

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Eduardo Santos de Almeida

**Desenvolvimento de um Sistema de Rastreamento Solar
Horizontal de Um Eixo de Baixo Custo Baseado em
Microcontrolador**

Belo Horizonte, MG

2024

Eduardo Santos de Almeida

**Desenvolvimento de um Sistema de Rastreamento Solar Horizontal de Um Eixo de Baixo
Custo Baseado em Microcontrolador**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Victor Flores Mendes
Coorientador: Prof. Dr. Allan Fagner Cupertino

Belo Horizonte, MG

2024

A447d

Almeida, Eduardo Santos de.

Desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar horizontal de um eixo de baixo custo baseado em microcontrolador [recurso eletrônico] / Eduardo Santos de Almeida. – 2024.

1 recurso online (99 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Victor Flores Mendes.

Coorientador: Allan Fagner Cupertino.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 93-99.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Energia solar – Teses. 3. Geração de energia fotovoltaica – Teses. 4. Algoritmos – Simulação por computador – Teses. 5. Microcontroladores – Teses. 6. Sistema de Posicionamento Global – Teses. I. Mendes, Victor Flores. II. Cupertino, Allan Fagner. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA RASTREAMENTO SOLAR DE UM EIXO BASEADO EM MICROCONTROLADOR"

EDUARDO SANTOS DE ALMEIDA

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada em 01 de agosto de 2024. Por:

Prof. Dr. Victor Flores Mendes
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Allan Fagner Cupertino
DEE (UFJF) - Coorientador

Prof. Dr. Rodrigo Cassio de Barros
(UFRB)

Prof. Dr. Luís Guilherme Monteiro Oliveira
(PUC-MG)



Documento assinado eletronicamente por **Victor Flores Mendes, Professor do Magistério Superior**, em 01/08/2024, às 12:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Allan Fagner Cupertino, Usuário Externo**, em 02/08/2024, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Cassio de Barros, Usuário Externo**, em

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais por todo o apoio incondicional que me deram. A confiança depositada em mim e no meu potencial foi essencial. Sou grato pelo esforço incansável do meu pai e da minha mãe em me fornecer conselhos, orientações e apoio financeiro, mesmo quando a situação não era das mais favoráveis.

Agradeço aos meus amigos e colegas de turma, que me ajudaram a chegar até aqui, compartilhando desafios e resolvendo problemas juntos, tanto presencialmente quanto remotamente. Aos amigos que não são da minha turma, já se formaram ou pertencem a outras instituições, como Alysson Aurélio, Victor Coelho, Henrique Prata e Thiago Vinícius, também expresse minha gratidão pelo apoio e amizade ao longo dessa jornada.

Também agradeço aos meus orientadores, Allan Cupertino e Victor Flores, seja pelas conversas, esclarecimentos e pela paciência e empenho durante os meses de orientação. Suas orientações foram excelentes e me permitiram aprender sobre temas que nunca imaginei compreender.

Agradeço também ao professor Cláudio Santos do CEFET-MG Campus Divinópolis por incentivar a continuação da minha jornada acadêmica através do mestrado em engenharia elétrica.

Ademais, agradeço aos demais professores da instituição federal que contribuíram para minha formação, assim como os membros da empresa Flex que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho. Igualmente, gostaria de deixar meus agradecimentos ao GESEP e seus membros, assim como a FAPEMIG.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de rastreamento solar horizontal de um eixo de baixo custo baseado no microcontrolador ESP32. A pesquisa foi conduzida em parceria com a empresa Flex de Divinópolis, MG, tendo como principal objetivo reduzir os custos do sistema de rastreamento solar originalmente comercializado pela Flex, substituindo o controlador original, um CLP (Controlador Lógico Programável), por um microcontrolador mais acessível. Durante o desenvolvimento do trabalho, foram implementados algoritmos em *Python* para a estimativa das curvas de irradiação diária, considerando diferentes condições de usinas fotovoltaicas (com estrutura fixa, e estruturas utilizando rastreamento de um ou dois eixos) e coordenadas geográficas. Além de avaliar a viabilidade dos seguidores solares, os algoritmos ajudaram a determinar a metodologia de movimentação mais vantajosa para o seguimento solar. Os resultados das simulações computacionais indicaram que o uso de rastreadores solares pode aumentar a produção de energia em até 30%, dependendo das condições climáticas e do tipo de rastreador utilizado. Quanto ao método de movimentação dos módulos para um seguidor de eixo único, foi observada maior geração no deslocamento baseado no ângulo da incidência solar, o ângulo que representa a posição do sol no céu. Antes dos testes do controlador proposto em uma usina solar real, um protótipo foi desenvolvido e testado em condições controladas, com 1,05 kWp de potência de pico. A análise da curva de posicionamento do seguidor protótipo mostrou que o sistema baseado no ESP32 mantém o alinhamento adequado dos painéis solares ao longo do dia, validando a eficácia dos algoritmos de rastreamento. Os resultados experimentais reais utilizaram uma usina com mini geração fotovoltaica com capacidade instalada de 109 kWp e indicaram que o seguidor solar baseado no ESP32 gerou entre 17,51% e 30,42% mais energia do que uma usina fixa, dependendo das condições meteorológicas. A análise de custos demonstrou que o sistema baseado em ESP32 possui um custo total significativamente menor em comparação com o sistema baseado no CLP, cerca de 86% menor, tornando-o uma alternativa economicamente viável para diversas aplicações, especialmente em usinas com potências de pico relativamente baixas, entre 1 kWp e 100 kWp.

Palavras-chave: sistemas fotovoltaicos; ESP32; solução de baixo custo; rastreador solar horizontal de eixo único.

Abstract

This work presents the development and evaluation of a cost-effective horizontal single-axis solar tracking system based on the ESP32 microcontroller. The research was conducted in collaboration with Flex, a company located in Divinópolis, MG, with the primary goal of reducing the costs of the solar tracking system originally marketed by Flex by replacing the original controller, a PLC (Programmable Logic Controller), with a more affordable microcontroller. Throughout the development, Python algorithms were implemented to estimate daily irradiation curves, taking into account different conditions of photovoltaic plants (fixed structures and structures using single or dual-axis tracking) and geographic coordinates. Besides assessing the feasibility of solar trackers, the algorithms helped determine the most advantageous tracking methodology for solar alignment. The results from computer simulations indicated that using solar trackers can increase energy production by up to 30%, depending on climatic conditions and the type of tracker used. Regarding the module movement method for a single-axis tracker, higher generation was observed with movement based on the solar incidence angle, which represents the sun's position in the sky. Before testing the proposed controller in a real solar plant, a prototype was developed and tested under controlled conditions, with a peak power of 1.05 kWp. The analysis of the prototype tracker's positioning curve showed that the ESP32-based system maintains adequate alignment of the solar panels throughout the day, validating the effectiveness of the tracking algorithms. Real experimental results, utilizing a photovoltaic mini-plant with an installed capacity of 109 kWp, indicated that the ESP32-based solar tracker generated between 17.51% and 30.42% more energy than a fixed plant, depending on weather conditions. The cost analysis demonstrated that the ESP32-based system has a significantly lower total cost compared to the PLC-based system, approximately 86% lower, making it an economically viable alternative for various applications, especially in plants with relatively low peak powers, between 1 kWp and 100 kWp.

Keywords: photovoltaic systems; ESP32; cost-effective solution; single-axis horizontal solar tracker.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Localização dos complexos solares com <i>tracker</i> no Brasil e seus respectivos fabricantes (ePowerBay, 2020).	18
Figura 2.1 – Ilustração das curvas das potências teóricas em uma fileira de sistema FV acoplado a uma estrutura fixa (sem rastreamento) e estrutura móvel (com rastreamento solar horizontal de eixo único). Fonte: Autoria Própria.	30
Figura 2.2 – <i>Design</i> típico de um seguidor passivo (BRITO <i>et al.</i> , 2019).	31
Figura 2.3 – Comparação entre sistemas de seguimento solar com e sem <i>backtracking</i> . Imagem adaptada de (NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2016).	34
Figura 2.4 – Exemplo de rastreador com eixo horizontal. Fonte: Autoria Própria.	35
Figura 2.5 – Movimentação típica de um rastreador solar com eixo horizontal. Fonte: Autoria Própria.	35
Figura 2.6 – Exemplo de seguidor polar de eixo único. Fonte: Autoria Própria.	36
Figura 2.7 – Exemplo de seguidor Azimutal. Fonte: Autoria Própria.	37
Figura 2.8 – Exemplo de <i>tracker</i> de dois eixos. Fonte: Autoria Própria.	37
Figura 2.9 – Vista alternativa da posição do sol em relação ao planeta terra. Adaptada de (MASTERS, 2004).	38
Figura 2.10 – Representação dos ângulos β e ϕ_s . Adaptada de (MASTERS, 2004).	39
Figura 2.11 – Suporte de rastreamento de um eixo com rastreamento leste-oeste. Adaptado de (MASTERS, 2004).	44
Figura 2.12 – Modelo de irradiância proposto para rastreador horizontal de eixo único. Fonte: Autoria Própria.	45
Figura 2.13 – Relações angulares do rastreamento de dois eixos. Adaptada de (MASTERS, 2004).	45
Figura 3.1 – Painel do seguidor solar original com CLP.	47
Figura 3.2 – Esquema simplificado do painel do <i>tracker</i> original com CLP. Fonte: Autoria Própria.	48
Figura 3.3 – Sistema do seguidor solar com microcontrolador. Fonte: Autoria Própria.	50
Figura 3.4 – Representação de algumas telas da IHM.	51
Figura 3.5 – Circuito de potência do rastreador solar proposto. Fonte: Autoria Própria.	55
Figura 3.6 – Perfil do acionamento do sistema: (a) velocidade; (b) torque. Fonte: Autoria Própria.	55
Figura 3.7 – Algoritmo <i>Python</i> : Determinação da posição ótima do <i>tracker</i> . Fonte: Autoria Própria.	58

Figura 3.8 – Algoritmo <i>Python</i> : Determinação das curvas de irradiância. Fonte: Autoria Própria.	59
Figura 3.9 – Fluxograma do algoritmo: operação manual. Fonte: Autoria Própria.	60
Figura 3.10–Fluxograma do algoritmo: operação automática. Fonte: Autoria Própria.	61
Figura 3.11–Protótipo de testes do seguidor solar proposto.	63
Figura 3.12–Sensoriamento do protótipo.	63
Figura 3.13–Acionamento do protótipo.	64
Figura 3.14–Vista aérea da usina Gráfica FV, utilizada nos testes do sistema de controle utilizando ESP32 desenvolvido nesta dissertação.	65
Figura 3.15–Painel da usina piloto.	65
Figura 3.16–Aspectos principais da usina piloto.	66
Figura 4.1 – Irradiância global na cidade de Divinópolis: dia 1 do ano (01/01/2023). Fonte: Autoria Própria.	67
Figura 4.2 – Irradiância global na cidade de Divinópolis: dia 100 do ano (10/04/2023). Fonte: Autoria Própria.	68
Figura 4.3 – Irradiação em função do número de acionamentos. Fonte: Autoria Própria.	70
Figura 4.4 – Irradiação anual em função da latitude e do número de movimentos do rastreador horizontal para a metodologia adaptativa. Fonte: Autoria Própria.	71
Figura 4.5 – Rastreador horizontal (50 passos): irradiância; ângulo do rastreador. Fonte: Autoria Própria.	72
Figura 4.6 – <i>Backtracking</i> para o caso adaptativo (50 passos): irradiância; ângulo do rastreador. Fonte: Autoria Própria.	73
Figura 4.7 – Posicionamento do protótipo para a data 11/06/2024. Fonte: Autoria Própria.	74
Figura 4.8 – Posicionamento do <i>tracker</i> na usina fotovoltaica Gráfica para a data 22/06/2024. Fonte: Autoria Própria.	76
Figura 4.9 – Comparativo das curvas de potência para o dia 04/06/2024. Fonte: Autoria Própria.	77
Figura 4.10–Potência do protótipo <i>versus</i> potência estimada via irradiância para o dia 11/06/2024. Fonte: Autoria Própria.	78
Figura 4.11–Comparativo das curvas de potência para usinas reais considerando <i>Final Yield</i> como parâmetro: dia 21/06/2024. Fonte: Autoria Própria.	80
Figura 4.12–Comparativo das curvas de potência para usinas reais considerando <i>Final Yield</i> como parâmetro: dia 25/06/2024. Fonte: Autoria Própria.	80
Figura 4.13–Comparativo das curvas de potência para usinas reais considerando <i>Final Yield</i> como parâmetro: dia 22/06/2024. Fonte: Autoria Própria.	81

Figura 4.14–Comparativo das curvas de potência para usinas reais considerando <i>Final Yield</i> como parâmetro: dia 23/06/2024. Fonte: Autoria Própria.	82
Figura 4.15–Energia gerada: seguidor solar proposto <i>versus</i> usina fixa, de 26/06/2024 a 09/07/2024. Fonte: Autoria Própria.	84
Figura 4.16–Comportamento temporal da tensão e corrente consumida pelo painel de controle do seguidor solar da usina Gráfica para o dia 11/07/2024. Fonte: Autoria Própria.	85
Figura 4.17–Comportamento temporal das potências aparente, reativa e ativa do sistema do seguidor solar da usina Gráfica para o dia 11/07/2024. Fonte: Autoria Própria.	86

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Comparação das tecnologias de rastreadores solares comerciais.	17
Tabela 1.2 – Abordagens de rastreamento solar de um eixo encontradas na literatura. . .	22
Tabela 3.1 – Sensores e dispositivos principais utilizados no rastreador solar versão CLP.	49
Tabela 3.2 – Dados microcontroladores da família ATMEGA.	52
Tabela 3.3 – Dados microcontrolador PIC 18F4520.	53
Tabela 3.4 – Dados microcontroladores da família ESP.	53
Tabela 3.5 – Placa de dados do motor escolhido.	55
Tabela 4.1 – Irradiação para cada categoria de usina fotovoltaica nos dias 01/01/2023 e 10/04/2023, latitude de $-20,14^\circ$	68
Tabela 4.2 – Variações percentuais na irradiação anual para diferentes sistemas de ras- treamento solar e latitudes.	69
Tabela 4.3 – Métricas de erros para as curvas de referência e real do seguidor protótipo com ESP32 em relação à referência do CLP.	75
Tabela 4.4 – Métricas de erros para as curvas de referência e real do seguidor com ESP32 em relação à referência do CLP na aplicação da usina fotovoltaica de 109 kWp.	75
Tabela 4.5 – Ganhos percentuais de geração de energia das usinas analisadas, utilizando <i>Final Yield</i> como parâmetro.	82
Tabela 4.6 – PR's e diferenças percentuais entre os PR's de cada uma das usinas ana- lisadas.	83
Tabela 4.7 – Análise de Custos dos Componentes e Fabricação da PCI.	88

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Análise Mercadológica	15
1.2	Revisão Bibliográfica	18
1.2.1	Seguidores Solares	18
1.2.2	Metodologias de Rastreamento Solar	21
1.2.3	Metodologias de Estimativa de Irradiância	23
1.2.4	Norma IEC 62817:2014	25
1.3	Seguidor Solar de Um Eixo: Mercado <i>Versus</i> Literatura	26
1.4	Motivação e Objetivos	26
1.5	Publicações do Trabalho	27
1.6	Organização do Trabalho	28
1.7	Resumo do Capítulo 1	29
2	Fundamentação Teórica	30
2.1	Tipos de Seguidores Solares	30
2.1.1	Seguidor Solar Passivo	30
2.1.2	Seguidor Solar Ativo	31
2.2	Metodologias de Seguimento Solar Ativo	32
2.2.1	Abordagem com Fotosensor	32
2.2.2	Abordagem com Visão Computacional	33
2.2.3	Sem Sensor de Luz, Irradiância ou Similar	33
2.2.4	Sistema Misto	33
2.2.5	<i>Backtracking</i> em Sistemas de Rastreamento Solar	34
2.3	Tipos de Rastreadores Solares	34
2.3.1	Seguidor Solar Horizontal	34
2.3.2	Seguidor Solar Polar de Eixo Único	35
2.3.3	Seguidor Solar Azimutal	36
2.3.4	Seguidor Solar de Dois Eixos	36
2.4	Posicionamento Ótimo do Seguidor Solar e Curvas de Irradiância	38
2.4.1	Estimativa da Posição do Sol no Céu	38
2.4.2	Estimativa do Meio-Dia Solar, Nascer e Pôr do Sol	40
2.4.3	Posicionamento <i>Tracker</i> de Eixo Único Horizontal	41
2.4.4	Incidência da Irradiância Solar em Módulos Fotovoltaicos	42
2.5	Resumo do Capítulo 2	46

3 Seguidor Solar Investigado	47
3.1 <i>Hardware</i> do Projeto	47
3.2 Especificação do Microcontrolador para o Projeto	52
3.3 Movimento dos Módulos Fotovoltaicos em Seguidores Solares Horizontais	54
3.4 Especificação do Atuador	54
3.5 Plataforma de Monitoramento	56
3.6 Algoritmos Computacionais	57
3.6.1 Algoritmos em <i>Python</i> : Estimativa de Ângulo Ótimo e Irradiância	57
3.6.2 Algoritmo do Microcontrolador	60
3.7 Protótipo Desenvolvido	62
3.8 Planta Piloto	64
3.9 Análise de Consumo do Sistema	66
3.10 Resumo do Capítulo 3	66
4 Resultados	67
4.1 Resultados de Simulação Computacional	67
4.1.1 Curvas de Irradiância Estimadas para Diferentes Categorias de Usinas Fotovoltaicas	67
4.1.2 Rendimento Anual Estimada para Diferentes Rastreadores Solares	69
4.1.3 Avaliação das Metodologias de Posicionamento para o <i>Tracker</i> Proposto	70
4.2 Resultados Experimentais	73
4.2.1 Curva de Posicionamento do Seguidor Solar	73
4.2.2 Geração do Seguidor Solar Protótipo	76
4.2.3 Geração Usina Gráfica: Análise Diária	78
4.2.4 Geração Usina Gráfica: Análise Semanal	83
4.3 Análise de Consumo do Sistema	85
4.4 Análise de Custos	87
4.5 Resumo do Capítulo 4	88
5 Conclusões e Propostas de Continuidade	90
Bibliografia do Autor	92
Referências	93

1 Introdução

Petróleo e seus derivados, carvão mineral e outros combustíveis fósseis são amplamente utilizados como fontes de energia ao redor do mundo, mas estão associados a impactos ambientais significativos, incluindo a emissão de gases do efeito estufa. Além disso, por serem recursos não renováveis, há um crescente investimento global em reduzir o seu uso. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica tem ganhado destaque (OLIVEIRA, 2015). A tecnologia fotovoltaica (FV) converte luz solar em eletricidade através do movimento de elétrons na junção PN de semicondutores usados nas células solares (PARIDA *et al.*, 2011). Contudo, a eficiência dessa conversão é influenciada por variáveis ambientais, como a temperatura de célula e a irradiância incidente.

A conversão solar fotovoltaica, devido à sua natureza intermitente, requer estratégias para otimizar sua eficiência, como o uso de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) juntamente com sistemas de conversão para a injeção de corrente na rede elétrica (KJAER *et al.*, 2005). Outro método para incrementar a geração consiste no uso de seguidores solares, também conhecidos como rastreadores ou *trackers* solares. Diferentemente das usinas fixas, os sistemas de rastreamento solar ajustam a posição dos módulos fotovoltaicos ao longo do dia para maximizar a exposição ao sol, aumentando a produção energética entre 20% e 40% (PAGANI *et al.*, 2020).

Os métodos de rastreamento solar variam entre passivos, que não usam atuadores para mover os módulos, e ativos, que empregam dispositivos como atuadores hidráulicos ou eletromecânicos para o mesmo fim. As técnicas ativas podem incluir sensores de luminosidade, cálculos baseados na posição do sol conforme a data e hora, ou uma combinação desses ou mais métodos (MOUSAZADEH *et al.*, 2009). Independentemente da metodologia de rastreio, encontra-se muitos seguidores solares com a lógica de operação implementada em Controladores Lógicos Programáveis (CLP) ou microcontroladores.

Microcontroladores são dispositivos que podem exercer em muitas aplicações as mesmas funções de um Controlador Lógico Programável. Como vantagem, são dispositivos com preços muito mais acessíveis. Nesse âmbito, os mesmos se mostram alternativas viáveis quando o objetivo é a redução de custos em um sistema de seguidor solar. No entanto, para essa alternativa pode ser necessário realizar algumas adaptações, como adequação do nível de tensão dos sensores auxiliares. O custo de um sistema de rastreamento solar é especialmente importante em usinas de micro-geração, em que os valores monetários associados ao sistema de rastreamento podem ser proibitivos. Afirma-se isso, tendo em vista que é esperado que a solu-

ção de rastreadores apresente maior viabilidade econômica em sistemas de maior porte, onde o acréscimo de receita contribui para cobrir os gastos adicionais de operação e manutenção.

1.1 Análise Mercadológica

A configuração de rastreadores solares varia amplamente, o que torna relevante a análise das metodologias adotadas por empresas do setor. Utiliza-se como referência as empresas: *Arctech*, *Nextracker*, *Trinatracker*, *Valmont Solar*, *Soltec*, *STI Norland* e *PVH Hardware*.

A *Arctech* oferece quatro modelos principais de *trackers*: *Sky Smart II*, *Sky Wings*, *Sky Line* e *Sky Line II*. Esses modelos incorporam algoritmos astronômicos que estimam a posição solar com base na data e hora, além de malhas de controle fechadas equipadas com sensores de inclinação e vibração. Os modelos *Sky Smart II* e *Sky Line* também empregam algoritmos de inteligência artificial para ajustes adicionais. Todos utilizam um sistema de rastreamento de eixo único horizontal com suporte para a técnica de *backtracking*, necessária para evitar o sombreamento de uma fileira de módulos fotovoltaicos sobre a outra no começo e final do dia (Arctech Solar, 2022c), (Arctech Solar, 2022d), (Arctech Solar, 2022b), (Arctech Solar, 2022a).

Por sua vez, da *Nextracker* destaca-se os modelos *NX Horizon* e *NX Gemini*, ambos seguidores de eixo único horizontal com algoritmos astronômicos, mas sem sensores auxiliares. Estes modelos utilizam motores CC (Corrente Contínua) *brushless* e também possuem suporte para a técnica de *backtracking*, conforme detalhado em seus *datasheets* (Nextracker Inc., 2022b), (Nextracker Inc., 2022a). O *Trinatracker Vanguard-2P* segue a mesma configuração de eixo único horizontal e integra algoritmos astronômicos e de *backtracking*, além de um método próprio de rastreamento denominado *Smart Tracking*. Segundo o *datasheet*, o controle é realizado por uma placa eletrônica com microprocessador (Trina Solar Co., Ltd., 2021).

Os modelos *Convert-1P* e *Convert-2P* da *Valmont Solar* já usam motores AC de indução e são configurados automaticamente por relógios astronômicos e GPS, dispensando sensores de irradiação, inclinação ou similares (Valmont Industries, Inc., 2022a), (Valmont Industries, Inc., 2022b).

A *Soltec* disponibiliza dois modelos principais de seguidores solares: o *SF One* e o *SF7*. Ambos são de eixo único e movimentação horizontal, operados por motores de corrente contínua, com algoritmo astronômico para o rastreamento. Ambos modelos possuem suporte para *backtracking*, mas o *SF7* se diferencia pelo seu algoritmo de *backtracking* assimétrico, o qual implica que, ao invés de todos os módulos se moverem simetricamente, cada módulo pode ajustar seu ângulo de forma independente para otimizar a captação de energia, evi-

tando sombras e aumentando a eficiência, especialmente em terrenos irregulares. O *datasheet* também informa a capacidade de rastreamento dos modelos, a qual varia de -60° a $+60^\circ$ leste-oeste (Soltec, 2024).

A *STI Norland* oferece três modelos: *Omini Track*, *Dura Track* e *STI H250 UH*, todos com motores de corrente contínua e seguimento horizontal. O *backtracking* é uma característica comum entre eles. O *Omini Track* possui como diferencial o fato de ter sido projetado especificamente para terrenos irregulares, destacando-se por suas adaptações estruturais (Array Technologies, 2024).

A *PVH Hardware* apresenta os modelos *Axoneduo Infinity* e *Monoline+*, ambos com motores elétricos e seguimento horizontal. Os *datasheet's* descrevem o uso de um algoritmo astronômico para o rastreamento, com suporte a *backtracking*. Notavelmente, o *Axoneduo Infinity* incorpora GPS ao seu sistema de rastreamento. Ambos produtos possuem um alcance de movimento informado, o qual varia de -60° a $+60^\circ$ leste a oeste (PV Hardware, 2024).

A análise revela uma preferência das empresas pelo uso de sistemas de rastreamento de eixo único e horizontal, com uma tendência ao emprego de algoritmos astronômicos e/ou com suporte para *backtracking*. Ademais, boa parte das empresas implementa algoritmos astronômicos para o rastreio. Motores elétricos, principalmente os de corrente contínua, são predominantes nesses sistemas.

A Tabela 1.1 consolida as informações discutidas nesta seção sobre as principais empresas que fornecem sistemas de seguimento solar. Adicionalmente, especifica-se o tipo de *tracker* utilizado.

Complementando o estudo, a Figura 1.1 mostra a distribuição dos fabricantes de cada equipamento no Brasil. A *Soltec* lidera o mercado, seguida por *NexTracker*, *Valmont Solar* (ou *Convert*), *STI Norland*, *Arctech*, *PVH Hardware* e *Nclave*. É importante mencionar que a *Nclave* foi adquirida pela *Trina Solar* no final de 2020 e já não opera como uma entidade independente (BADRA, 2020). Assim, predominam no Brasil os sistemas de rastreamento solar horizontal e ativo, equipados com algoritmos astronômicos que suportam *backtracking*, sendo um reflexo do que é mais utilizado pelos fabricantes. Quanto ao controlador utilizado em cada modelo, não foram encontrados dados sobre.

Tabela 1.1 – Comparação das tecnologias de rastreadores solares comerciais.

Empresa	Modelos	Tipo de Seguitor	Eixos de Rastreo	Atuador	Controlador	Algoritmos
<i>Arcotech</i>	<i>Sky Smart II, Sky Line</i>	Ativo	Horizontal, Único	Não especificado	Controle em malha fechada, IA	Astronômico, <i>Backtracking</i>
<i>Nextracker</i>	<i>NX Horizon, NX Gemini</i>	Ativo	Horizontal, Único	Motor CC sem escovas	Não especificado	Astronômico, <i>Backtracking</i>
<i>Trinatracker</i>	<i>Vanguard-2P</i>	Ativo	Horizontal, Único	Motor CC	Placa eletrônica com microprocessador	Astronômico, <i>Backtracking</i>
<i>Valmont Solar</i>	<i>Convert-1P, Convert-2P</i>	Ativo	Horizontal, Único	Motor AC de indução	Relógio astronômico, GPS	Astronômico, <i>Backtracking</i>
<i>Soltec</i>	<i>SF One, SF7</i>	Ativo	Horizontal, Único	Motor CC	Não especificado	Astronômico, <i>Backtracking</i> (assimétrico para SF7)
<i>STI Norland</i>	<i>Omini Track, Dura Track, STI H250 UH</i>	Ativo	Horizontal, Único	Motor CC	Não especificado	Astronômico, <i>Backtracking</i>
<i>PVH Hardware</i>	<i>Axoneduo Infinity, Mono-line+</i>	Ativo	Horizontal, Único	Não especificado	Não especificado	Astronômico, <i>Backtracking</i>

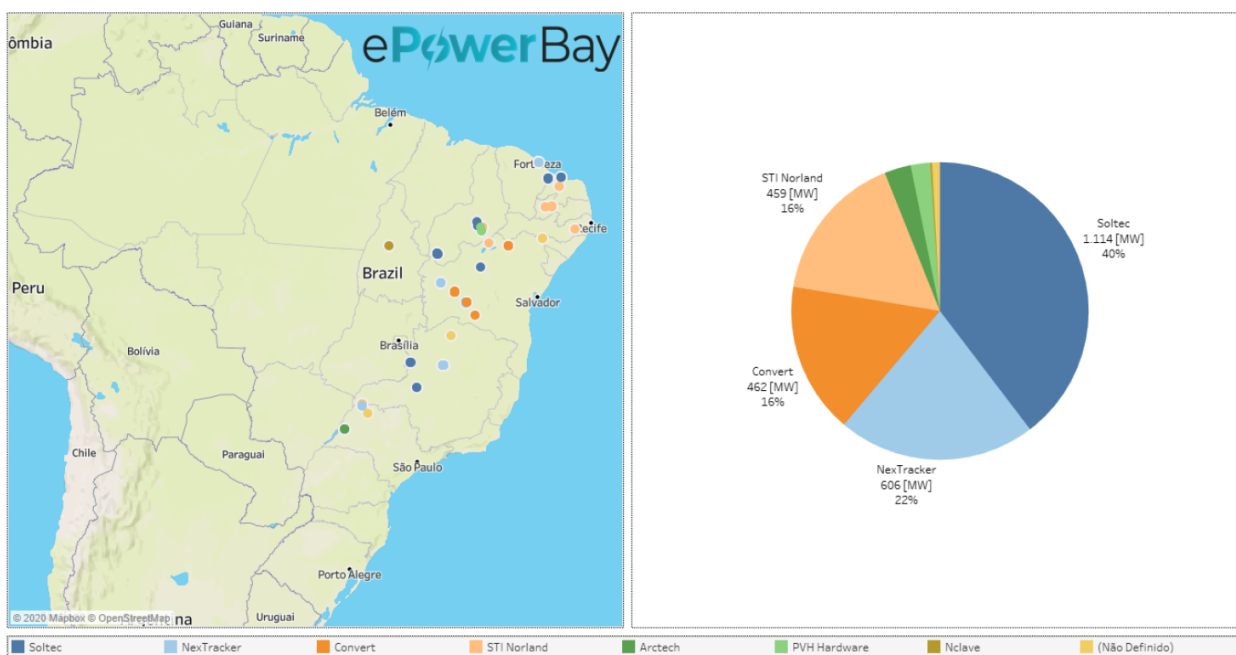


Figura 1.1 – Localização dos complexos solares com *tracker* no Brasil e suas respectivos fabricantes (ePowerBay, 2020).

