A pesquisa envolveu a estimativa de custo, que mostrou que o sistema desenvolvido é custo-efetivo; no entanto, o sistema implementado não foi mostrado.

Um sistema de rastreamento solar de eixo duplo foi projetado e implementado por [Özer et al. \(2018\)](#), onde o projeto geral do sistema é dividido em duas partes, elétrica e mecânica. A parte elétrica é ainda subdividida em projeto e programação do sistema de controle. Em contraste, a parte mecânica é composta por dois motores DC que fornecem movimentos horizontal e vertical, da esquerda para a direita, além de engrenagens que transferem seus movimentos para o painel solar. Outros componentes incluem um resistor dependente de luz (LDR), microcontrolador, bateria, interruptores de limite de montagem, suporte de perfil de ferro e rolo. Para avaliar o desempenho do sistema, foi feita uma comparação entre o sistema proposto e um sistema de painel solar estacionário; os resultados mostraram que a energia gerada aumentou em 25% quando o sistema proposto foi utilizado e com base na análise de custos realizada no estudo, o sistema proposto é muito econômico.

Em [Mustafa et al. \(2018\)](#), um sistema automático de rastreamento solar de eixo duplo foi projetado e desenvolvido usando um resistor dependente de luz (LDR) para determinar a intensidade da luz solar e motores DC em uma estrutura mecânica com arranjo de engrenagens para rastrear o Sol com precisão. Os resultados mostraram que a energia obtida do painel solar com o rastreador duplo supera 35% da energia obtida do painel solar fixo. Ao analisar os dados, a energia obtida do rastreador solar ocorre principalmente pela manhã e à noite porque há pouca diferença ao meio dia, provando que o painel solar fixo é eficiente ao meio-dia. Uma das principais limitações do sistema é o custo, pois o sistema utiliza quatro sensores LDR.

[Subramaniam et al. \(2018\)](#), desenvolveu o projeto e a implementação de um sistema de

rastreamento solar automático de eixo duplo baseado em relógio de tempo real (RTC) com protocolo I2C (barramento bidirecional), onde um motor gira o concentrador solar em um ângulo de azimute e ajusta a posição inicial do concentrador solar enquanto outro motor ajusta o concentrador no ângulo zenital. O desempenho do sistema desenvolvido foi testado e comparado com o sistema de rastreamento solar fixo, e os resultados experimentais mostraram que o sistema de rastreamento solar baseado em relógio em tempo real tem 75% a mais de ganho térmico médio quando comparado aos sistemas de rastreamento solar fixos. O sistema desenvolvido é econômico e possui baixo consumo de energia. No entanto, não foi implementado para sistemas solares fotovoltaicos.

Um rastreador solar de eixo duplo foi projetado e implementado em [Wicaksono e Musafa \(2019\)](#) para fornecer energia adicional a um robô de limpeza para estender seu tempo de operação. O sistema de rastreamento compreende três partes: um sistema mecânico de rastreamento solar, um sistema eletrônico de rastreamento solar e algoritmos de programa embutidos no controlador de rastreamento solar. O desempenho do sistema foi avaliado em termos de teste de módulo fotovoltaico, teste de carregador de bateria e um teste geral, que comparou o tempo de operação do robô com e sem FVs adicionais. Os resultados mostraram que o robô opera por mais tempo com FV por 7 min 17 s em comparação sem FV. Além disso, o tempo médio de carregamento da bateria usando FV é de 94min e 48s.

Um sistema de rastreamento de dois eixos confiável, baseado em algoritmo, simples e econômico para medição da posição solar em tempo real foi desenvolvido em [Chowdhury et al. \(2019\)](#). A pesquisa utilizou o algoritmo *Astronomical Almanac's* (AA) devido à sua simplicidade, confiabilidade e rápida computabilidade, o que o tornou adequado para ser implementado em uma plataforma microcontroladora de 8 bits. Para avaliar a precisão do algoritmo, uma comparação com outros algoritmos padrão, *Sun Position Algorithm* (SPA) e *Energy and Sustainable Economic Development* (ENEA), foi realizada usando simulação MATLAB, e verificou-se que a precisão do algoritmo ENEA era maior do que aquela do algoritmo AA, mas o algoritmo ENEA não foi válido após 2022, e também o SPA é computacionalmente caro e não implementável em um microcontrolador de baixa velocidade e baixo consumo de energia. Além disso, a tensão medida do painel solar também reflete que um rastreador de eixo duplo baseado em algoritmo de circuito fechado pode ser implementado usando um microcontrolador de 8 bits, que supera um rastreador óptico convencional sem aumentar o custo do sistema. O sistema proposto tem o benefício de alta precisão no rastreamento do Sol. No entanto, o sistema estava limitado ao design do protótipo e não à implementação na vida real.

O projeto, a fabricação e o desempenho de um sistema de rastreamento solar de eixo duplo foram apresentados por [Munshi et al. \(2022\)](#), no qual os componentes utilizados para desenvolver o sistema foram divididos em projetos de sistemas elétricos e mecânicos. O projeto do sistema elétrico consistia em um painel solar, servo motores, sensor de luz,

sensor de posição, microcontrolador e bateria, enquanto a parte mecânica consistia no atuador, rotor e caixa de base. Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foi realizada uma comparação com um sistema de painel solar fixo, no qual a corrente, tensão e potência foram medidas entre 8h e 16h. No entanto, o sistema não foi avaliado para diferentes condições climáticas.

Já em [Awad, Jbaar e Abdullah \(2020a\)](#), um novo sistema de rastreamento solar de eixo duplo e de baixo custo foi desenvolvido usando um microcontrolador Arduino. O sistema rastreador consistia em três partes principais: a entrada de oito LDRs, o Arduino como controlador e os servomotores como saídas. Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foi realizada uma comparação experimental entre um sistema de painel solar fixo, sistema de rastreamento solar de eixo único e o sistema solar de eixo duplo desenvolvido em termos de energia gerada, e os resultados mostraram que o sistema desenvolvido desempenhou melhor que os outros sistemas; no entanto, nenhuma implementação na vida real foi feita, daí a limitação da pesquisa.

Em [Awad, Jbaar e Abdullah \(2020b\)](#), foram apresentados o projeto e a implementação de um sistema de rastreamento solar de eixo duplo simples e econômico. Os principais componentes do sistema de rastreamento incluem quatro resistores ópticos LDR como sensores, dois servo motores MG996R, atuadores, uma bateria, um controlador de carga solar e um microcontrolador Arduino. O sistema geral foi dividido em *design* de *hardware* e *software*, o sistema foi implementado e programado. O desempenho do sistema desenvolvido foi avaliado com base na comparação entre painéis solares fixos, um sistema de rastreamento solar de eixo único e o sistema de rastreamento solar de eixo duplo desenvolvido, e a amperagem e a tensão produzida por cada sistema foram medidas. Os resultados experimentais mostraram que o sistema desenvolvido teve um desempenho melhor que o outro sistema, com um aumento de eficiência de 20,77%. O sistema é econômico e simples de implementar. Porém, possui limitações, como o fato de não poder ser monitorado remotamente.

Em [Ali et al. \(2021\)](#), um projeto de eixo duplo de um sistema de rastreamento automático foi desenvolvido para rastrear a posição do Sol para garantir que a posição do painel solar esteja sempre posicionada verticalmente em relação ao Sol. O sistema de rastreamento inclui um painel solar, microcontrolador, sistema de motor redutor, painéis solares e resistores dependentes de luz (LDR), que foram utilizados como sensor. O sistema também inclui um relógio em tempo real e um interruptor de fim de curso, que redefine a posição dos painéis solares no final do dia. O *design* do sistema é portátil e pode ser usado para aumentar a potência, bem como a eficiência dos painéis, reduzindo a pressão sobre os combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa.

O trabalho desenvolvido por [Mohanapriya et al. \(2021\)](#) projetou e implementou um ras-

treador solar de eixo duplo usando LDR com Arduino Uno e usou um motor de passo em vez de um atuador linear para melhorar o desempenho geral do rastreador. O sistema automatizado de rastreamento solar baseado no protótipo Arduino é construído principalmente usando o microcontrolador Arduino, quatro LDRs e três motores de passo. O sistema proposto foi comparado com um sistema solar fotovoltaico fixo. Os resultados mostraram que o sistema proposto funciona melhor do que um painel solar fixo em cerca de 30 a 40%. A implementação atual foi baseada em sensores, e um relógio de tempo real não foi considerado para o rastreamento sazonal do Sol. Portanto, aumentar a eficiência do sistema como um todo causaria um aumento equivalente no custo do sistema.

Um sistema de rastreamento solar de eixo duplo foi projetado e desenvolvido em [Prakash e Govindarajulu \(2022\)](#) para um sistema fotovoltaico autônomo usando engrenagem helicoidal. O sistema era composto de placas de células solares, um microcontrolador PIC, um LCD, um relógio em tempo real, sensores LDR, motores DC e servo motores. O desempenho do sistema foi avaliado contra um painel solar de eixo fixo, e a potência de entrada e saída foram medidas e utilizadas para calcular a eficiência para diferentes dias. Os resultados obtidos mostraram que o sistema proposto teve melhor desempenho, com ganho de potência de 84% pela manhã, e à noite, o ganho de potência foi de 100%. No entanto, o sistema desenvolvido foi limitado ao uso em pequena escala.

2.3 Sistema híbrido de rastreamento solar

O rastreador solar híbrido, também conhecido como rastreador solar de três eixos ou eixo triplo, se move ao longo de três eixos, permitindo captar a energia solar por mais tempo ao longo do dia e com o alinhamento mais preciso em relação a posição do Sol em diferentes estações e condições meteorológicas ([TAMANG; ROY, 2019](#)).

A Figura 2.5 representa um sistema híbrido de rastreador solar desenvolvido em [Gupta et al. \(2022\)](#), que compreendia um painel solar montado entre dois postes verticais e uma superfície horizontal rotativa adaptada para montar os dois postes verticais. Uma abordagem de elevação em tesoura foi empregada para mover suavemente o eixo para cima e para baixo para obter o terceiro eixo e minimizar o sombreamento. A localização do Sol foi rastreada usando quatro LDRs colocados no topo do painel solar, e os sinais desses sensores são enviados para o servo motor através do microcontrolador, que assim move o painel solar na direção do Sol. Outro LDR está conectado na parte inferior do módulo solar e foi usado para controlar automaticamente o funcionamento do terceiro eixo, enviando sinais para um relé e acionando o motor DC para mover a tesoura para cima quando for detectado sombreamento. O sistema foi comparado com sistemas de rastreamento solar de eixo fixo e duplo em termos de potência e eficiência energética, e foi demonstrado que o sistema híbrido produzia a maior potência, particularmente em áreas

sombreadas; no entanto, consumia mais energia do que o sistema de rastreamento solar de eixo duplo. O erro relativo dos ângulos de azimute solar e altitude varia de $0,844^\circ$ a $0,251^\circ$ e $-0,498^\circ$ a $0,576^\circ$ (ZHANG; YIN; JIN, 2019).

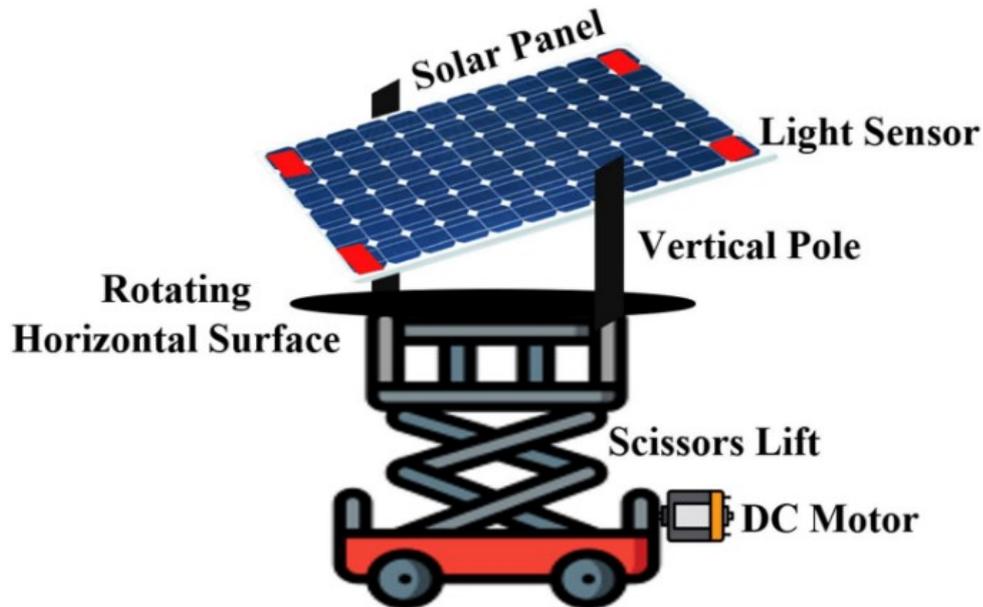


Figura 2.5: Sistema híbrido de rastreamento solar.

Fonte: Awasthi et al. (2020)

Uma breve visão geral do sistema de rastreamento solar híbrido foi apresentada em Tamang e Roy (2019), onde foi mencionado que o sistema de rastreamento solar híbrido foi desenvolvido para resolver o problema enfrentado por outros sistemas de rastreamento, especialmente em dias nublados. Concluiu-se então que o sistema híbrido de rastreamento solar poderia funcionar eficientemente em dias claros e nublados, mas parou de funcionar em dias chuvosos para economizar o uso da energia gerada. No entanto, a implementação do sistema de rastreamento híbrido é muito complexa devido à presença e sincronização de dois esquemas de rastreamento.

Um sistema híbrido de rastreamento solar foi proposto por Homyk e Bone (2012), combinando um sistema de rastreamento mecânico e elétrico. O sistema de rastreamento mecânico foi baseado em um *array* de fotodiodos (PDA, do inglês *photodiode*) que foi implementado usando uma esfera cuja superfície interna foi otimizada, permitindo que o PDA funcione como um sensor de alta precisão. Por outro lado, o sistema de rastreamento elétrico consistia em um sistema de controle de *feedback* de rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT, do inglês *maximum power point tracking*). O sistema foi simulado e concluiu-se que, embora o sistema de rastreamento solar único seja mais eficiente que o painel solar fixo, ele não pode rastrear a variação do ângulo de azimute, que foi codificado no microcontrolador do sistema proposto. Além disso, o sistema proposto pode rastrear o Sol a qualquer momento, aumentando assim a potência de saída.

O trabalho [Mohammad e Karim \(2013\)](#) projetou e implementou um sistema híbrido de rastreamento solar automático baseado em microcontrolador de dois eixos com o objetivo de melhorar a eficiência da conversão solar. O sistema utilizou um microcontrolador que operava um rastreador solar híbrido de dois eixos que funciona em diferentes condições climáticas, apesar da longa duração da presença de nuvens, onde o rastreador mede continuamente a intensidade da luz até que o limite de 3,70 V seja atingido. Para avaliar o desempenho do sistema proposto, foram coletados dados de quatro rastreadores diferentes, estacionário, eixo único, eixo duplo e eixo híbrido. Os resultados mostraram que o sistema de rastreamento de eixo duplo superou o rastreador de eixo único em um incremento de 18% na potência de saída. Em contraste, o sistema de rastreador híbrido superou o rastreador estacionário em um incremento de 54% na potência de saída.