1.2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica deste trabalho tem como objetivo fornecer uma visão geral sobre as principais metodologias e tecnologias utilizadas em sistemas de rastreamento solar e na estimativa de geração de energia. Com isso, esta seção é dividida em três partes principais: a primeira aborda as diferentes metodologias de seguidores solares, a segunda discute as diversas abordagens para a estimativa de geração de energia em sistemas fotovoltaicos e a terceira discute a norma de qualificação de *design* aplicável a rastreadores solares.

1.2.1 Seguidores Solares

Os rastreadores solares têm sido amplamente investigados na literatura. O trabalho de Al-Mohamad (2004) propõe um rastreador solar de eixo único baseado em fotossensores, utilizando o CLP PS4-201 MM1 como controlador. O sistema emprega dois fotossensores simétricos para rastrear a posição solar. As saídas desses sensores são conectadas às entradas analógicas do CLP, que compara os dois sinais e produz um sinal de saída para ativar o atuador eletromecânico. Esse sistema aumentou a geração de energia em mais de 20% em comparação com um sistema fixo.

O trabalho de Oliveira e Krenzinger (2008) descreve o desenvolvimento e análise de um seguidor solar azimutal (um eixo vertical) aplicado a módulos fotovoltaicos. O estudo visa

comparar a produção de energia deste sistema com um sistema fixo. O ganho energético com o seguidor azimutal foi de até 24% em dias parcialmente nublados e até 38% em períodos fora do intervalo central do dia. O seguidor foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), utilizando um microcontrolador da família 8051 para controle e um pequeno motor elétrico CC como atuador. As medições foram realizadas em um sistema experimental com dois módulos fotovoltaicos em paralelo para cada montagem, fixo e móvel.

A pesquisa realizada em Ribeiro *et al.* (2012) e continuada em Ribeiro *et al.* (2013) explora um sistema de rastreamento solar uniaxial controlado por um microcontrolador PIC16F877. Este sistema ajusta os módulos solares em incrementos de 15 graus a cada hora, resultando em um aumento na produção de energia superior a 18% sob condições ótimas de luz solar. Em 2012, este projeto recebeu o 3º lugar no prêmio WEG de inovação.

Na produção de Rajesh e Prasad (2015), os autores apresentaram a implementação de um sistema de rastreamento solar de eixo único utilizando um microcontrolador de baixo custo, o AT89S52. O estudo se concentrou na viabilidade de um sistema de coleta de energia solar eficiente e acessível, utilizando um microcontrolador CMOS de 8 bits com 4K bytes de memória *flash* programável. O *software* controla a posição inicial do módulo fotovoltaico e rastreia a luz solar ao longo do dia, ajustando a posição do módulo com base na intensidade da luz detectada por dois sensores LDR (*Light Dependent Resistor*).

Em Artanto *et al.* (2016), é proposto um rastreador solar para aplicação em destilação solar vertical, um método de purificação da água que utiliza a energia solar para destilar água em um sistema verticalmente orientado. O sistema utiliza um *design* baseado em GPS controlado por um Arduino Nano, movendo-se de acordo com o ângulo de azimute do sol. Os resultados mostraram que a potência gerada pela célula solar vertical rotacionada foi maior do que a da célula fixa horizontal.

Já Meikap e Dey (2016) constroem um sistema de rastreamento solar de eixo único composto por uma placa de pequeno porte, tendo o Arduino Uno como controlador e um motor CC com caixa de redução como atuador. O protótipo utiliza um sensor RTC (*Real Time Clock*) para que o microcontrolador tenha as informações de data e hora. No entanto, a movimentação não ocorre baseada na hora e data diretamente. Tais informações são utilizadas para estimar a elevação e o ângulo zenital solar, os quais são os dados ativamente implementados para o rastreio. O aumento da produção para o dia testado chegou a 20% em comparação com o sistema sem rastreamento.

Por sua vez, o artigo de Revoredo *et al.* (2019) aborda o desenvolvimento e a prototipagem de um sistema de microgeração fotovoltaica com rastreamento solar. O sistema

utiliza um microcontrolador Arduino Mega para o controle de dois motores de passo, responsáveis pelo ajuste dos ângulos horário e de declinação do painel solar. A estratégia de rastreamento é realizada em duas etapas: uma orientação inicial baseada no conceito de hora solar e um ajuste fino realizado com sensores de luminosidade LDR. O ganho proporcionado pelo seguidor solar experimental foi de 48,5% em comparação com um painel fixo de mesmas especificações.

O artigo de Ngo *et al.* (2020) avalia a eficiência de um sistema de rastreamento solar de eixo único no Vietnã Central utilizando o dispositivo pré-fabricado WST03-5, um controlador de rastreamento solar que emprega fotossensores. Os resultados indicaram que a eficiência geral do sistema fotovoltaico com rastreador aumentou até 30,3% em dias limpos.

Na pesquisa de Ahmed *et al.* (2020), um seguidor solar de eixo único é controlado por um Arduino Mega, tendo um servo-motor como atuador. O sistema conta com um módulo RTC que indica ao controlador o horário e data atual. Com base nesses dados, os módulos fotovoltaicos são movidas a fim de ficarem mais perpendiculares com os raios solares, com movimentações já previamente configuradas. Em uma análise anual, os testes indicaram aumento médio na produção mensal em torno de 30%.

O trabalho de Munanga *et al.* (2020) desenvolve um rastreador solar de baixo custo usando Arduino Mega, dois LDR's e um motor de passo. Este protótipo, para um único módulo de 24 Wp, demonstrou um aumento de 20% na potência de saída em comparação com um sistema fixo.

Por sua vez, o trabalho de Tiba e Campos (2021) introduz um modelo de rastreamento solar chamado *npTrack*, que utiliza um microcontrolador PIC18F4620 para controlar um sistema de rastreamento solar de eixo único polar. O sistema opera com apenas sete posições ao longo do dia, alcançando uma eficiência teórica de 99,27% da energia coletada, comparável a 96,5% da eficiência de um sistema de dois eixos.

No estudo de Hariri *et al.* (2022), são comparados dois tipos de rastreadores: um baseado em fotossensores e outro em cálculos de azimute, ambos controlados por Arduino Mega. O rastreador baseado em sensores gerou 14,8% a mais de energia e consumiu 65% a menos do que o baseado em cálculos de azimute. O estudo concluiu que o rastreador baseado em azimute é menos eficiente devido a sua precisão de rastreamento mais baixa, pois segue a localização teórica do sol. No entanto, este estudo não examina a taxa de degradação de cada abordagem.

No trabalho de Jaafar e Maarof (2022), os autores demonstram um sistema de eixo único controlado por Arduino Uno, com o seguimento solar baseado no uso de dois LDR's. Os testes são conduzidos utilizando um único módulo fotovoltaico de pequeno porte, usando

um servo-motor como atuador. O coletor é movido com base na diferença de luminosidade identificada entre ambos os sensores de luz, criando um sistema com movimentações mais contínuas. O aumento no desempenho do módulo fotovoltaico é sugerido em torno de 55% durante o dia analisado.

A Tabela 1.2 resume as principais abordagens de rastreamento solar identificadas na literatura, com todos os modelos sendo rastreadores de um eixo. Observa-se uma preferência por rastreamento ativo sobre alternativas passivas. Vale destacar que rastreadores ativos movimentam os módulos fotovoltaicos utilizando atuadores elétricos, enquanto os passivos utilizam métodos que não dependem de energia elétrica, como versões baseadas na dilatação de gases. Os controladores usados são variados, com um número significativo de modelos empregando sistemas de microcontroladores. Quanto ao modo de rastreamento, há uma diversidade de técnicas, sendo os fotossensores e o cálculo de variáveis referentes a posição do sol particularmente comuns entre os estudos avaliados. Em termos de escala, os trabalhos analisados tendem a aplicar seus modelos de rastreadores em sistemas de pequena escala ou protótipos.

1.2.2 Metodologias de Rastreio Solar

Na literatura também é possível encontrar artigos focados na avaliação das metodologias de rastreio solar, não necessariamente na sua aplicação prática. Por exemplo, Muñoz *et al.* (2024) conduziram uma avaliação detalhada de algoritmos de rastreamento solar de eixo único horizontal, comparando diferentes estratégias. A pesquisa teve foco em otimizar a produção de energia e o desempenho operacional sem a necessidade de novos equipamentos ou tecnologias adicionais. Utilizando simulações de alta resolução temporal, o estudo analisou oito locais com diferentes condições climáticas. Os resultados mostraram que, em locais com alta fração difusa, o algoritmo analítico superou os demais, aumentando a produção de energia em até 3% em comparação com o algoritmo astronômico. A pesquisa concluiu que, apesar do maior número de movimentos necessários pelo algoritmo analítico, o mesmo oferece o melhor desempenho em termos de ganho de geração, especialmente em condições de céu parcialmente nublado.

Por sua vez, a publicação de Piotrowski e Farret (2022) apresenta uma análise técnica e econômica sobre o uso de sistemas de rastreamento solar comparados a sistemas fixos, considerando a degradação estimada e o desempenho dos módulos fotovoltaicos ao longo do tempo. Motivado pela necessidade de maximizar a produção de energia e entender os impactos na durabilidade dos módulos, o estudo utiliza simulações computacionais para um período de 25 anos. O sistema de rastreamento solar é de dois eixos, e os testes foram realizados em uma usina experimental. Os resultados mostram que o rastreamento solar aumenta a produção

Tabela 1.2 – Abordagens de rastreamento solar de um eixo encontradas na literatura.

Autor	Tipo	Controlador	Modo de Rastreamento	Porte do Sistema Testado
Al-Mohamad (2004)	Ativo	CLP PS4-201 MM1	Fotossensores	Pequeno
Oliveira e Krenzinger (2008)	Ativo	Microcontrolador 8051	Cálculo do âng. de azimute	Pequeno
Ribeiro <i>et al.</i> (2012)	Ativo	PIC16F877	Passos fixos	Pequeno
Rajesh e Prasad (2015)	Ativo	AT89S52	Fotossensores	Pequeno
Artanto <i>et al.</i> (2016)	Ativo	Arduino Nano	Cálculo do âng. de azimute	Pequeno
Meikap e Dey (2016)	Ativo	Arduino Uno	Cálculo do âng. de elevação e zenital	Pequeno
Revoredo <i>et al.</i> (2019)	Ativo	Arduino Mega	Fotossensores e cálculos astronômicos	Pequeno
Ngo <i>et al.</i> (2020)	Ativo	WST03-5	Fotossensores	Pequeno
Ahmed <i>et al.</i> (2020)	Ativo	Arduino Mega	RTC	Pequeno
Munanga <i>et al.</i> (2020)	Ativo	Arduino Mega	Fotossensores	Pequeno
Tiba e Campos (2021)	Ativo	PIC18F4620	Passos fixos	Pequeno
Hariri <i>et al.</i> (2022)	Ativo	Arduino Mega	Fotossensor e cálculo do âng. de azimute	Pequeno
Jaafar e Maarof (2022)	Ativo	Arduino Uno	Fotossensor	Pequeno
Esta dissertação	Ativo	ESP32	Estimativa da posição do sol	Pequeno e Grande

anual de eletricidade em média 20,87%, mas também resulta em uma degradação acumulada 2,43% maior ao final do período simulado.

Os esforços de pesquisa também são direcionados para avaliar a viabilidade de utilizar Aprendizado de Máquina (*Machine Learning* ou ML) e Aprendizado Profundo (*deep learning* ou DL) para aumentar a produção de energia em sistemas de rastreamento solar. Por exemplo, estudos recentes ressaltam a eficácia dos modelos de DL na previsão de condições meteorológicas e na otimização da captação de energia solar (PHIRI *et al.*, 2023).

1.2.3 Metodologias de Estimativa de Irradiância

Na literatura, há também publicações que possuem temas correlacionados ao tema principal deste trabalho. Produções como os de Carrasco *et al.* (2014) e Tan *et al.* (2013) concentram-se em estimar a irradiância solar, utilizando dados de corrente, tensão e temperatura de célula de módulos fotovoltaicos, bem como informações do *datasheet* do fabricante. Outras pesquisas empregam redes neurais para construir sistemas digitais de estimativa da irradiância (ZEČEVIĆ; ROLEVSKI, 2020), (MANCILLA-DAVID *et al.*, 2014). Além disso, pode-se citar o Projeto Jaíba Solar, descrito por Junqueira *et al.* (2014), o qual explora a implementação de uma usina solar fotovoltaica de 3 MWp em Minas Gerais, analisando a viabilidade técnica e econômica de diferentes tecnologias fotovoltaicas através de simulações computacionais com o *software PVsyst*.

Algoritmos para a predição das curvas de irradiância em condições de céu limpo podem ser desenvolvidos considerando diferentes tipos de usinas (fixa ou com seguidor de um ou dois eixos). Pode-se utilizar equações para estimar essas curvas, embora existam publicações que empregam outras metodologias, conforme serão descritas ainda nesta seção. Um aspecto interessante desta área de estudo é a previsão teórica do ganho de energia com o uso de seguidores solares. Esse ganho energético depende diretamente da irradiância disponível, sendo essencial a análise detalhada das condições específicas de cada local para determinar a eficiência dos sistemas de seguimento solar em diferentes coordenadas e épocas do ano.

Nesse contexto, salienta-se a publicação de El-Adawi *et al.* (1986), em que os autores desenvolveram um método semiempírico para a estimativa da irradiância solar horária em uma superfície horizontal, baseada em medições experimentais. Utilizando a técnica de ajuste por mínimos quadrados, a fórmula proposta foi validada com dados experimentais de várias localidades, incluindo Meca, Jidá, Sana'a (Iêmen) e Hong Kong. A fórmula considera a irradiância solar global média horária máxima ao meio-dia e a duração do dia, ajustando-se bem aos dados experimentais com um erro máximo de 11%.

Já Şen (1998) desenvolveu um algoritmo de lógica *fuzzy* para a estimativa da irradiação solar a partir da duração do brilho solar. A lógica *fuzzy* é uma abordagem que lida com incertezas e variabilidades ao usar valores que podem variar entre 0 e 1, ao invés de valores binários como na lógica clássica. Utilizando tal teoria, o estudo propõe substituir as equações de regressão tradicionais, como a equação de *Angström*, por um conjunto de regras *fuzzy* que descrevem a relação entre irradiação solar e duração do brilho solar. O algoritmo é aplicado a dados mensais de três locais na Turquia, mostrando que a abordagem pode lidar melhor com as incertezas e variabilidades atmosféricas. A metodologia demonstrou uma capacidade robusta de estimar a irradiação solar, fornecendo uma alternativa viável e mais flexível aos

modelos estatísticos tradicionais.

Nunez Munoz *et al.* (2022) desenvolveram e avaliaram modelos empíricos para a estimativa da irradiância solar difusa horizontal horária no Reino Unido. O estudo teve como objetivo melhorar a precisão das estimativas de irradiância difusa, usando dados de medições ao nível do solo de três regiões do Reino Unido: *South Yorkshire*, *Norfolk* e *West Sussex*, coletados entre 1982 e 1999. A equipe avaliou modelos empíricos existentes e desenvolveu novos modelos baseados no índice de claridade e na fração difusa. Os novos modelos foram comparados com os existentes e demonstraram melhorias significativas, especialmente na redução do erro médio quadrático (RMSE) e no aumento do coeficiente de determinação (R^2). Os resultados indicaram que os novos modelos são mais precisos para as regiões estudadas, validando a importância de desenvolver correlações específicas para locais específicos.

Sánchez-Segura *et al.* (2021) apresentaram uma metodologia inovadora para estimar componentes de irradiação solar usando um sistema de imagem do céu de baixo custo. Utilizando uma câmera NILECAM30 e um domo de alumínio, o sistema captura imagens do céu e as processa para corrigir “aberrações esféricas”, permitindo que cada pixel da imagem seja considerado uma fonte individual de irradiação. A metodologia foi testada em quatro cenários climáticos diferentes, mostrando desempenho robusto em todas as condições, com erros médios normalizados variando entre 0,79% e 100% para diferentes componentes de irradiação solar. O estudo destaca a eficácia do sistema de imagem do céu de baixo custo como uma alternativa viável às estações tradicionais, com a vantagem adicional de manutenção mínima e fácil configuração.

Chu *et al.* (2023) propuseram um método baseado em imagens de céu inteiro para estimar a irradiância solar e a geração de energia solar. O estudo aborda a variabilidade da irradiância solar devido a condições atmosféricas, utilizando a extração de características de nuvens de imagens de céu inteiro, integradas a um modelo de memória de longa e curta duração para estimar a irradiância. As características regionais e globais das nuvens são extraídas das imagens e usadas como entradas no modelo. Os resultados experimentais mostraram um desempenho notável do método proposto, com menor erro absoluto médio (MAE) e erro quadrático médio (RMSE), e um alto coeficiente de determinação. As estimativas de geração demonstraram resultados próximos à performance real.

Por sua vez, Chen *et al.* (2023) desenvolveram uma abordagem para a estimativa de irradiância solar global horizontal (GHI) e irradiância direta normal (DNI) utilizando aprendizado profundo e imagens espectrais de satélite. A metodologia proposta emprega redes neurais convolucionais (CNNs) combinadas com um mecanismo de atenção para melhor extrair informações espaciais das imagens de satélite geostacionário, especificamente do satélite

GOES-16. A seleção das bandas espectrais é otimizada através de uma análise de correlação, reduzindo a complexidade do modelo sem perda significativa de desempenho. Os resultados demonstram que o modelo proposto alcança um erro quadrático médio normalizado de 20,57% para GHI e 23,63% para DNI, com reduções significativas de erro em comparação com o *National Solar Radiation Database*.

Com base nas publicações destacadas, nota-se que as estimativas de irradiância e/ou irradiação na literatura são essencialmente baseadas em visão computacional, redes neurais ou métodos computacionais equivalentes. Todavia, é possível usar equacionamentos para estimar as curvas de irradiância, conforme Masters (2004), uma referência utilizado em trabalhos na área da energia solar, como: Lenz *et al.* (2017) e Lenz *et al.* (2018). Vale destacar que, no contexto avaliado, irradiância é a potência da radiação solar incidente por unidade de área, normalmente medida em watts por metro quadrado, enquanto irradiação é a energia total recebida por unidade de área durante um certo período, geralmente expressa em quilowatt-hora por metro quadrado.

No âmbito do trabalho, as estimativas citadas são importantes para avaliar pontos como: o ganho de energia médio que seguidores solares podem gerar na latitude avaliada (Divinópolis, MG); qual metodologia de movimentação dos módulos fotovoltaicos ao longo do dia é mais viável; entre outros.

1.2.4 Norma IEC 62817:2014

A norma IEC 62817:2014, intitulada “*Photovoltaic systems - Design qualification of solar trackers*”, é um padrão de qualificação de *design* aplicável a rastreadores solares para sistemas fotovoltaicos, embora também possa ser utilizada para rastreadores em outras aplicações solares (International Electrotechnical Commission, 2014).

Esta norma define procedimentos de testes tanto para componentes chave quanto para o sistema de rastreamento completo. Em alguns casos, os procedimentos de teste descrevem métodos para medir e/ou calcular parâmetros que devem ser reportados no *datasheet* do rastreador. Em outros casos, o procedimento de teste resulta em um critério de aprovação ou reprovação.

Os principais objetivos dos testes são garantir que os parâmetros relatados no *datasheet* do rastreador sejam medidos por procedimentos consistentes e aceitos pela indústria e separar os *designs* de rastreadores que provavelmente terão falhas precoces daqueles que são sólidos e adequados para uso conforme especificado pelo fabricante. Isso assegura a confiabilidade e durabilidade dos rastreadores solares, promovendo a adoção de práticas padrão na indústria fotovoltaica (International Electrotechnical Commission, 2014).

1.3 Seguidor Solar de Um Eixo: Mercado *Versus* Literatura

Com base nas Seções 1.1 e 1.2, especialmente as Tabelas 1.1 e 1.2, é possível comparar as metodologias de seguimento solar de eixo único utilizadas pela indústria e em produções acadêmicas. Nota-se a preferência por seguidores solares ativos, ou seja, que utilizam atuadores eletromecânicos ou similares. Quanto ao modo de rastreamento, enquanto as empresas analisadas implementam majoritariamente algoritmos astronômicos, ou seja, com cálculos de variáveis referentes ao posicionamento solar, as publicações avaliadas focam no uso de fotosensores. Quanto ao controlador, por mais que boa parte dos fabricantes não informarem tal dado, nota-se que apenas a publicação científica mais antiga, vide Al-Mohamad (2004), recorre a implementação do algoritmo via CLP, com as demais recorrendo a microcontroladores ou dispositivos equivalentes.

Em conclusão, a análise revela uma clara tendência da indústria em adotar métodos baseados em algoritmos astronômicos devido à sua precisão e independência de condições ambientais variáveis, enquanto a literatura acadêmica explora abordagens com fotossensores. Além disso, a transição do uso de CLP's para microcontroladores em publicações mais recentes reflete uma busca por soluções mais acessíveis financeiramente

1.4 Motivação e Objetivos

O presente trabalho é realizado em parceria com a empresa Flex de Divinópolis, MG, sendo executado pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O mesmo originou-se de uma colaboração P&D com a Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência (GESEP) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). A Flex obteve financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) para o projeto, no qual o autor foi bolsista. Essa parceria buscou desenvolver soluções inovadoras e acessíveis para o seguimento solar, contribuindo para o avanço tecnológico na área, principalmente no âmbito nacional.

A Flex apresenta um sistema de seguimento solar que opera com base em informações de data e hora, além da longitude e latitude. Esse seguidor solar, entretanto, possui sua lógica de acionamento feita com CLP, tornando o produto com custo final mais elevado.

A motivação deste trabalho reside na necessidade de reduzir custos em sistemas de rastreamento solar já existentes, tal como a versão comercializada pela Flex, em que há a utilização de CLP's, dispositivos de custo mais elevado. Ao substituir o CLP por microcontroladores mais acessíveis, como o ESP32, a tecnologia de seguidores solares também se torna mais acessível, ampliando sua adoção em escalas de aplicação mais diversas. Adicionalmente,

são desenvolvidos algoritmos em *Python* para a estimativa das curvas de irradiância diária para diferentes situações de usinas (fixas, com rastreamento horizontal de eixo único e seguidor de dois eixos), assumindo céu limpo, não sendo englobadas no algoritmo condições de dias nublados. Os algoritmos estimam as curvas de irradiância visualizadas por usinas fotovoltaicas fixas, com seguimento de um e dois eixos, utilizando como entradas o dia do ano e as coordenadas geográficas. Assim, torna-se possível avaliar a viabilidade de diferentes seguidores solares em cada latitude e estação do ano.

Nesta perspectiva, o principal objetivo deste trabalho é propor um sistema de seguimento solar inteligente horizontal de um eixo de menor custo. Para tanto, a proposta base é substituir o uso de CLP do sistema original como controlador por um microcontrolador, optando-se pelo ESP32. Além disso, o trabalho busca fortalecer a colaboração com a Flex e universidades envolvidas no projeto.

Como objetivos específicos, elenca-se os seguintes pontos:

- Analisar o desempenho de ganho energético de usinas fotovoltaicas fixas e com seguimento de um e dois eixos sob diferentes condições de latitude e dia do ano, utilizando algoritmos desenvolvidos na linguagem de programação *Python*;
- Estudar estratégias de operação utilizadas em sistemas de rastreamento solar similares, analisando os componentes e tecnologias a serem utilizados no sistema;
- Projetar e implementar os circuitos que irão proporcionar as adaptações necessárias para tornar o microcontrolador aplicável, tais como adequações de níveis de tensão;
- Validar o projeto, comparando as gerações para três categorias de sistemas de rastreamento solar: seguidor solar horizontal de um eixo com CLP, seguidor solar horizontal de um eixo com microcontrolador e usina fotovoltaico com estrutura fixa;
- Avaliar a relação de custo-benefício das alterações propostas.

1.5 Publicações do Trabalho

Durante o período de desenvolvimento desta dissertação, foram submetidos dois artigos com temas correlatos, os quais estão elencados a seguir:

- ***Aceito para publicação*** - submetido no Congresso Brasileiro de Automática (CBA): Desenvolvimento de um Controlador de Baixo Custo para Seguidor Solar de um Eixo;

- **Em Revisão** - Artigo submetido em 2024 na *IEEE Latin America Transactions: Field Implementation of a PLC-Controlled Single-Axis Sun Tracker in Commercial PV Systems*.

1.6 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Este capítulo apresenta uma visão geral do trabalho, incluindo a análise mercadológica dos rastreadores solares, a revisão bibliográfica abrangente das metodologias e tecnologias existentes, a motivação e os objetivos do trabalho, além das publicações resultantes da pesquisa. A seção finaliza com a estrutura organizacional do documento.
- **Capítulo 2 - Fundamentação Teórica:** Este capítulo aborda os conceitos teóricos essenciais para o entendimento do trabalho. Ele é dividido em subseções que discutem os diferentes tipos de seguidores solares (passivos e ativos), as metodologias de seguimento solar ativo (abordagens com fotosensor, visão computacional, sem sensor de luz e sistemas mistos), e os tipos de rastreadores solares (horizontal, polar de eixo único, azimutal e de dois eixos). Adicionalmente, são exploradas as metodologias para estimar a posição do sol e as curvas de irradiância solar.
- **Capítulo 3 - Metodologia:** Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do sistema de rastreamento solar proposto. As seções incluem a especificação do microcontrolador e do atuador, o design dos circuitos de potência e controle, a plataforma de monitoramento, e os algoritmos computacionais desenvolvidos em Python e implementados no microcontrolador. Além disso, é detalhado o processo de desenvolvimento e testes do protótipo, assim como a implantação da planta piloto.
- **Capítulo 4 - Resultados:** Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das simulações computacionais e dos testes experimentais. Os resultados incluem as curvas de irradiância estimadas para diferentes condições de usinas fotovoltaicas, o rendimento anual estimado, a avaliação teórica das metodologias de posicionamento, e os dados reais de geração de energia obtidos com o protótipo e a planta piloto. Também é realizada uma análise detalhada dos custos associados ao sistema proposto.
- **Capítulo 5 - Conclusão:** O capítulo final resume os principais resultados obtidos e conclusões do trabalho, discutindo a eficácia do sistema de rastreamento solar horizontal de

um eixo de baixo custo baseado no microcontrolador ESP32. São apresentadas as considerações finais sobre a viabilidade econômica e técnica do sistema, além de sugestões para trabalhos futuros e possíveis melhorias.

1.7 Resumo do Capítulo 1

Neste capítulo, foi apresentada uma visão geral do trabalho, incluindo a análise mercadológica dos rastreadores solares, a revisão bibliográfica abrangente das metodologias e tecnologias existentes, a motivação e os objetivos do trabalho, além das publicações resultantes da pesquisa. No próximo capítulo, será discutida a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do sistema de rastreamento solar proposto, abrangendo os conceitos e equações relevantes para o estudo.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Tipos de Seguidores Solares

Seguidor ou rastreador solar é um mecanismo utilizado em sistemas FV (fotovoltaicas), tendo o objetivo de posicionar os módulos fotovoltaicos em orientações e inclinações mais favoráveis para a captação otimizada da irradiação solar incidente em seu plano (GÓMEZ-GIL *et al.*, 2009). Nesta perspectiva, tal tecnologia aumenta a energia entregue pelo gerador fotovoltaico. O aumento típico médio pode ser entre 15% e 35%, podendo ter ainda um acréscimo de 40% na produção total de energia (WU *et al.*, 2016). A Figura 2.1 ilustra a comparação entre as curvas de geração teórica de uma fileira com módulos fotovoltaicos fixa e uma acoplada a um sistema de *tracking* horizontal de um eixo. Nota-se aumento de geração especialmente no início e final do dia devido ao efeito do seguidor solar.