Um sistema híbrido de rastreamento solar de eixo duplo foi proposto por [Ferdaus et al. \(2014\)](#), onde um motor funciona continuamente para rastrear o movimento do Sol, e outro motor funciona uma vez por mês para rastrear o movimento sazonal do Sol. Para simplificar o processo de projeto e implementação do sistema, ele foi dividido em duas partes: o sistema mecânico e o projeto do circuito elétrico. Para avaliar o desempenho do sistema projetado, foi realizada uma comparação entre o sistema proposto, um sistema de rastreamento solar estático e um sistema de rastreamento solar de eixo duplo contínuo, e constatou-se que o sistema proposto tem um ganho médio de potência 25,62% maior em relação ao sistema estático enquanto tem um ganho de potência médio 4,2% menor em relação ao sistema de rastreamento contínuo. O sistema proposto foi alcançado com baixo consumo de energia, alta precisão e baixo custo; no entanto, é bastante complexo de implementar.

Um dispositivo híbrido de rastreamento solar foi proposto por [Lee et al. \(2015\)](#), utilizando fotosensores e GPS. O fotosensor foi utilizado para rastrear a posição do Sol quando a radiação solar for maior ou igual a 400 W/m^2 enquanto os dados do GPS seriam utilizados quando o nível de radiação solar caísse abaixo de 400 W/m^2 . Para avaliar o desempenho do dispositivo proposto, uma comparação com um dispositivo de rastreamento solar fotosensor foi realizada em uma condição de baixa radiação solar, ou seja, menos de 400 W/m^2 , onde foram analisados os erros de precisão. Os resultados mostraram que o dispositivo de rastreamento solar híbrido operou com mais precisão do que o dispositivo de rastreamento solar fotosensor, o que indicou que ele pode ser utilizado para diferentes condições climáticas. A pesquisa não considerou o custo do sistema.

Um sistema eletromecânico programado em C++ foi desenvolvido por [Abdulrahman et al. \(2016\)](#) que controla o movimento do painel solar com base em um sistema de rastreamento de eixo híbrido (um eixo e dois eixos) de modo que esteja sempre posicionado na direção do Sol. O principal componente do sistema de rastreamento inclui painéis solares, uma bateria recarregável de ciclo profundo, um microcontrolador, circuitos de condicionamento

de sinal e um acionador de motor, que são conectados a sensores de resistor dependente de luz (LDR) de quatro quadrantes e um mecanismo de rotação solar. O sistema fornece um meio confiável e econômico de alinhar um painel solar com o Sol para otimizar a produção de energia e a eficiência em 31% quando comparado a um painel solar estacionário.

O sistema de rastreamento adequado para uma persiana fotovoltaica inteligente (SPB, do inglês *smart photovoltaic blind*) foi investigado por [Hong et al. \(2016\)](#), e um método de rastreamento indireto foi adotado como um estudo preliminar de um método de rastreamento solar híbrido de dois eixos (direto e indireto). Segundo a pesquisa, o SPB é um dispositivo que pode ser utilizado tanto para geração de energia elétrica quanto para proteção solar e pode ser instalado nas janelas de edifícios. O método de rastreamento indireto foi realizado por meio de duas etapas: cálculo da altitude horária e azimute do Sol e cálculo da inclinação horária do painel (SoP, do inglês *slope of the panel*) e o azimute do painel (AoP, do inglês *azimuth of the panel*) que são perpendiculares à altitude e ao azimute do Sol. Os resultados obtidos mostraram que o SoP rastreou o Sol de 0° a 90° , enquanto o AoP rastreou o Sol de -9° a 9° . A limitação desta pesquisa é que nenhum sistema de rastreamento solar foi desenvolvido.

Em [Jianwattanamukul, Locharoenrat e Lekchaum \(2016\)](#), um novo sistema de rastreamento solar híbrido foi projetado e desenvolvido no Instituto de Tecnologia de King Mongkut Ladkrabang, Bangkok, Tailândia. O sistema híbrido desenvolvido compreendia oito sensores ópticos do LDR para quatro direções, um sistema de equação de relógio local, um sensor atmosférico e dois servo motores DC para verificar os ângulos de azimute e altitude para determinar a posição do Sol. Para avaliar o desempenho do sistema de rastreamento solar desenvolvido, a temperatura externa do receptor foi medida, a temperatura medida foi obtida em 508,25 K e outros resultados indicaram que as tolerâncias dos ângulos de azimute e altitude são menores que $\pm 2^\circ$, mostrando a alta precisão do sistema de rastreamento. O sistema desenvolvido não gerou energia solar, mas apenas mediu a temperatura, daí a limitação.

Em [Tharamuttam e Ng \(2017\)](#), um sistema autônomo de rastreamento solar baseado em microcontrolador foi desenvolvido usando um algoritmo híbrido para rastrear a posição do Sol. O algoritmo híbrido proposto combinou sensores e modelos matemáticos para estimar a posição do Sol e obter a energia solar ideal para todas as condições climáticas. O sistema de rastreamento era composto por LDRs, um mega microcontrolador Arduino, um *shield* Arduino Wi-Fi, um servo motor, um motor de passo e *driver*, um magnetômetro HMC5883L, um sensor de corrente ACS712 e um painel solar com servo suporte metálico. Para avaliar o desempenho do algoritmo híbrido proposto, uma comparação com os algoritmos ativo e cronológico foi realizada em dias ensolarados e nublados, e os resultados experimentais mostraram que o algoritmo proposto rendeu maior energia solar para todas as condições climáticas do que os outros algoritmos. O sistema de rastreamento solar

baseado no algoritmo proposto pode efetivamente produzir maior energia solar. No entanto, não é custo efetivo, pois compreende muitos componentes, sendo essa a limitação da pesquisa.

Em [Haider et al. \(2021\)](#), foi proposta a fabricação e instalação de um painel solar montado com um controlador de rastreamento solar de três eixos. As principais partes do sistema solar são painéis solares e células solares. No entanto, outros componentes utilizados incluem uma bateria, servo motores, microcontrolador AVR, regulador de tensão, visor de cristal líquido (LCD), relógio em tempo real e um resistor dependente de luz (LDR). O sistema proposto foi comparado com um painel solar estacionário, e os resultados mostraram que o sistema proposto aumentou a eficiência geral em 25%. No entanto, o sistema está sujeito a algumas limitações inerentes ao sistema de energia solar em termos de custo de instalação, inequivalência com as centrais convencionais, conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) e indisponibilidade do sistema solar. energia em todos os momentos, especialmente à noite.

Em [Baouche et al. \(2022\)](#), foi apresentada a metodologia adotada para projetar e implementar um protótipo de rastreador solar de eixo único baseado em algoritmos híbridos. O *software* de simulação MATLAB/Simulink foi utilizado antes da implementação experimental para explorar vários projetos para um sistema de rastreamento solar, e testes e verificações usando a simulação foram conduzidos. O rastreador solar proposto era composto por LDRs, um microcontrolador Arduino conectado a Wi-Fi, um servo motor, um sensor de corrente e um painel solar com um suporte servo metálico de suporte. O sistema utilizou algoritmos ativos e cronológicos. Para validar o protótipo de *design*, foram realizadas duas comparações entre o ângulo do motor e o ângulo do sol quando o painel é fixo e quando o painel é conectado ao rastreador de eixo único proposto durante todo o dia, e os resultados mostraram que o sistema proposto aumentou a potência elétrica em 22 a 56% a mais do que o sistema de painel fixo. A pesquisa foi baseada em algumas suposições e projetou um protótipo de rastreador solar em pequena escala. A Tabela 2.1 é uma comparação dos sistemas de rastreamento solar de acordo com a rotação do eixo.

Tabela 2.1: Comparação entre o Sistema de Rastreamento Solar baseado na rotação do Eixo. Fonte: Autor.

Propriedades	Eixo Único	Eixo Duplo	Eixo Híbrido
Custo	Barato para implementar	Mais caro de implementar do que um único, mas mais barato do que um híbrido	Mais caro para implementar
Complexidade	Menos complexo	Alta complexidade	Muito complexo de implementar
Precisão de rastreamento	Oferece a menor precisão em comparação com os outros tipos de rastreadores	Ele oferece alta precisão em comparação com o eixo único	Oferece a melhor precisão, pois o Sol será rastreado em qualquer ângulo e posição
Número de eixo	É limitado a apenas um eixo	Limita-se a ter apenas dois eixos	Pode ter três ou mais eixos
Eficiência	Muito reduzido, pois apenas rastreia o movimento do Sol na direção leste-oeste e, em dias nublados, sua eficiência é quase próxima ao sistema de rastreamento solar de ângulo fixo	Tem alta eficiência, pois além de rastrear o movimento do Sol de leste a oeste, também segue a posição de altura angular do sol	Tem a maior eficiência, especialmente durante os dias nublados

2.4 Sistema de rastreamento solar ativo

Um sistema de rastreamento solar ativo é um tipo de sistema de rastreamento solar que utiliza motores e engrenagens para alinhar o painel solar na direção do Sol, conforme mostrado na Figura 2.6. É uma combinação de rastreadores de malha aberta e fechada. Os sistemas de rastreamento ativo vêm em diversas variedades que podem ser classificados em sistemas de rastreamento solar ativo de eixo único, eixo duplo e cronológico. Comparados aos rastreadores passivos, os sistemas ativos de rastreamento solar fornecem melhor utilização da energia solar. No entanto, eles exigem manutenção regular devido aos motores e partes móveis, que podem ser caros.

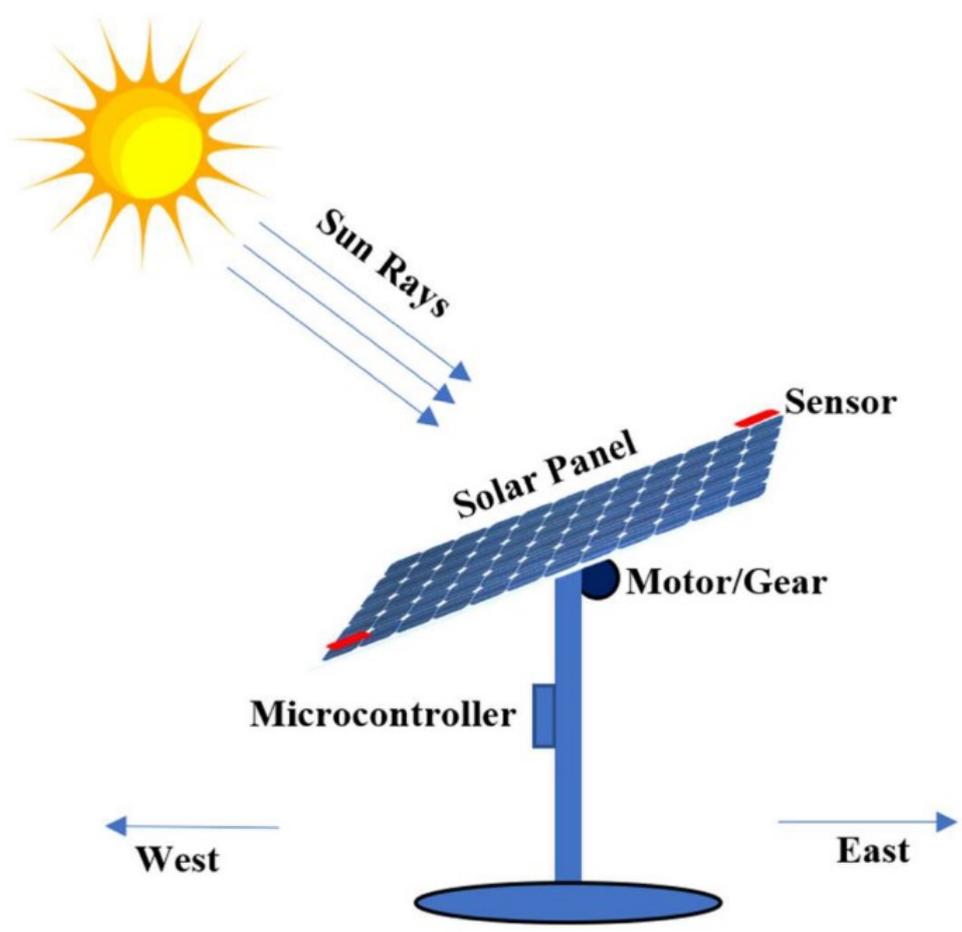


Figura 2.6: Sistema de rastreamento Solar ativo.

Fonte: [Awasthi et al. \(2020\)](#)

Um rastreador solar ativo baseado no sistema de coordenadas do horizonte solar foi desenvolvido em [Indrasari et al. \(2018\)](#), onde o sistema de coordenadas do horizonte foi usado para determinar a posição do Sol e alinhar o painel na direção do Sol. O sistema era composto por Arduino Uno como sistema de controle, dois servo motores como acionamento do painel, um programa PLX-DAQ para monitoramento de dados, ACS-712 como sensor

de corrente e um sensor de tensão CC como sensor de tensão de saída. O desempenho do sistema foi medido com base na caracterização e saída do sensor, bem como no efeito da altitude e azimute, para os quais as medições foram realizadas em duas cidades diferentes, e os resultados obtidos mostraram que o sistema desenvolvido aumentou a potência de saída com um erro relativo mínimo ou diferença entre as cidades. No entanto, o sistema desenvolvido não foi comparado com outros sistemas.

2.4.1 Sistema de rastreamento solar ativo de eixo único

O projeto e a implementação de um sistema de rastreamento solar ativo de eixo único foram conduzidos por Ghosh, Dey e Das (2019) baseado no Node MCU (módulo ESP 8266). O sistema também compreendia um sensor LDR, um driver de motor L293D, um painel solar, um motor DC e um monitor serial. O sistema de rastreamento implementado foi então utilizado com base na intensidade da luz caindo em sua superfície para coletar os dados de potência de saída do painel solar sob diferentes condições climáticas, e verificou-se que o sistema pode atingir sua tensão de pico por mais tempo. O sistema proposto tem inúmeras vantagens. No entanto, foi utilizado um painel solar de 5V e apenas um eixo único foi considerado, sendo essa a limitação do sistema.

Em Chin, Babu e McBride (2011), foram apresentados o projeto, modelagem e teste de um sistema de rastreamento solar ativo de eixo único, mostrando que sua portabilidade e compactidade permitem que ele seja montado em uma parede. Para evitar o consumo desnecessário de energia e fornecer flexibilidade, o sistema foi projetado para desligar a noite e funcionar sob várias condições climáticas com diferentes preferências do usuário. O MATLAB/Simulink foi utilizado primeiro para modelar o sistema e determinar sua eficiência em relação a outros sistemas. Os resultados experimentais obtidos em termos de eficiência, potência e saída de corrente mostraram que os resultados da simulação do sistema proposto correspondem ao sistema solar fixo; no entanto, a limitação do sistema é que ele é afetado por distúrbios externos não modelados, como atrito mecânico e corrente do vento.

2.4.2 Sistema de rastreamento solar ativo de eixo duplo

O projeto e a implementação prática de um rastreador solar ativo de eixo duplo simples foram conduzidos por Hammoumi et al. (2018) para rastrear o movimento do Sol com pouquíssimos componentes e baixo custo. O sistema era formado por um chassi, um painel solar monocristalino, quatro sensores LDR, dois servo motores e um rolamento, que foi projetado para controlar os motores com base na incidência solar medida pelos

quatro sensores LDR colocados nos quatro cantos do painel solar. Para minimizar custos, o sistema foi projetado utilizando um microcontrolador ATmega328 de baixo custo, que foi integrado a uma placa Arduino Uno de baixo custo. Para avaliar o desempenho do sistema proposto, foi realizada uma comparação com um sistema de painéis solares fixos, obtendo-se uma eficiência de 36,25%. O sistema desenvolvido nesta pesquisa limitou-se à implementação em pequena escala.