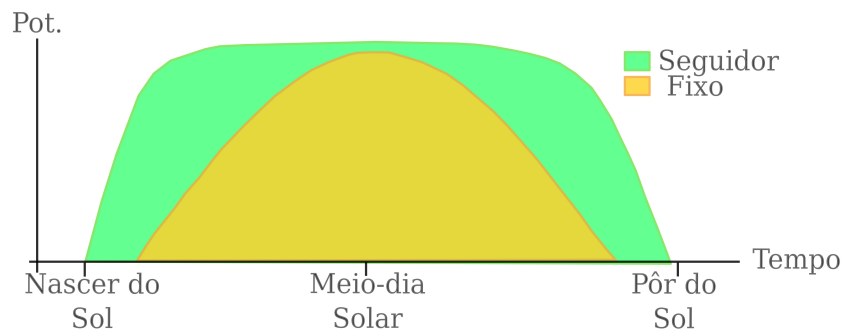


Figura 2.1 – Ilustração das curvas das potências teóricas em uma fileira de sistema FV acoplado a uma estrutura fixa (sem rastreamento) e estrutura móvel (com rastreamento solar horizontal de eixo único). Fonte: Autoria Própria.

Por mais que sua implementação em grande escala seja relativamente recente, destaca-se que o primeiro rastreador foi proposto em 1962 (MOUSAZADEH *et al.*, 2009). A partir deste ponto, várias topologias de seguimento solar surgiram, tais como: rastreamento passivo, ativo, entre outros. Nas seções subseqüentes serão discutidos os principais tipos de seguidores solares.

2.1.1 Seguidor Solar Passivo

Os rastreadores solares passivos não usam sistemas eletrônicos para operar. Por consequência, não costumam utilizar fontes externas de energia para a sua movimentação dos módulos FV, muito menos um atuador eletromecânico (PARMAR *et al.*, 2015). O funciona-

mento padrão desta metodologia é baseado na dilatação de gases como, por exemplo, o gás denominado Freon (ALEXANDRU; POZNA, 2008).

A implementação mais comum utiliza dois cilindros, cada um em uma extremidade do módulo fotovoltaico. O módulo inicia com orientação oeste, se movendo para leste a medida que os raios solares transferem calor para os cilindros. O movimento ocorre por conta do desequilíbrio de massa que irá surgir entre os cilindros (ADÁN, 2007). A Figura 2.2 representa, em síntese, o funcionamento descrito para esse sistema.

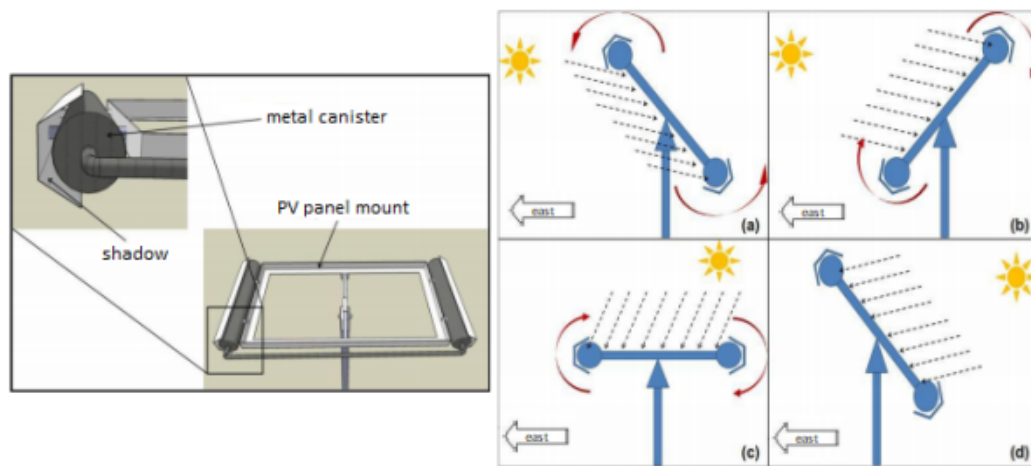


Figura 2.2 – *Design* típico de um seguidor passivo (BRITO *et al.*, 2019).

Como desvantagens principais do seguidor solar passivo, pode-se elencar: sofrem distúrbios por conta da força do vento, operam melhor em temperaturas mais altas, tornam o sistema mais dependente da radiação solar, geralmente são desenvolvidos para movimentação em eixo único (ABOUZEID, 2001). Como vantagens tem-se: simplicidade construtiva, custo de implementação mais baixo, manutenção simples.

Comparado com módulos fixos, pode-se verificar um aumento de 23% da eficiência global do arranjo com o uso dessa topologia (CLIFFORD; EASTWOOD, 2004). Também é citado na literatura aumentos de até 28% da eficiência (LIRA, 2014), no entanto, o grau de complexidade da metodologia torna a aplicação inviável, especialmente para usos em grande escala.

2.1.2 Seguidor Solar Ativo

Em contraste com os seguidores solares passivos, os rastreadores ativos já usam a energia elétrica para operar atuadores que, por sua vez, movem os módulos ao longo do

dia, sendo baseados em sistemas eletrônicos e de lógica (Controlador Lógico Programável ou microcontrolador, por exemplo). Por conta disso, são alternativas que costumam ter mais precisão e, portanto, eficiência. Como atuadores típicos para a movimentação, tem-se: motores de passo, motores CC ou motores CA (como de indução) (HULD *et al.*, 2010).

Os seguidores ativos possuem uma grande gama de modelos possíveis, já que existem inúmeras opções de lógica de rastreamento solar, assim como atuadores. Por exemplo, existem alternativas de seguimento baseada nos horários do dia, rastreador azimutal, seguidor baseado no uso de fotosensores, entre outros. Além disso, a quantidade de eixos de movimento também diferenciam esses sistemas (eixo único ou dois eixos).

Na literatura, consegue-se encontrar rastreador solar de diversos tipos, assim como apresentado na Seção 1.2 do primeiro Capítulo. Em geral, a eficiência média dessas metodologias são de 16% a 40% maiores que a alternativa com painéis fixos (ABDALLAH, 2004)

2.2 Metodologias de Seguimento Solar Ativo

2.2.1 Abordagem com Fotosensor

A presença e a intensidade da luz pode ser identificada com fotosensores, os quais possuem diversos tipos. Entre as opções disponíveis, consegue-se citar: fotodiodo, fototransistor, LDR, células de referências, entre outros. Quando há o uso desses dispositivos, geralmente tem-se um controle em malha fechada do sistema para movimentação dos atuadores (HAFEZ *et al.*, 2017).

São posicionados ao menos dois fotosensores, cada um em uma extremidade do módulo FV. A diferença de luminosidade entre ambos cria a indicação do ângulo que deve ser corrigido. Com essa informação, utiliza-se sistemas que traduzem esse dado para um comportamento equivalente do atuador.

É aconselhável que os fotosensores possuam exatidão e precisão similares, a fim de assegurar níveis de leitura parecidos nas mesmas condições. Se isso não ocorrer, a estimativa da posição do sol será menos precisa. Adicionalmente, deve-se salientar que a sensibilidade e a confiabilidade desses sensores são afetadas pelo envelhecimento do semicondutor, assim como sujeira. Do mesmo modo, pode haver perda de orientação em dias nublados ou com pouca iluminação (LOS, 2019).

Um exemplo de aplicação de LDRs em um contexto relacionado é apresentado por Barros *et al.*, em 2018. Neste trabalho, foi desenvolvido um medidor de irradiância solar de baixo custo utilizando sensores LDR. O estudo destaca a importância da irradiância na

conversão de energia solar e propõe uma solução de baixo custo com medidas compatíveis com medidores de irradiância convencionais. A calibração dos sensores LDR foi realizada com base em um piranômetro fotodiodo, e análises estatísticas mostraram a validade do sistema proposto com erros relativos significativamente pequenos (BARROS *et al.*, 2018).

2.2.2 Abordagem com Visão Computacional

A posição do sol é estimada usando uma câmera, com auxílio de um algoritmo de identificação de imagem. Dentre as opções possíveis para o *tracking*, esta é a alternativa mais complexa, já que demanda maior processamento computacional, além de maior manutenção e cuidado na sua instalação. Como espera-se que a câmera fique sempre apontada para o sol, é preciso ainda investir em um sistema de proteção e filtragem da irradiação, de modo a evitar que o equipamento se danifique. De todo modo, também tem-se vantagens associadas a essa metodologia, tais como: grande resolução e precisão, posto que permite localizar objetos com características conhecidas; grande visão periférica; entre outros (NASCIMENTO, 2015a).

2.2.3 Sem Sensor de Luz, Irradiância ou Similar

Quando o seguimento solar é feito sem uso de sensores, costuma-se ter um sistema de malha aberta. Por conta disso, é comum a implementação de algum algoritmo de determinação da posição solar, conhecido como algoritmo astronômico.

Como mostrado na Seção 1.1, o algoritmo astronômico sem sensoriamento é o método mais utilizado pelos fabricantes. Utilizando as equações da astronomia solar, o algoritmo determina a altitude (altura do sol acima do horizonte) e o azimute (direção do sol em relação ao norte geográfico) em qualquer momento do dia. A partir dessas informações, o sistema de rastreamento ajusta automaticamente a inclinação e/ou a orientação dos módulos fotovoltaicos para alinhar-se o mais perpendicularmente possível aos raios solares incidentes, maximizando a eficiência da geração de energia (SOCIETY, 2021). Em geral, o sistema de controle possui tais equações embarcadas.

2.2.4 Sistema Misto

É uma metodologia que une o seguimento solar feito com sensores e o realizado com base em algoritmos da predição da posição solar. Há a comparação dos valores gerados pelo algoritmo e pelos fotosensores, tornando mais robusto o processo de decisão de como será o acionamento do atuador. Por conta da comparação citada, pode-se usar algoritmos de estimativa da posição do sol de menor confiabilidade. Espera-se que os dados do fotosensor supram as falhas do algoritmo de posicionamento e vice-versa. Neste âmbito, cabe ao projetista defi-

nir em quais contextos cada conjunto de informações terá a maior prioridade na tomada de decisões do algoritmo final de movimentação do atuador, ou os valores lidos pelos sensores de luminosidade ou a técnica da predição da posição do sol, por exemplo (CORTEZ, 2013).

2.2.5 *Backtracking* em Sistemas de Rastreamento Solar

O *backtracking* é uma técnica utilizada em sistemas de rastreamento solar para minimizar as perdas de geração energética causadas por sombreamentos entre fileiras paralelas, em usinas com rastreadores de eixo único com múltiplas *strings*. Esta estratégia ajusta o ângulo dos módulos fotovoltaicos, especialmente durante as primeiras e últimas horas do dia, quando o sol está mais baixo no horizonte (SMALLEY, 2015).

A Figura 2.3 ilustra a diferença entre um sistema de seguimento solar, com e sem *backtracking*. No cenário sem *backtracking*, os módulos fotovoltaicos são inclinados para maximizar a captação de luz solar direta, mas isso resulta em sombras significativas nas filas subsequentes de módulos, reduzindo a eficiência geral do sistema. Com o *backtracking*, os módulos ajustam seus ângulos para minimizar essas sombras, mesmo que isso signifique comprometer ligeiramente a angulação ideal para a captação de luz solar direta. Este ajuste dinâmico permite uma captação mais eficiente da energia ao longo do dia.

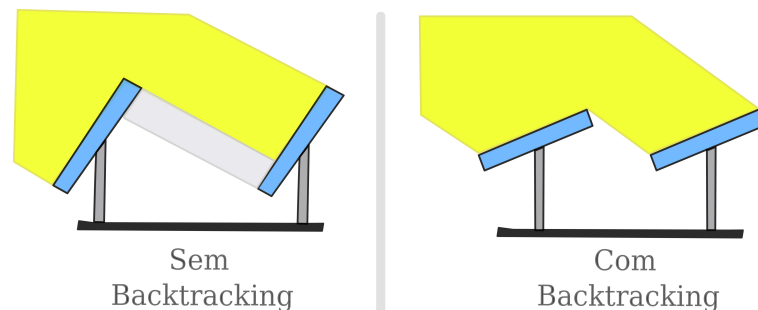


Figura 2.3 – Comparação entre sistemas de seguimento solar com e sem *backtracking*. Imagem adaptada de (NASCIMENTO *et al.*, 2016).

2.3 Tipos de Rastreadores Solares

2.3.1 Seguidor Solar Horizontal

O rastreador de eixo horizontal possui eixo de rotação exposta de modo paralelo à superfície, com o seguimento ocorrendo linearmente de leste para oeste. São considerados estruturalmente mais simples, mais rígidos e estáveis. Todavia, em comparação com outras metodologias de *tracking*, sua eficiência é considerada baixa, tendo um ganho médio na faixa de 25% em comparação com a estrutura fixa. A Figura 2.4 exibe um exemplo desse rastreador.

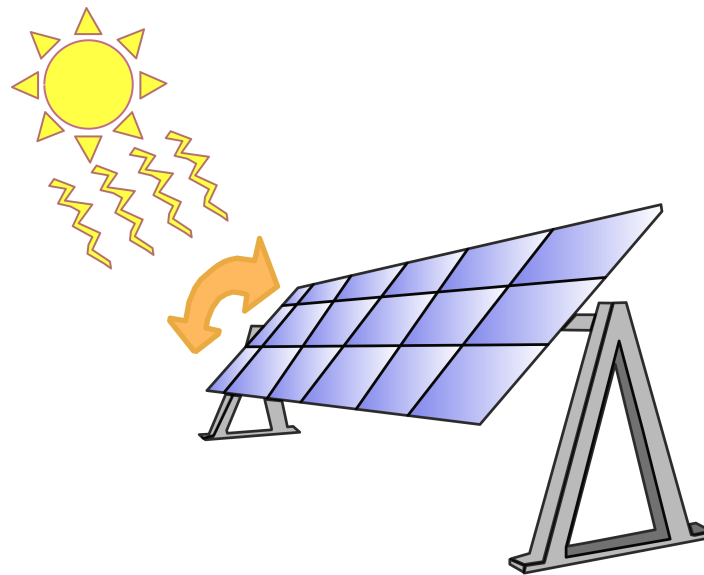


Figura 2.4 – Exemplo de rastreador com eixo horizontal. Fonte: Autoria Própria.

A Figura 2.5 ilustra o movimento típico dessa categoria de seguidor ao longo do dia. Geralmente, os módulos fotovoltaicos iniciam o dia com inclinação mais voltada para o leste. Ao meio-dia, a tendência é que os módulos fotovoltaicos tenham uma inclinação próxima de zero. De tarde, a inclinação já é voltada para o oeste.

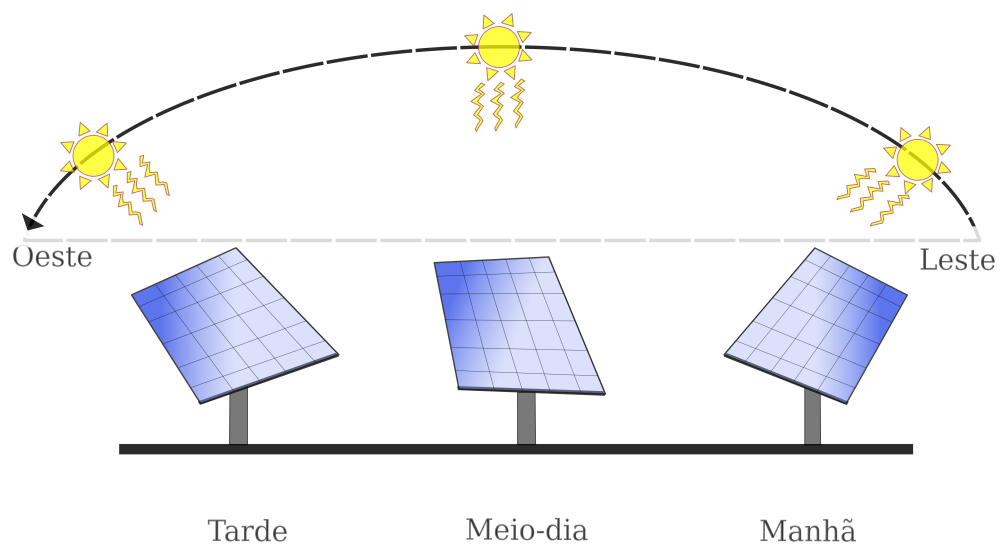


Figura 2.5 – Movimentação típica de um rastreador solar com eixo horizontal. Fonte: Autoria Própria.

2.3.2 Seguidor Solar Polar de Eixo Único

O seguidor polar de eixo único é posicionado de forma perpendicular à movimentação do sol, com orientação Norte e Sul. Seu movimento, portanto, ocorre de leste para oeste ou

de oeste para leste. Em outros termos, tem-se o *tracking* do nascer ao pôr do sol (CORTEZ, 2013). A Figura 2.6 mostra uma ilustração desse tipo de seguidor. Salienta-se que o seguidor polar pode ser interpretado como um tipo particular de seguidor horizontal, em que o ângulo de inclinação foi ajustado para corresponder à latitude local.

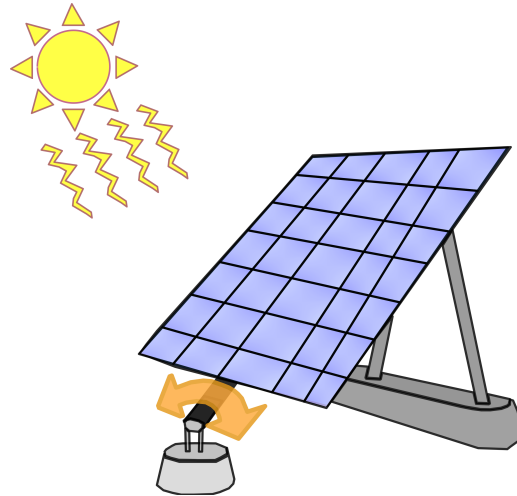


Figura 2.6 – Exemplo de seguidor polar de eixo único. Fonte: Autoria Própria.

Essa abordagem se mostra mais eficiente em latitudes mais elevadas, ou seja, distantes dos trópicos e da linha do equador (CORTEZ, 2013). Em comparação com uma estrutura fixa, na literatura pode-se encontrar ganho de geração energética de até 31% na eficiência (OLIVEIRA, 2007).

2.3.3 Seguidor Solar Azimutal

Os rastreadores solares azimutais têm eixo vertical que comporta a estrutura de fixação dos módulos. Eles são caracterizados por possuir somente um eixo, movimentando-se sobre uma base fixa, tomando como referência a variação do ângulo de azimute durante um dia. Entende-se como ângulo de azimute o ângulo medido no plano horizontal, entre o meridiano e o plano vertical (SOARES, 2019). A Figura 2.7 ilustra esse tipo de rastreador.

A montagem desses seguidores é considerada simples, sendo mais adequados em locais distantes da zona do equador (LOS, 2019). Conseguem-se encontrar uma eficiência até 35,5% maior desse *tracking* quando em comparação com a metodologia fixa (OLIVEIRA, 2008).

2.3.4 Seguidor Solar de Dois Eixos

Como a nomenclatura sugere, o rastreador solar de dois eixos possui duas movimentações base: norte-sul e leste-oeste. Por conta disso, espera-se que o rendimento seja mais elevado, tendo em vista que a irradiação incidente sempre será perpendicular aos módulos.

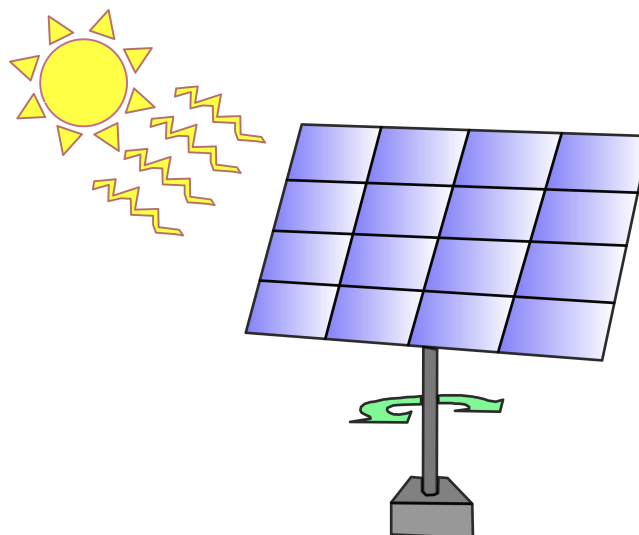


Figura 2.7 – Exemplo de seguidor Azimutal. Fonte: Autoria Própria.

Por ser uma alternativa de seguimento com mais eixos, a mesma necessita de uma área maior de instalação, além de um investimento inicial mais elevado (MARTINS, 2016). A Figura 2.8 exibe uma ilustração desse tipo de seguidor.

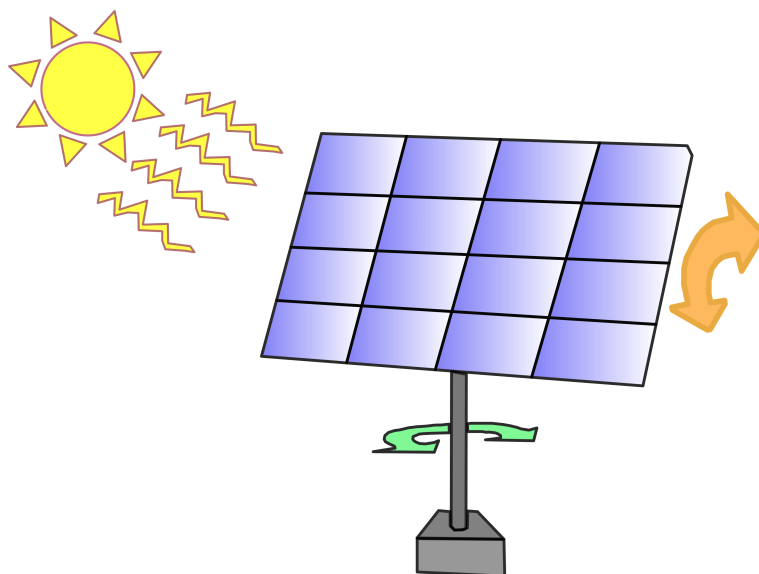


Figura 2.8 – Exemplo de *tracker* de dois eixos. Fonte: Autoria Própria.

Ao mesmo tempo que assegura maior eficiência, a presença de dois eixos também eleva os custos de manutenção, como também exige o uso de uma estrutura mais robusta, a fim de suportar os esforços causados por rajadas de vento. Destaca-se ainda que os sistemas de dois eixos podem ser substituídos por seguidores solares mais simples e com rendimentos próximos (CORTEZ, 2013). Na literatura há trabalhos que mostram uma eficiência nominal de 41,34% para esse seguidor solar em comparação com a opção fixa (ABDALLAH, 2004).

2.4 Posicionamento Ótimo do Seguidor Solar e Curvas de Irradiância

Nesta seção serão abordados os principais pontos teóricos utilizados durante o desenvolvimento da metodologia deste trabalho, tais como: equações para estimativa da posição do sol no céu; equações para estimativa do meio-dia solar, nascer e pôr do sol; como definir a posição ótima do *tracker* (caso baseado em data, hora e coordenadas geográficas); como estimar as curvas de irradiância para usinas fotovoltaicas fixas, com seguidores de um e dois eixos (caso de céu claro). Ademais, os desenvolvimentos apresentados nesta seção foram baseados no livro do Masters (2004).

2.4.1 Estimativa da Posição do Sol no Céu

A Figura 2.9 ilustra uma perspectiva alternativa da posição solar em relação à Terra. O ângulo de declinação solar, denotado por δ , é crucial para compreender a interação solar-terrestre. Este ângulo, formado entre o plano do equador e uma linha que se estende do centro da terra ao centro teórico do sol, varia entre $\pm 23,45^\circ$. A declinação é considerada positiva quando o sol está ao norte do equador e negativa ao sul. A equação de declinação solar é expressa por (2.1):

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right], \quad (2.1)$$

em que n representa o dia do ano.

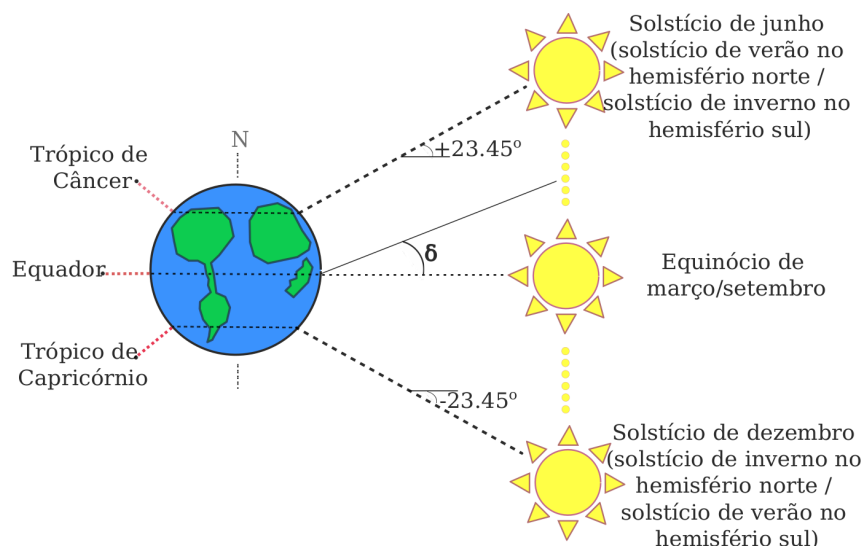


Figura 2.9 – Vista alternativa da posição do sol em relação ao planeta terra. Adaptada de (MASTERS, 2004).

Com o valor de δ , é possível calcular outras variáveis importantes para determinar a

posição solar. Por exemplo, o ângulo da altitude solar ao meio-dia, dado por (2.2):

$$\beta = 90^\circ - L + \delta, \quad (2.2)$$

em que β é o ângulo formado entre o sol e o horizonte local, vide Figura 2.10, e L representa a latitude do local em graus.

A posição do sol também é caracterizada pela altitude solar e pelo ângulo de azimute, denotado por ϕ_s , vide Figura 2.10. O azimute é positivo no período da manhã (com o sol a leste), negativo à tarde (sol a oeste) e zero ao meio-dia solar. Estas variáveis podem ser estimadas utilizando as Equações (2.3) e (2.4):

$$\sin(\beta) = \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(L) \sin(\delta), \quad (2.3)$$

$$\sin(\phi_s) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(\beta)} \implies \phi_s = \arcsin\left[\frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(\beta)}\right]. \quad (2.4)$$

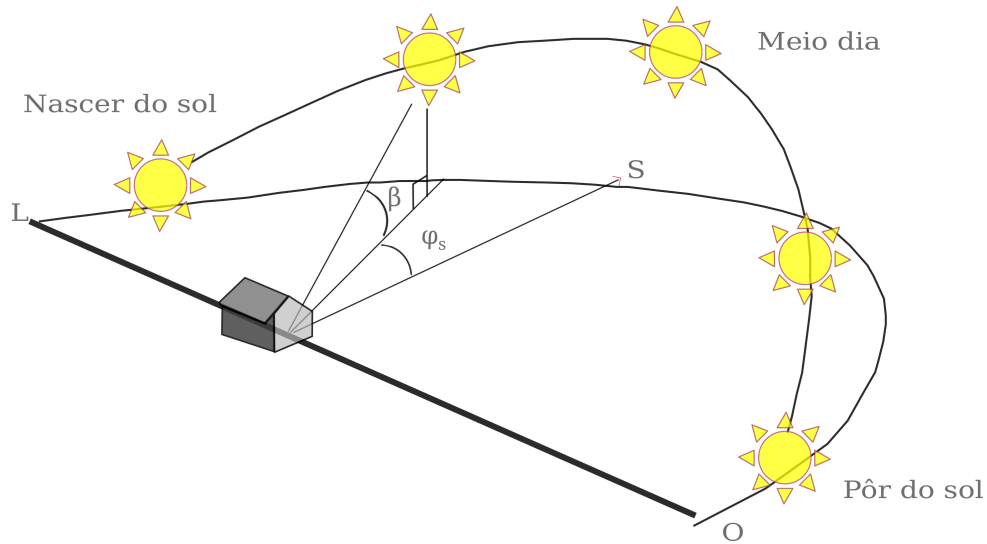


Figura 2.10 – Representação dos ângulos β e ϕ_s . Adaptada de (MASTERS, 2004).

O ângulo horário ω indica o movimento da terra necessário para alcançar o meio-dia solar, expresso como (2.5):

$$\omega = \left(\frac{15^\circ}{\text{hora}}\right) \cdot (\text{Horas até o Meio Dia Solar}). \quad (2.5)$$

No verão e primavera, o ângulo de azimute pode assumir valores maiores que 90° ou menores que -90° no nascer e/ou por do sol. Nesse âmbito, torna-se necessário adequar o valor de ϕ_s . Para tanto, aplica-se a seguinte condição: caso $\cos(\omega) \geq \frac{\tan(\delta)}{\tan(L)}$, então $|\phi_s| \leq 90^\circ$; caso contrário, $|\phi_s| > 90^\circ$.