A principal desvantagem do sistema de rastreamento solar de eixo duplo ativo é que a potência de acionamento é obtida a partir da potência de saída do próprio painel solar. Para resolver este problema, em [Rambhawan e Oree \(2014\)](#) apresentou um projeto inovador que utilizou uma estratégia tripla para minimizar o consumo de energia do drive enquanto satisfazia o requisito de maior eficiência. A estratégia utilizada inclui (i) acoplar o motor com as caixas de engrenagens para reduzir o torque, (ii) combinar engrenagens e rolamentos para reduzir o efeito da carga de vento forte e (iii) adotar um algoritmo de retorno noturno para reiniciar todo o sistema, colocando o painel solar em sua posição inicial à noite e muda para o modo de hibernação para economizar energia. Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foi realizada uma comparação entre o sistema proposto, um sistema fotovoltaico fixo e um sistema genérico de rastreamento solar ativo de eixo duplo, e a tensão e a corrente foram medidas. Os resultados obtidos mostraram que o sistema proposto teve um desempenho melhor que o outro sistema, com uma potência de saída significativamente aumentada de 42%. O sistema desenvolvido pode economizar energia e gerar alta potência de saída. No entanto, não apenas o sistema é complexo de implementar, mas a estratégia adotada também prejudica a sensibilidade do rastreamento.

Em [Kaur et al. \(2016\)](#), um sistema ativo de rastreamento solar de eixo duplo econômico foi desenvolvido para rastrear o movimento do Sol. O sistema de rastreamento utiliza LDRs para detectar a posição do Sol e, em seguida, envia esses dados para um microcontrolador Arduino Uno, que processa os dados e instrui um conjunto de dois servo motores que permitem que o painel se mova e fique perpendicular ao Sol. O desempenho do sistema de rastreamento desenvolvido foi avaliado através do LabView e comparado a um sistema de rastreamento solar fixo, e os resultados mostraram que o sistema desenvolvido teve melhor desempenho com um ganho médio de potência de 13,44%. No entanto, o sistema de rastreamento solar desenvolvido é limitado apenas ao uso em pequena escala.

Em [Patil et al. \(2020\)](#), um sistema ativo de rastreamento solar de eixo duplo foi desenvolvido com base em três LDRs idênticos para rastrear a posição do Sol na maior intensidade de luz visível. O sistema de rastreamento compreendia outros componentes principais, incluindo um microcontrolador Arduino, um painel solar, dois motores DC, duas baterias, um *driver* de motor ponte H e uma lâmpada LED. O desempenho do sistema desenvolvido foi avaliado usando luz solar e luz de tubo normal. Em ambos os casos, os LDRs foram

capazes de detectar a luz de intensidade máxima, que era o Sol, e mover o painel solar nessa direção. O sistema desenvolvido também foi comparado a um sistema de painéis solares fixos, e constatou-se que o custo de geração de energia para o sistema desenvolvido foi reduzido. A principal limitação do sistema desenvolvido é o custo de implementação, pois utiliza muitos componentes.

2.5 Sistema de rastreamento solar passivo

Os rastreadores solares passivos operam em princípios termohidráulicos. Termohidráulica é o estudo de fluxos hidráulicos em fluidos térmicos que são afetados por temperaturas ou pressões flutuantes (THUNBERG, 2022). Em outras palavras, a termohidráulica é o estudo das pressões, temperaturas e vazões de gasodutos, levando em conta as propriedades térmicas do solo, tubulação e, se aplicável, isolamento da tubulação (BESTION, 2017). Conforme mostrado na Figura 2.7, é composto por dois tanques tubulares que são montados na lateral do painel fotovoltaico (DEEKSHITH et al., 2015). Como o rastreador ativo, os sistemas de rastreadores passivos também vêm em diversas variedades que podem ser classificados em sistemas de rastreamento solar passivo de eixo único, eixo duplo e híbrido. O princípio de operação não é tão complicado quanto o dos rastreadores ativos. O custo dos rastreadores passivos é menor e eles também são menos propensos a serem afetados pela iluminação. Embora possam não ser tão atraentes quanto os rastreadores ativos, eles fornecem bons resultados. No entanto, uma olhada nos aspectos negativos indica que eles são lentos pela manhã.

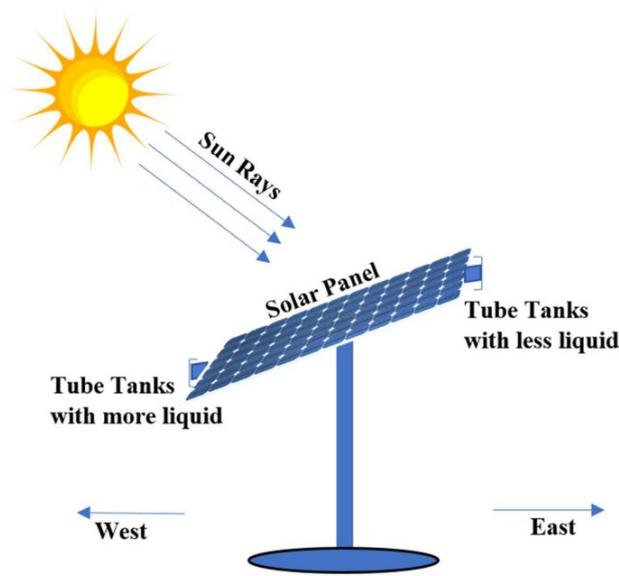


Figura 2.7: Sistema de rastreamento solar passivo.

Fonte: Awasthi et al. (2020)

Em [Maindad et al. \(2020\)](#), foram descritos o projeto, construção e teste de um rastreador solar passivo. Ele usou R-134a, Tetrafluoretileno ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$), como meio refrigerante para colher mais energia solar a um custo muito menor do que os rastreadores disponíveis. Para armazenar o refrigerante, foram utilizados dois recipientes e um conduíte de cobre para conectá-los. O sistema de rastreamento operava com base no princípio de um sistema controlado por pressão diferencial, onde o refrigerante de alta pressão de um recipiente flui para outro. Devido ao desequilíbrio no peso dos botijões, o painel irá inclinar na direção do lado onde o peso é maior devido à gravidade. No entanto, a altura e o ângulo das placas de sombra requerem ajustes de acordo com a localização geográfica para obter mais sensibilidade de rastreamento solar.

Uma metodologia para a detecção e monitoramento do movimento aparente do Sol através de um sistema de aquisição passiva de imagens foi apresentada por [Angulo et al. \(2020\)](#), onde o sistema proposto opera processando imagens da cúpula do céu para encontrar o centro solar. O sistema mostrou-se economicamente viável para ser implementado em aplicações solares de baixo custo que requerem rastreamento solar devido à sua relação custo-benefício e compatibilidade com múltiplos sistemas de energia solar concentrada (CSP, do inglês *concentrated solar power*). A grande vantagem do sistema desenvolvido foi atingir um campo de visão (FOV, do inglês *field of view*) de 180° , o que mostrou a possibilidade de localizar o Sol a qualquer hora do dia e não é afetado pela radiação difusa. No entanto, a posição do Sol não pode ser localizada em dias com forte nebulosidade, e a caracterização do sistema de rastreamento solar para saber a precisão do rastreamento não foi realizada.

2.5.1 Sistema de rastreamento solar passivo de eixo duplo

O projeto e a implementação de um rastreador solar passivo de eixo duplo foram desenvolvidos por [Sanchez, Tamayo e Estrada \(2011\)](#) com uma diferença angular média de 25 graus para a posição do Sol sob condições controladas, usando as propriedades de expansão térmica de metais em uma tira bimetálica como base de operação. O sistema tem dois níveis de flexibilidade, onde um é usado para rastrear o Sol todos os dias e é controlado automaticamente pela faixa bimetálica, enquanto o outro é ajustado manualmente nas mudanças sazonais para compensar as variações na descida do Sol ao longo do ano. A construção do sistema proposto foi simples e o custo de produção foi baixo em comparação com os métodos existentes. No entanto, a precisão do sistema é modesta e não é totalmente automatizada.

Um novo rastreador solar de baixo custo adequado para ser usado em regiões equatoriais ao redor do mundo foi apresentado em [Clifford e Eastwood \(2004\)](#). O sistema proposto foi ativado passivamente por tiras bimetálicas de alumínio/aço e controlado por um amor-

tecedor viscoso. A modelagem por computador previu um aumento na eficiência de até 23% em relação aos painéis solares fixos, e o projeto atendeu a seus critérios adotando um método passivo de controle – não drenando energia da célula solar real para movimento. Embora a radiação solar possa ser insuficiente em certas localizações geográficas, um sistema de eixo duplo/inclinado adaptado deve fornecer rastreamento preciso em muitos locais além daqueles no equador. Testes experimentais mostraram excelente concordância com o modelo de computador. No entanto, a resposta matinal do sistema é finita, a aplicabilidade do sistema é restrita apenas a regiões equatoriais e testes experimentais adicionais são necessários para avaliar a resistência à corrosão do sistema.

2.5.2 Sistema de rastreamento solar passivo de eixo híbrido

Um conceito de rastreamento solar passivo de múltiplos eixos foi apresentado em [Brito et al. \(2019\)](#) que aproveitou a variação de comprimento induzida pela expansão térmica de um material quando exposto à luz do sol. A expansão diferencial de três finas faixas planas verticais com diferentes orientações foi amplificada por um sistema de alavanca para permitir o rastreamento do movimento aparente do Sol no céu. Um protótipo de sistema de rastreamento solar passivo que suporta um módulo fotovoltaico foi construído e testado. O modelo e os resultados experimentais mostram que o sistema de rastreamento usando o rastreador de alcance azimutal pode seguir corretamente o movimento azimutal do Sol durante o dia. O uso desse sistema de rastreamento levou a um aumento de 28% na geração fotovoltaica durante o período de teste. No entanto, o sistema proposto tem algumas limitações, incluindo o relativamente menor coeficiente de expansão térmica do alumínio levando a pequenas variações de comprimento, o que implica requisitos mais elevados no sistema mecânico. Além disso, o sistema de rastreamento exige um controle rigoroso da folga e uma amplificação significativa do sistema de alavancagem, exigindo, portanto, um ajuste fino da alavanca.

2.6 Sistema de rastreamento solar baseado em aprendizado de máquina

A inteligência artificial (IA) é um campo amplo que tem aplicações em vários setores, incluindo agricultura, finanças, medicina, engenharia, marketing, etc. É uma das tecnologias populares amplamente utilizadas para sistemas de controle, como sistemas de rastreamento solar. Vários autores, ao longo dos anos, desenvolveram diferentes modelos baseados em IA para controlar sistemas de rastreamento solar, que incluem regressão logística (LR), regressão vetorial de suporte (SVR), lógica fuzzy (FL), sistema de inferência neural fuzzy adaptável (ANFIS), multicamadas perceptron (MLP) e algoritmo

genético (GA).

Um sistema de rastreamento solar foi simulado usando MATLAB/Simulink em [Usta, Akyazi e Altaş \(2011\)](#), onde um controlador de lógica fuzzy (FLC) foi utilizado para controlar o sistema. O sistema de rastreamento solar consistia em dois motores de ímã permanente DC (PDCM), dois LDRs e dois amplificadores utilizados para acionar os motores. O controlador de lógica fuzzy tem duas entradas, erro e mudança de taxa de erros, e uma saída, mudança de saída controlada. Para comparação e avaliação, o sistema de rastreamento solar foi projetado usando diferentes funções de pertinência fuzzy, e os resultados mostraram que o FLC de base triangular produziu desempenhos bons e aceitáveis. A pesquisa apenas modelou o sistema de rastreamento solar sem qualquer implementação física.

Um sistema inteligente de rastreamento solar de eixo duplo foi projetado e desenvolvido em [Ataei et al. \(2011\)](#) com base na lógica fuzzy em que sensores foto-resistores foram utilizados para determinar a direção da luz solar. O desenvolvimento geral do sistema foi dividido em três partes: a parte dos fotossensores, que compreendia os quatro LDRs utilizados para rastrear com precisão a luz solar; a segunda parte, conhecida como controlador e drivers do motor, tratava dos componentes de hardware do sistema de rastreamento solar, que incluía uma placa eZdspF2812 com DSP TMS320F2812 sendo o controlador principal do sistema de rastreamento. Por fim, a terceira parte é conhecida como algoritmo, que tratou de projetar o FLC para o sistema de rastreamento. Para avaliar o desempenho do sistema, um indicador de 10 cm foi instalado na superfície do painel solar e, se controlado com precisão, o painel solar ficaria perpendicular ao Sol; assim, o indicador não projetaria nenhuma sombra. Os resultados obtidos mostraram que houve a menor quantidade de erro no período da tarde. No entanto, os erros aumentaram quando o Sol começou a se pôr.

Uma rede neural artificial (ANN) foi utilizada para identificar e modelar um sistema de rastreamento solar de eixo duplo em [Shenawy, Kamal e Mohamad \(2012\)](#), onde uma derivada integral proporcional (PID) com e sem lógica fuzzy de autoajuste foi utilizada para controlar o rastreador solar. Para treinar o modelo, as respostas de entrada e saída do sistema de rastreamento solar foram regularmente recuperadas e armazenadas depois que um sinal aleatório foi produzido usando uma função desenvolvida no Simulink e aplicada como um sinal de entrada. O sistema foi projetado de forma que a raiz quadrada média do erro fosse utilizada para avaliar a melhor época, e a época 800 foi considerada a melhor época de treinamento. Para obter o melhor controlador PID para controlar o sistema, foi realizada uma comparação entre o PID convencional (cPID), PID sem lógica fuzzy de autoajuste (PIDFL) e PID com lógica fuzzy de autoajuste (PIDSFL), e os resultados obtidos mostraram que tanto o PIDFL quanto o PIDSFL tiveram melhor desempenho do que o cPID, produzindo melhores resultados; no entanto, o controlador

PIDSFL respondeu mais rapidamente à perturbação do que os outros controladores. Uma das principais limitações desta pesquisa foi que o sistema desenvolvido não foi comparado com outros sistemas existentes baseados em IA.

Em [Batayneh, Owais e Nairoukh \(2013\)](#), um sistema de rastreamento solar de eixo duplo baseado em controlador difuso foi proposto para aumentar a eficiência do sistema de rastreamento. O sistema de rastreamento compreendia um painel solar, dois motores DC, dois atuadores e quatro células fotovoltaicas que agem como sensores, que foram então utilizados como entradas para o FLC para gerar duas saídas usando 50 regras. Para avaliar o desempenho do sistema proposto, vários estudos de simulação foram conduzidos e os resultados obtidos mostraram que o sistema proposto é confiável e pode ser utilizado para controlar vários painéis fotovoltaicos simultaneamente. No entanto, o sistema proposto não foi comparado com outros sistemas existentes.