O período descrito nas equações anteriores baseia-se no horário solar. Contudo, o horário civil, que determina a configuração dos relógios, segue um sistema de referência distinto. Portanto, é essencial converter o horário civil para seu correspondente solar. Devido ao movimento de translação da Terra em uma órbita elíptica ao redor do sol, a velocidade de deslocamento do planeta varia ao longo do ano. Isso resulta em uma variação na duração do dia solar, dependendo da época do ano (MASTERS, 2004). A equação do tempo, expressa em minutos, é a ferramenta utilizada para calcular essa discrepância, sendo definida por (2.6):

$$E = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B), \quad (2.6)$$

em que B é calculado como (2.7):

$$B = \frac{360}{364} \cdot (n - 81). \quad (2.7)$$

Finalmente, a relação entre o horário civil e o horário solar local é ajustada por (2.8):

$$ST = CT + 4(LTM - L_g) + E, \quad (2.8)$$

sendo: ST a hora solar, CT a hora civil, LTM o meridiano de referência do fuso e L_g a longitude local.

Essas equações permitem estimar com precisão a posição do sol no céu para diferentes latitudes e dias do ano, facilitando o cálculo preciso do ângulo de incidência da irradiância solar em diferentes configurações de instalação de módulos FV.

2.4.2 Estimativa do Meio-Dia Solar, Nascer e Pôr do Sol

Embora possa parecer intuitivo considerar que o meio-dia solar ocorre às 12 horas, esta não é uma suposição precisa, pois o meio dia solar pode variar antes ou depois das 12 horas dependendo da localização geográfica e da época do ano. Essa compreensão é crucial para determinar com precisão o nascer e o pôr do sol, elementos fundamentais para o desenvolvimento de algoritmos de rastreamento solar.

O cálculo do meio-dia solar envolve três parâmetros principais: o dia do ano, a longitude e o fuso horário. Primeiramente, a variável E , que representa a equação do tempo, é calculada utilizando a Equação (2.6). Em seguida, faz-se a correção para a longitude como descrito na Equação (2.9):

$$C_l = 4(L_g - 15F_h), \quad (2.9)$$

em que C_l é a correção em minutos devido à longitude, L_g é a longitude do local e F_h é o fuso horário. O meio-dia solar local, expresso em minutos, é então determinado por (2.10):

$$M_{ds} = 720 - (E + C_l). \quad (2.10)$$

Para converter M_{ds} para horas fracionárias, divide-se o resultado em minutos por 60.

A determinação dos horários de nascer e pôr do sol inicia com o cálculo do ângulo horário do nascer do sol (HSR), usando a latitude local e a declinação solar, conforme Equação (2.11):

$$\text{HSR} = \arccos(-\tan L \tan \delta). \quad (2.11)$$

Com HSR definido, o horário de nascer do sol pode ser calculado por (2.12):

$$N_s = M_{ds} - \frac{\text{HSR}}{15}. \quad (2.12)$$

Da mesma forma, o pôr do sol pode ser estimado via Equação (2.13):

$$P_s = M_{ds} + \frac{\text{HSR}}{15}. \quad (2.13)$$

Tanto N_s quanto P_s são expressos em horas fracionadas, permitindo um planejamento preciso para aplicações que dependem da posição solar, como os sistemas de *tracking*.

2.4.3 Posicionamento *Tracker* de Eixo Único Horizontal

Rastreadores solares de eixo único horizontal podem adotar diferentes estratégias de movimento ao longo do dia, incluindo ajustes em passos fixos, movimentos inteligentes com ou sem o uso de *backtracking*. No método de passos fixos, os módulos fotovoltaicos são reajustados em intervalos regulares, mantendo uma distância angular constante entre posições consecutivas. Os movimentos inteligentes, por outro lado, definem os ângulos de forma mais exata através de fórmulas, sensores, entre outros métodos. Neste estudo, utiliza-se a metodologia das equações preditivas da posição do sol para configurar o seguimento solar.

Em instalações com várias fileiras de módulos, o sombreamento entre módulos pode ocorrer se os módulos forem excessivamente inclinados. O *backtracking* é uma técnica desenvolvida para minimizar esse sombreamento, vide Seção 2.2.5. A fórmula do *backtracking* adiciona um ângulo de correção (a_c) ao ângulo de incidência solar (I_s) resultando no ângulo de posicionamento ao longo do dia, expresso pela Equação (2.14):

$$A_{pd} = a_c + I_s. \quad (2.14)$$

O ângulo de incidência solar, I_s , é calculado através da Equação (2.15):

$$I_s = \frac{180(H_{atualF} - N_s)}{\frac{2\text{HSR}}{15}} - 90, \quad (2.15)$$

em que H_{atualF} é a hora fracionada atual. O valor de I_s será zero antes do nascer ou após o pôr do sol (utiliza-se os resultados das Equações (2.12) e (2.13) como referências).

Os possíveis valores para o ângulo de correção dependem do coeficiente de *backtracking* (b) e do momento do dia, conforme as condições apresentadas pela Equação (2.16):

$$a_c = \begin{cases} 90 - \gamma, & \text{se } b \leq 1 \text{ e } H_{atualF} \leq M_{ds} \\ \gamma - 90, & \text{se } b \leq 1 \text{ e } H_{atualF} \geq M_{ds} \\ 0, & \text{se } b > 1. \end{cases} \quad (2.16)$$

O coeficiente de *backtracking*, b , é determinado pela Equação (2.17) (NASCIMENTO, 2015b):

$$b = \frac{d \sin(\beta - \alpha)}{W}, \quad (2.17)$$

em que d representa a distância entre os módulos, β é o ângulo calculado pela Equação (2.3), α o ângulo de inclinação do terreno, e W a largura dos módulos. Por sua vez, o ângulo γ é dado por (2.18):

$$\gamma = \begin{cases} \arcsin(b), & \text{se } -1 \leq b \leq 1 \\ 0, & \text{se } b > 1. \end{cases} \quad (2.18)$$

Sem o uso de *backtracking*, o sistema se baseia apenas no ângulo de incidência solar, seguindo o seu valor. Limitações mecânicas podem, contudo, restringir a amplitude de movimento dos módulos fotovoltaicos, sendo considerados neste projeto apenas ângulos entre -45° e $+45^\circ$ para o rastreador.

2.4.4 Incidência da Irradiância Solar em Módulos Fotovoltaicos

A eficácia com que a energia solar é convertida em eletricidade por um módulo fotovoltaico depende essencialmente de três componentes da irradiância: direta, difusa e refletida. A componente direta da irradiância solar é influenciada pela trajetória dos raios solares através da atmosfera. Um modelo comum para descrever esta componente trata a irradiância direta como decrescente exponencialmente em função da profundidade óptica da atmosfera, como demonstra a Equação (2.19):

$$I_B = Ae^{-km}, \quad (2.19)$$

em que I_B representa a irradiância que atinge a superfície terrestre perpendicularmente, A é o fluxo extraterrestre, k o coeficiente de atenuação atmosférica e m a massa de ar. O valor de m é determinado por (2.20):

$$m = \frac{1}{\sin \beta}, \quad (2.20)$$

sendo β a elevação solar já descrita anteriormente.

Os valores de A e k podem ser calculados conforme as Equações (2.21) e (2.22):

$$A = 1160 + 75 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 275) \right], \quad (2.21)$$

$$k = 0,174 + 0,035 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 100) \right]. \quad (2.22)$$

A quantidade de irradiância direta normal absorvida por um módulo fotovoltaico depende do ângulo de incidência θ , que varia conforme a orientação do módulo e a posição solar. Este ângulo pode ser expresso matematicamente por (2.23):

$$\cos \theta = \cos \beta \cos (\phi_s - \phi_c) \sin \psi + \sin \beta \cos \psi, \quad (2.23)$$

sendo que ψ e ϕ_c representam, respectivamente, o ângulo de inclinação e o azimute do coletor fotovoltaico. O coletor fotovoltaico refere-se aos módulos FV que capturam a luz solar e a convertem diretamente em eletricidade. O azimute do coletor difere do ângulo ϕ_s , sendo convencionalmente negativo a oeste e positivo a leste. Quando apontado para o norte, no hemisfério sul ϕ_c é nulo.

A irradiância difusa horizontal é proporcional à componente direta e é menos afetada pela posição solar, como descrito pela Equação (2.24):

$$I_{DH} = CI_B, \quad (2.24)$$

com C representando o coeficiente de céu difuso, dado pela Equação (2.25):

$$C = 0,095 + 0,04 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 100) \right]. \quad (2.25)$$

A irradiância difusa que efetivamente atinge o módulo é ajustada pela inclinação deste, conforme Equação (2.26):

$$I_{DC} = I_{DH} \left(\frac{1 + \cos \psi}{2} \right) = CI_B \left(\frac{1 + \cos \psi}{2} \right). \quad (2.26)$$

A irradiância refletida, I_{RC} , é uma fração da energia solar refletida pelo solo e captada pelo coletor. Este valor depende tanto da irradiância direta horizontal quanto da difusa e da inclinação do módulo, vide Equação (2.27):

$$I_{RC} = \rho(I_B + I_{DH}) \left(\frac{1 - \cos \psi}{2} \right). \quad (2.27)$$

Ao combinar as equações de cada componente, estima-se a irradiância total (ou global) que atinge um módulo fotovoltaico em condições de céu claro, a qual é expressa pela Equação (2.28):

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC}. \quad (2.28)$$

Para sistemas com seguidores solares, a lógica discutida para determinação de I_C se mantém, ou seja, continua sendo o somatório de I_{BC} , I_{DC} e I_{RC} . Todavia, o cálculo desse trio de componentes se altera.

Destaca-se que, no caso de um módulo fixo, o mesmo é orientado para o norte geográfico no hemisfério sul, com $\phi_c = 0^\circ$ e $\psi = |L|$. Esse ajuste deve ser feito considerando que o trabalho é conduzido no Brasil.

O rastreamento horizontal em um único eixo para sistemas fotovoltaicos geralmente utiliza um suporte ajustável e se movimenta de leste a oeste. Ajustar o ângulo de inclinação para corresponder à latitude local é conhecido como montagem polar, conforme ilustrado na Figura 2.11, e otimiza a coleta anual de irradiação para configurações de módulos fixos. As Equações (2.29) a (2.31) são usadas para estimar a irradiância nesta situação:

$$I_{BC1} = I_B \cos \delta, \quad (2.29)$$

$$I_{DC1} = CI_B \left[\frac{1 + \cos(90 - \beta + \delta)}{2} \right], \quad (2.30)$$

$$I_{RC1} = \rho I_B (\sin \beta + C) \left[\frac{1 - \cos(90 - \beta + \delta)}{2} \right]. \quad (2.31)$$

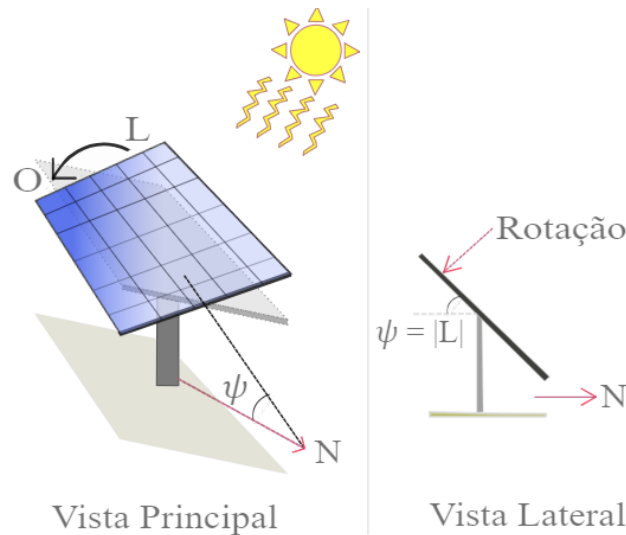


Figura 2.11 – Suporte de rastreamento de um eixo com rastreamento leste-oeste. Adaptado de (MASTERS, 2004).

Para o rastreamento horizontal de eixo único proposto neste trabalho, as Equações (2.29) a (2.31) são adaptadas. O novo rastreador foi desenvolvido com base na Figura 2.12. Utilizando $\phi_c = 90^\circ$, o módulo é rotacionado para o leste. Desta forma, o ângulo que varia no rastreamento horizontal é ψ , que pode mudar através de variações igualmente espaçadas, baseadas na incidência solar, entre outros métodos.

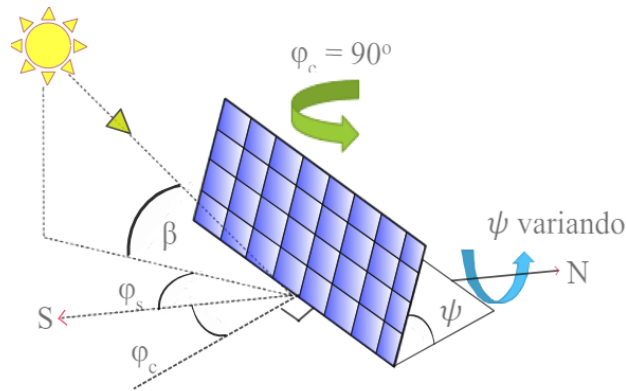


Figura 2.12 – Modelo de irradiância proposto para rastreador horizontal de eixo único. Fonte: Autoria Própria.

Para calcular as componentes de irradiância de um sistema de *tracker* de dois eixos, utiliza-se a Figura 2.13 como referência. Nesse caso, a irradiância direta no coletor é I_B , enquanto as parcelas difusa e refletida são encontradas usando (2.26) e (2.27), mas com um ângulo de inclinação do coletor corrigido, ou seja, igual ao complemento do ângulo de altitude solar. Portanto, para o seguidor de eixo duplo tem-se as Equações (2.32) a (2.34):

$$I_{BC2} = I_B, \tag{2.32}$$

$$I_{DC2} = CI_B \left[\frac{1 + \cos(90^\circ - \beta)}{2} \right], \tag{2.33}$$

$$I_{RC2} = \rho I_B (\sin \beta + C) \left[\frac{1 - \cos(90^\circ - \beta)}{2} \right]. \tag{2.34}$$

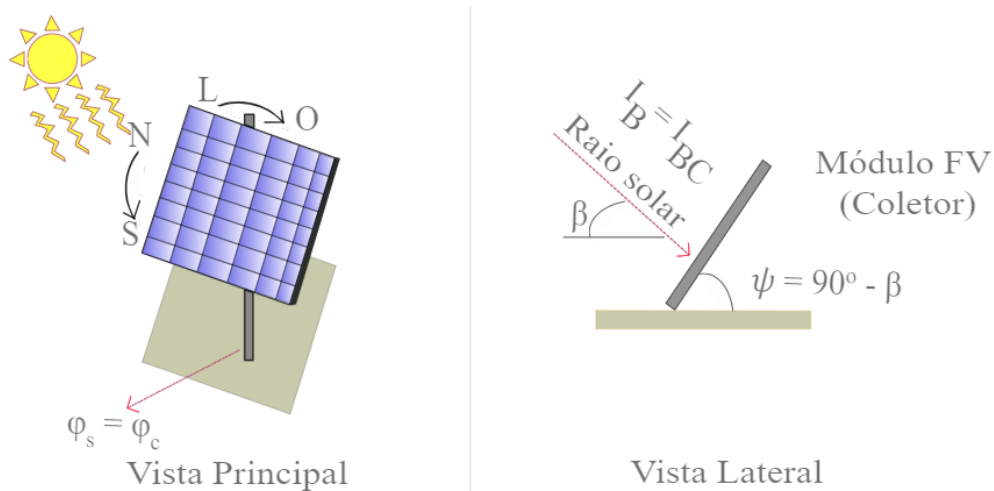


Figura 2.13 – Relações angulares do rastreamento de dois eixos. Adaptada de (MASTERS, 2004).

2.5 Resumo do Capítulo 2

Neste capítulo, foram discutidos os conceitos teóricos essenciais para o entendimento do trabalho proposto, incluindo os diferentes tipos de seguidores solares, as metodologias de seguimento solar ativo e os tipos de rastreadores solares, bem como as metodologias para estimar a posição do sol e as curvas de irradiância solar. O próximo capítulo apresentará a metodologia adotada para o desenvolvimento do sistema de rastreamento solar, detalhando os materiais e métodos utilizados.

3 Seguidor Solar Investigado

3.1 *Hardware* do Projeto

O seguidor solar horizontal de um eixo originalmente comercializado pela empresa Flex utiliza o painel de controle mostrado na Figura 3.1. Esses painéis incluem, em suma, um CLP para a aplicação das lógicas, DPS (Dispositivo de Proteção contra Surtos), relés, contadores, entre outros componentes típicos para este contexto.



Figura 3.1 – Painel do seguidor solar original com CLP.

A Figura 3.2 apresenta o esquema simplificado da montagem original do seguidor solar, que utiliza como controlador o *Nexo Web - Mini CLP* da Metaltex. O CLP opera com tensões de até 24 V, e todos os sensores, exceto o piranômetro, são alimentados com essa tensão, eliminando a necessidade de ajustes auxiliares nos níveis dos sinais monitorados. A determinação do posicionamento ótimo do rastreador é realizada por equações de estimativa da posição solar. O atuador é um Motor de Indução Trifásico (MIT) com caixa de redução, acionado por inversor de frequência. A cada 8 minutos, entre o nascer e o pôr do sol, o controlador envia comandos ao inversor via relés, acionando o motor até que os módulos fotovoltaicos atinjam a inclinação ótima estimada para um dado horário.

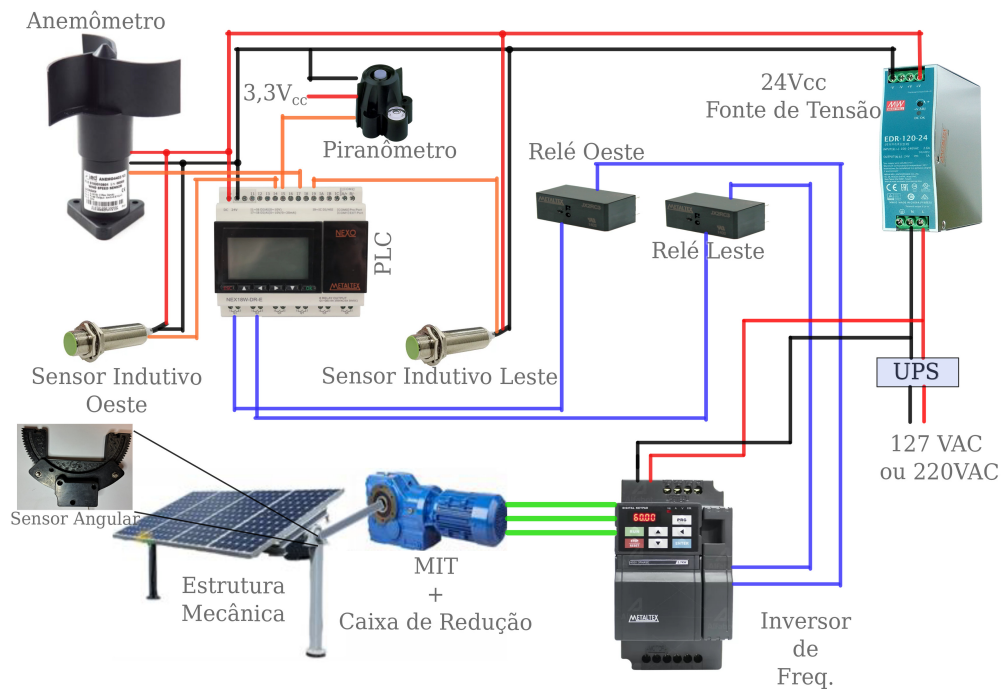


Figura 3.2 – Esquema simplificado do painel do *tracker* original com CLP. Fonte: Autoria Própria.

A estrutura mecânica do rastreador possui movimento limitado de -45° até $+45^\circ$. Conectados à estrutura, sensores indutivos operam como fim de curso, impedindo o sistema de ultrapassar os limites estabelecidos. A velocidade do vento é monitorada por um anemômetro, que move os módulos para uma inclinação de segurança caso o vento exceda um limite. O ângulo dos módulos é medido por um sensor baseado em potenciômetro, criado especialmente para o sistema, em que a alteração da posição do potenciômetro provoca a alteração da sua tensão de saída. O algoritmo calcula o ângulo equivalente com base nesse sinal em volts. Complementando a lista de sensores, utiliza-se um piranômetro para monitorar a irradiância local, embora esse dado não seja usado ativamente no seguimento solar, sendo coletado apenas para avaliar o desempenho da usina e podendo ser removido sem prejudicar o rastreo. A Tabela 3.1 resume todos os sensores e dispositivos utilizados, suas funções, intervalo de alimentação e relevância para a versão com CLP.

A alternativa com CLP, no entanto, possui algumas desvantagens, como o alto custo de alguns componentes, especialmente o controlador. Portanto, é proposta a substituição do controlador do painel de instalação do sistema do *tracking* por uma versão mais econômica, utilizando um microcontrolador como base em vez do CLP. Com isso, espera-se reduzir os custos e tornar a tecnologia do rastreamento solar mais acessível.

O presente trabalho desenvolve um seguidor solar de eixo único horizontal, leste-oeste, controlado por um ESP32, substituindo o CLP como controlador do projeto original. O fun-

Tabela 3.1 – Sensores e dispositivos principais utilizados no rastreador solar versão CLP.

Sensor	Função	Alimentação	Relevância
Sensor Indutivo	Proteção estrutural: fim de curso (movimento limitado, de -45° até $+45^\circ$)	10-30 V_{cc}	Alta, não pode ser removido
Anemômetro de hélice ANEMO4403	Proteção estrutural: monitoramento da velocidade do vento, leva sistema para inclinação de segurança se necessário	5-24 V_{cc}	Alta, não pode ser removido
Sensor Angular	Medição do ângulo dos módulos fotovoltaicos	3,3-24 V_{cc}	Alta, não pode ser removido
Piranômetro Davis 7821 baseado em fotodiodo	Monitoramento da irradiância	3,3 V_{cc}	Baixa, pode ser removido
CLP	Cálculos numéricos e comando do atuador	24 V_{cc}	Alta
UPS	Fornecimento de energia ininterrupta, proteção contra sobretensões, estabilização de tensão, filtragem de ruído e suporte a desligamento seguro	110-250 V_{ca}	Alta
Relés	Ativação do inversor de frequência	24 V_{cc}	Alta
Inversor Freq.	Comando do atuador	220 V_{ca}	Alta
MIT	Atuador	220 V_{ca}	Alta

cionamento base não é alterado quanto a estrutura mecânica, sensores e atuador. No entanto, o *software* precisou de ser refeito, já que enquanto o CLP utiliza a linguagem *ladder*, o ESP32 utiliza a linguagem C. Como vantagem, a substituição do CLP pelo ESP32 reduz significativamente o custo do sistema e aumenta a flexibilidade na implementação do algoritmo de rastreamento solar. No entanto, essa mudança requer adaptações específicas devido às diferenças nos níveis de tensão operacionais. O ESP32 funciona com níveis de tensão de até 3,3 V, enquanto muitos sensores do rastreador solar operam entre 10 V e 30 V, vide Tabela 3.1. Para resolver essa discrepância, uma placa de condicionamento de sinais foi projetada neste trabalho para ajustar os diferentes níveis de tensão.

A Figura 3.3 apresenta um esquema simplificado do sistema de rastreamento solar com o ESP32. No interior da caixa preta está a placa que ajusta os sinais e fornece alimentação para o microcontrolador, assim como o microcontrolador em si. O circuito é alimentado por uma fonte externa de 12 V e a PCI (Placa de Circuito Impresso) possui dois reguladores de tensão: um para 3,3 V e outro para 5 V. O regulador de 3,3 V é usado para os sensores que requerem esse valor de referência, enquanto o regulador de 5 V alimenta o microcontrolador e

os demais circuitos integrados associados. Destaca-se que, embora o ESP32 opere com tensões de até 3,3 V, é possível alimentá-lo com 5 V devido ao regulador interno presente na sua seção de alimentação.

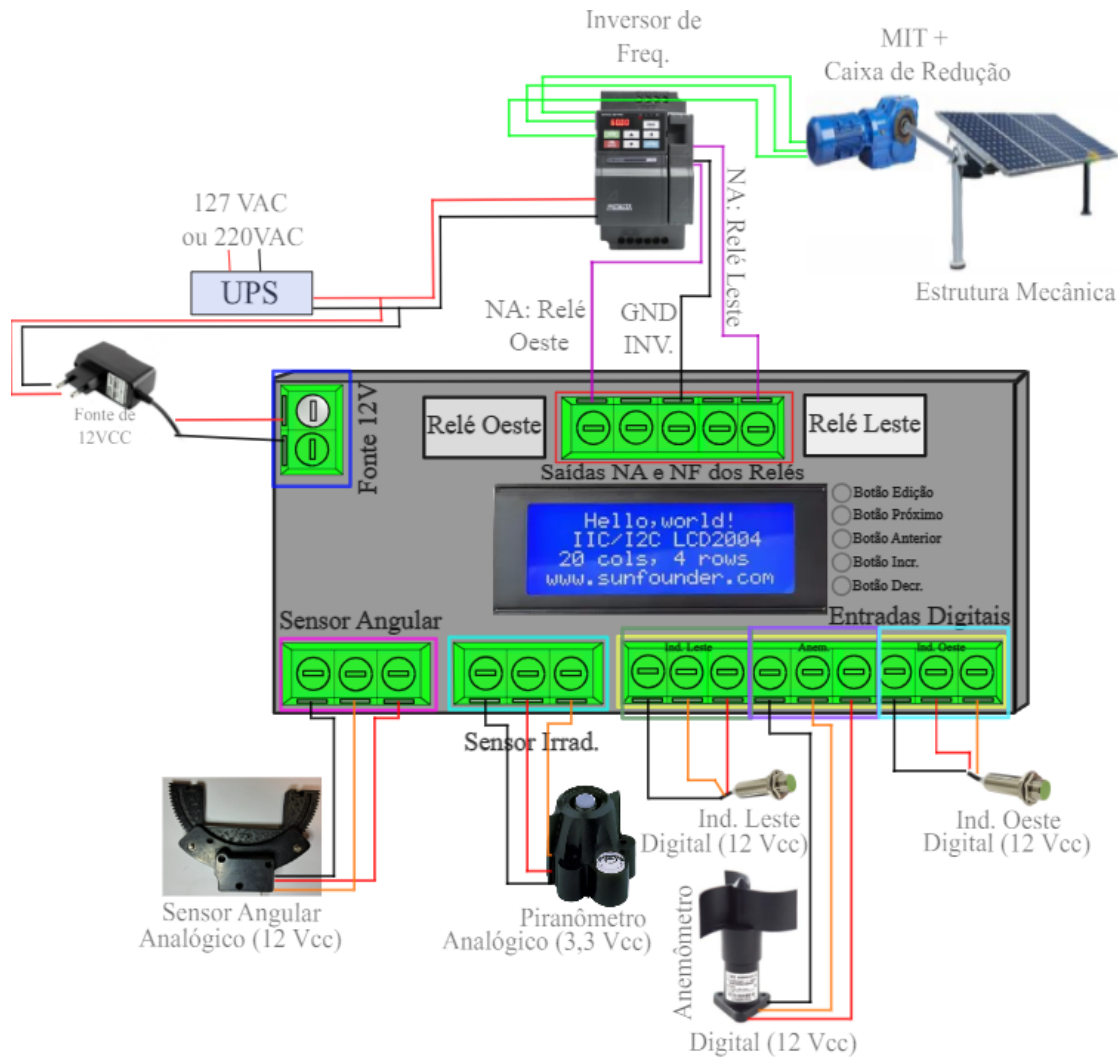


Figura 3.3 – Sistema do seguidor solar com microcontrolador. Fonte: Autoria Própria.

Todos os sensores e dispositivos elencados na Tabela 3.1 ainda são implementados com as mesmas funções, contudo, com exceção do piranômetro, todos os sensores CC passam a ser alimentados com 12 V, em vez dos 24 V utilizados na versão com CLP. Os relés de 24 V também são substituídos por versões equivalentes de 12 V. O piranômetro mantém a alimentação com 3,3 V. A placa projetada coleta os sinais de saída de cada sensor, fornecendo referências analógicas (para o sensor angular e o piranômetro) e sinais digitais para os demais sensores.

Adicionalmente, a placa fornece saídas NA (Normalmente Abertas) e NF (Normalmente Fechadas) dos relés, mas apenas as saídas NA são usadas. O inversor possui duas

entradas, FWD e INV. Quando o GND do inversor é conectado a uma dessas entradas, o atuador é acionado: FWD move o motor em um sentido, enquanto INV move no sentido oposto. Ao ativar um relé, o GND do inversor é conectado a FWD ou INV, movendo o rastreador solar para uma inclinação mais a leste ou oeste. O relé marcado como oeste move os módulos fotovoltaicos para uma inclinação mais a oeste, enquanto o relé leste faz o mesmo para a inclinação oposta.