Um sistema de rastreamento solar baseado em lógica fuzzy usando Arduino Uno foi proposto por [Bawa e Patil \(2013\)](#) no qual o MATLAB foi utilizado para implementar e testar o sistema de rastreamento. O sistema compreendia um conversor Buck DC-DC, motor de passo, bateria de corrente para tensão (12V) e circuitos sensoriais LDR. O controlador de lógica difusa possui duas entradas, erro e mudança de erro, utilizadas para gerar uma saída, o ciclo de trabalho. O sistema foi projetado e para avaliar seu desempenho, foi realizada uma comparação com um sistema de painel solar fixo onde a potência de saída foi medida das 7h às 19h. Os resultados obtidos mostraram que o FLC aumenta a eficiência do sistema geral em 33,416% a mais do que o sistema de painel solar fixo.

Em [Rosario e Dadios \(2014\)](#), diferentes tipos de funções de pertinência fuzzy foram analisados em relação a sistemas de rastreamento solar onde duas entradas, intensidade de luz e dia, foram utilizadas para gerar duas saídas, direção da intensidade solar e ângulo de inclinação. O desempenho dos diferentes tipos de funções de pertinência, triangular, trapezoidal e gaussiana, foi avaliado das 6h às 18h usando Qtfuzzylite, e uma comparação do sistema de rastreamento solar proposto com um sistema de painel solar fixo foi realizada. Os resultados mostraram que a função de pertinência triangular teve melhor desempenho que as demais com menor percentual de erro. Além disso, os resultados também mostraram que o sistema baseado em fuzzy melhorou o sistema geral em comparação com o sistema fixo.

Em [Abadi, Soeprijanto e Musyafa \(2014\)](#), um protótipo de um sistema de rastreamento solar de eixo único foi desenvolvido com base na lógica fuzzy para rastrear de maneira ideal a posição do Sol. A implementação geral do sistema foi dividida em uma parte mecânica que compreendia o projeto do sistema e uma parte elétrica. Estes se preocuparam com o projeto do controlador de lógica fuzzy onde os sensores LDR foram utilizados como entradas, controlados por um microcontrolador Atmega 328 no qual foram projetadas as

regras fuzzy e funções de pertinência, para gerar a saída que movimentava os motores DC. Para avaliar o desempenho do sistema, vários experimentos foram realizados para comparar a potência de saída do sistema desenvolvido contra um sistema de painel solar fixo entre 7h e 16h, e os resultados obtidos mostraram que o ganho máximo de potência do sistema desenvolvido foi de 47% mais do que o sistema de painel solar fixo.

O projeto e a implementação de um sistema fuzzy de apoio à decisão (FDSS) foram apresentados em [Stamatescu et al. \(2014\)](#) para controlar o movimento de um painel solar e aumentar a disponibilidade de energia solar e a eficiência do sistema. Foram utilizados dois controladores fuzzy com duas entradas cada, a máxima intensidade solar nas direções leste-oeste e norte-sul, e sua variação com o tempo, e essas entradas foram utilizadas para gerar uma saída que controla o movimento de dois motores. O esquema implementado foi concluído para reduzir o custo de rastreamento, e é uma técnica eficaz; no entanto, o desempenho da técnica não foi validado e não foi comparado com outros esquemas existentes, daí a limitação deste estudo.

Um sistema de rastreamento solar de eixo duplo foi projetado e desenvolvido em [Zakariah, Jamian e Yunus \(2015\)](#) com base na lógica fuzzy. O sistema compreendia um microcontrolador Arduino Uno, quatro LDRs, dois motores de vidro elétrico, uma placa de driver do motor e um módulo carregador MPPT. O FLC foi projetado de forma a receber os dois valores de erro e as duas alterações correspondentes nos valores de erro como entradas que geram duas saídas que seriam alimentadas ao motor do vidro elétrico. Para avaliar o desempenho do sistema, foi realizada uma comparação experimental com um sistema sem rastreamento, e os resultados mostraram que o sistema desenvolvido foi capaz de proporcionar um aumento na eficiência da potência de saída em 18,13% em relação ao sistema estático.

Um sistema de rastreamento solar de eixo único baseado em microcontrolador foi projetado e apresentado por [Racharla, Rajan e Kumar \(2015\)](#) no qual a lógica fuzzy foi utilizada para maximizar a eficiência do painel fotovoltaico, focalizando o painel para ficar perpendicular à luz solar. O sistema de rastreamento desenvolvido consistiu em quatro sensores LDR, sensores LED, motores DC e servomotores como atuadores e um microcontrolador PIC16F877A como controlador. O software MPLAB foi utilizado para simular o sistema e foi comparado com um sistema de painel solar fixo, e os resultados experimentais obtidos mostraram que a eficiência do sistema projetado foi de 30,26% a mais do que o sistema fixo. No entanto, nenhuma implementação na vida real foi realizada.

Em [Uebari et al. \(2016\)](#), um sistema de rastreamento solar de eixo duplo foi modelado usando MATLAB/Simulink no qual um FLC foi projetado para controlar o sistema. Várias etapas de modelagem matemática foram desenvolvidas. Para avaliar o desempenho do sistema de rastreamento baseado em fuzzy proposto, uma comparação com um

sistema de rastreamento solar estático e um sistema de rastreamento solar baseado em PID em que a insolação solar gerada, bem como a potência gerada do FV, foram medidas. Os resultados obtidos mostraram que o sistema proposto teve um desempenho melhor do que os outros sistemas. No entanto, a pesquisa não implementou nenhum sistema de rastreamento da vida real.

Em [Huang, Pan e Lin \(2016\)](#), um sistema de rastreamento solar de eixo duplo baseado em lógica fuzzy foi proposto e desenvolvido para alcançar a máxima eficiência para painéis solares. O sistema de rastreamento compreendia painéis solares monocristalinos, baterias de chumbo-ácido, uma caixa de engrenagens, um motor de passo e um circuito de detecção de luz. A parte do software compreendia um sistema de detecção, um controlador de rastreamento difuso e um sistema de banco de dados. O FLC neste trabalho foi usado para decidir o tempo de rastreamento do Sol. Especificamente, ele foi projetado para aceitar duas entradas, saída do sensor de luz solar e corrente de saída da célula, para gerar uma saída que alimentaria o motor para movê-lo ou pará-lo com base na posição do sol. Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foi realizada uma comparação com um sistema de rastreamento solar fixo, e os resultados mostraram que o sistema desenvolvido é mais preciso.

O trabalho [Kiyak e Gol \(2016\)](#) propôs e desenvolveu o projeto e a aplicação de um sistema de rastreamento solar de eixo único baseado em lógica fuzzy e controlador PID em um sistema real. Os circuitos de controle foram projetados e construídos em um microcontrolador Atmega328. O software foi instalado na unidade de controle com base em simulações MATLAB. O resultado experimental usando dados de medição em tempo real obtidos mostrou que os controladores fuzzy foram mais eficientes que os controladores PID para sistemas de rastreamento solar de eixo único em 2,39% e a energia obtida do sistema usando lógica fuzzy para um sistema de rastreamento solar aumentou em 21,2% em comparação para sistemas que não usam lógica difusa para um sistema de rastreamento solar. No entanto, a interface para transmissão e monitoramento de dados em tempo real não foi desenvolvida e a sensibilidade dos sensores usados como entrada para o sistema de controle em lógica fuzzy não foi otimizada.

O desempenho de dois tipos de sistemas de rastreamento solar foi comparado em [Away et al. \(2018\)](#) com base na geometria do tetraedro usando PID e algoritmos de lógica difusa. Os dois sistemas de rastreamento solar de eixo duplo foram desenvolvidos de forma idêntica e incluíam vários componentes, como um microcontrolador Atmega 328, sensor LDR, célula solar, servo mini, registrador de dados, etc. Eles também foram desenvolvidos com configurações de sistema de controle idênticas, mas cada um utilizou um algoritmo de programação de controle diferente, PID e lógica difusa. Para avaliar o desempenho dos sistemas de rastreamento solar com base nos algoritmos, foi realizada uma comparação da energia gerada pelas células solares, e os resultados mostraram que

a lógica fuzzy foi relativamente estável e gerou maior energia nas células solares do que o PID.

Em [Cruz-Alejo, Antonio-Méndez e Salazar-Pereyra \(2019\)](#), uma nova implementação de um FLC em um field programmable gate array (FPGA) para um sistema de rastreamento solar de eixo duplo foi apresentada. A CLF foi utilizada para estimar a posição do Sol em diferentes condições do dia e foi baseada em regras de Mamdani, operações max-min e níveis alfa para defuzzificação. O sistema de rastreamento foi projetado em FPGA e composto por dois servomotores e dois sensores de intensidade solar utilizados como entradas para o FLC. Para avaliar o desempenho do sistema, foi desenvolvido um protótipo em escala onde foram obtidos resultados experimentais para a FLC comparados com os resultados simulados e calculados, que mostraram que os valores obtidos com a FLC proposta correspondiam aos outros resultados. No entanto, a pesquisa não avaliou a FLC proposta com os sistemas de rastreamento baseados em FLC existentes.

Em [Lehloka, Swart e Hertzog \(2020\)](#), o desempenho de dois algoritmos, regressão linear e lógica difusa em um sistema de rastreamento solar de eixo duplo foi comparado para otimizar a potência de saída de um painel solar alinhando-o constantemente com a direção da luz solar. Três módulos solares diferentes foram projetados e desenvolvidos onde um é fixo enquanto os outros são de eixo duplo, cada um controlado por lógica fuzzy e algoritmo de regressão linear. Para determinar qual sistema teve melhor desempenho, as leituras de calibração e as leituras de potência instantânea para todos os sistemas foram medidas e comparadas. Os resultados mostraram que a lógica difusa é mais adequada para eixo duplo, pois superou o algoritmo de regressão linear em 1,3%. No entanto, o sistema pode funcionar mal em condições de nebulosidade.

Um sistema de rastreamento solar de eixo duplo foi projetado e desenvolvido em [Toylan \(2020\)](#) com base em um controlador de lógica fuzzy otimizado por algoritmo genético. O sistema compreendia um motor DC, um atuador, um driver de motor de canal duplo, dois relés reed, etc. enquanto o algoritmo de controle do sistema foi desenvolvido usando MATLAB. Depois de projetar o controlador de lógica fuzzy, as funções de pertinência e as regras foram encontradas simultaneamente usando um algoritmo genético. Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foi realizada uma comparação com um sistema de painéis solares fixos com base na potência gerada. Os resultados obtidos mostraram que o sistema desenvolvido teve melhor desempenho do que o sistema fixo em taxas variáveis com base nas condições meteorológicas e climáticas.

Em [Faraji et al. \(2020\)](#), um método rápido e preciso para rastrear a posição do Sol usando um rastreador solar de eixo duplo foi apresentado com base em uma combinação de malha fechada de uma rede neural perceptron multicamada (MLP) e uma perturbação e observação procedimento de controle. Os algoritmos propostos foram avaliados em dois

cenários através de simulação MATLAB. Os resultados mostraram que o método proposto reduz o tempo de rastreamento e atinge mais energia, aumentando assim a eficiência e a flexibilidade. No entanto, nenhuma implementação da vida real foi realizada na pesquisa, daí a limitação.

O projeto e a implementação de sistemas eficientes de controle de rastreamento solar de eixo único e duplo foram propostos por [AL-Rousan, Mat Isa e Mat Desa \(2020\)](#) com base em modelos ANFIS que podem aumentar o desempenho de rastreadores solares, estimar com precisão a trajetória do Sol no céu e minimizar os erros de rastreamento. Os modelos propostos utilizaram o mês do ano, o dia do mês e a hora solar do dia como entradas que podem ser utilizadas para estimar o ângulo de orientação para o sistema de rastreamento solar de eixo único, enquanto para o eixo duplo, o variáveis podem ser utilizadas para prever o ângulo de inclinação e orientação. Para avaliar o desempenho dos modelos ANFIS propostos, foram utilizadas duas métricas estatísticas, erro quadrático médio (MSE) e taxa de predição (PR), bem como três cenários. Os resultados mostraram que para ambos os sistemas de rastreamento solar, o modelo ANFIS com cinco funções de pertinência foi o mais eficiente, apresentando o menor MSE e o maior PR.

Em [Khadka et al. \(2020\)](#), foram avaliados o projeto e a avaliação de dois controladores, PID e lógica fuzzy, de um sistema de rastreamento solar de eixo duplo para manter a luz do sol perpendicular ao painel solar e obter uma potência de saída constante. Ambos os esquemas foram simulados no Simulink, onde foram realizados dois testes, mantendo a potência de saída em sua potência nominal e seguindo uma referência de potência arbitrária, para avaliar o desempenho do controlador. Os resultados obtidos mostraram que a lógica fuzzy teve melhor desempenho, pois possui menor tempo de estabilização, menor amplitude e menor percentual de erro no estado estacionário. No entanto, nenhuma implementação da vida real foi realizada na pesquisa, daí a limitação.

Em [AL-Rousan et al. \(2021\)](#), um novo sistema de rastreamento solar de eixo único e duplo eficiente e de baixa complexidade foi proposto com base na integração de uma regressão logística supervisionada (LR), que inclui LR binomial (BLR) ou LR multinomial (MLR) e perceptron multicamadas (MLP) ou perceptron multicamada em cascata (CMLP), e que pode ser utilizado para estimar os ângulos de inclinação e orientação usando dois conjuntos de dados diferentes. O primeiro conjunto de dados contém variáveis como mês, dia e hora, enquanto o segundo conjunto de dados consiste em mês, dia, hora, corrente, tensão e radiação de energia. O desempenho dos modelos propostos foi avaliado e os resultados mostraram que o uso de uma camada oculta para ambos os sistemas alcançou um número menor de neurônios quando comparado com o uso de três camadas ocultas em modelos convencionais. Além disso, o modelo proposto alcançou menor complexidade de tempo quando comparado com os métodos convencionais. A pesquisa avaliou apenas os modelos necessários para o controle eficiente dos sistemas de rastreamento solar, sem

desenvolver os sistemas de rastreamento solar.

Em [AL-Rousan, Isa e Desa \(2021\)](#), as variáveis mais eficazes em ângulos de orientação para sistemas de rastreamento solar de eixo único e ângulos de orientação e inclinação para sistemas de rastreamento solar de eixo duplo foram investigadas e avaliadas para selecionar a combinação mais apropriada das variáveis solares e preditores inteligentes. Essas variáveis foram obtidas usando resultados de correlação entre diferentes variáveis solares de entrada: dia, mês, hora, corrente, tensão e radiação de energia utilizada para prever as variáveis de saída, inclinação ou ângulos de orientação. A implementação geral do sistema foi dividida em cinco fases, onde a primeira fase se ocupou com o desenvolvimento do protótipo de rastreamento solar. A segunda fase tratou da coleta de dados, que foi usada para identificar a orientação correta e ângulos de inclinação para o sistema de rastreamento. A terceira fase preocupou-se em encontrar uma correlação entre as variáveis coletadas, levando à quarta fase, onde o rastreador solar foi desenvolvido com base nos resultados obtidos a partir da análise de correlação e regras estatísticas. A fase final tratou da avaliação de três preditores inteligentes, LR, MLP e CMLP em termos de taxa de predição e MSE, e os resultados obtidos mostraram que LR é insuficiente no desenvolvimento de sistemas de rastreamento solar de eixo duplo e altas taxas de predição foram obtidas para preditores MLP e CMLP com três camadas ocultas. No entanto, o CMLP tem os melhores resultados para sistemas de rastreamento solar de eixo único e duplo.

Um sistema de rastreamento solar de eixo único foi proposto e demonstrado por [Thang et al. \(2021\)](#) baseado em um controlador automático fuzzy logic (FLC) que encontra a melhor posição dos painéis solares correspondente à posição do Sol. O controlador de lógica difusa neste trabalho utilizou duas entradas, erro e soma, para gerar uma saída que foi alimentada no atuador linear, que mudaria o ângulo de inclinação do painel solar. Para avaliar o desempenho do sistema proposto, uma simulação foi realizada usando o software MATLAB/Simulink, e os resultados obtidos mostraram que o sistema proposto pode funcionar efetivamente em condições normais e nubladas. No entanto, a pesquisa não implementou nenhum sistema de rastreamento solar.

Vários modelos inteligentes têm sido utilizados para controlar e aumentar a eficiência de diferentes sistemas de rastreamento solar; no entanto, a lógica fuzzy é o modelo mais utilizado para controlar vários sistemas de rastreamento solar desenvolvidos devido à sua simplicidade e ampla gama de aplicações, e os resultados obtidos mostraram que a lógica fuzzy pode efetivamente aumentar a eficiência do sistema de rastreamento solar, quando comparado com outros esquemas como PID e sistemas de painéis solares fixos. Na a [Tabela 2.2](#), pode-se ver que, entre todos os outros modelos e esquemas, a lógica fuzzy tem sido amplamente utilizada para controlar vários sistemas de rastreamento solar, tanto para sistemas de rastreamento solar de eixo único quanto para sistemas de rastreamento solar

de eixo duplo, e os resultados de vários estudos de pesquisa mostraram que ela melhora o desempenho geral. Além disso, pode-se observar que nenhum modelo foi aplicado para controlar os sistemas de rastreamento solar utilizando a arquitetura de redes neurais recorrentes Long Short-Term Memory (LSTM). Segundo [Yu et al. \(2019\)](#), as redes neurais recorrentes (RNNs) têm sido amplamente adotadas em áreas de pesquisa relacionadas a dados sequenciais. No entanto, RNNs são incapazes de aprender informações relevantes dos dados de entrada quando o intervalo de entrada é grande. Desde a introdução das redes LSTM, quase todos os resultados empolgantes baseados em RNNs foram alcançados pelo LSTM. De acordo com [Sherstinsky \(2020\)](#), LSTM tornou-se o foco do aprendizado profundo. Esse trabalho procura preencher essa lacuna, neste sentido, foca-se na criação de um modelo computacional para controlar um sistema de rastreamento solar baseado na arquitetura de redes neurais recorrentes LSTM.

Tabela 2.2: Taxonomia do Modelo Baseado em Aprendizagem para Sistemas de Rastreamento Solar. Fonte: Autor.

Pesquisa	Eixo	ANFIS	R. Logística	MLP	L. Difusa	ANN	R. Linear
Ataei et al. (2011)	duplo				x		
Batayneh, Owais e Nairoukh (2013)	duplo				x	x	
Abadi, Soeprijanto e Musyafa (2014)	único				x		
Zakariah, Jamian e Yunus (2015)	duplo				x		
Racharla, Rajan e Kumar (2015)	único				x		
Uebari et al. (2016)	duplo				x		
Huang, Pan e Lin (2016)	duplo				x		
Kiyak e Gol (2016)	único				x		
Away et al. (2018)	duplo				x		
Cruz-Alejo, Antonio-Méndez e Salazar-Pereyra (2019)	duplo				x		
Lehloka, Swart e Hertzog (2020)	duplo				x		x
Toylan (2020)	duplo				x		
Faraji et al. (2020)	duplo			x			
AL-Rousan, Mat Isa e Mat Desa (2020)	simples e duplo	x					
Khadka et al. (2020)	duplo				x		
AL-Rousan et al. (2021)	simples e duplo		x	x			
AL-Rousan, Isa e Desa (2021)	simples e duplo		x	x			
Thang et al. (2021)	único				x		

Projeto e desenvolvimento da pesquisa

Para o desenvolvimento do modelo computacional foi necessário construir um sistema seguidor solar de dois eixos em ambiente simulado. Essa etapa foi necessária para construção do *dataset* que serviu como base de treinamento para o modelo computacional baseado em aprendizado profundo. Para programar o movimento dos painéis, foi utilizado o algoritmo desenvolvido em [Mustafa et al. \(2018\)](#), que representa os algoritmos que operam rastreando a angulação de máxima incidência de irradiação solar em tempo real, com auxílio de sensores de luminosidade acoplados a estrutura dos painéis fotovoltaicos. De acordo com [Kabalcı e Calpbıncı \(2020\)](#), esse tipo de algoritmo promove uma maior eficiência energética, pois opera em malha fechada, proporcionando menores erros de regime permanente na orientação dos painéis fotovoltaicos. A Figura 3.1, ilustra o circuito do rastreamento solar desenvolvido no *Software Proteus*.

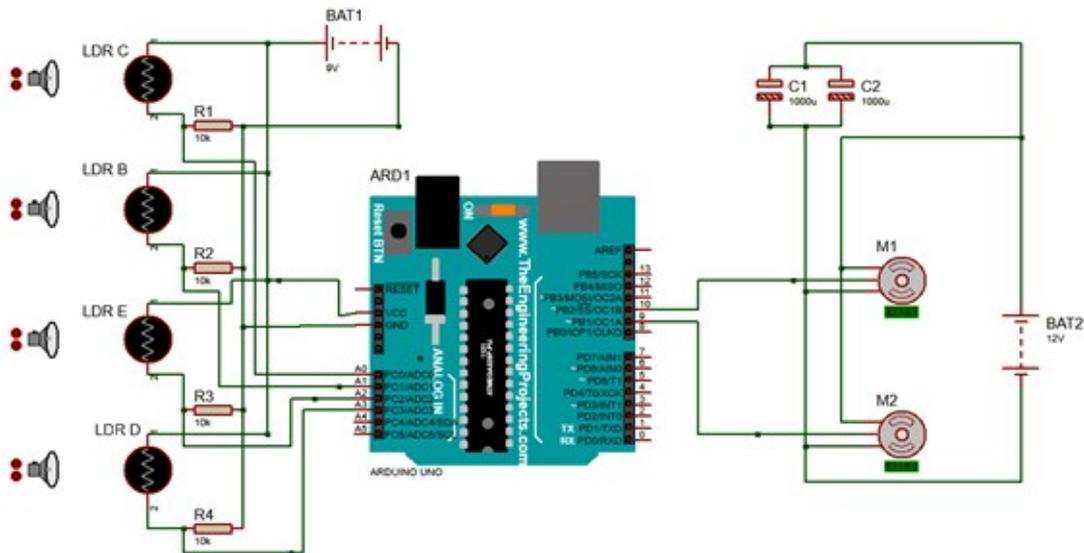


Figura 3.1: Circuito do rastreamento solar.

Fonte: Autor.

[Mustafa et al. \(2018\)](#) utilizam um sensor com formato de pirâmide de base quadrada, contendo quatro faces, no qual cada face contém um Light Dependent Resistor (LDR). Os autores aplicaram um controle clássico proporcional em cada eixo, implementado por meio de circuitos analógicos, que tem como entrada a diferença de luminosidade entre os LDRs dispostos em cada eixo. Se um dos LDR obtiver mais intensidade de luz do que os outros, a diferença de tensão do nó será recebida como sinal analógico no canal ADC (conversor analógico para digital), e gerarão um sinal lógico para acionar o motor para mover o rastreador para uma posição onde a luz igual está sendo iluminada no par

de LDRs. Os sensores geram sinal lógico para azimute, bem como ângulos de altitude e rotação do motor no sentido horário ou anti-horário. Se todos os quatro LDRs forem igualmente iluminados, então os sinais analógicos de tensão recebidos no canal ADC do microcontrolador terão valores iguais e o microcontrolador não gerará nenhum sinal lógico para acionar os motores. A Figura 3.2 apresenta o diagrama de blocos do projeto do sistema.

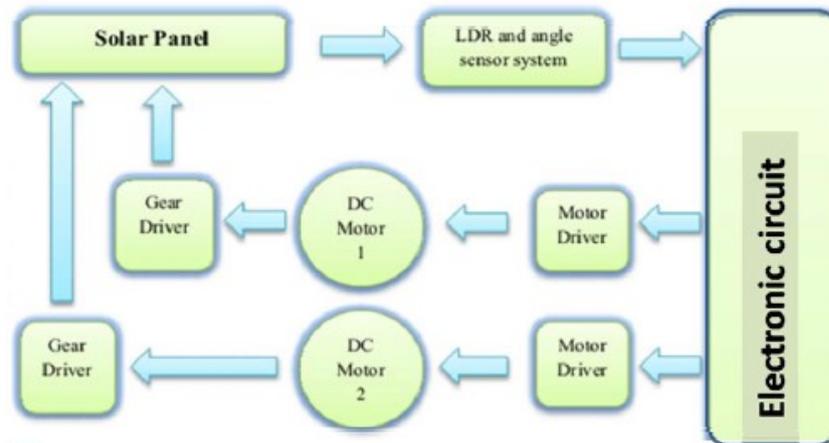


Figura 3.2: Diagrama de blocos do projeto do sistema.

Fonte: Mustafa et al. (2018)

A Figura 3.3 apresenta o processo de aprendizado de máquina implementado no modelo computacional. O processo inicia a partir da leitura dos dados brutos armazenados no *dataset*. Logo em seguida, vem a etapa de pré-processamento que consiste em adequar e formatar os dados, ou seja, esses dados estão em formato de texto e queremos passá-los para formato numérico. Além disso, nessa etapa ocorre a normalização dos dados, o objetivo da normalização é mudar os valores das colunas numéricas no conjunto de dados para usar uma escala comum, sem distorcer as diferenças nos intervalos de valores nem perder informações. Depois que os dados foram tratados na etapa anterior, avançamos para o processo de treinamento do algoritmo de aprendizagem, nesse momento, o *dataset* sofre uma divisão gerando dois outros conjuntos de dados: 70% reservados para o treinamento do modelo e 30% destinados à etapa de teste (avaliação do modelo). O modelo treinado deve ser avaliado para que seja possível prever sua precisão em uso. Após a avaliação do modelo, caso o desempenho esperado não tenha sido alcançado, faz-se necessário aperfeiçoar o modelo.

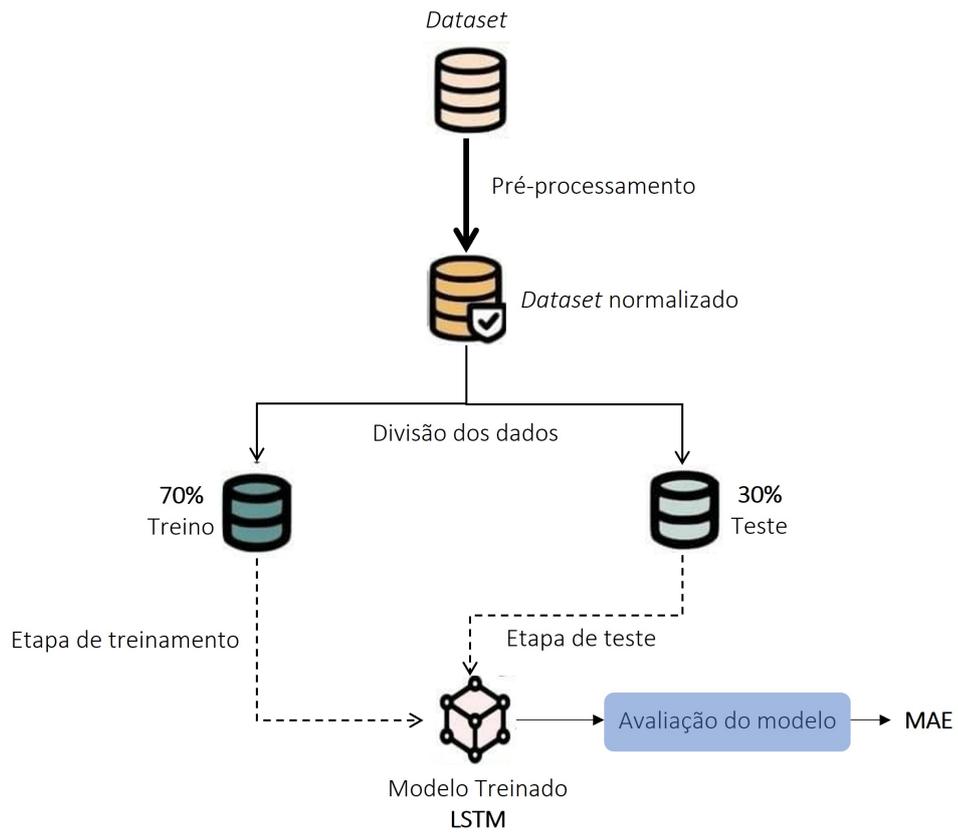


Figura 3.3: Processo de aprendizado de máquina do modelo.
 Fonte: Autor.

3.1 Preparação de dados

Os dados para criação do *dataset* foram capturados a partir do ambiente de simulação do sistema de rastreamento solar. Para construção do modelo foram utilizados 2000 (duas mil) instâncias de dados composto por 6 (seis) atributos, ilustrados na Figura 3.4.

LDR_B	LDR_C	LDR_D	LDR_E	M1	M2
54	579	54	54	88	90
54	716	54	54	87	90
54	716	54	54	86	90
54	716	54	54	85	90

Figura 3.4: Composição dos dados do *dataset*.
 Fonte: Autor.

O *dataset* foi elaborado no formato de arquivo CSV (*comma-separated values*), os valores dos LDR's representados nos atributos: LDR B, LDR C, LDR D, e LDR E. Já os dados dos motores estão representados nos atributos: M1 e M2.

Segundo [Witten, Frank e Hall \(2016\)](#), algoritmos de aprendizado de máquina funcionam melhor quando as variáveis de entrada numérica são dimensionadas para um intervalo padrão. Os modelos de aprendizado de máquina aprendem um mapeamento de variáveis de entrada para uma variável de saída. Assim, a escala e a distribuição dos dados retirados do domínio podem ser diferentes para cada variável. De acordo com [Max e Kjell \(2019\)](#), dimensionar variáveis de entrada e saída é uma etapa crítica no uso de modelos de rede neural. Nesse sentido, pode ser uma boa ideia dimensionar a variável de destino para problemas de modelagem preditiva de regressão para facilitar o aprendizado do problema, principalmente no caso de modelos de rede neural. Uma variável de destino com uma grande dispersão de valores, por sua vez, pode resultar em grandes valores de gradiente de erro, fazendo com que os valores de peso mudem drasticamente, tornando o processo de aprendizado instável. O dataset foi normalizado no intervalo [0,1] e o resultado pode ser observado na Figura 3.5.

0	1	2	3	4	5
0	0.719565	0	0	0.365385	0.258621
0	0.719565	0	0	0.355769	0.258621
0	0.719565	0	0	0.346154	0.258621
0	0.818478	0	0	0.336538	0.258621

Figura 3.5: *Dataset* normalizado.

Fonte: Autor.