O sistema proposto também suporta uma Interface Homem-Máquina (IHM), com tela para monitoramento, ajuste dos valores internos e botões de navegação. Na Figura 3.3, é possível verificar uma representação do *display* e dos botões. São implementados cinco botões: edição, próximo, anterior, incremento e decremento. O botão de edição habilita a modificação de variáveis editáveis. Os botões de incremento e decremento são usados somente no modo de edição, para ajustar o valor de uma variável. Fora do modo de edição, os botões próximo e anterior trocam a tela do *display*. No modo de edição, esses mesmos botões alternam a variável a ser ajustada. Além disso, a IHM permite que o usuário altere o modo de operação do *tracker* entre manual e automático, os quais serão explicados com mais detalhes em seções subsequentes. Por sua vez, a Figura 3.4 exibe algumas telas da IHM, as quais mostram informações tais como: valores dos ângulos real e de referência do seguidor solar, coordenadas configuradas, configuração do *backtracking*, estado dos sensores indutivos, velocidade do vento, entre outros.



Figura 3.4 – Representação de algumas telas da IHM.

3.2 Especificação do Microcontrolador para o Projeto

Para o desenvolvimento do trabalho, foram analisados diversos microcontroladores de forma a substituir o CLP do sistema original do seguidor solar horizontal de um eixo. Entre as opções disponíveis, destacavam-se três principais: ATMEGA, a família PIC e a família ESP. A fim de tomar a decisão de qual alternativa seria tecnicamente e financeiramente mais viável, foi necessário avaliar o desempenho de cada um desses microcontroladores, considerando características como: quantidade de entradas e saídas, quantidade de conversores digital para analógico (DAC) e analógico para digital (ADC), capacidade de processamento, capacidade de memória, entre outros parâmetros.

O ATMEGA é o microcontrolador típico das placas *Arduino*. Desse modo, é possível avaliar a capacidade desse microcontrolador considerando os *datasheets* dessas placas. Em análise global, três microcontroladores se destacaram: ATMEGA328, ATMEGA2560 e o Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU. O primeiro se destacou por ser o mais utilizado e barato, tendo em vista que é o microcontrolador do Arduino UNO. Os outros dois, por mais que mais caros, se destacaram quanto ao número de entradas e saídas, capacidade de processamento e memória.

A Tabela 3.2 traz as principais características técnicas e custos dos microcontroladores citados da família ATMEGA, tanto com relação aos desempenhos quanto o preço médio, sendo avaliados os valores típicos que são encontrados com uma pesquisa rápida. Comparando os dados, julga-se que a opção do ATMEGA2560 seria o melhor custo benefício, tendo em vista que possui maior memória e processamento que o ATMEGA328, mas um custo menor quando em comparação com o Atmel SAM3X8E.

Tabela 3.2 – Dados microcontroladores da família ATMEGA.

Modelo	Flash	EEPROM	RAM	Freq.	GPIO	ADC	R\$
ATMEGA328	32 KB	1 KB	2 KB	16 MHz	23	8 (10 Bits)	70,00
ATMEGA2560	256 KB	4 KB	8 KB	16 MHz	86	16 (10 Bits)	250,00
SAM3X8E	512 KB	4 KB	96 KB	84 MHz	66	12 (12 Bits)	500,00

Relativo a família PIC, esta também conta com diferentes modelos. No entanto, optou-se por analisar o PIC 18F4520, tendo em vista que é um dos microcontroladores mais modernos do seu grupo. Como vantagem adicional, seu preço não é elevado, tendo custo menor em comparação com o ATMEGA2560.

A Tabela 3.3 elenca as características do microcontrolador PIC 18F4520. Em comparação com a família ATMEGA, percebe-se que o microcontrolador em voga possui menos capacidade EEPROM e RAM, o que pode ser uma desvantagem considerável em proces-

sos de automação com cálculos complexos. No entanto, o PIC apresenta algumas vantagens singulares, tais como:

1. Apresenta 75 instruções, sendo 83 no caso do *set* de instruções estendido;
2. Apresenta 20 interrupções possíveis;
3. Possui programação *Power-on Reset* (POR) interno;
4. Possui *Brown-out Reset* (BOR) interno;
5. Tem comunicações seriais I2C SPI e USART.

Tabela 3.3 – Dados microcontrolador PIC 18F4520.

Modelo	Flash	EEPROM	RAM	Freq.	GPIO	ADC	R\$
PIC 18F4520	32 KB	256 B	1536 B	40 MHz	36	13 (10 Bits)	100,00

A família ESP foi a última opção considerada para o microcontrolador. Esses microcontroladores têm o diferencial de já possuírem módulo *Wi-fi* integrado e, a depender do modelo, módulo *Bluetooth* também. Essa característica assegura uma considerável vantagem ao microcontrolador, posto que torna mais simples a integração da automação com a *internet*, facilitando o monitoramento de dados via *dashboard's*. Dentre os modelos disponíveis, destacou-se dois principais: ESP8266 e o ESP32.

A Tabela 3.4 resume os dados dos microcontroladores ESP. Entre as duas alternativas, destacou-se o ESP32, o qual detém o melhor custo benefício, já que tem alta capacidade de processamento, a maior memória dentre os modelos listados e um preço relativamente baixo. Em adição, também é um microcontrolador com acesso a *Wi-fi* e, a depender do caso, *Bluetooth*, além de possuir uma resolução maior para o conversor analógico digital. O ESP32 também se destaca por possuir portas DAC.

Tabela 3.4 – Dados microcontroladores da família ESP.

Modelo	Flash	EEPROM	RAM	Freq.	GPIO	ADC	R\$
ESP32	16 MB	448 KB	520 KB	240 MHz	36	14 (12 Bits)	40,00
ESP8266	64 KB	36 KB	160 MB	17	-	1 (10 Bits)	31,00

Desse modo, em síntese, observa-se que o microcontrolador ESP32 possui não apenas o melhor custo benefício dentro da família ESP, mas também o melhor desempenho global, no quesito processamento, memória, custo, integração com *internet*, entre outros. Assim, especifica-se o uso do ESP32 para a substituição do CLP como plataforma de controle.

3.3 Movimento dos Módulos Fotovoltaicos em Seguidores Solares Horizontais

Nos rastreadores solares de eixo único horizontal, a eficiência na captura de energia solar é significativamente influenciada pela metodologia de movimento dos módulos fotovoltaicos. Nesse contexto, duas técnicas para ajustar a inclinação dos módulos solares podem ser citadas: a abordagem de passos fixos e a estratégia de passos adaptativos.

A técnica de passos fixos ajusta a inclinação dos módulos solares através de incrementos angulares constantes, estabelecidos com base nos horários de nascer e pôr do sol. Este método é conhecido por sua simplicidade, exigindo apenas o conhecimento dos horários de início e fim do dia solar e dos limites angulares do sistema de rastreamento.

Por outro lado, a estratégia de passos adaptativos utiliza equações solares para estimar a posição do sol, tomando como base a data do ano e as coordenadas geográficas. Isso permite a estimativa da inclinação ideal para os módulos fotovoltaicos ao longo do dia. Consequentemente, este método gera uma curva que descreve o ângulo ótimo dos módulos FV (curva de incidência solar, seja ajustada ou não) em um dia. O próximo passo é avaliar o nível de amostragem dessa curva, ou seja, quantos ajustes diários são necessários para representá-la com precisão.

Este estudo avalia o desempenho de ambas as metodologias para determinar qual é mais eficiente, focando na análise teórica, utilizando algoritmos desenvolvidos em *Python* (serão mais detalhados em seções subsequentes). O objetivo é demonstrar que a estratégia adaptativa (baseada em cálculos astronômicos) é a mais eficaz para estimar a posição ótima do *tracker*, além de identificar o número ideal de ajustes angulares diários para o rastreador.

3.4 Especificação do Atuador

Como comentado na Seção 3.1, o atuador utilizado neste sistema é um MIT, o qual é controlado por um inversor de frequência vetorial IF20 da *Metaltex*. O circuito de potência, incluindo motor, caixa de redução e inversor, é apresentado na Figura 3.5.

A escolha do motor foi baseada no perfil de torque e velocidade mostrado na Figura 3.6, considerando um momento de inércia para 40 módulos fotovoltaicos retangulares de 30 kg (com uma margem de 30%). As análises direcionaram a escolha para um motor de 0,75 HP e 6 polos, acoplado a um inversor de 1 HP, com as especificações elencadas na Tabela 3.5. O atuador utilizado foi aquele já implementado pela empresa Flex, portanto os detalhes da especificação não serão tratados neste trabalho.

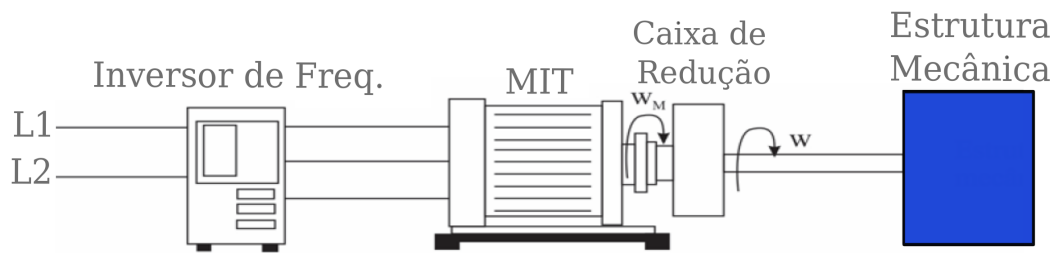


Figura 3.5 – Circuito de potência do rastreador solar proposto. Fonte: Autoria Própria.

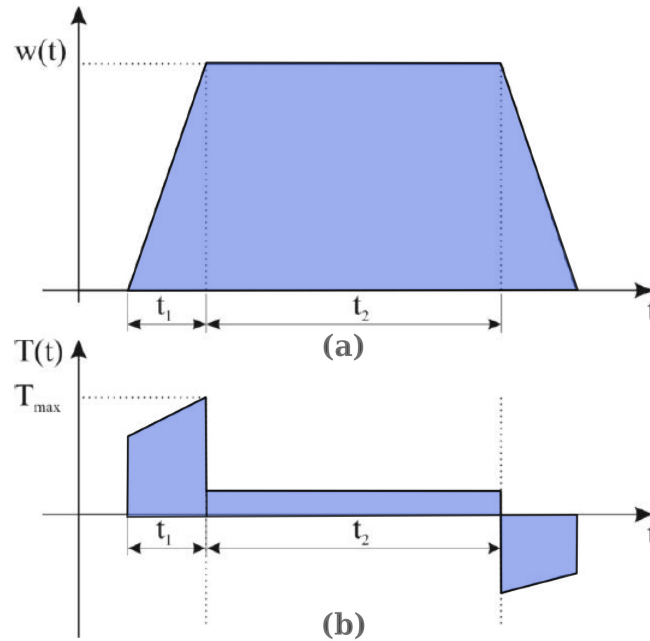


Figura 3.6 – Perfil do acionamento do sistema: (a) velocidade; (b) torque. Fonte: Autoria Própria.

Tabela 3.5 – Placa de dados do motor escolhido.

Dados da Placa	Valor
Frequência nominal	60 Hz
Classe	A
Potência mecânica nominal	0,75 HP
I_p/I_n	4,9
T_m/T_n	2,6
Tensão nominal de fase	220 V
Corrente nominal de fase	1,4327 A
Eficiência nominal	79,5%
Fator de potência nominal	0,74 defasado
Velocidade nominal	1135 rpm
Número de polos	6

3.5 Plataforma de Monitoramento

Para o monitoramento de dados em um sistema, uma alternativa eficiente é o protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), ideal para dispositivos IoT. O sistema MQTT é composto por um *broker* (ou servidor) central, *publishers* (dispositivos que enviam dados) e *subscribers* (dispositivos que recebem dados). O uso do MQTT oferece diversas vantagens, tais como (Amazon Web Services, 2024):

- **Eficiência de Banda:** Consumo relativamente baixo de largura de banda.
- **Baixa Latência:** Troca rápida de mensagens.
- **Escalabilidade:** Suporte a um grande número de dispositivos.
- **Simplicidade:** Facilidade de implementação em dispositivos com recursos limitados.

O ESP32 suporta conexão com a *internet* via *Wi-Fi* e comunicação MQTT. Considerando essas vantagens, utiliza-se esses recursos para monitorar o sistema do seguidor solar proposto, enviando informações para um servidor MQTT. Este servidor organiza os dados em *dashboards* gráficas utilizando os serviços da empresa *Thingable!*. Mais detalhes sobre a referida empresa podem ser encontrados no *site*: <<https://www.thingable.com.br/>>.

A *Thingable!* é uma empresa que oferece uma plataforma IoT *low-code*, facilitando o desenvolvimento de aplicações de “Internet das Coisas”. A plataforma *Thingable!* recebe dados via MQTT, integrando dispositivos e monitorando dados em tempo real. Seu uso se destaca tanto em aplicações comerciais quanto em projetos de pesquisa, como os realizados na Universidade Federal de Viçosa (UFV). Um exemplo é o trabalho publicado em 2023 pelo Departamento de Engenharia Elétrica, que aborda a importância de sistemas *off-grid* para regiões remotas, tratando de desafios como a comunicação de discrepâncias operacionais e a ativação de modos de economia de energia durante condições climáticas adversas. Utilizando a plataforma da *Thingable!*, foi desenvolvida uma interface para controle de um sistema de bombeamento fotovoltaico, permitindo o monitoramento de parâmetros críticos como tensão, temperatura e potência, otimizando a gestão de energia em sistemas *off-grid* (CASTRO *et al.*, 2023).

No presente trabalho, as variáveis de interesse incluem a posição ótima do seguidor solar, sua posição real, a velocidade do vento e a irradiância. Os dados de geração, como a curva de potência e a energia gerada, são coletados pelo inversor fotovoltaico e seus respectivos aplicativos. Salienta-se que o CLP da versão original do seguidor solar também possui possibilidade de envio de dados com MQTT, mas tendo conexão com a *internet* apenas cabeada.

3.6 Algoritmos Computacionais

Nesta seção serão abordados os principais algoritmos desenvolvidos para o projeto. Foram desenvolvidos algoritmos em duas linguagens principais: *Python* e *C*. A primeira foi usada para criar o algoritmo da estimativa das curvas teóricas de irradiância, tanto para usinas fotovoltaicas fixas, quanto para usinas FV com seguidores de um ou dois eixos. O microcontrolador, por sua vez, foi programado em *C*. Como ambientes de programação, utiliza-se o *Spyder* para *Python* e Arduino IDE para o ESP32.

3.6.1 Algoritmos em *Python*: Estimativa de Ângulo Ótimo e Irradiância

Dois algoritmos principais foram desenvolvidos em *Python*, ambos baseados nas equações descritas ao longo da Seção 2.4. O primeiro algoritmo estima a curva de posicionamento ótimo do *tracker* com base na incidência solar, aplicando a saturação do posicionamento em $\pm 45^\circ$ (limitação estrutural) e correções de *backtracking*, se necessário. O segundo algoritmo estima as curvas de irradiância diária com base nas entradas do dia do ano, latitude e longitude do local sob análise.

Ambos os algoritmos em *Python* utilizam as bibliotecas *numpy* e *matplotlib*. A *numpy* é usada para operações matemáticas e manipulação de *arrays*, permitindo cálculos diversificados, o que inclui cálculo da área abaixo de curvas. A *matplotlib* é utilizada para a criação de gráficos, facilitando a visualização dos dados e resultados obtidos pelos algoritmos.

A Figura 3.7 apresenta uma representação simplificada do algoritmo para estimar a posição ótima do *tracker* baseado na incidência solar. Como entradas, o algoritmo recebe: hora do dia fracionada, dia do ano, coordenadas geográficas, fuso horário, distância entre fileiras e largura dos módulos (para casos de *backtracking*). Com esses dados, calcula-se a declinação e o meio-dia solar, assim como o coeficiente de *backtracking*. A declinação é utilizada para definir o HSR, enquanto o meio-dia solar e o HSR auxiliam nos cálculos do ângulo horário, hora do nascer e pôr do sol. A variável β é então determinada usando a declinação solar e o ângulo horário, vide Equação (2.3). Em seguida, o coeficiente de *backtracking* é calculado. Paralelamente, a variável γ , vide Equação (2.18), e a incidência solar são definidas. Por fim, a posição ótima do seguidor é obtida, com correção de *backtracking* e saturação em $\pm 45^\circ$, se necessário.

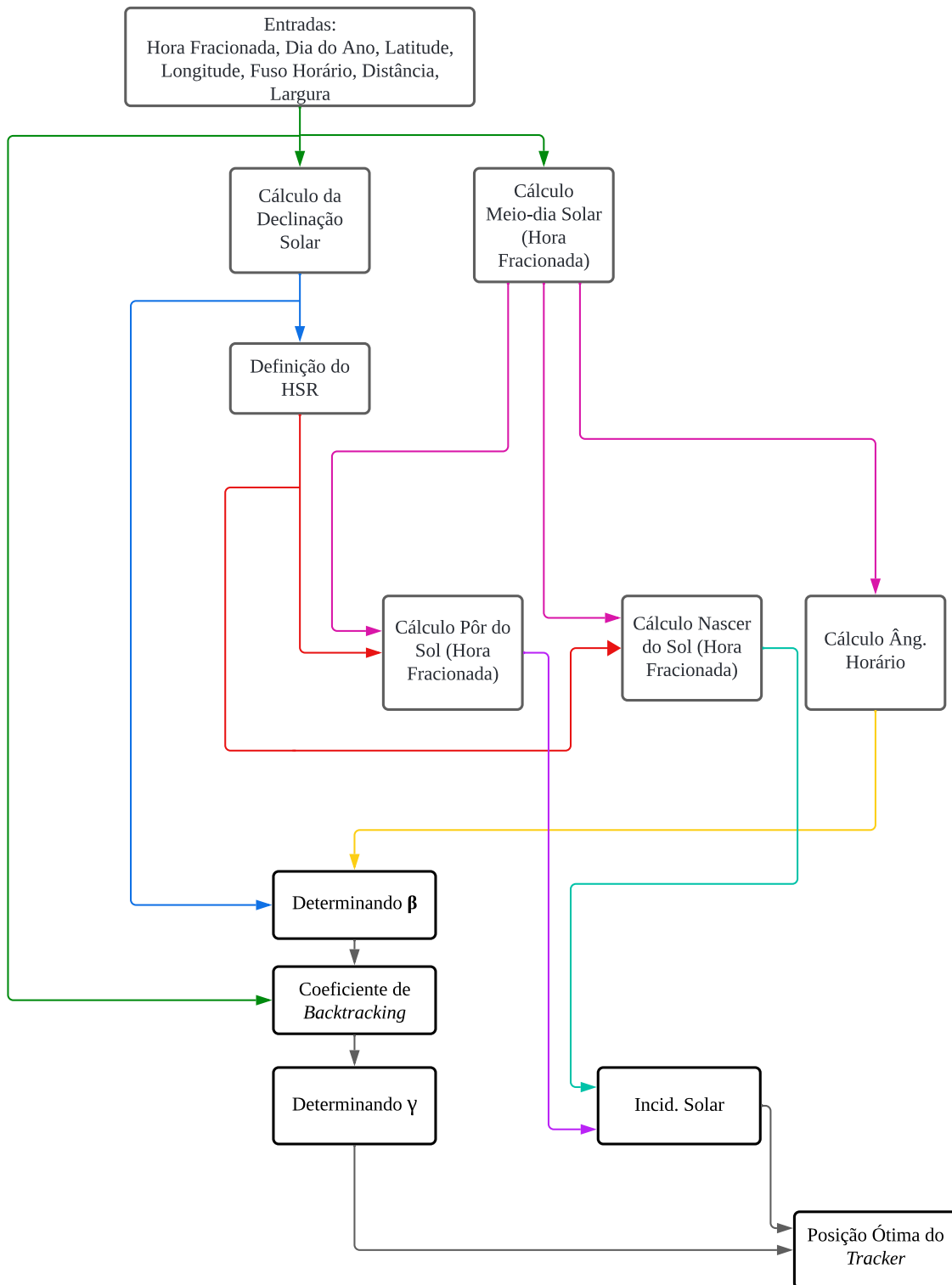


Figura 3.7 – Algoritmo *Python*: Determinação da posição ótima do *tracker*. Fonte: Autoria Própria.

O algoritmo descrito na Figura 3.7 fornece somente a posição ótima em um dado horário. Para obter a curva de posicionamento diário, é necessário implementar um laço de

repetição, juntamente com um vetor para armazenar as informações.

A Figura 3.8 mostra o esquema simplificado do algoritmo de estimação das curvas de irradiância (usinas FV fixas ou com seguidor). As entradas incluem o dia do ano, coordenadas geográficas, tipo e modo. O tipo determina o tipo da usina fotovoltaica, enquanto o modo define a metodologia para movimentação dos módulos fotovoltaicos no caso do seguidor de eixo único horizontal. Com base nas entradas, são calculadas variáveis como declinação solar, HSR, nascer e pôr do sol, ângulo horário, β e azimute. Em seguida, são calculadas as variáveis A , k , m e C , essenciais para definir as parcelas das curvas de irradiância (ver Seção 2.4.4).

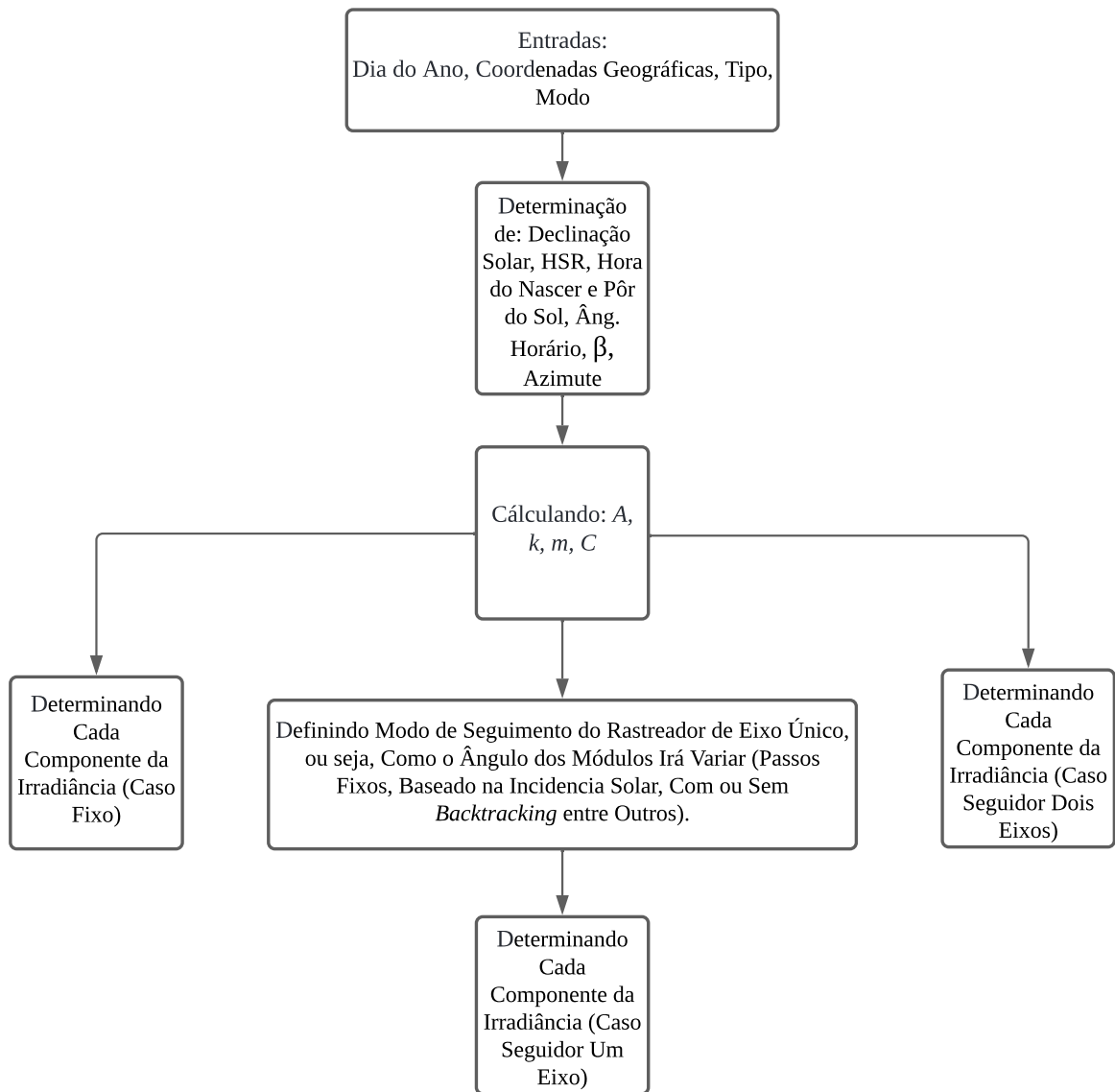


Figura 3.8 – Algoritmo *Python*: Determinação das curvas de irradiância. Fonte: Autoria Própria.

As curvas de irradiância são determinadas conforme o tipo de usina fotovoltaica configurada no algoritmo. No caso do seguidor de eixo único horizontal, é necessário especificar a

metodologia de rastreamento, como passos fixos, baseado na incidência solar, com ou sem *backtracking*. Para análises específicas, como desempenho das usinas FV para um ano e/ou diferentes coordenadas, é necessário utilizar estruturas de repetição no algoritmo.

Os algoritmos desenvolvidos podem ser acessados no *GitHub*, em uma versão onde as funções criadas são utilizadas de forma simplificada para melhor entendimento. Acesso em: <<https://github.com/Duari123/Irradiance>>.

3.6.2 Algoritmo do Microcontrolador

A Figura 3.9 mostra o fluxograma do algoritmo no modo manual. Neste modo, o usuário pode mover o sistema independentemente da posição ideal calculada, utilizando a Interface Homem-Máquina. Se os sensores indutivos estiverem desativados e o modo manual estiver habilitado, pressionar o botão “incrementar” na IHM ativa o relé leste, enquanto o botão “decrementar” ativa o relé oeste.

Se o sensor indutivo oeste for acionado, pressionar o botão “decrementar” fará com que o relé leste ative, movendo o sistema para trás alguns graus para evitar avançar na inclinação para o oeste. A mesma lógica adaptada se aplica ao sensor leste. Os relés permanecem desativados caso nenhum botão seja pressionado ou se ambos os sensores indutivos estiverem ativos simultaneamente.

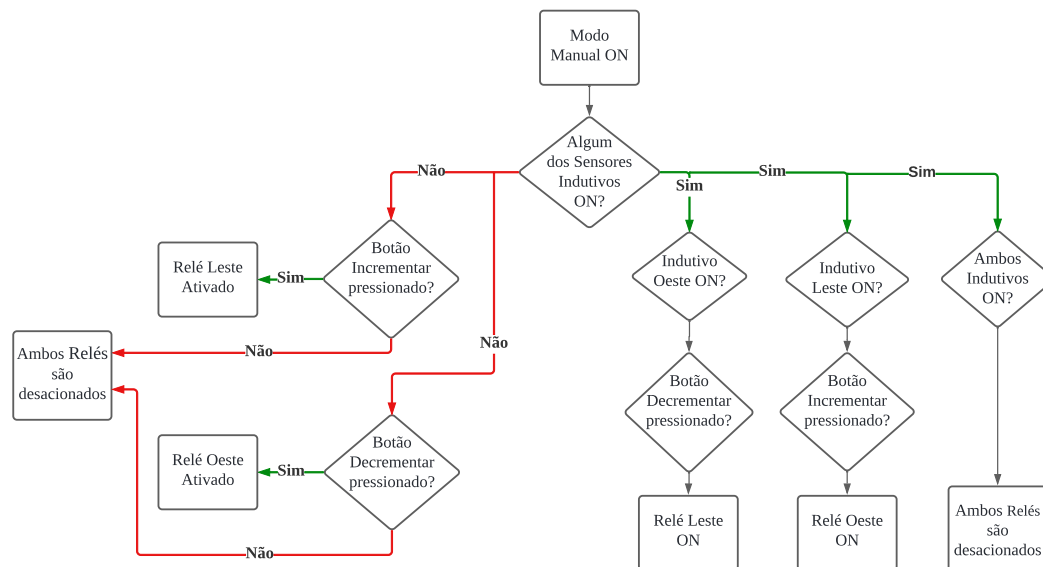


Figura 3.9 – Fluxograma do algoritmo: operação manual. Fonte: Autoria Própria.

A Figura 3.10 apresenta o fluxograma simplificado do algoritmo do microcontrolador referente ao modo automático. Nesse modo, os relés são acionados automaticamente, sem interferência do usuário, com base nos cálculos da posição do sol e nos estados dos sensores.

Após a inicialização das variáveis e a configuração da data e hora, o algoritmo verifica se a velocidade do vento excede 40 km/h (medida com um anemômetro). Se isso ocorrer, o rastreador solar é posicionado em 0°, acionando os relés conforme necessário para mover os módulos solares para essa posição de segurança.