3.2 Modelo computacional

Para a construção do modelo computacional utilizou-se a arquitetura de rede neural recorrente LSTM. A Figura 3.6 ilustra a composição do modelo, onde temos duas camadas LSTM seguidas por camadas de *Dropout* e uma camada *Dense* formada por dois neurônios representando as saídas do modelo (dados dos motores M1 e M2). Segundo [Hinton et al. \(2012\)](#), esta técnica reduz co-adaptações complexas de neurônios, já que um neurônio não pode confiar na presença de outros neurônios em particular. É, portanto, forçado a aprender recursos mais robustos que são úteis em conjunto com muitos subconjuntos aleatórios diferentes dos outros neurônios. As camadas de dropout têm sido o método ideal para reduzir o *overfitting* de redes neurais. As redes neurais profundas têm arquiteturas diferentes, às vezes rasas, às vezes muito profundas, tentando generalizar no conjunto de dados fornecido. Mas, nessa busca de se esforçar demais para aprender diferentes recursos do conjunto de dados, às vezes eles aprendem o ruído estatístico no conjunto de dados.

Isso definitivamente melhora o desempenho do modelo no conjunto de dados de treinamento, mas falha enormemente em novos pontos de dados (conjunto de dados de teste). Esse é o problema do *overfitting*.

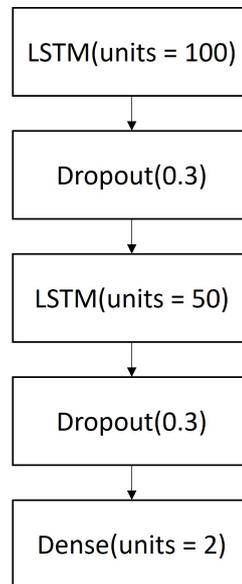


Figura 3.6: Arquitetura da rede neural utilizada.

Fonte: Autor.

3.3 Método de avaliação dos resultados

Uma rede neural de aprendizado profundo aprende a mapear um conjunto de entradas para um conjunto de saídas de dados de treinamento. Não podemos calcular os pesos perfeitos para uma rede neural; há muitas incógnitas. Em vez disso, o problema de aprendizado é lançado como um problema de busca ou otimização e um algoritmo é usado para navegar no espaço de possíveis conjuntos de pesos que o modelo pode usar para fazer previsões boas ou boas o suficiente. Normalmente, um modelo de rede neural é treinado usando o algoritmo estocástico de otimização de gradiente descendente e os pesos são atualizados usando o algoritmo de retropropagação de erro (IAN; YOSHUA; AARON, 2016). O gradiente na descida do gradiente refere-se a um gradiente de erro. O modelo com um determinado conjunto de pesos é usado para fazer previsões e o erro dessas previsões é calculado. O algoritmo de descida do gradiente procura alterar os pesos para que a próxima avaliação reduza o erro, significando que o algoritmo de otimização está navegando para baixo no gradiente (ou inclinação) do erro.

No contexto de um algoritmo de otimização, a função usada para avaliar uma solução candidata (ou seja, um conjunto de pesos) é chamada de função objetivo. Segundo Ian, Yoshua e Aaron (2016), podemos tentar maximizar ou minimizar a função objetivo, o que significa que estamos procurando uma solução candidata que tenha a pontuação mais alta

ou mais baixa, respectivamente. Normalmente, com redes neurais, procuramos minimizar o erro. Como tal, a função objetivo é muitas vezes referida como uma função de custo ou uma função de perda e o valor calculado pela função de perda é referido simplesmente como "perda" (do inglês *loss*). No caso de problemas de regressão em que uma quantidade é prevista, é comum usar a função de perda *Mean absolute error* (IAN; YOSHUA; AARON, 2016). Nesse sentido, para avaliar o modelo computacional, utilizou-se a métrica *Mean absolute error* para medir e analisar os erros que ele apresenta, ou seja, vamos comparar x e y (x real e Y previsto, respectivamente) e dar atenção à esses resíduos.

O *mean absolute error* (MAE) é um parâmetro básico de precisão que calcula a magnitude média dos erros dos resultados de previsão. Ele fornece as diferenças numéricas entre os valores reais e previstos. Em estatísticas, o MAE é uma quantidade usada para medir o quão próximas as previsões estão dos resultados finais (USHA; BALAMURUGAN, 2016). É definido pela seguinte equação 3.1:

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_i - y_i| \quad (3.1)$$

Avaliação e resultados experimentais

Neste capítulo serão apresentados o desempenho do modelo computacional baseado em aprendizado de máquina profundo para controlar um sistema de rastreamento solar de dois eixos. O computador utilizado para a execução do modelo computacional possui um processador 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11800H @ 2.30GHz 2.30 GHz. 16,0 GB de RAM. Placa de vídeo NVIDIA GeForce RTX 3060, 6GB de memória dedicada, e o sistema operacional Windows 11 Pro. Para o desenvolvimento do modelo foi utilizado o *software Spyder Python 3.10* e o Keras versão 2.6.0. O modelo foi configurado com o otimizador Adam¹. Segundo Kingma e Ba (2015), o método é computacionalmente eficiente, requer pouca memória, invariante ao reescalonamento diagonal de gradientes e é adequado para problemas que são grandes em termos de dados/parâmetros. Parâmetros *default* do otimizador Adam:

- *learning rate*: A taxa de aprendizado. O padrão é 0,001.
- *beta 1*: A taxa de decaimento exponencial para as estimativas de 1^o momento. O padrão é 0,9.
- *beta 2*: A taxa de decaimento exponencial para as estimativas do segundo momento. O padrão é 0,999.
- *ema momentum*: Termo *momentum*. O padrão é 0,99.

Segundo Kingma e Ba (2015), a função de ativação linear é usada para fazer previsões sobre dados de regressão, contudo, como o *dataset* foi normalizado [0,1], avaliamos o modelo utilizando três funções de ativação: linear (por recomendação da literatura), tangente hiperbólica e a sigmoid, pois ela trabalha com valores de saída entre 0 e 1. Para ambas avaliações o número de épocas de treinamento utilizado foi 500. O *dataset* foi dividido em 70% dos dados para treinamento e 30% para avaliação do modelo.

4.1 Função de ativação sigmoid

A Figura 4.1 apresenta o gráfico de perda nos conjuntos de dados de treinamento e teste utilizando a função de ativação sigmoid. Pode-se observar que a perda de treinamento e a perda de teste (validação) diminuem e se estabilizam indicando um bom modelo.

¹A otimização de Adam é um método de descida de gradiente estocástico baseado na estimativa adaptativa de momentos de primeira e segunda ordem.

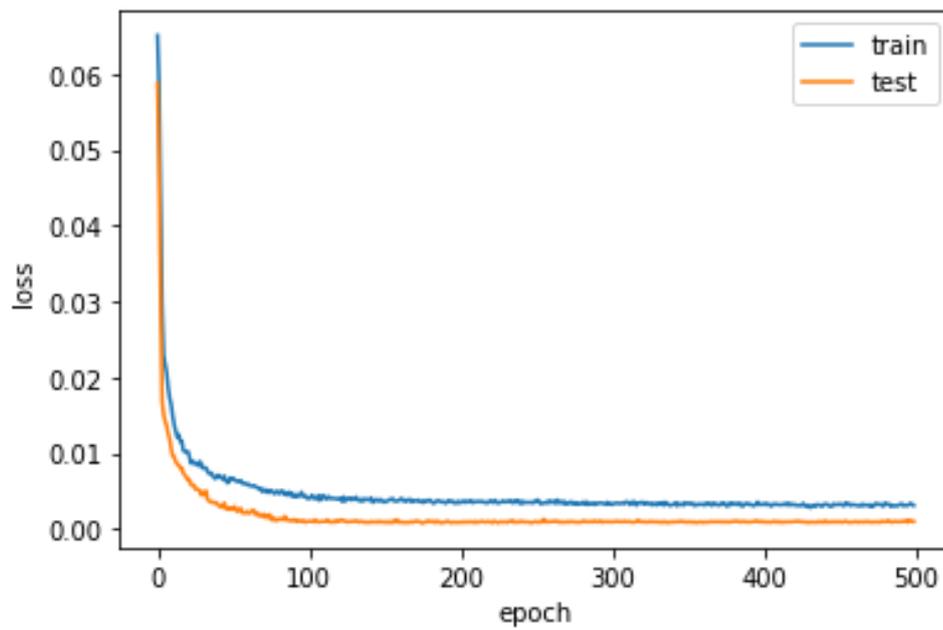


Figura 4.1: Perda nos conjuntos de dados de treinamento e teste.

Fonte: Autor.

A Figura 4.2 temos o gráfico de dispersão de erros para o modelo gerado utilizando a função de ativação sigmoid. É possível analisar os erros, ou seja, a diferença entre os valores atuais e previstos.

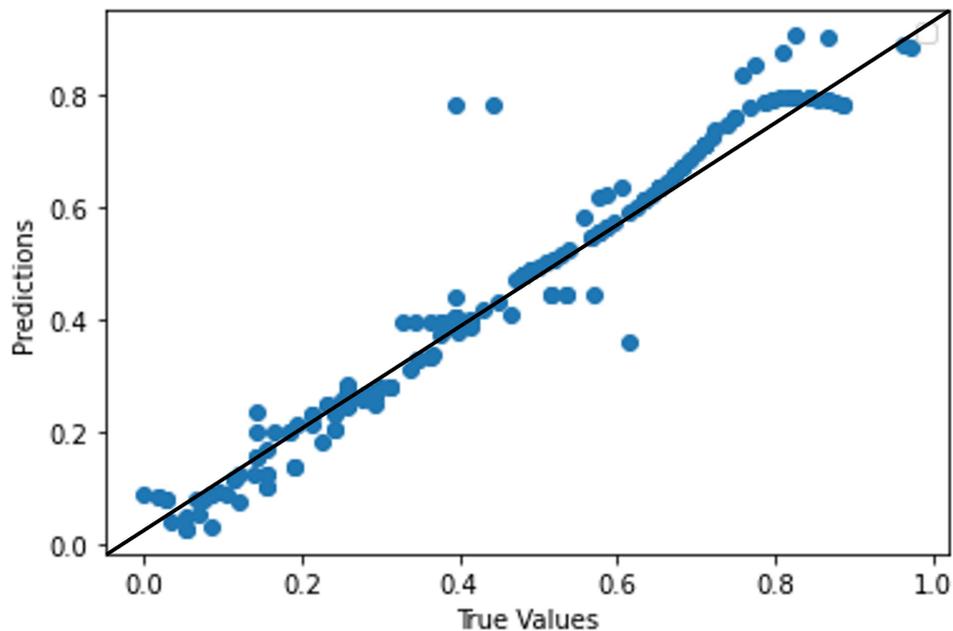


Figura 4.2: Gráfico de dispersão de erros.

Fonte: Autor.

O algoritmo de regressão tenta encontrar a melhor linha para prever a resposta como uma função das variáveis preditoras. Desta maneira, o gráfico de dispersão de erros (4.2) mostra que a maioria dos erros nos valores previstos estão muito próximos de uma reta de 45°, que representa os valores originais da variável dependente. Cada ponto em forma no gráfico representa uma previsão e quanto mais próximo da linha reta o erro é menor. O MAE para essas previsões foi: 0.02, ou seja, o erro médio do ângulo do eixo (em graus) entre as previsões e os valores reais neste conjunto de dados é 0.02, indincando um bom modelo.

4.2 Função de ativação linear

A Figura 4.3 apresenta o gráfico de perda nos conjuntos de dados de treinamento e teste utilizando a função de ativação linear. Pode-se observar que a perda de treinamento e a perda de teste diminuem, estabilizam e se aproximam indincando um bom modelo.

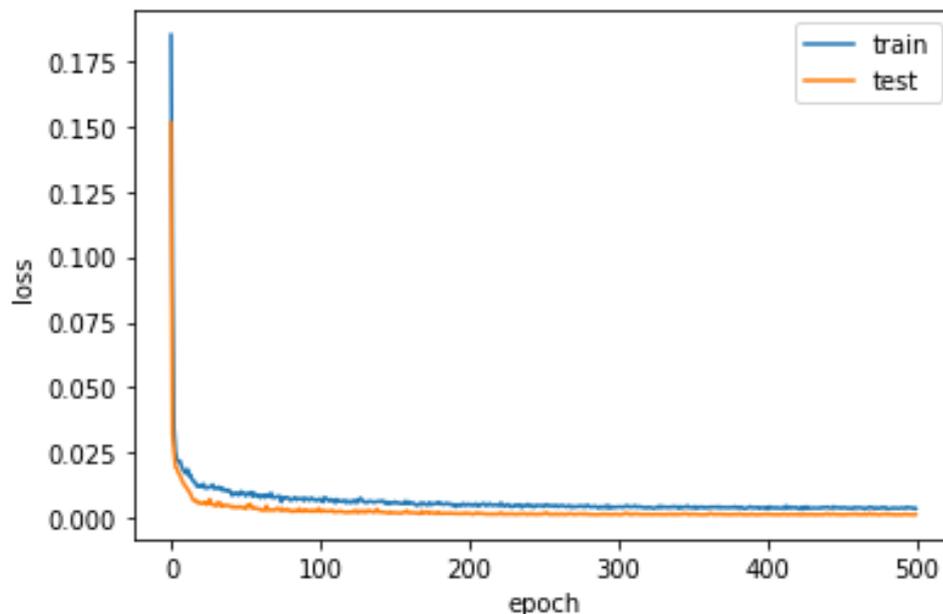


Figura 4.3: Perda nos conjuntos de dados de treinamento e teste.

Fonte: Autor.

A Figura 4.4 temos o gráfico de dispersão de erros para o modelo gerado utilizando a função de ativação linear. É possível analisar os erros, ou seja, a diferença entre os valores atuais e previstos. O MAE para essas previsões foi: 0.03, ou seja, o erro médio do ângulo do eixo (em graus) entre as previsões e os valores reais neste conjunto de dados é 0.03, indincando um bom modelo.

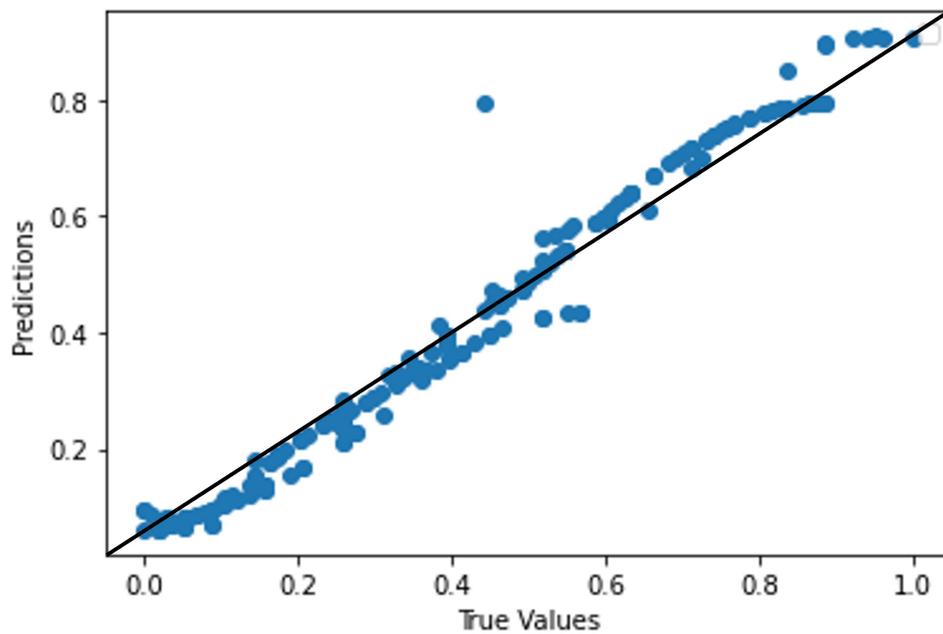


Figura 4.4: Gráfico de dispersão de erros.