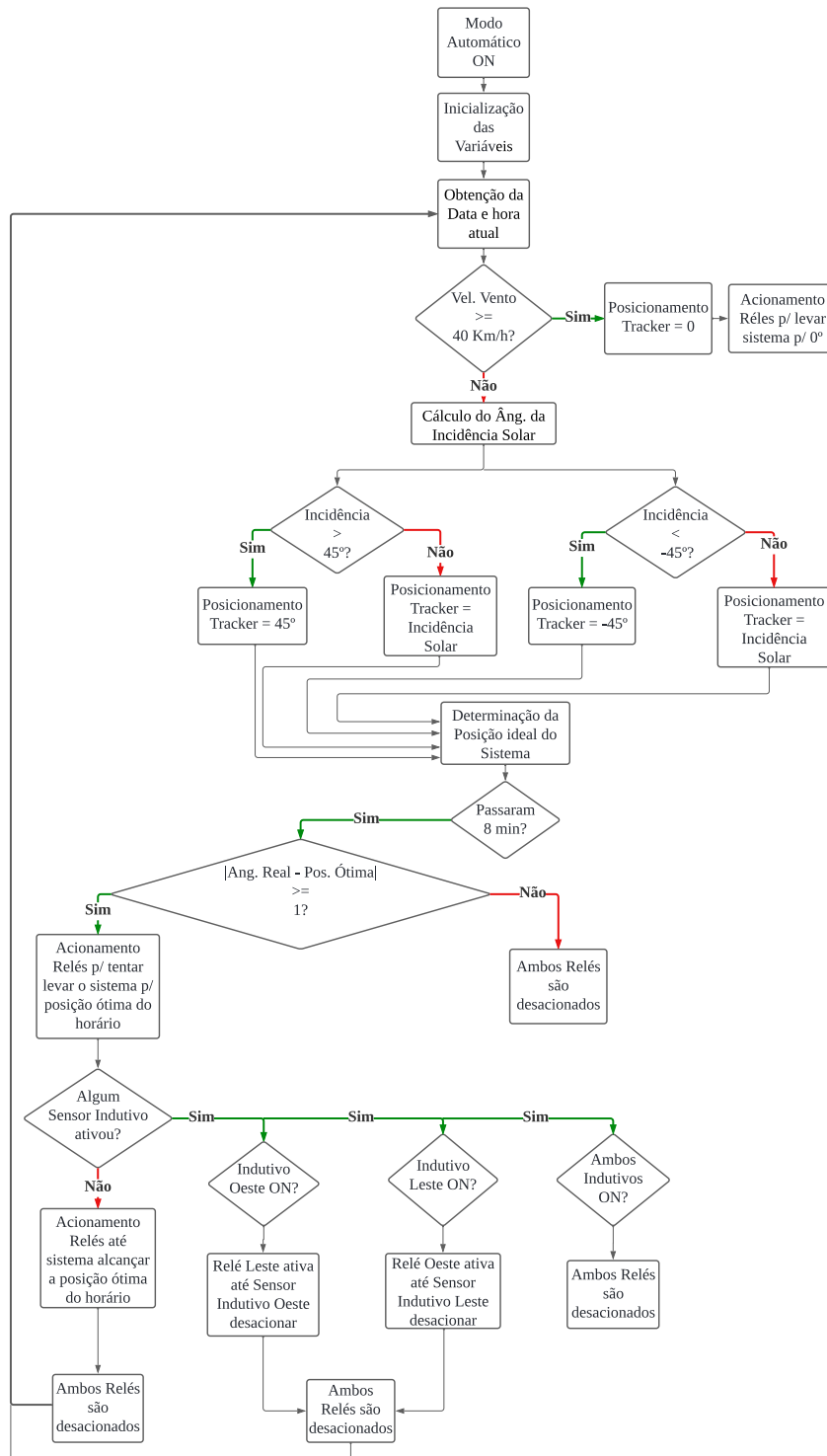


Figura 3.10 – Fluxograma do algoritmo: operação automática. Fonte: Autoria Própria.

Caso a velocidade do vento esteja abaixo de 40 km/h, a incidência solar é calculada usando as equações discutidas na Seção 2.4.3, incluindo o ajuste de *backtracking* para múltiplas fileiras. A incidência solar pode ultrapassar os limites de $\pm 45^\circ$. Portanto, o rastreador solar é posicionado de acordo com esses limites, ou o valor é ajustado para permanecer dentro da faixa (saturação em -45° e $+45^\circ$).

O algoritmo verifica se já passaram 8 minutos desde o último acionamento. Se não, os relés permanecem desativados. Caso contrário, o algoritmo verifica a diferença entre a posição real do sistema (medida pelo sensor angular) e a posição ótima estimada para o horário. Os relés são acionados apenas se a diferença for significativa.

Os relés são então ativados para mover o sistema na direção leste ou oeste, até que a posição ótima seja atingida. Se um sensor indutivo for acionado durante esse processo, o comando original é ignorado, e o relé na direção oposta é ativado para mover os módulos fotovoltaicos alguns graus para trás, evitando danos estruturais.

A integração da IHM com os algoritmos demonstrados nas Figuras 3.10 e 3.9, consiste na possibilidade de modificar algumas variáveis internas. Por exemplo, as coordenadas geográficas, a largura dos módulos, distância entre fileiras, entre outras variáveis editáveis, as quais influenciam a determinação da posição ótima do seguidor solar proposto.

Destaca-se que as lógicas de comunicação MQTT, conexão e reconexão (em caso de queda temporária da rede) com o *Wi-Fi* foram omitidas dos fluxogramas para simplificar o esquema, posto que não é uma parte essencial dos algoritmos.

3.7 Protótipo Desenvolvido

Para validar o algoritmo desenvolvido para o microcontrolador, assim como a placa de circuito impresso projetada, foi montada uma estrutura de testes contendo três módulos solares, totalizando um pequeno sistema FV com capacidade instalada de 1,05 kWp. As Figuras 3.11(a) e (b) exibem o protótipo em vista frontal e traseira, respectivamente. Optou-se por testar inicialmente uma versão de pequeno porte para facilitar a identificação de possíveis erros no algoritmo e/ou no projeto da placa. Além disso, em caso de danos durante os testes, os custos envolvidos seriam menores.

Com exceção do anemômetro, o protótipo contou com todos os sensores previstos para o sistema real. A Figura 3.12(a) demonstra o sensor angular instalado (peça preta), enquanto a Figura 3.12(b) mostra os sensores indutivos leste e oeste. A meia engrenagem presente no sensor angular se move junto com a estrutura, alterando a posição do potenciômetro e, conseqüentemente, a tensão de saída. O algoritmo calcula o ângulo equivalente com base



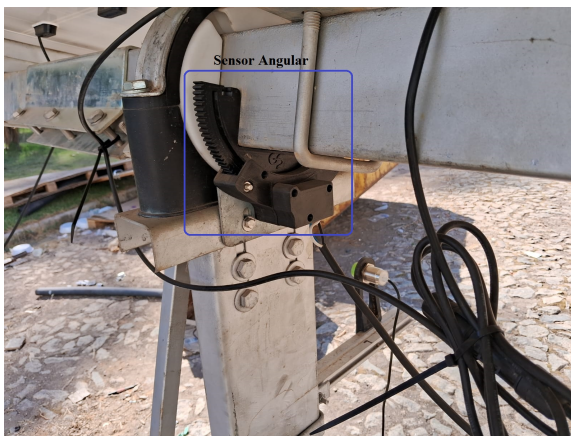
(a) Vista frontal do protótipo.



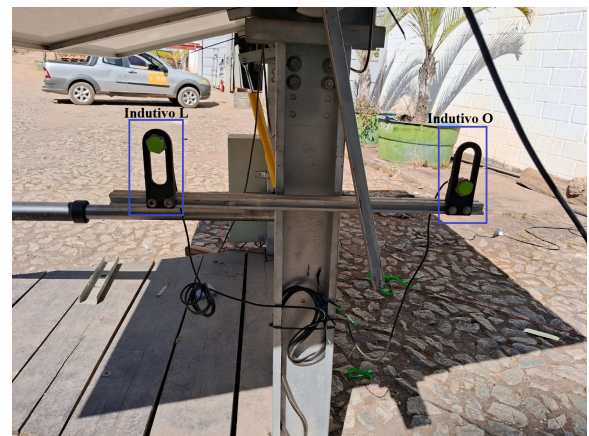
(b) Vista traseira do protótipo.

Figura 3.11 – Protótipo de testes do seguidor solar proposto.

nesse sinal em volts. A haste metálica vista na Figura 3.12(b) acompanha o movimento dos módulos solares, ativando os sensores indutivos se a inclinação for suficientemente grande. Os sensores indutivos devem ser adequadamente posicionados para que a haste os acione apenas em inclinações ligeiramente maiores que $+45^\circ$ ou menores que -45° .



(a) Sensor angular.



(b) Sensores indutivos (fins de curso).

Figura 3.12 – Sensoriamento do protótipo.

Por se tratar de um caso de menor porte, foi utilizado um motor com menor capacidade de torque em comparação com o modelo especificado na Seção 3.4. Ainda assim, o acionamento ocorre de forma similar às usinas reais, utilizando um braço metálico e um fuso mecânico. A Figura 3.13(a) exhibe tanto o motor utilizado quanto a caixa de redução, enquanto a Figura 3.13(b) destaca o braço de acionamento.

Para acompanhar a geração, foi utilizado um inversor fotovoltaico com capacidade nominal de 2 kW, com monitoramento realizado por meio da plataforma *FusionSolar*. A in-

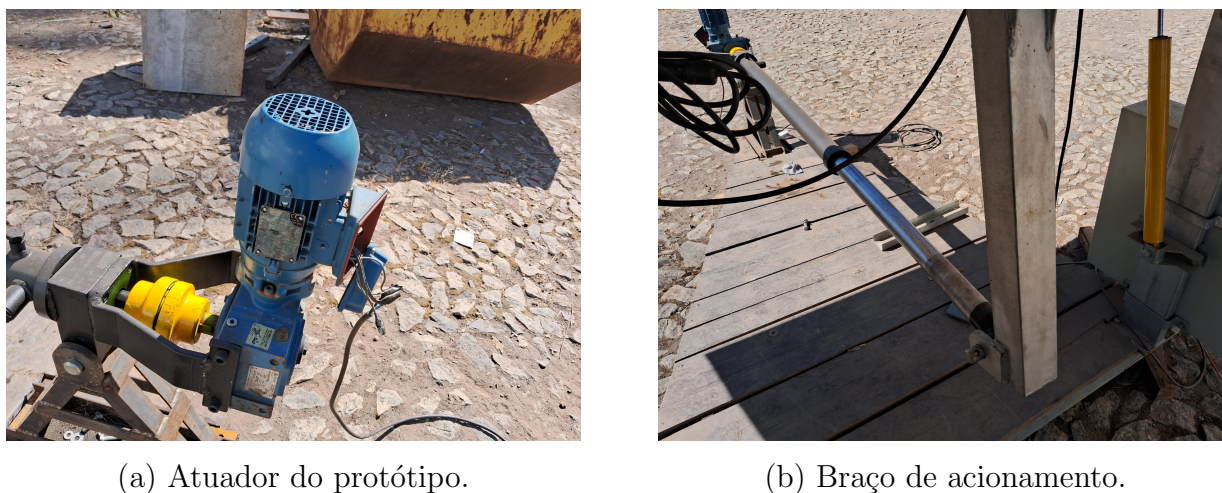


Figura 3.13 – Acionamento do protótipo.

tenção é validar se a curva de geração tem um formato similar ao esperado. Para acompanhar a posição atual e ótima do protótipo, assim como outras variáveis pertinentes do sistema, foi utilizado um servidor MQTT com *dashboard*. Para tanto, foi incluído no algoritmo original funções para o microcontrolador enviar dados usando tópicos MQTT.

3.8 Planta Piloto

Após a validação do protótipo em escala reduzida, o próximo passo é a validação em uma usina FV de maior porte, com potência de pico mais elevada. Para isso, utilizou-se a usina Gráfica, localizada em Divinópolis, MG, com capacidade instalada de 109 kWp. A Figura 3.14 apresenta uma vista aérea da usina Gráfica. Diferentemente do protótipo, esta usina possui múltiplas fileiras de módulos fotovoltaicos. Consequentemente, o uso da técnica de *backtracking* torna-se essencial para evitar sombreamentos mútuos nos períodos iniciais e finais do dia. Ademais, vale mencionar que tanto o protótipo quanto a usina Gráfica estão em pontos relativamente próximos, nas instalações da empresa Flex.

A Figura 3.15(a) mostra o painel de controle fechado da usina Gráfica, enquanto a Figura 3.15(b) exhibe a vista interna do painel. Para os testes, foi removida a alimentação do CLP, conforme indicado pela seta laranja na Figura 3.15(b). Além disso, todos os sensores conectados às entradas do CLP foram removidos e conectados na placa projetada, destacada em azul na mesma figura. Também foi substituído o acionamento do inversor do CLP para a versão com o microcontrolador. Como o painel foi originalmente projetado para o CLP, o espaço disponível para acomodar a placa foi limitado, resultando na exclusão dos botões e da tela da PCI para economizar espaço. Destaca-se que a placa possui as saídas e entradas da IHM, a tela e botões apenas não foram conectados.



Figura 3.14 – Vista aérea da usina Gráfica FV, utilizada nos testes do sistema de controle utilizando ESP32 desenvolvido nesta dissertação.



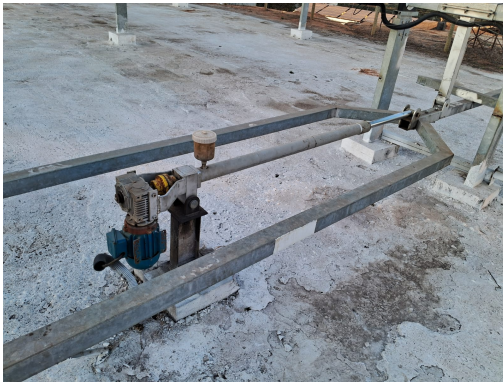
(a) Painel da usina piloto: porta fechada.



(b) Painel da usina piloto: porta aberta.

Figura 3.15 – Painel da usina piloto.

As Figuras 3.16 mostram detalhes da usina piloto de forma mais próxima. A Figura 3.16(a) exibe o acionamento mecânico da usina, incluindo o atuador, uma caixa de redução, um braço e um fuso mecânicos. Embora semelhante ao protótipo, a estrutura do acionamento da usina real é adaptada para suportar a maior carga do sistema. A Figura 3.16(b) mostra os sensores indutivos que funcionam como fins de curso. Uma haste metálica se move com os módulos fotovoltaicos e ativa os sensores indutivos caso a inclinação exceda os limites operacionais, prevenindo movimentos indesejados da estrutura. A Figura 3.16(c) ilustra o anemômetro da usina, que monitora a velocidade do vento no local, movendo os módulos para uma posição segura se a velocidade ultrapassar os limites estabelecidos. O anemômetro é instalado em uma altura elevada para minimizar interferências.



(a) Acionamento mecânico da usina piloto.



(b) Sensores indutivos da usina piloto.



(c) Anemômetro da usina piloto.

Figura 3.16 – Aspectos principais da usina piloto.

3.9 Análise de Consumo do Sistema

Para avaliar o consumo do sistema proposto e comparar a energia gerada com a consumida, utilizou-se o analisador de qualidade de energia *Fluke 430 Série II*. Foram medidos os consumos do controlador, do atuador e do painel de controle. As pontas de medição de tensão e corrente foram conectadas na entrada do painel, configurado como monofásico, conforme a usina Gráfica, com amostragem a cada 0,5 segundos.

3.10 Resumo do Capítulo 3

Neste capítulo, foram descritos os materiais e métodos usados no desenvolvimento do sistema proposto, incluindo a especificação do microcontrolador e do atuador, o projeto dos circuitos de potência e controle, a plataforma de monitoramento e os algoritmos computacionais. Adicionalmente, especifica-se como foi feita a análise do consumo do sistema, utilizando um Analisador de Qualidade de Energia *Fluke 430 Série II*. O próximo capítulo apresentará os resultados obtidos a partir das simulações computacionais e dos testes experimentais.

4 Resultados

4.1 Resultados de Simulação Computacional

4.1.1 Curvas de Irradiância Estimadas para Diferentes Categorias de Usinas Fotovoltaicas

Através dos algoritmos desenvolvidos em *Python*, é possível estimar as curvas de irradiância global (total) vistas por usinas fotovoltaicas com estruturas fixas, com seguimento de um ou dois eixos. No caso fixo, a inclinação e orientação foram configuradas para a geração de energia mais eficiente para o hemisfério sul. Para teste, utilizam-se as coordenadas de Divinópolis - MG (latitude: $-20,14^\circ$, longitude: $-44,89^\circ$), para duas diferentes datas: 01/01/2023 e 10/04/2023.

A Figura 4.1 demonstra as curvas obtidas para o primeiro dia do ano. Nota-se que ambos os rastreadores implicam no aumento da área da curva, o que significa maior geração, especialmente no início e final do dia. Nesse caso, como trata-se do verão, a diferença entre as curvas de ambos os seguidores não é muito expressiva.

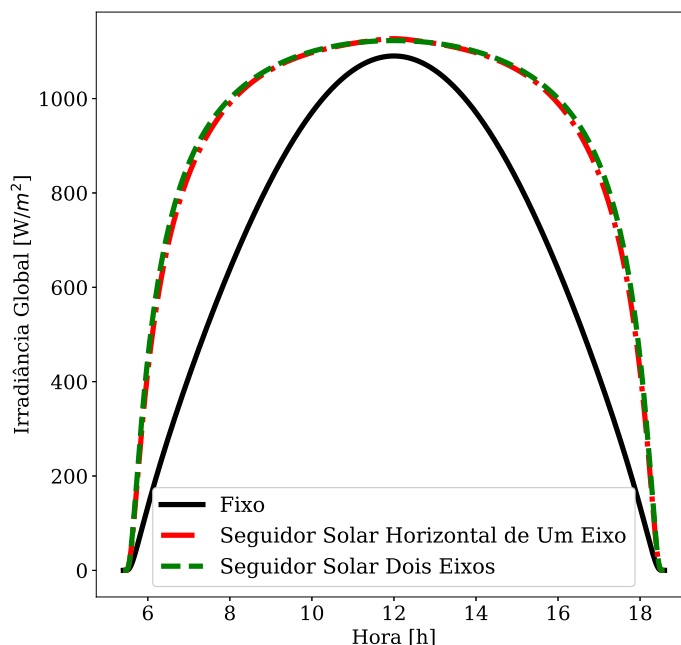


Figura 4.1 – Irradiância global na cidade de Divinópolis: dia 1 do ano (01/01/2023). Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4.2 já demonstra as mesmas curvas, mas para o dia 100 do ano, equivalente a data 10/04/2023. Agora já é possível observar uma diferença mais notável entre as duas categorias de seguidores solares, com o rastreador de eixo duplo possibilitando maior geração especialmente em horários próximos do meio-dia solar.

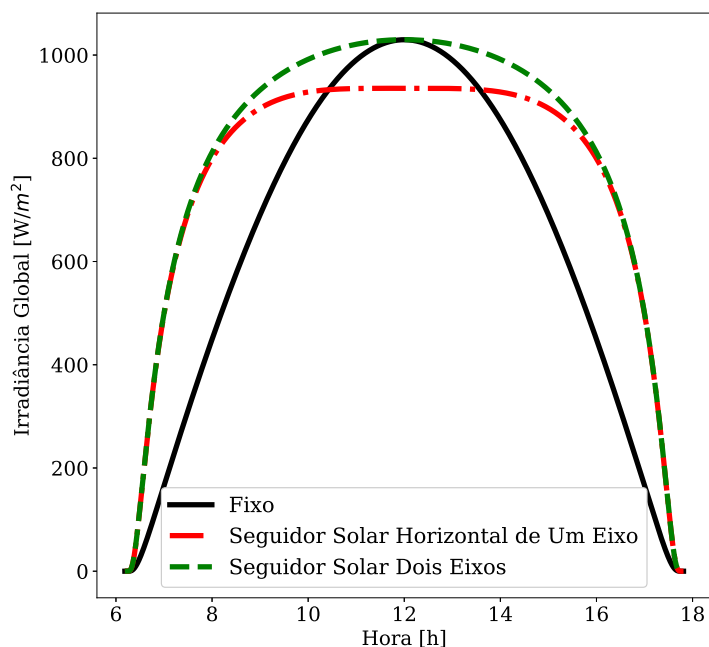


Figura 4.2 – Irradiância global na cidade de Divinópolis: dia 100 do ano (10/04/2023). Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 4.1 já demonstra a área abaixo de cada uma das curvas demonstradas nas Figuras 4.1 e 4.2, ou seja, a irradiação global. Com isso, é possível realizar uma análise quantitativa dos resultados. No dia primeiro de janeiro, durante o verão no hemisfério sul, a diferença na irradiação para ambos os rastreadores é mínima. No entanto, em dez de abril, a discrepância aumenta para cerca de 7%. No dia primeiro, a diferença percentual entre a usina com estrutura fixa e o rastreador de um eixo vale cerca de 31,5%, já entre a fixa e o rastreador de dois eixos vale 32,6%. No dia 100, as diferenças já são: 20,1% entre estrutura fixa e com rastreador de eixo único; 28,3% entre fixa e rastreador de dois eixos.

Tabela 4.1 – Irradiação para cada categoria de usina fotovoltaica nos dias 01/01/2023 e 10/04/2023, latitude de $-20,14^\circ$.

Dia	Fixa	1-Eixo	2-Eixos
01/01/2023	9,2 kWh/m ²	12,1 kWh/m ²	12,2 kWh/m ²
10/04/2023	7,4 kWh/m ²	8,9 kWh/m ²	9,5 kWh/m ²

Nesta seção são realizadas análises mais pontuais dos resultados do algoritmo, avaliando as curvas obtidas para dois dias. Todavia, nas seções subsequentes, serão desenvolvidas

análises mais gerais, considerando o desempenho em um ano, para diferentes latitudes.

4.1.2 Rendimento Anual Estimada para Diferentes Rastreadores Solares

Para avaliar a eficiência de diferentes tipos de rastreadores solares em várias coordenadas, foram selecionadas três latitudes distintas do hemisfério sul: $-3,11^\circ$, $-20,11^\circ$ e $-40,00^\circ$. Essas escolhas foram feitas para avaliar a viabilidade de cada usina FV em regiões mais distantes ou mais próximas à linha do equador, assim como em regiões com uma latitude intermediária entre esses dois extremos.

Para complementar essa avaliação e fornecer uma visão abrangente do desempenho ao longo do ano, foi conduzida uma análise de desempenho anual. Utilizando os algoritmos desenvolvidos em *Python* descritos na Seção 3.6, obteve-se as curvas de irradiância global solar diária observadas pelas três configurações de usinas fotovoltaicas ao longo de um ano. No caso, foi desenvolvido um laço de repetição para calcular as curvas de irradiância para todas as combinações de latitude e dia do ano, em um intervalo anual (para um caso de ano não bissexto). Na sequência, foram obtidas as áreas abaixo de cada curva de irradiância, ou seja, a irradiação caso a caso. Esses cálculos permitiram estimar o potencial energético para as latitudes selecionadas, já que foi possível calcular a irradiação anual somando as irradiações estimadas para cada dia. As irradiações anuais obtidas estão elencados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Variações percentuais na irradiação anual para diferentes sistemas de rastreamento solar e latitudes.

Lat. ($^\circ$)	Fixo Vs 1-Eixo (%)	1-Eixo Vs 2-Eixo (%)
-3.11	+31.36	+2.34
-20.11	+27.29	+4.77
-40.0	+22.30	+13.21

Para locais próximos ao equador, os módulos com rastreadores solares exibem um aumento de eficiência de aproximadamente 30% em comparação com o caso fixo. A diferença de desempenho entre os rastreadores horizontal e de dois eixos foi marginal, cerca de 2,34%.

Na latitude de $-20,11^\circ$, a diferença do incremento de eficiência entre os dois tipos de rastreadores aumentou para 4,77%. A vantagem do rastreador de um eixo sob os módulos FV fixos diminuiu para 27,29%, enquanto a diferença de potencial de geração entre os módulos fotovoltaicos fixos e o rastreador de dois eixos permaneceu próxima de 30%.

Para a latitude mais distante do equador, a discrepância na eficiência entre o rastreador de um e de dois eixos tornou-se mais notável, atingindo 13,21%. A eficiência do rastreador de um eixo em relação aos painéis fixos caiu para 22,3%, enquanto a vantagem dos rastreadores de dois eixos sobre os fixos aumentou para cerca de 35%.

Em síntese, os resultados destacam que os rastreadores solares de dois eixos podem não ser a opção mais indicada para locais próximos ao equador, no que diz respeito a custo-benefício. Além disso, os dados mostram que o aumento de eficiência proporcionado por rastreadores horizontais pode variar de 20% a 30%, enquanto para rastreadores de dois eixos, essa variação é de 30% a 35%. É importante notar, entretanto, que apesar da aparente vantagem em eficiência dos rastreadores de dois eixos, os rastreadores solares de um eixo oferecem benefícios significativos em termos de simplicidade e custo-efetividade. Por fim, deve-se destacar que os resultados consideram situações ideais, com todos os dias de céu claro.

4.1.3 Avaliação das Metodologias de Posicionamento para o *Tracker* Proposto

Nesta seção, são avaliadas duas metodologias de movimentação para o rastreador solar proposto visando utilizar a alternativa que maximiza a captura de irradiação solar. As estratégias consideradas são: movimento com incrementos angulares fixos e ajuste baseado na curva de incidência solar (ou adaptativo), conforme descrito na Seção 3.3. Utiliza-se os algoritmos em *Python* para avaliar teoricamente qual abordagem oferece maior eficiência e determinar o número ideal de ajustes diários. Para tanto, foram estimadas, em um período de um ano, as curvas de irradiância diárias teóricas que seriam observadas pelo rastreador horizontal de eixo único se movimentado utilizando cada uma das duas alternativas descritas, assumindo diferentes quantidades de acionamentos diários. Após, foi calculada a irradiação associada a cada uma dessas curvas, obtendo a irradiação diária de cada metodologia para um ano de análise. O potencial de geração de energia anual final foi, desse modo, o somatório das irradiações calculadas. Os resultados podem ser visualizados na Figura 4.3.

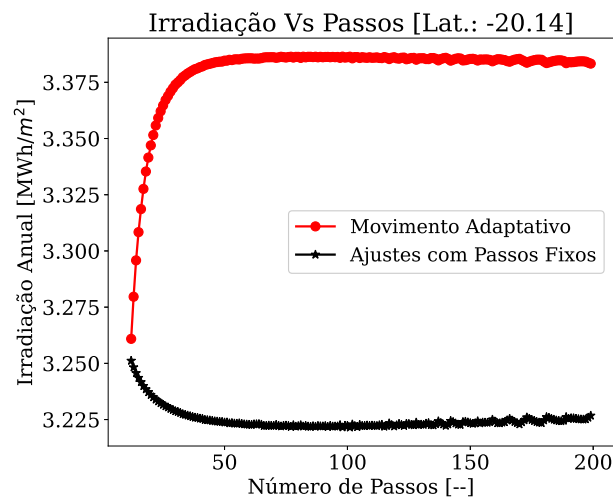


Figura 4.3 – Irradiação em função do número de acionamentos. Fonte: Autoria Própria.

Os resultados da Figura 4.3 indicam que a abordagem adaptativa, que se ajusta de acordo com a incidência solar, supera a estratégia de passos fixos. Observa-se que realizar entre 50 e 60 ajustes diários é mais eficaz, pois um número maior de ajustes não resulta em ganhos significativos de eficiência. Na metodologia de passos fixos, aumentar o número de ajustes não garante necessariamente maior captura de irradiação, sugerindo que um intervalo angular maior no movimento do sistema pode ser mais vantajoso para esta alternativa. De todo modo, os resultados obtidos sugerem que o movimento adaptativo, com 50 a 60 ajustes por dia, é a opção mais indicada.

No caso de ajustes em passos fixos, pode parecer contra-intuitivo que aumentar o número de passos leve a uma diminuição na eficiência de geração de energia. Este resultado ocorre porque os ajustes na inclinação dos módulos são feitos em intervalos iguais. Aumentar excessivamente o número de ajustes torna o sistema menos flexível, fazendo com que o ângulo real de inclinação dos módulos fotovoltaicos possa desviar do ângulo ótimo. Isso acontece porque distribuir uniformemente os ajustes ao longo do dia não considera a variação dinâmica na intensidade solar e na posição específica do sol, que são cruciais para alcançar a máxima eficiência energética.

A Figura 4.4 estende a análise para incluir variações na latitude, avaliando a irradiação acumulada anual. Esta análise é dedicada exclusivamente à metodologia adaptativa, já que foi a alternativa mais eficiente. Nota-se que a localização geográfica impacta significativamente a produção de energia. A produção tende a diminuir à medida que a distância do equador aumenta, sendo resultados consistentes com as observações feitas na análise da Seção 4.1.2.

Irradiação Anual vs. Passos vs. Lat.

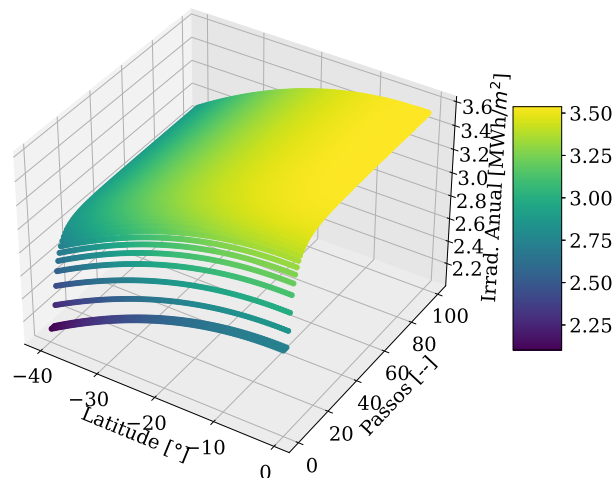


Figura 4.4 – Irradiação anual em função da latitude e do número de movimentos do rastreador horizontal para a metodologia adaptativa. Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4.5 compara a eficiência das duas metodologias em relação à curva teórica

máxima de irradiância, considerando o dia 290 do ano, data 17/10/2023, e a latitude de $-20,14^\circ$. O dia foi escolhido ao acaso, já que anteriormente, ainda nesta seção, foi avaliado o desempenho anual. Nesse caso, a abordagem adaptativa alcança 96,77% da irradiação teórica máxima, enquanto a metodologia de passos fixos atinge 93,15%, destacando a eficiência do ajuste baseado na incidência solar. É importante notar que essas conclusões são válidas para um cenário envolvendo uma única fileira de módulos, já que os efeitos de sombreamento mútuo são desconsiderados.

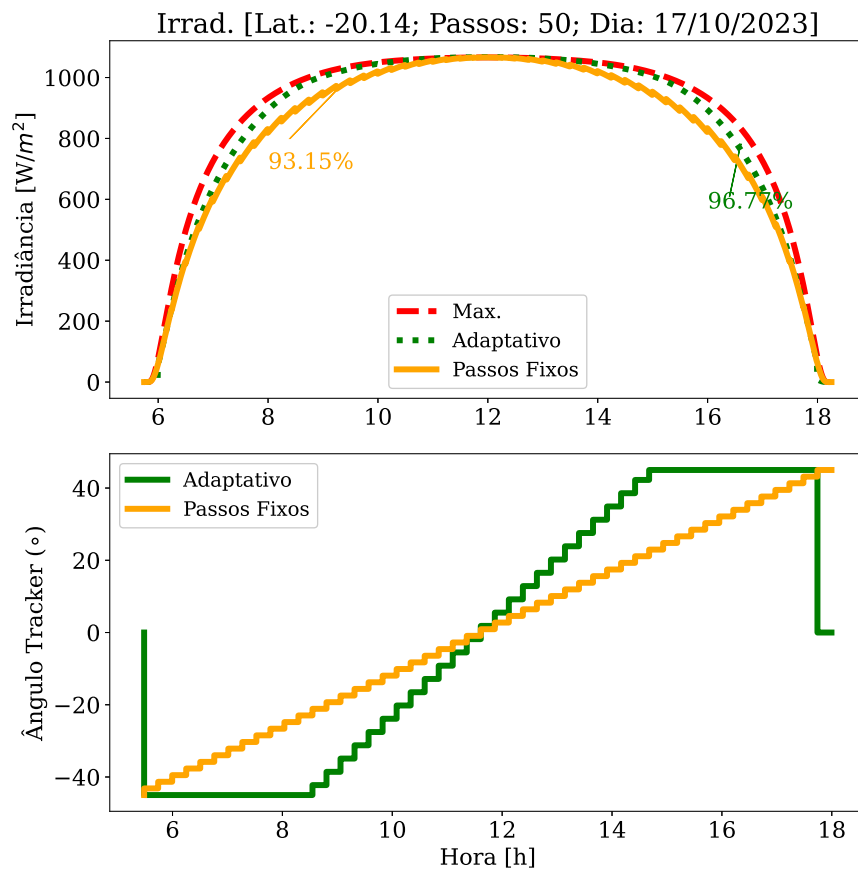


Figura 4.5 – Rastreador horizontal (50 passos): irradiância; ângulo do rastreador. Fonte: Autoria Própria.

Levando em conta o sombreamento mútuo entre múltiplas fileiras, a Figura 4.6 introduz a análise de *backtracking* para o caso adaptativo. Neste cenário, a curva de incidência solar precisa ser ajustada no início e no final do dia solar. Embora essa estratégia reduza ligeiramente a irradiação capturada, ela é essencial em sistemas com múltiplas filas para minimizar perdas devido ao sombreamento, especialmente durante períodos de baixa e alta incidência solar.

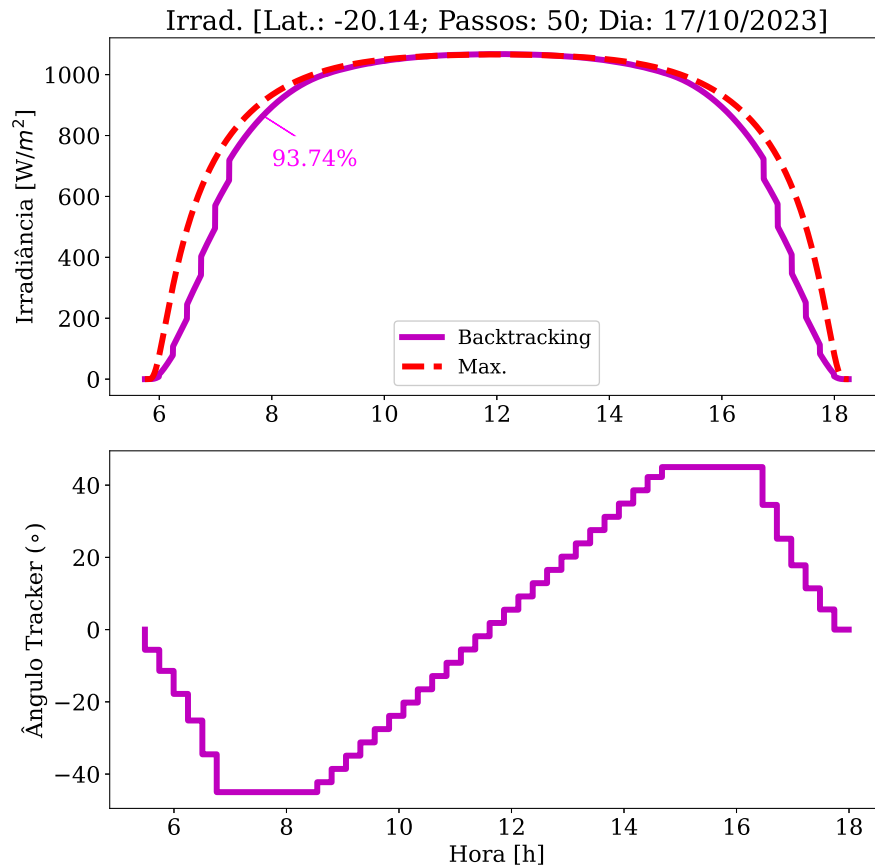


Figura 4.6 – *Backtracking* para o caso adaptativo (50 passos): irradiância; ângulo do rastreador. Fonte: Autoria Própria.

4.2 Resultados Experimentais

4.2.1 Curva de Posicionamento do Seguidor Solar

O primeiro resultado experimental discute a curva de posicionamento do seguidor solar ao longo do dia. O objetivo é avaliar se a versão proposta com o microcontrolador pode estimar a curva de posicionamento ótimo do seguidor solar de maneira similar à versão com CLP. Além disso, avalia-se se o algoritmo desenvolvido consegue comandar adequadamente o atuador para que o sistema siga esse posicionamento ótimo. Para isso, o protótipo foi configurado para operar com o mesmo *backtracking* da usina FV demonstrada na Figura 3.14, embora seja uma montagem sem múltiplas fileiras.

A Figura 4.7 exibe os dados de posicionamento coletados no dia 11/06/2024, apresentando um comparativo entre o posicionamento ótimo calculado pelo CLP da usina fotovoltaica de 109 kWp, o calculado pelo ESP32 e o ângulo real do protótipo com microcontrolador. Observa-se que os ângulos de referência em ambos os casos são consideravelmente semelhan-

tes. Os erros de seguimento da referência entre os ângulos ótimos e real podem ser justificados pela inércia da estrutura (mesmo que menor que o da usina FV real), uma vez que o controle é do tipo *on/off*. Portanto, se o sistema desligar com um pequeno erro, não haverá correção até o próximo passo angular.

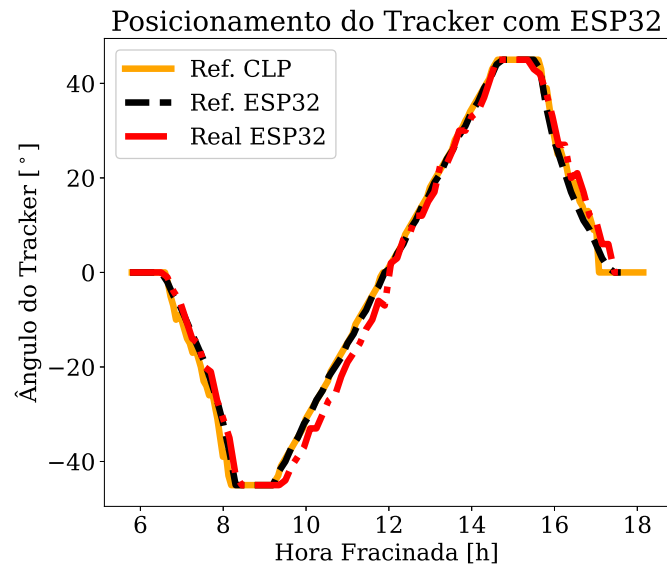


Figura 4.7 – Posicionamento do protótipo para a data 11/06/2024. Fonte: Autoria Própria.

Para avaliar quantitativamente a precisão das curvas de posicionamento do *tracker* com ESP32 em comparação com a referência fornecida pelo CLP, utiliza-se duas métricas de erro: o Erro Médio Absoluto (MAE) e o Erro Quadrático Médio (MSE). O Erro Médio Absoluto (MAE) é a média das diferenças absolutas entre os valores previstos e os valores observados. Essa métrica fornece uma ideia clara da magnitude média dos erros nas previsões, sem considerar a direção dos mesmos. O Erro Quadrático Médio (MSE) é a média dos quadrados das diferenças entre os valores previstos e os valores observados. Essa métrica dá mais peso a grandes erros, pois os erros são elevados ao quadrado antes de serem calculados. É útil para identificar grandes discrepâncias entre os valores previstos e observados. Os valores dessas métricas para a curva de referência calculada com microcontrolador (Ref. ESP32) e para a curva real de posicionamento do protótipo com ESP32 (Real ESP32) estão apresentados na Tabela 4.3. Essas métricas são fundamentais para avaliar a precisão e a confiabilidade do sistema de rastreamento, fornecendo uma visão quantitativa das discrepâncias entre o sistema real e a referência.

O MAE para a curva “Ref. ESP32” é de $1,4497^\circ$, enquanto para a curva “Real ESP32” é de $3,0372^\circ$. Isso indica que, em média, os valores calculados pelo ESP32 estão aproximadamente $1,4497$ unidades de ângulo em relação à referência do CLP, enquanto os valores reais

Tabela 4.3 – Métricas de erros para as curvas de referência e real do seguidor protótipo com ESP32 em relação à referência do CLP.

Curva	MAE ($^{\circ}$)	MSE ($^{\circ}$) ²
Ref. ESP32	1,4497	4,7134
Real ESP32	3,0372	15,5874

do posicionamento do protótipo com ESP32 estão a 3,0372 unidades de ângulo.

O MSE para a curva “Ref. ESP32” é de $4,7134^{(\circ)^2}$, enquanto para a curva “Real ESP32” é de $15,5874^{(\circ)^2}$. O MSE, sendo mais sensível a grandes erros, indica que há desvios mais significativos na curva “Real ESP32” em comparação com a “Ref. ESP32”. Esses grandes erros contribuem para um MSE mais elevado, reforçando que a curva “Ref. ESP32” é mais precisa e consistente em relação à referência do CLP.

Salienta-se que a frequência tanto do CLP quanto do ESP32 para calcular o ângulo real e ótimo é de 1 em 1 segundo. No entanto, o seguidor solar em ambos os casos só se move a cada 8 minutos, se o ângulo real e de referência forem suficientemente distantes. Para a coleta de dados, o CLP envia os dados para o servidor MQTT a cada 4 minutos (tempo máximo de envio do dispositivo), enquanto o ESP32 envia a cada 8,1 minutos, o que também pode contribuir para eventuais diferenças. Salienta-se que o tempo de envio do microcontrolador foi configurado como 8,1 minutos propositalmente, de modo que os envios ocorressem um pouco depois do acionamento do seguidor.

Anteriormente, os dados discutidos foram obtidos do protótipo, com a usina fotovoltaica Gráfica ainda operando com CLP. O próximo passo foi avaliar a operação dessa mesma usina FV, mas com a versão com o microcontrolador. A Figura 4.8 exibe as curvas coletadas, em que, para obter a curva de referência via CLP, um dispositivo à parte com as mesmas configurações de *backtracking* foi configurado para enviar dados, sem estar conectado a uma usina FV. A análise qualitativa revela uma grande proximidade entre as curvas, com o posicionamento real estando mais próximo das referências em comparação com o protótipo.

Para a análise quantitativa dos resultados mostrados na Figura 4.8, foram utilizadas as mesmas métricas de erro, MAE e MSE. Os valores dessas métricas para cada uma das curvas estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Métricas de erros para as curvas de referência e real do seguidor com ESP32 em relação à referência do CLP na aplicação da usina fotovoltaica de 109 kWp.

Curva	MAE ($^{\circ}$)	MSE ($^{\circ}$) ²
Ref. ESP32	0,6397	1,1892
Real ESP32	2,0889	6,7685

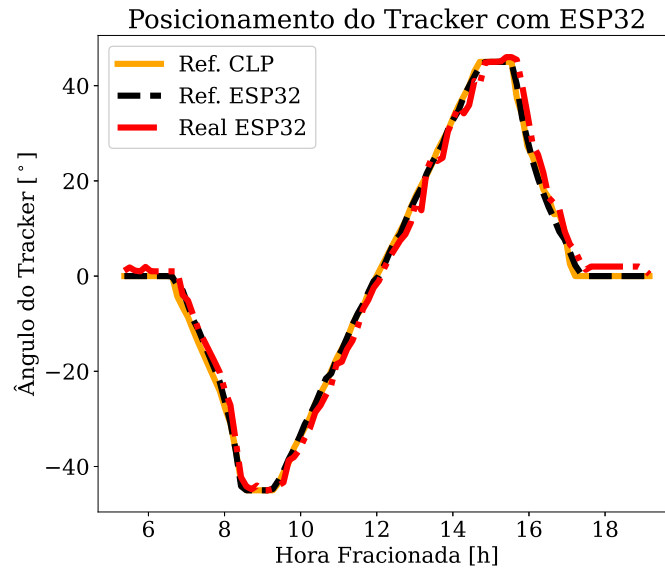


Figura 4.8 – Posicionamento do *tracker* na usina fotovoltaica Gráfica para a data 22/06/2024. Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 4.4 revela que o MAE para a curva “Ref. ESP32” é de $0,6397^\circ$, enquanto para a curva “Real ESP32” é de $2,0889^\circ$. Isso indica que, em média, os valores preditos pela “Ref. ESP32” estão a aproximadamente 0,6397 unidades de ângulo em relação à referência do CLP, enquanto os valores da curva real estão a 2,0889 unidades de ângulo. O MSE para a curva “Ref. ESP32” é de $1,1892^{(o)^2}$, enquanto para a curva real é de $6,7685^{(o)^2}$. Logo, em comparação com o protótipo, observa-se que há uma maior proximidade entre os dados da versão com microcontrolador e com CLP.

Com isso, a aplicação na usina fotovoltaica real de 109 kWp demonstra que o sistema pode manter uma precisão elevada em escala maior, embora a curva real ainda apresente margens para melhorias. Esse desempenho na aplicação real é promissor e sugere que ajustes e calibrações adicionais podem melhorar ainda mais a precisão do sistema de posicionamento do *tracker* baseado no ESP32.

4.2.2 Geração do Seguidor Solar Protótipo

A Figura 4.9 exibe a geração do protótipo em comparação com uma usina com estrutura fixa e outra com seguimento solar utilizando CLP medidos em um mesmo dia, na data 04/06/2024. Para uma comparação adequada, as curvas de potência foram normalizadas pela potência de pico respectiva de cada usina. Observa-se que todos os seguidores solares apresentam maior geração em comparação ao sistema fixo, especialmente no início e no final do dia. No caso do protótipo, nota-se uma queda de potência próxima ao meio-dia, o que não

acontece nas demais situações. Isso ocorre devido ao sombreamento no local de instalação do protótipo nesse horário. A queda de geração próxima das 16h, em todas as ocasiões, deveu-se à presença de nuvens. No entanto, no caso do protótipo, há sombreamento adicional dos módulos fotovoltaicos em torno das 16h, resultando em uma queda mais acentuada da potência após esse horário.

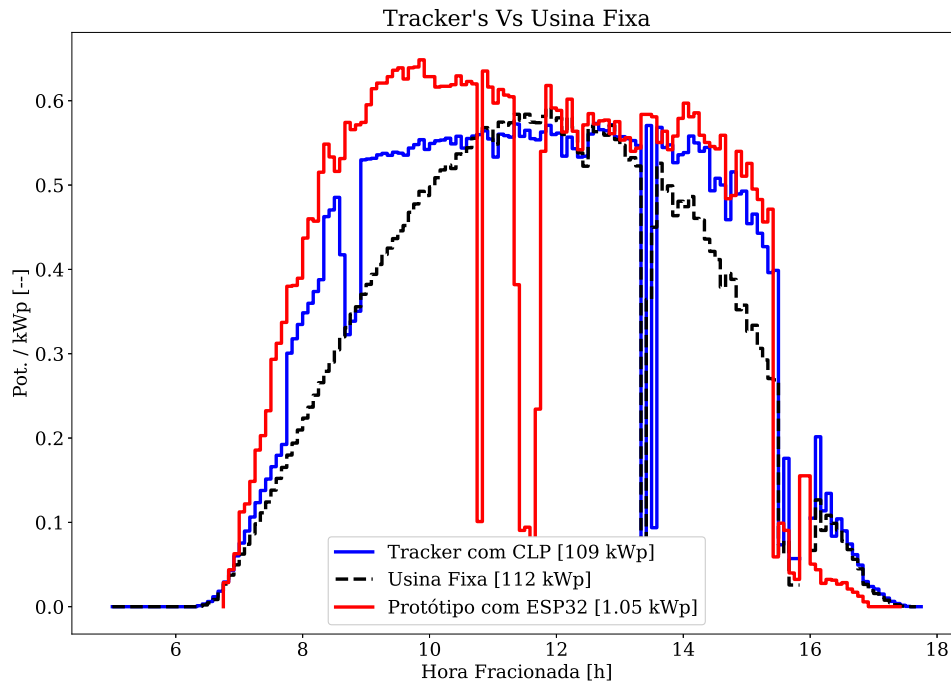


Figura 4.9 – Comparativo das curvas de potência para o dia 04/06/2024. Fonte: Autoria Própria.

Ainda sobre a Figura 4.9, observa-se que o protótipo tende a gerar mais energia do que o seguidor baseado em CLP. Contudo, também é evidente que a curva de potência do protótipo tende a apresentar uma queda no pico ao longo do dia, mesmo sem haver sombreamentos. Isso sugere que os módulos solares do protótipo não estavam adequadamente orientados para o oeste, resultando em um pico de geração pela manhã que não se mantém ao longo do dia.

Em vez de comparar a curva de potência do protótipo com outras curvas similares, compara-se agora a sua curva de potência com a curva de potência estimada via piranômetro. Para tanto, um piranômetro do modelo informado na Tabela 3.1 foi instalado na estrutura do protótipo, de modo a se mover juntamente com os módulos fotovoltaicos. A curva de irradiância coletada foi convertida em potência equivalente, conforme descrito em Zilles *et al.* (2012), assumindo valores médios das temperaturas ambiente de Divinópolis - MG ao longo do dia, para a data analisada. As temperaturas foram obtidas via *site* MeteoBlue (2024). A Figura 4.10 apresenta essa comparação, utilizando dados de um novo dia de análise, diferente

do considerado na Figura 4.9, na data 11/06/2024. Logo, a usina em estudo permanece a mesma (o protótipo), alterando apenas o dia analisado.

A Figura 4.10 mostra que o protótipo possui uma geração coerente com a irradiância coletada para o dia 11/06/2024, principalmente entre 10h e 15h. O sombreamento próximo ao meio-dia não ocorre em toda a área do protótipo, por isso, o piranômetro não registrou a queda de geração nesse horário, uma vez que a área de incidência luminosa dos módulos fotovoltaicos é significativamente maior que a do sensor. Já o sombreamento por volta das 16h é capturado pelo sensor, resultando na queda da potência estimada e real.

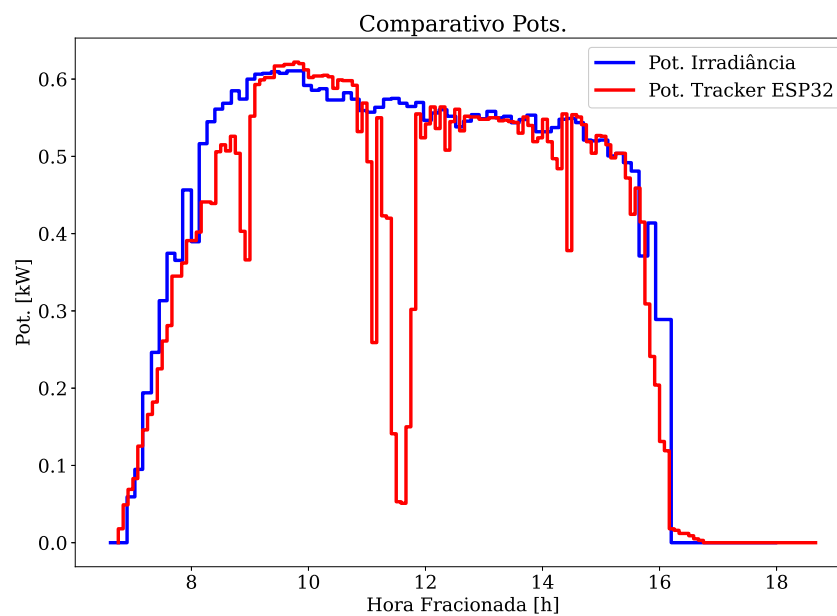


Figura 4.10 – Potência do protótipo *versus* potência estimada via irradiância para o dia 11/06/2024. Fonte: Autoria Própria.

O funcionamento do sistema de rastreamento no protótipo pode ser visto através do vídeo acelerado disponível no *link* <<https://youtu.be/e-NgnJCs0L8>>, mostrando o funcionamento efetivo do sistema de proposto.

4.2.3 Geração Usina Gráfica: Análise Diária

As Figuras 4.11 a 4.14 exibem as curvas de potência de três usinas diferentes, para dois dias de céu limpo e dois dias de céu nublado. As usinas analisadas são: uma usina fixa com 105 kWp; uma usina com seguidor solar baseado em CLP com 336 kWp; e a usina piloto onde foi instalado o seguidor baseado no ESP32, com 109 kWp. Todas as usinas são localizadas na cidade de Divinópolis, MG, no entanto se encontram significativamente afastadas uma das outras. As coordenadas de cada usina são:

- Seguidor Solar com ESP32 → latitude: $-22,917210^\circ$; longitude: $-43,557892^\circ$;
- Usina com Seguidor Solar com CLP → latitude: $-20,143423^\circ$; longitude: $-44,843173^\circ$;
- Usina fixa → latitude: $-20,102225^\circ$; longitude: $-44,852888^\circ$.

A comparação de desempenho entre as usinas foi conduzida calculando o *Final Yield* para cada planta, definido como a razão entre a energia gerada (kWh) e a potência de pico instalada (kWp). O *Final Yield*, expresso em kWh/kWp, é um indicador-chave de desempenho em sistemas fotovoltaicos, pois fornece uma medida normalizada da saída de energia em relação à capacidade do sistema. Com isso, é possível comparar a eficiência de diferentes instalações, independentemente de suas capacidades instaladas (ZILLES *et al.*, 2012).

Na Figura 4.11 tem-se as curvas de geração para um dia de céu limpo, em 21/06/2024. Observa-se, em uma análise qualitativa, que as usinas com seguidor solar produzem mais que a usina fixa, principalmente nas horas iniciais e finais do dia. Considerando os valores do *Final Yield*, a usina com o controlador baseado no ESP32 gera cerca de 4,81% a menos em comparação com a usina com CLP, mas aproximadamente 23,23% a mais que a usina fixa. Em termos do *Final Yield*, tem-se para o dia 21/06:

- Usina Piloto com Seguidor Solar com ESP32 → 4,95 kWh/kWp;
- Usina com Seguidor Solar com CLP → 5,20 kWh/kWp;
- Usina fixa → 3,8 kWh/kWp.

A Figura 4.12 apresenta as mesmas curvas em um dia limpo, mas em outra data, em 25/06/2024. Novamente, nota-se qualitativamente que ambas as usinas com seguidor solar produzem mais que a usina fixa. Todavia, novamente usando o *Final Yield* como métrica, a usina com o ESP32 gera cerca de 5,31% a menos em comparação com a usina com CLP, mas cerca de 21,55% a mais que a usina fixa. Em termos de energia por potência de pico, tem-se para o dia 25/06:

- Usina Piloto com Seguidor Solar com ESP32 → 4,64 kWh/kWp;
- Usina com Seguidor Solar com CLP → 4,90 kWh/kWp;
- Usina fixa → 3,64 kWh/kWp.

A Figura 4.13 apresenta as curvas para um dia parcialmente nublado a partir do meio-dia. Nessa situação, o *Final Yield* indica que a produção do seguidor com o ESP32 é cerca

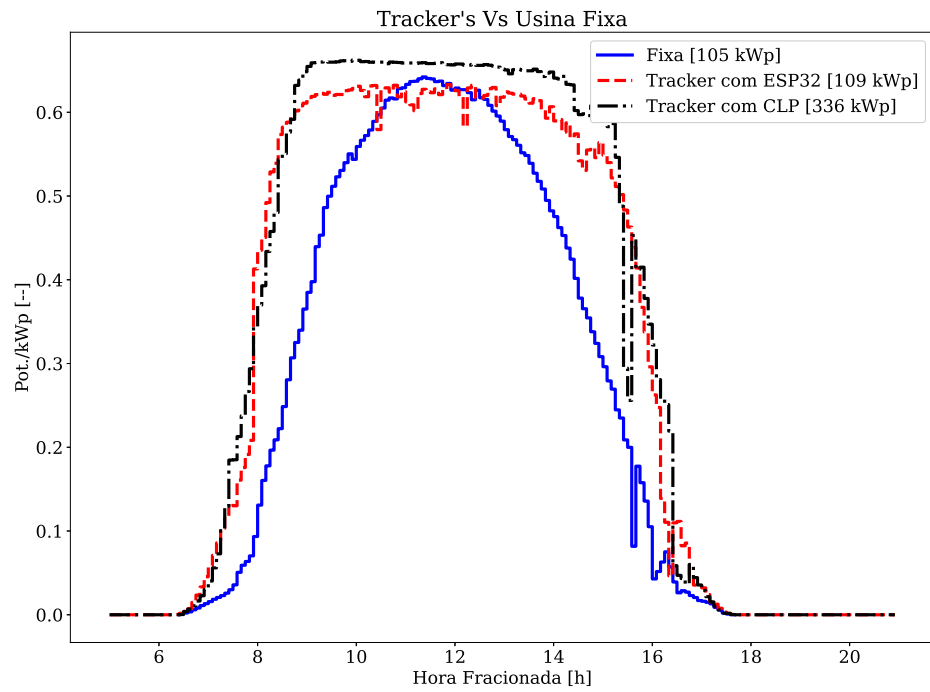


Figura 4.11 – Comparativo das curvas de potência para usinas reais considerando *Final Yield* como parâmetro: dia 21/06/2024. Fonte: Autoria Própria.