Fonte: Autor.

4.3 Função de ativação tangente hiperbólica

A Figura 4.5 apresenta o gráfico de perda nos conjuntos de dados de treinamento e teste utilizando a função de ativação tangente hiperbólica. Pode-se observar que a perda de treinamento e a perda de teste diminuem, estabilizam e se aproximam indicando um bom modelo.

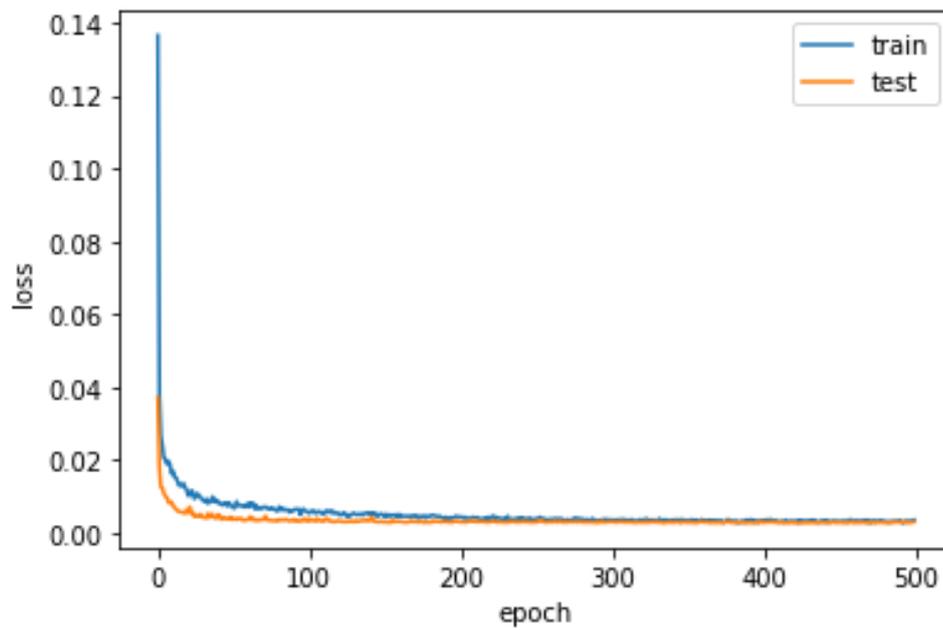


Figura 4.5: Perda nos conjuntos de dados de treinamento e teste.

Fonte: Autor.

A Figura 4.6 temos o gráfico de dispersão de erros para o modelo gerado utilizando a função de ativação tangente hiperbólica. É possível analisar os erros, ou seja, a diferença entre os valores atuais e previstos. O MAE para essas previsões foi: 0.02, ou seja, o erro médio do ângulo do eixo (em graus) entre as previsões e os valores reais neste conjunto de dados é 0.02, indicando um bom modelo.

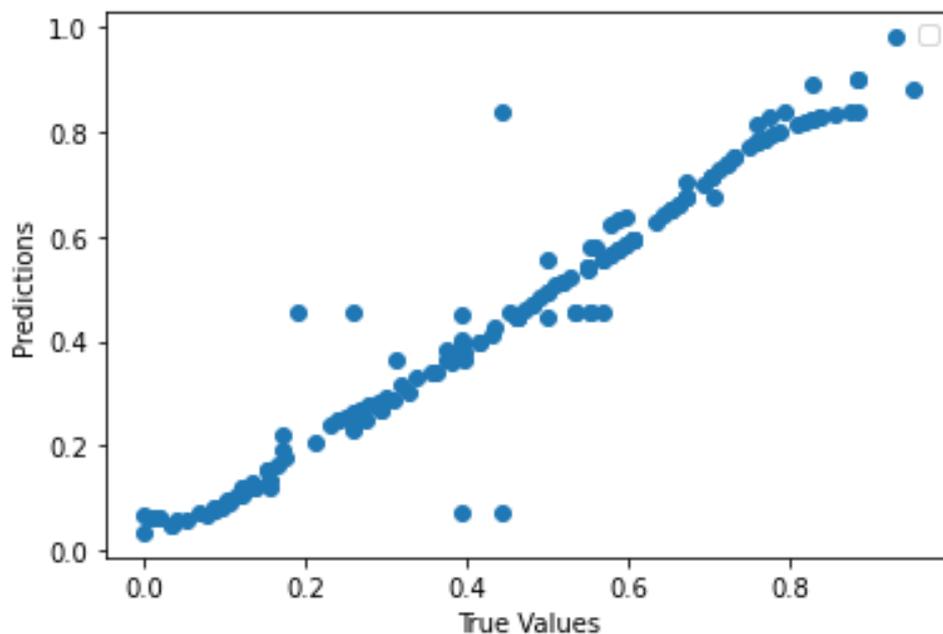


Figura 4.6: Gráfico de dispersão de erros.

Fonte: Autor.

A Tabela 4.1 apresenta os valores do erro absoluto médio e valor o da função de perda (val_loss) por função de ativação. O MAE nos diz o tamanho do erro que podemos esperar da previsão em média. Observa-se que a diferença é relativamente pequena 0.01, o que sugere uma conclusão que os três modelos obtiveram bons resultados, contudo, o modelo baseado na função de ativação tangente hiperbólica apresentou o melhor resultado.

Tabela 4.1: Erro absoluto médio e valor da função de perda por função de ativação. Fonte: Autor.

Função de ativação	MAE	val_loss
linear	0.03	0.0026
sigmoid	0.02	0.0036
tangente hiperbólica	0.02	0.0020

A utilização do modelo computacional para controle de sistemas de rastreamento solar de eixo duplo para melhorar a eficiência da geração de energia em painéis fotovoltaicos se apresenta como uma alternativa a ser utilizada. O algoritmo LSTM gerou um resultado apropriado, que pode ser utilizado como base para o controle em malha fechada de sistemas em FVs.

Considerações finais

5.1 Conclusões

A ideia principal do uso de células fotovoltaicas é produzir energia elétrica a partir da energia solar. Essa energia pode ser usada em muitas aplicações, como aquecimento, iluminação e/ou operação de diversos dispositivos. Maior eficiência de tal sistema pode ser alcançada quando a luz do sol é perpendicular à superfície do painel solar fotovoltaico, conseqüentemente, a máxima energia elétrica possível pode ser produzida. Um sistema de rastreamento solar é um sistema de controle que consiste em vários sensores que verificam se a luz do sol está perpendicular ao painel fotovoltaico ou não, e um controlador que dá sinais a um ou mais atuadores para mover o painel para a posição correta. Nesse sentido, vários estudos têm sido focados em melhorar o desempenho dos sistemas de rastreamento solar.

Neste trabalho, um modelo computacional para controle de sistemas de rastreamento solar de eixo duplo com utilização de técnicas de aprendizado profundo baseado em rede neural recorrente utilizando arquitetura LSTM é apresentado. O modelo computacional consiste em um painel fotovoltaico que pode ser posicionado usando dois atuadores. O modelo depende da saída dos quatro LED's que atuam como sensores fixados no painel em quatro locais diferentes. O modelo recebe entradas desses sensores e realiza rastreamento contínuo para maximizar a eficiência do sistema. O modelo foi treinado para prever os valores de posicionamento de dois motores. O erro médio absoluto para as previsões foi de 0.02 quando o modelo utilizou a função de ativação sigmode e tangente hiperbolica, e de 0.03 quando o modelo utilizou a função de ativação linear, indicando que erro médio do ângulo do eixo (em graus) do modelo entre as previsões e os valores reais varia de 0.02 a 0.03.

5.2 Contribuições

As principais contribuições desta pesquisa são:

- Desenvolvimento de um sistema de controle de rastreamento solar de eixo duplo em ambiente de simulação para geração de *dataset* para treinamento de modelos de regressão baseado em aprendizado de máquina.

- Desenvolvimento de algoritmo de predição de aprendizado profundo utilizando arquitetura de rede neural recorrente (LSTM) para controle de sistemas de rastreamento solar de eixo duplo.
- Avaliação de desempenho de diferentes funções de ativação de modo a determinar a metodologia mais eficiente para a solução do problema.

5.3 Atividades Futuras de Pesquisa

Como proposta de atividade futura desta pesquisa, sugere-se a instrumentação do sistema em FV real para avaliar a eficiência do modelo em um ambiente operacional. A abordagem adotada utilizou dados de um ambiente simulado.

Uma possível proposta de continuidade dessa pesquisa seria a possibilidade de avaliar os recursos de *hardware* de computação, por exemplo: CPU, GPU, unidade de armazenamento, memória RAM, necessários para implementação do modelo computacional em ambiente industrial.

Outra proposta de atividade futura, seria a introdução de dados astronômicos, ou seja, o algoritmo utiliza dados da localização geográfica para determinar o ângulo de azimute e altitude do sol, informações que serão utilizadas no algoritmo para o cálculo do movimento dos painéis

Referências Bibliográficas

- ABADI, I.; SOEPRIJANTO, A.; MUSYAFA, A. Design of single axis solar tracking system at photovoltaic panel using fuzzy logic controller. *IET*, 2014.
- ABDULRAHMAN, A.; HAMOUD, A.; AL-NEHARI, A.; ALMAKHLAFY, M. Design and implementation of solar tracking system. *International Journal of Engineering and Technical Research*, v. 4, n. 1, 2016.
- ACAPOVI, A.; ASABERE, N. Y.; SUNNY, D. B. Low cost two-axis automatic solar tracking system. *Commun. Appl. Electron*, Citeseer, v. 3, n. 8, p. 46–53, 2015.
- AKBAR, H. S.; FATHALLAH, M. N.; RAOOF, O. O. Efficient single axis sun tracker design for photovoltaic system applications. *IOSR J. Appl. Phys*, v. 9, p. 53–60, 2017.
- AL-ROUSAN, N.; ISA, N. A. M.; DESA, M. K. M. Correlation analysis and mlp/cmlp for optimum variables to predict orientation and tilt angles in intelligent solar tracking systems. *International Journal of Energy Research*, v. 45, n. 1, p. 453–477, 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.5676>><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.5676>.
- AL-ROUSAN, N.; ISA, N. A. M.; DESA, M. K. M.; AL-NAJJAR, H. Integration of logistic regression and multilayer perceptron for intelligent single and dual axis solar tracking systems. *International Journal of Intelligent Systems*, v. 36, n. 10, p. 5605–5669, 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/int.22525>><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/int.22525>.
- AL-ROUSAN, N.; Mat Isa, N. A.; Mat Desa, M. K. Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, v. 32, n. 7, p. 459–469, 2020. ISSN 1018-3639. Photovoltaic Materials, Devices and Systems. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363920302233>><https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363920302233>.
- ALI, F. B. et al. Design and implementation of a time-based sun tracking solar system. In: AIP PUBLISHING. *AIP Conference Proceedings*. [S.l.], 2021. v. 2327, n. 1.
- AMELIA, A. et al. Technologies of solar tracking systems: A review. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.], 2020. v. 767, n. 1, p. 012052.

- ANGULO, M.; DÍAZ-PONCE, A.; VALENTÍN, L.; VALDIVIA, R.; KESHTKAR, S. Design and control of a passive solar tracking system using a sky imager. In: SPRINGER. *Industrial and Robotic Systems: LASIRS 2019*. [S.l.], 2020. p. 170–178.
- ATAEI, E.; AFSHARI, R.; POURMINA, M. A.; KARIMIAN, M. R. Design and construction of a fuzzy logic dual axis solar tracker based on dsp. In: IEEE. *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation*. [S.l.], 2011. p. 185–189.
- AUNG, E. E. Single axis solar tracking system. *Int. J. Sci. Eng. Appl*, v. 8, p. 283–286, 2019.
- AWAD, S. R.; JBAAR, M. A. A.; ABDULLAH, M. A. Efficient and low-cost arduino based solar tracking system. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.], 2020. v. 745, n. 1, p. 012016.
- AWAD, S. R.; JBAAR, M. A. A.; ABDULLAH, M. A. M. Efficient and low-cost arduino based solar tracking system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, v. 745, n. 1, p. 012016, feb 2020. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012016>><https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012016>.
- AWASTHI, A. et al. Review on sun tracking technology in solar pv system. *Energy Reports*, v. 6, p. 392–405, 2020. ISSN 2352-4847. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719304780>><https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719304780>.
- AWAY, Y.; RAHMAN, A.; AULIANDRA, T. R.; FIRDAUS, M. Performance comparison between pid and fuzzy algorithm for sun tracker based on tetrahedron geometry sensor. In: IEEE. *2018 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICELTICs)*. [S.l.], 2018. p. 40–44.
- BALAJI, B.; ARULVIZHI, J. Maximum solar power tracker mechanically by using dual axis tracker. Citeseer, 2017.
- BAOUCHE, F. Z. et al. Design and simulation of a solar tracking system for pv. *Applied Sciences*, MDPI, v. 12, n. 19, p. 9682, 2022.
- BATAYNEH, W.; OWAIS, A.; NAIROUKH, M. An intelligent fuzzy based tracking controller for a dual-axis solar pv system. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 29, p. 100–106, 2013.
- BAWA, D.; PATIL, C. Fuzzy control based solar tracker using arduino uno. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, v. 2, n. 12, p. 179–187, 2013.
- BESTION, D. The structure of system thermal-hydraulic (sys-th) code for nuclear energy applications. In: *Thermal-Hydraulics of Water Cooled Nuclear Reactors*. [S.l.]: Elsevier, 2017. p. 639–727.

- BRITO, M. C. et al. Passive solar tracker based in the differential thermal expansion of vertical strips. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, AIP Publishing LLC, v. 11, n. 4, p. 043701, 2019.
- CHIN, C.; BABU, A.; MCBRIDE, W. Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using matlab/simulink. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 36, n. 11, p. 3075–3090, 2011.
- CHOUDHARY, P.; SRIVASTAVA, R. K. Sustainability perspectives-a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 227, p. 589–612, 2019.
- CHOWDHURY, M. E.; KHANDAKAR, A.; HOSSAIN, B.; ABOUHASERA, R. A low-cost closed-loop solar tracking system based on the sun position algorithm. *Journal of Sensors*, Hindawi, v. 2019, 2019.
- CLIFFORD, M.; EASTWOOD, D. Design of a novel passive solar tracker. *Solar Energy*, Elsevier, v. 77, n. 3, p. 269–280, 2004.
- CRUZ-ALEJO, J. D. L.; ANTONIO-MÉNDEZ, R.; SALAZAR-PEREYRA, M. Fuzzy logic control on fpga for two axes solar tracking. *Neural Computing and Applications*, Springer, v. 31, n. 7, p. 2469–2483, 2019.
- DAS, A.; DURGAPRASAD, S. Simulation and implementation of single axis solar tracker. *Simulation*, v. 7, n. 05, 2020.
- DEEKSHITH, K.; ARAVIND, D.; NAGARAJU, H.; REDDY, B. Solar tracking system. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 6, n. 9, p. 994–999, 2015.
- El Hammoumi, A.; CHTITA, S.; MOTAHHIR, S.; El Ghzizal, A. Solar pv energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of pv systems: A focus on solar trackers and floating solar panels. *Energy Reports*, v. 8, p. 11992–12010, 2022. ISSN 2352-4847. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722017784>><https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722017784>.
- FARAJI, J. et al. Fast-accurate dual-axis solar tracker controlled by po technique with neural network optimization. In: *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- FERDAUS, R. A.; MOHAMMED, M. A.; RAHMAN, S.; SALEHIN, S.; MANNAN, M. A. Energy efficient hybrid dual axis solar tracking system. *Journal of Renewable Energy*, Hindawi, v. 2014, 2014.

- GHOSH, J.; DEY, N.; DAS, P. Active solar tracking system using node mcu. In: IEEE. *2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. [S.l.], 2019. p. 924–928.
- GUPTA, P.; GUPTA, V.; SHARMA, M.; PACHAURI, R. K.; AKHTAR, J. Design and performance analysis of three axis solar tracking system. In: IEEE. *2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. [S.l.], 2022. p. 1876–1880.
- GUPTA, S. Maximum sunlight tracking using single axis solar panel prototype with simulation. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, v. 8, n. 7, p. 221–225, 2019.
- HAFEZ, A.; YOUSEF, A.; HARAG, N. Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 91, p. 754–782, 2018.
- HAIDER, M. R. et al. Design and implementation of three-axis solar tracking system with high efficiency. In: IEEE. *2021 International Conference on Information and Communication Technology for Sustainable Development (ICICT4SD)*. [S.l.], 2021. p. 1–5.
- HAMMOUMI, A. E.; MOTAHHIR, S.; GHIZAL, A. E.; CHALH, A.; DEROUICH, A. A simple and low-cost active dual-axis solar tracker. *Energy science & engineering*, Wiley Online Library, v. 6, n. 5, p. 607–620, 2018.
- HINTON, G. E.; SRIVASTAVA, N.; KRIZHEVSKY, A.; SUTSKEVER, I.; SALAKHUTDINOV, R. Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors. *CoRR*, abs/1207.0580, 2012. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1207.0580>><http://arxiv.org/abs/1207.0580>.
- HOMYK, A.; BONE, G. A. *Automated solar tracking system*. [S.l.]: Google Patents, 2012. US Patent 8,203,070.
- HONG, T. et al. A preliminary study on the 2-axis hybrid solar tracking method for the smart photovoltaic blind. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 88, p. 484–490, 2016.
- HUANG, C.-H.; PAN, H.-Y.; LIN, K.-C. Development of intelligent fuzzy controller for a two-axis solar tracking system. *Applied Sciences*, MDPI, v. 6, n. 5, p. 130, 2016.
- Preface. In: IAN, G.; YOSHUA, B.; AARON, C. (Ed.). *Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series)*. Boston: The MIT Press, 2016. p. 800. ISBN 978-0262035613.
- INDRASARI, W. et al. Active solar tracker based on the horizon coordinate system. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2018. v. 1120, n. 1, p. 012102.

- JIANWATTANANUKUL, K.; LOCHAROENRAT, K.; LEKCHAUM, S. Design and construction of new hybrid solar tracking system. In: TRANS TECH PUBL. *Applied Mechanics and Materials*. [S.l.], 2016. v. 851, p. 510–515.
- KABALCI, E.; CALPBINICI, A. Design and implementation of control algorithms for single-axis sun tracking systems. *Journal of Power Technologies*, v. 100, n. 1, p. 32–42, 2020. ISSN 1425-1353.
- KARTHIK, K.; KUMAR, D. J. Design and implementation of high efficiency solar tracking system. In: *International conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 2, p. 2866–2870.
- KAUR, T.; MAHAJAN, S.; VERMA, S.; GAMBHIR, J. et al. Arduino based low cost active dual axis solar tracker. In: IEEE. *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. [S.l.], 2016. p. 1–5.
- KHADKA, D. B. et al. Evaluation and design of power controller of two-axis solar tracking by pid and fl for a photovoltaic module. *International Journal of Photoenergy*, v. 2020, n. 1, 2020.
- KINGMA, D. P.; BA, J. Adam: A method for stochastic optimization. In: BENGIO, Y.; LECUN, Y. (Ed.). *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015, San Diego, CA, USA, May 7-9, 2015, Conference Track Proceedings*. [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1412.6980>><http://arxiv.org/abs/1412.6980>.
- KIYAK, E.; GOL, G. A comparison of fuzzy logic and pid controller for a single-axis solar tracking system. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, Springer, v. 3, p. 1–14, 2016.
- KUTTYBAY, N. et al. Optimized single-axis schedule solar tracker in different weather conditions. *Energies*, MDPI, v. 13, n. 19, p. 5226, 2020.
- LEE, H. G. et al. Development of a hybrid solar tracking device using a gps and a photo-sensor capable of operating at low solar radiation intensity. *Journal of the Korean Physical Society*, Springer, v. 67, n. 6, p. 980–985, 2015.
- LEHLOKA, M.; SWART, J.; HERTZOG, P. A comparison of two automatic solar tracking algorithms. In: EDP SCIENCES. *E3S Web of Conferences*. [S.l.], 2020. v. 152, p. 02009.
- MAATALLAH, T.; ALIMI, S. E.; NASSRALLAH, S. B. Performance modeling and investigation of fixed, single and dual-axis tracking photovoltaic panel in monastir city, tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 15, n. 8, p. 4053–4066, 2011.

MAINDAD, N.; GADHAVE, A.; SATPUTE, S.; NANDA, B. Automatic solar panel cleaning system. In: *2nd International Conference on Communication & Information Processing (ICCIP)*. [S.l.: s.n.], 2020.

Preface. In: MAX, K.; KJELL, J. (Ed.). *Feature Engineering and Selection: A Practical Approach for Predictive Models (Chapman Hall/CRC Data Science Series) (First edition)*. First edition. Boston: Chapman and Hall/CRC, 2019. p. 314. ISBN 978-1138079229.

MOHAMMAD, N.; KARIM, T. Design and implementation of hybrid automatic solar-tracking system. *Journal of solar energy engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 135, n. 1, p. 011013, 2013.

MOHANAPRIYA, V.; MANIMEGALAI, V.; PRAVEENKUMAR, V.; SAKTHIVEL, P. Implementation of dual axis solar tracking system. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.], 2021. v. 1084, n. 1, p. 012073.

MUHAMMAD, J. Y.; JIMOH, M. T.; KYARI, I. B.; GELE, M. A.; MUSA, I. A review on solar tracking system: A technique of solar power output enhancement. *Engineering Science*, Science Publishing Group, v. 4, n. 1, p. 1–11, 2019.

MUNNA, M. S.; BHUYAN, M. A. I.; RAHMAN, K. M.; HOQUE, M. A. Design, implementation and performance analysis of a dual-axis autonomous solar tracker. In: IEEE. *2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET)*. [S.l.], 2015. p. 1–5.

MUNSHI, R. et al. Design and fabrication of microcontroller-based dual axis light-sensitive rotating solar panel. *Advances in Materials and Processing Technologies*, Taylor & Francis, v. 8, n. 1, p. 444–460, 2022.

MUSTAFA, F. I.; SHAKIR, S.; MUSTAFA, F. F.; NAIYF, A. T. Simple design and implementation of solar tracking system two axis with four sensors for baghdad city. In: IEEE. *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*. [S.l.], 2018. p. 1–5.

NADIA, A.-R.; ISA, N. A. M.; DESA, M. K. M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 82, p. 2548–2569, 2018.

NAHAR, M. J. et al. Single axis solar tracker for maximizing power production and sunlight overlapping removal on the sensors of tracker. *International Journal of Robotics and Control Systems*, v. 1, n. 2, p. 186–197, 2021.

NORI, A. F.; MOHAMMED, F. G. Design and implementation of an efficient solar tracker system. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2020. v. 1530, n. 1, p. 012150.

- ÖZER, T.; KELEK, M. M.; OĞUZ, Y.; KIVRAK, S.; ŞAHİN, M. Double axis solar tracking system design and implementation. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 9, p. 66–71, 2018.
- PATIL, A.; DHAVALIKAR, M.; DINGARE, S.; BHOJWANI, V. Design and prototyping of dual axis solar tracking system for performance enhancement of solar photo-voltaic power plant. In: EDP SCIENCES. *E3S Web of Conferences*. [S.l.], 2020. v. 170, p. 01011.
- PONNIRAN, A.; HASHIM, A.; JORET, A. A design of low power single axis solar tracking system regardless of motor speed. *International Journal of Integrated Engineering*, v. 3, n. 2, 2011.
- PONNIRAN, A.; HASHIM, A.; MUNIR, H. A. A design of single axis sun tracking system. In: IEEE. *2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference*. [S.l.], 2011. p. 107–110.
- PRAKASH, M. B.; GOVINDARAJULU, K. Analysis and testing of dual axis solar tracker for standalone pv systems using worm gear. 2022.
- PÁRAMO, O. A.; RIVERA, J. C.; LÓPEZ, G. A. Effects on electricity markets of a demand response model based on day ahead real time prices: Application to the colombian case. *IEEE Latin America Transactions*, v. 16, n. 5, p. 1416–1423, 2018.
- RACHARLA, S.; RAJAN, K. Solar tracking system—a review. *International journal of sustainable engineering*, Taylor & Francis, v. 10, n. 2, p. 72–81, 2017.
- RACHARLA, S.; RAJAN, K.; KUMAR, K. S. A fuzzy logic controlled single axis solar tracking system. In: TRANS TECH PUBL. *Applied Mechanics and Materials*. [S.l.], 2015. v. 787, p. 893–898.
- RAMBHOWAN, Y.; OREE, V. Improving the dual-axis solar tracking system efficiency via drive power consumption optimization. *Applied Solar Energy*, Springer, v. 50, p. 74–80, 2014.
- RAY, S.; TRIPATHI, A. K. Design and development of tilted single axis and azimuth-altitude dual axis solar tracking systems. In: IEEE. *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. [S.l.], 2016. p. 1–6.
- REN, H.; ORTEGA, J.; CASIMIS, D. W. Review of operating reserves and day-ahead unit commitment considering variable renewable energies: International experience. *IEEE Latin America Transactions*, v. 15, n. 11, p. 2126–2136, 2017.
- REN21, P. S. et al. Renewables 2017 global status report. *Secretariat Renewable Energy Policy Network for the*, v. 21, 2017.

ROSARIO, J. R. B. D.; DADIOS, E. Development of a fuzzy logic-based pv solar tracking system simulated using qt fuzzy engine. In: IEEE. *2014 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. [S.l.], 2014. p. 1–8.

SANCHEZ, M. M. P.; TAMAYO, D. B.; ESTRADA, R. H. C. Design and construction of a dual axis passive solar tracker, for use on yucata´ n. In: *Energy Sustainability*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 54686, p. 1341–1346.

SEME, S.; ŠTUMBERGER, B.; HADŽISELIMOVIĆ, M.; SREDENŠEK, K. Solar photovoltaic tracking systems for electricity generation: A review. *Energies*, MDPI, v. 13, n. 16, p. 4224, 2020.

SHENAWY, E. T. E.; KAMAL, M.; MOHAMAD, M. Artificial intelligent control of solar tracking system. *Journal of Applied Sciences Research*, v. 8, n. 8, p. 3971–3984, 2012.

SHERSTINSKY, A. Fundamentals of recurrent neural network (rnn) and long short-term memory (lstm) network. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, v. 404, p. 132306, 2020. ISSN 0167-2789. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167278919305974>><https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167278919305974>.

SHUFAT, S.; KURT, E.; HANÇERLIOĞULLARI, A. Modeling and design of azimuth-altitude dual axis solar tracker for maximum solar energy generation. *INTERNATIONAL JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT-IJRED*, v. 8, n. 1, 2019.

STAMATESCU, I.; STAMATESCU, G.; ARGHIRA, N.; FĂGĂRĂȘAN, I.; ILIESCU, S. S. Fuzzy decision support system for solar tracking optimization. In: IEEE. *2014 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*. [S.l.], 2014. p. 16–20.

SUBRAMANIAM, V. et al. Real time clock based energy efficient automatic dual axis solar tracking system. *Engineering Journal*, v. 22, n. 1, p. 15–26, 2018.

TAMANG, D.; ROY, O. Hybrid solar tracking system: A brief overview. In: IEEE. *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. [S.l.], 2019. p. 1–5.

THANG, L. V.; NAING, Z. M.; CUONG, N. X.; HIEU, L. D.; ANATOLII, S. Research of solar tracking controller for pv panel based on fuzzy logic control. In: *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 2696–2699.

THARAMUTTAM, J. K.; NG, A. K. Design and development of an automatic solar tracker. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 143, p. 629–634, 2017.

THUNBERG, W. *Thermal Hydraulics Simulations for Nuclear Energy*. 2022.

TOYLAN, H. Design and application of solar tracking system using optimized fuzzy logic controller by genetic algorithm. *Mugla Journal of Science and Technology*, v. 6, n. 1, p. 136–145, 2020.

UEBARI, B.; BERE, B. S.; KOMI, B.; UEBARI, S. L. Design of automatic two-axis solar tracker with fuzzy logic controller for maximum power system in nigeria. *Int. J. Innov. Sci. Eng. Technol*, v. 3, p. 329–336, 2016.

USHA, T.; BALAMURUGAN, S. A. A. Seasonal based electricity demand forecasting using time series analysis. *Circuits and Systems*, Scientific Research Publishing, v. 7, n. 10, p. 3320–3328, 2016.

USTA, M. A.; AKYAZI, Ö.; ALTAŞ, İ. H. Design and performance of solar tracking system with fuzzy logic controller used different membership functions. In: IEEE. *2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. [S.l.], 2011. p. II–381.

WANG, J.-M.; LU, C.-L. Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International (MDPI), v. 13, n. 3, p. 3157–3168, 2013.

WICAKSONO, D.; MUSAFI, A. Design and implementation of dual axis solar tracker pv to increase cleaning robot operating time. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2019. v. 1376, n. 1, p. 012022.

Preface. In: WITTEN, I. H.; FRANK, E.; HALL, M. A. (Ed.). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (Fourth Edition)*. Fourth edition. Boston: Morgan Kaufmann, 2016, (The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems). p. 654. ISBN 978-0128042915.

WU, Y. E.; HUANG, K. C. Design and implementation of dual-axis solar tracking system with gsm fault reporting capability. In: TRANS TECH PUBL. *Advanced Materials Research*. [S.l.], 2013. v. 724, p. 43–51.

YU, Y.; SI, X.; HU, C.; ZHANG, J. A Review of Recurrent Neural Networks: LSTM Cells and Network Architectures. *Neural Computation*, v. 31, n. 7, p. 1235–1270, 07 2019. ISSN 0899-7667. Disponível em: <https://doi.org/10.1162/neco_a_01199>https://doi.org/10.1162/neco_a_01199

^a
01199.

ZAKARIAH, A.; JAMIAN, J. J.; YUNUS, M. A. M. Dual-axis solar tracking system based on fuzzy logic control and light dependent resistors as feedback path elements. In: IEEE. *2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd)*. [S.l.], 2015. p. 139–144.

ZHANG, J.; YIN, Z.; JIN, P. Error analysis and auto correction of hybrid solar tracking system using photo sensors and orientation algorithm. *Energy*, Elsevier, v. 182, p. 585–593, 2019.