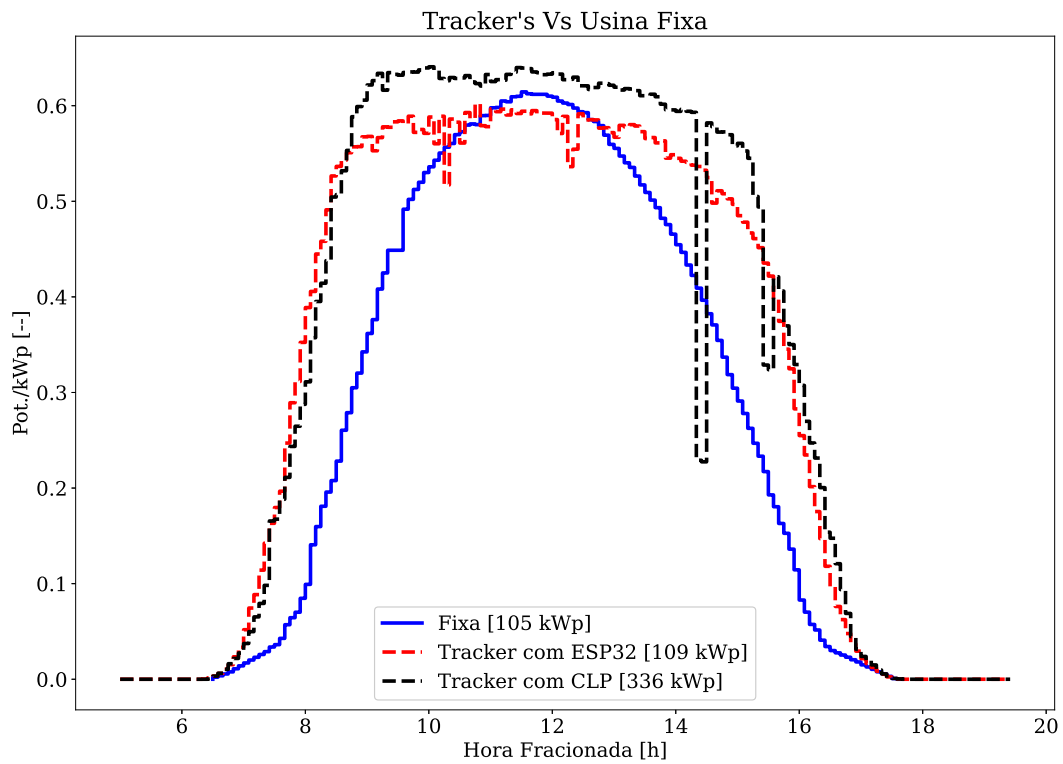


Figura 4.12 – Comparativo das curvas de potência para usinas reais considerando *Final Yield* como parâmetro: dia 25/06/2024. Fonte: Autoria Própria.

de 4,90% menor que o caso com CLP, embora supere em 30,42% a produção da usina fixa. Em termos de energia por potência de pico, tem-se para o dia 22/06:

- Usina Piloto com Seguidor Solar com ESP32 \rightarrow 4,08 kWh/kWp;
- Usina com Seguidor Solar com CLP \rightarrow 4,29 kWh/kWp;
- Usina fixa \rightarrow 2,83 kWh/kWp.

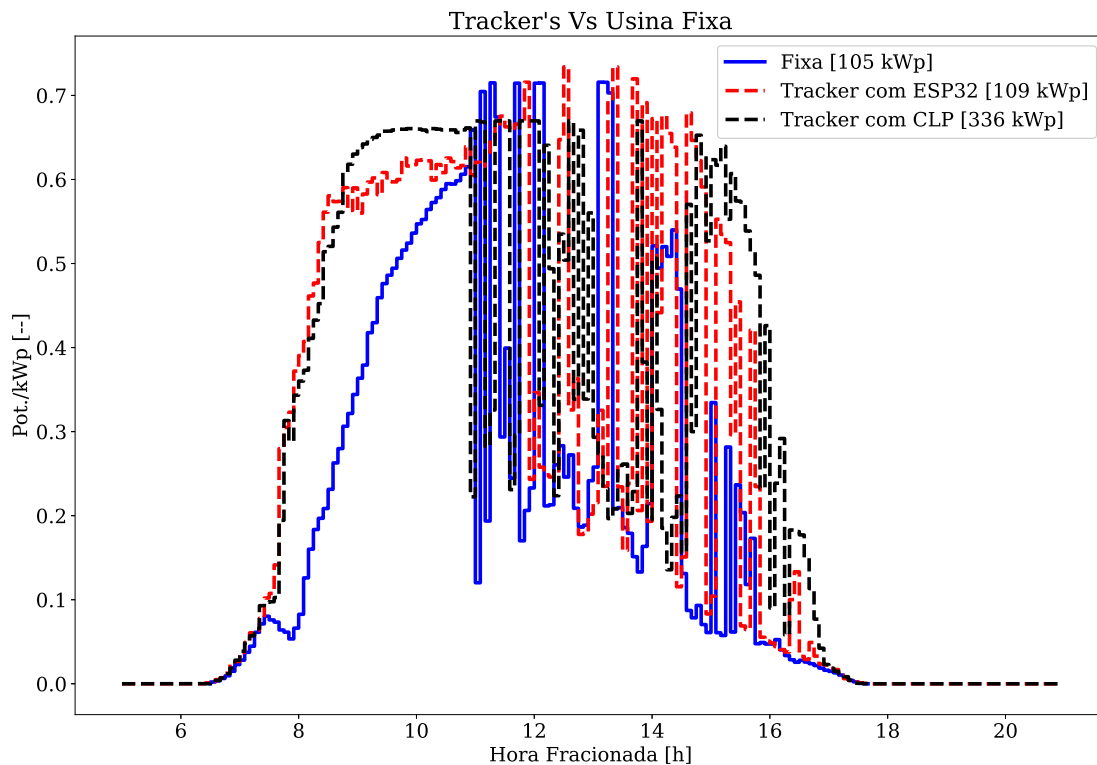


Figura 4.13 – Comparativo das curvas de potência para usinas reais considerando *Final Yield* como parâmetro: dia 22/06/2024. Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4.14 exibe as curvas para outro dia nublado. Nesta data, a usina com o microcontrolador produz 9,50% a menos que a usina com CLP, mas ainda mantém uma produção 17,51% superior à usina fixa. Em termos do *Final Yield*, tem-se para o dia 23/06:

- Usina Piloto com Seguidor Solar com ESP32 \rightarrow 4,00 kWh/kWp;
- Usina com Seguidor Solar com CLP \rightarrow 4,42 kWh/kWp;
- Usina fixa \rightarrow 3,31 kWh/kWp.

A Tabela 4.5 sumariza os resultados obtidos para os quatro dias analisados, levando em conta o *Final Yield* como parâmetro. Nota-se que, por mais que o sistema com ESP32

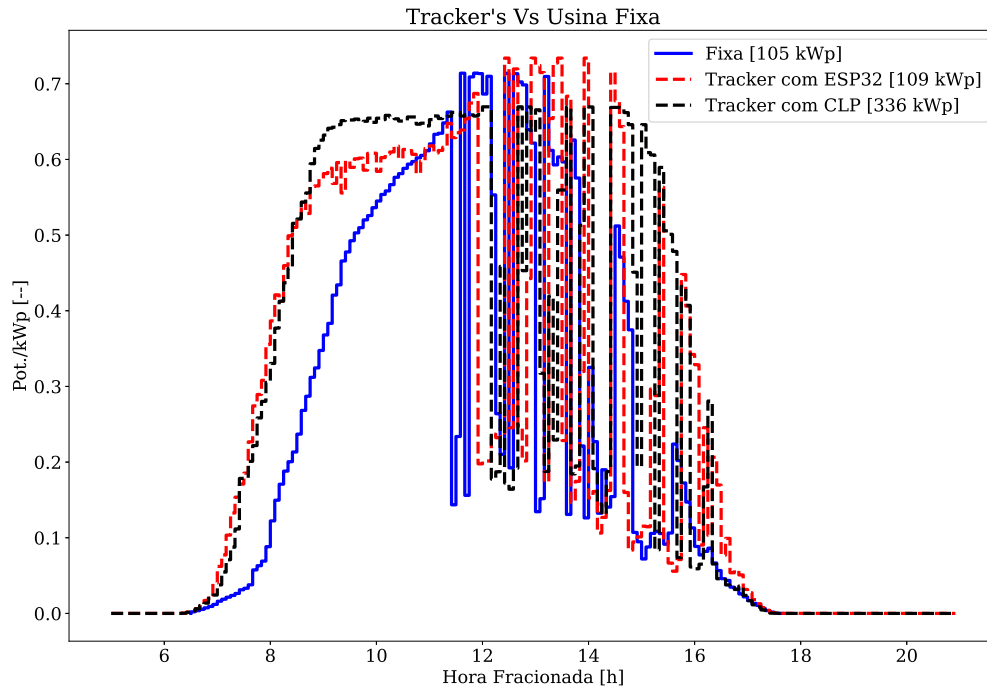


Figura 4.14 – Comparativo das curvas de potência para usinas reais considerando *Final Yield* como parâmetro: dia 23/06/2024. Fonte: Autoria Própria.

sempre tenha uma geração de energia superior a usina com estrutura fixa, em geral sua produção energética é cerca de 5% menor que o rastreador com CLP.

Tabela 4.5 – Ganhos percentuais de geração de energia das usinas analisadas, utilizando *Final Yield* como parâmetro.

Data	Seguidores Solares: CLP x ESP32	Seguidor ESP32 x Usina Fixa
21/06/2024	-4,81%	+23,23%
25/06/2024	-5,31%	+21,55%
22/06/2024	-4,90%	+30,42%
23/06/2024	-9,50%	+17,51%

Além do *Final Yield*, outro mérito que pode ser usado na comparação de usinas diferentes é o *Performance Ratio* (PR), sendo equivalente ao rendimento global do sistema. O PR pode ser obtido utilizando a Equação (4.1) (ZILLES *et al.*, 2012):

$$PR = \frac{Y_F}{\frac{\int_{t_1}^{t_2} H_{t,\beta} dt}{H_{ref}}}, \quad (4.1)$$

sendo Y_F o *Final Yield*, $H_{t,\beta}$ a irradiância incidente no plano inclinado e H_{ref} a irradiância solar nominal de 1000 W/m².

Assumindo os valores obtidos anteriormente para Y_F e o valor de $\int_{t_1}^{t_2} H_{t,\beta} dt$ de 5,18 kWh/m² · dia (irradiação média do mês de junho para a cidade de Divinópolis, MG) (CRE-

SESB, 2024), tem-se os dados elencados na Tabela 4.6. A análise dos PR's revela que, em 21 de junho, o sistema com CLP apresentou um desempenho 36,84% superior ao fixo, enquanto o ESP superou o fixo em 30,26%. A diferença entre o CLP e o ESP nesse dia foi de 5,05%, indicando uma leve superioridade do CLP. Já em 25 de junho, o rastreador com CLP manteve um desempenho 34,62% maior que o fixo, e o ESP 27,47% superior, com uma diferença de 5,60% entre o CLP e o ESP. No dia de 22 de junho, o CLP foi 51,59% mais eficiente que a estrutura fixa, enquanto o seguidor solar com ESP apresentou uma diferença de 44,17%. Nesse caso, a diferença entre o CLP e o ESP foi de 5,15%. Por fim, em 23 de junho, as diferenças percentuais foram de 33,53% e 20,85% para o CLP e o ESP, respectivamente, em relação ao sistema fixo, com uma diferença de 10,50% entre o CLP e o microcontrolador.

Tabela 4.6 – PR's e diferenças percentuais entre os PR's de cada uma das usinas analisadas.

Data	PR			Diferença Percentual		
	Fixo	CLP	ESP32	CLP-Fixo	ESP32-Fixo	CLP-ESP32
21/06/2024	0,734	1,004	0,956	36,84%	30,26%	5,05%
25/06/2024	0,703	0,946	0,896	34,62%	27,47%	5,60%
22/06/2024	0,546	0,828	0,788	51,59%	44,17%	5,15%
23/06/2024	0,639	0,853	0,772	33,53%	20,85%	10,50%

Com relação aos resultados obtidos, algumas considerações devem ser destacadas. Em primeiro lugar, as usinas com seguidor solar não estão exatamente nas mesmas coordenadas, mesmo que na mesma cidade, o que pode ocasionar diferenças nas potências geradas, especialmente em dias que não são de céu limpo. Além disso, podem ocorrer erros nas comparações devido à diferentes condições de sujidade dos módulos fotovoltaicos, eficiência dos inversores das usinas analisadas, entre outros pontos. Por fim, essa análise é restrita apenas a 4 dias, sendo que para uma comparação mais precisa seria necessário ter ao menos a medição ao longo de um ano. No entanto, tal análise não foi realizada por questões práticas, tendo em vista que o trabalho foi realizado em um contexto de mestrado, com data limite para entrega da pesquisa.

4.2.4 Geração Usina Gráfica: Análise Semanal

A Figura 4.15 apresenta a análise da geração de energia em um período maior, de 25/06 a 09/07, em contraste com a análise diária mostrada na Seção 4.2.3. Utilizam-se os dados da mesma usina fixa de 105 kWp mencionada anteriormente e os dados da usina Gráfica. Para uma comparação mais adequada, novamente utiliza-se o mérito *Final Yield* como parâmetro.

Observa-se na Figura 4.15 que a usina com o controlador proposto supera a geração da usina fixa na maioria dos dias, com um aumento médio de aproximadamente 18,3%. Uma

observação importante sobre a geração no dia 02/07 é que a usina Gráfica passou por uma limpeza dos seus módulos fotovoltaicos. Durante esse processo, os módulos foram posicionados em uma inclinação fixa, adequada para a limpeza, mas não ideal para a captação de energia. Ainda assim, a geração do seguidor ficou próxima com a geração de energia da usina fixa, considerando que os dados foram coletados no inverno do hemisfério sul e o posicionamento fixo representa uma média anual. A limpeza resultou em um aumento significativo da energia gerada, especialmente no dia seguinte à manutenção, mas prejudicou a geração no dia da manutenção em si.

De todo modo, os resultados ao longo dos dias analisados reforçam o desempenho consistente do controlador projetado, com a usina apresentando um aumento percentual de geração.

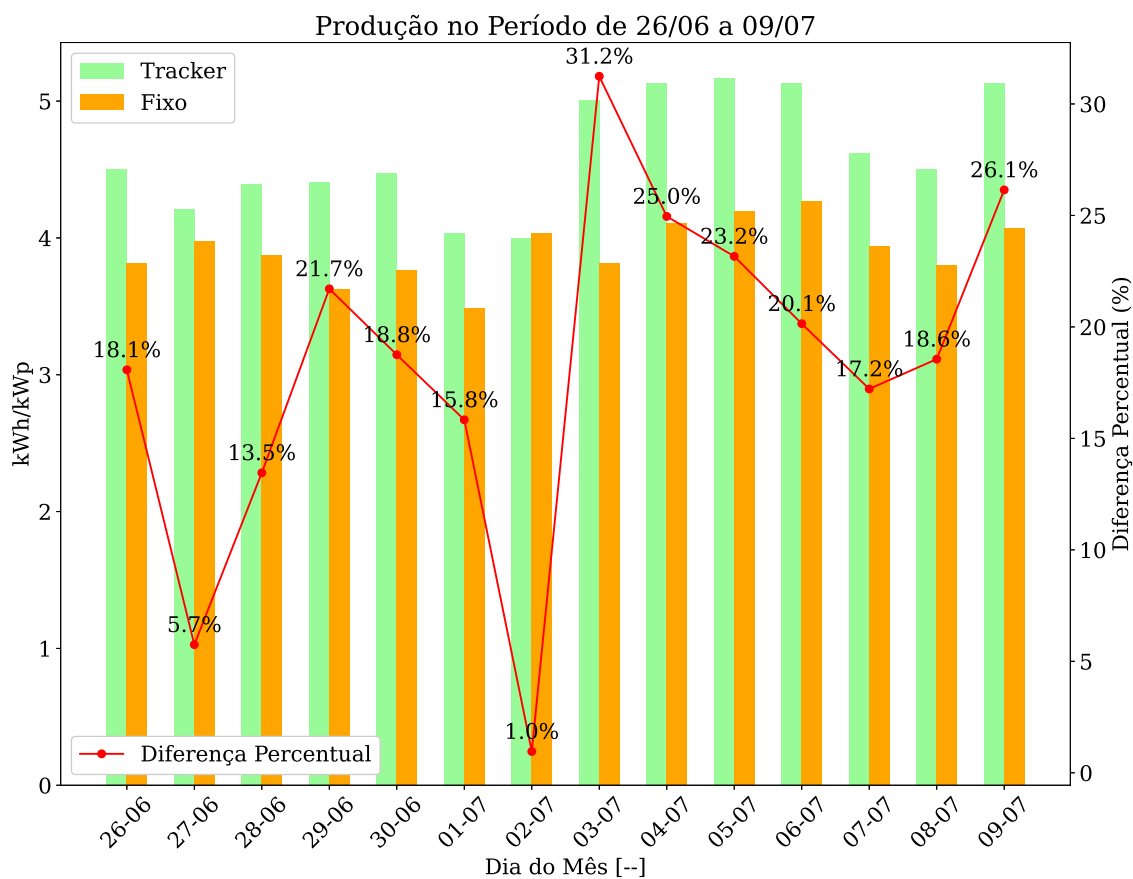


Figura 4.15 – Energia gerada: seguidor solar proposto *versus* usina fixa, de 26/06/2024 a 09/07/2024. Fonte: Autoria Própria.

4.3 Análise de Consumo do Sistema

Após avaliar a geração do rastreador solar proposto, o próximo passo é analisar o consumo do sistema, comparando a energia gerada com a energia consumida. Para isso, foi utilizado um analisador de qualidade de energia, conforme descrito na Seção 3.9, com o objetivo de coletar os dados de consumo total do painel de controle, incluindo o controlador baseado no ESP32, o acionamento do atuador via inversor de frequência, entre outros dispositivos.

A Figura 4.16 mostra a tensão de entrada e a corrente consumida do painel de controle ao longo do dia 11/07/2024. Observa-se que a tensão varia em torno de 220V, com as maiores variações ocorrendo entre 10h e 15h. A corrente reflete o funcionamento do seguidor solar: nos períodos iniciais e finais do dia, a corrente é constante, indicando que o atuador não é acionado nesses horários. A partir do nascer do sol, são observados picos de corrente a cada 8 minutos, representando a ativação do motor. As duas regiões com consumo constante entre 8h e 16h correspondem aos intervalos em que o seguidor está fixo em $\pm 45^\circ$. Nota-se que o consumo é maior fora do *backtracking*, devido ao maior número de acionamentos.

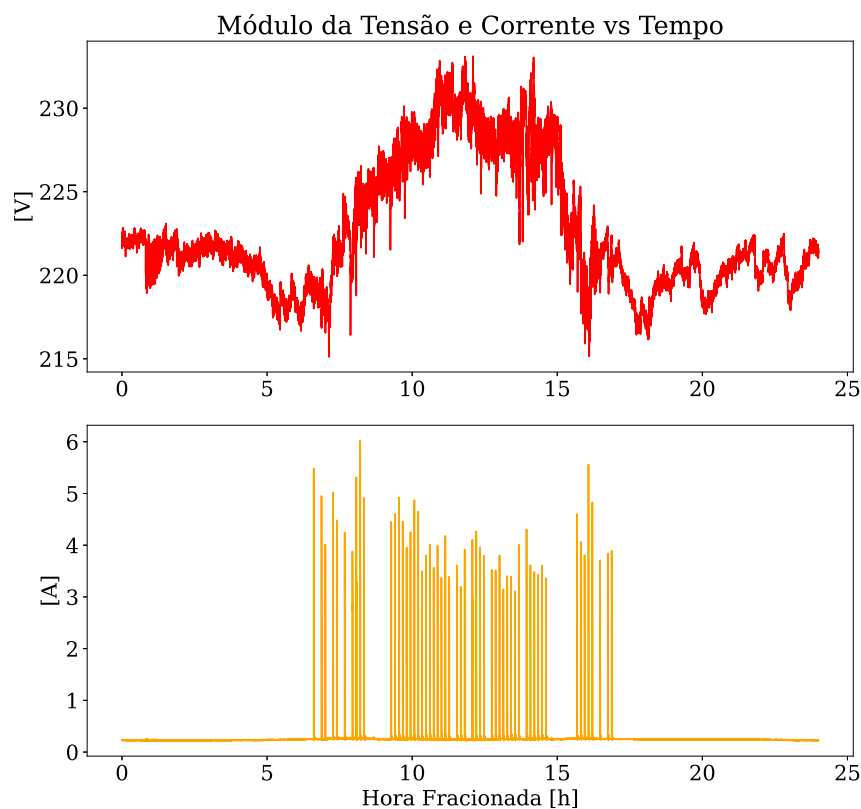


Figura 4.16 – Comportamento temporal da tensão e corrente consumida pelo painel de controle do seguidor solar da usina Gráfica para o dia 11/07/2024. Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4.17 apresenta as potências aparente, reativa e ativa consumidas pelo sistema ao longo do dia 11/07/2024. As curvas das potências aparente e ativa se assemelham à da corrente, com variações nos valores máximos e mínimos. No *subplot* da potência ativa, destaca-se um *zoom* em uma região específica da curva, onde se observa um pico no início do acionamento, seguido de um decréscimo após alguns segundos. Em seguida, a potência cresce em rampa até se estabilizar, voltando a cair com o desligamento do motor. Esse comportamento também foi notado na corrente e na potência aparente. O pico inicial pode representar a energia extra necessária para superar a inércia do atuador, enquanto o aumento gradativo da potência após o pico pode ser devido à configuração do inversor, que apresenta um acionamento gradativo, em rampa, de 0 a 60 Hz. O módulo da potência reativa, por sua vez, é consideravelmente menor que o das demais.

Em termos de energia, a potência ativa mostrada na Figura 4.17 representa um consumo de 0,65 kWh diário, assumindo os dados para o dia 11/07/2024. Este valor refere-se ao consumo diário de todo o sistema, incluindo o consumo em *standby* e durante os acionamentos do nascer ao pôr do sol. Isso indica um consumo significativamente menor em comparação com a energia gerada pelo arranjo de módulos fotovoltaicos associados ao seguidor, que foi de cerca de 522,10 kWh para a data medida.

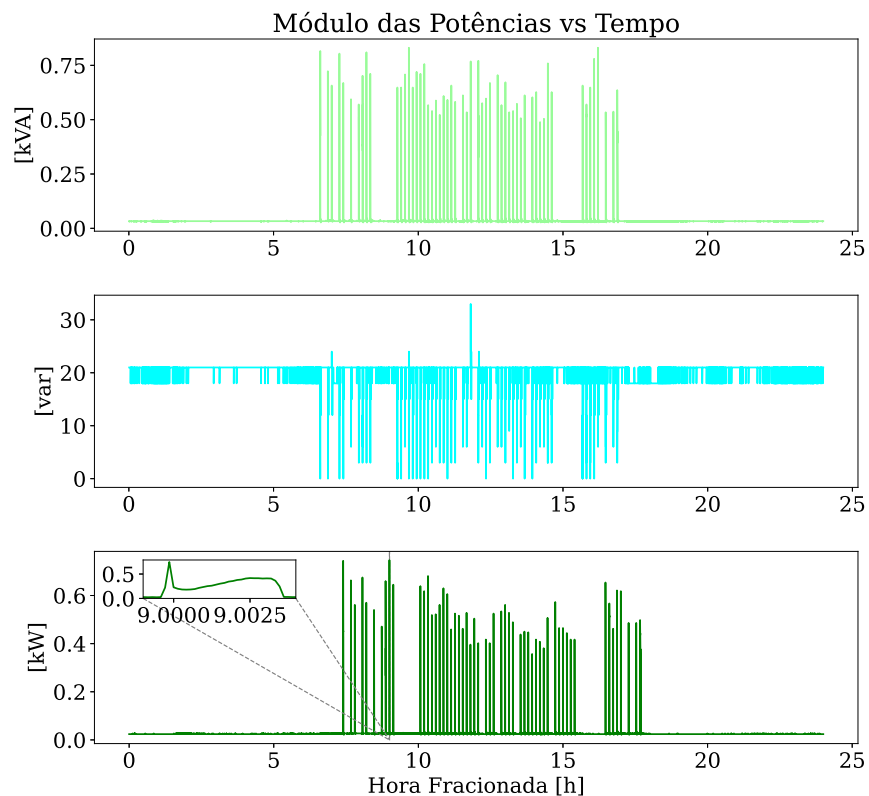


Figura 4.17 – Comportamento temporal das potências aparente, reativa e ativa do sistema do seguidor solar da usina Gráfica para o dia 11/07/2024. Fonte: Autoria Própria.

Conhecido o consumo de energia diário pelo painel de controle do seguidor solar e pelos acionamentos do atuador, foi possível estimar a energia líquida gerada durante o período de operação do controlador proposto. Assim, foram comparadas as energias geradas pela usina Gráfica (com rastreamento solar) e pela usina fixa de 105 kWp. Para essa análise, considerouse o período de 21/06/2024 a 09/07/2024. A energia líquida gerada com o seguidor solar foi calculada como o somatório dos kWh diários, subtraído de 0,65 kWh multiplicado pelo número de dias, assumindo um consumo constante durante todo o intervalo. No período analisado, a usina com rastreamento solar gerou aproximadamente 9642,93 kWh de energia líquida, enquanto a usina fixa gerou cerca de 8482,60 kWh. Isso demonstra que o seguidor solar proposto incrementou, em média, cerca de 15% na produção energética. Nesse caso, a comparação ocorreu sem considerar as respectivas potências de pico das duas usinas.

Ademais, é importante destacar que o *backtracking* varia ao longo do ano, o que pode significar mais ou menos tempo dos módulos fotovoltaicos na angulação de $\pm 45^\circ$ e, conseqüentemente, mais ou menos consumo. No entanto, os resultados obtidos indicam que, mesmo em casos de maior número de acionamentos diários, o sistema aparenta ter uma geração que supera o caso de usinas fixas, mesmo que necessite de um consumo de potência para operar.

Por questões práticas, foi medido o consumo de energia apenas de um dia, embora medições ao longo de diferentes estações do ano sejam recomendadas para uma análise mais abrangente.

4.4 Análise de Custos

Para a confecção da placa de circuito impresso e montagem do sistema, foram necessários diversos componentes eletrônicos, cujo custo totalizou aproximadamente R\$ 100,00 (Eletrodex, 2024). Além dos componentes para a PCI, três outros itens foram essenciais: o controlador ESP32, a tela LCD e os botões para a interface homem-máquina (IHM). O ESP32 tem um custo aproximado de R\$ 45,00, enquanto a tela LCD I2C 20x4 custa cerca de R\$ 50,00. Já os cinco botões somam aproximadamente R\$ 5,00.

A fabricação da placa de circuito impresso foi realizada por uma empresa especializada, com um custo unitário de R\$ 158,33 para a produção de três placas. Vale notar que o custo unitário diminui conforme aumenta a quantidade de placas fabricadas; inversamente, quanto menor a quantidade produzida, maior o preço individual. Assumindo o valor da produção para o caso de três placas, o custo bruto da PCI, incluindo o ESP32, é de R\$ 302,45. Considerando custos adicionais como estanho, fluxo, pasta de solda e frete, é aplicado um acréscimo de 30% ao valor. Dessa forma, o custo final da PCI é R\$ 393,20. Incluindo os componentes adicionais

da IHM, o custo total chega a R\$ 448,20, podendo variar conforme a quantidade de PCI's fabricadas, entre outros fatores.

O modelo de controlador lógico programável (CLP) utilizado no seguidor solar original é o CLP Nexo Nex18W-DR-E da Metaltex, com um custo de R\$ 3.373,27 (Oferta Elétrica, 2024). Comparando este valor com o custo total calculado para o projeto, há uma economia de aproximadamente R\$ 2.925,07, resultando em uma redução de 86,7% no custo com controlador. A Tabela 4.7 sumariza os principais custos e discussões realizadas ao longo desta seção.

Tabela 4.7 – Análise de Custos dos Componentes e Fabricação da PCI.

Item	Custo (R\$)
Componentes Eletrônicos para PCI	
Controlador ESP32	45,00
Tela LCD I2C 20x4	50,00
Cinco botões	5,00
Total Componentes (Eletrodex, 2024)	100,00
Fabricação da PCI (Empresa especializada)	
Custo unitário (três placas)	158,33
Custo bruto incluindo ESP32	302,45
Custo final da PCI (30% acréscimo)	393,20
Custo Total com IHM	
Total	448,20
Comparação com Controlador Original	
CLP Nexo Nex18W-DR-E (Oferta Elétrica, 2024)	3.373,27
Economia	2.925,07 (86,7%)

Salienta-se que essa é uma análise simplificada, pois desconsidera, por exemplo, valor de mão de obra para confecção das placas e a redução de custos ao aumentar a escala. No entanto, demonstra-se claramente o objetivo de redução de custos almejado nesse projeto.

4.5 Resumo do Capítulo 4

Neste capítulo, foram apresentados e analisados os resultados obtidos a partir das simulações computacionais e dos testes experimentais, destacando as curvas de irradiância estimadas, a performance anual, a avaliação comparativa das metodologias de posicionamento, e os dados reais de geração e consumo de energia. Além disso, foram identificados padrões de eficiência energética e comportamentos específicos do sistema sob diferentes condições operacionais. No próximo capítulo, que conclui este trabalho, serão discutidas as principais descobertas, a eficácia do sistema de rastreamento solar implementado, bem como suas im-

plicações práticas e limitações. Por fim, serão propostas sugestões para melhorias e direções para futuras pesquisas, visando a otimização contínua de sistemas de energia solar.

5 Conclusões e Propostas de Continuidade

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um sistema de rastreamento solar horizontal de um eixo de baixo custo baseado no microcontrolador ESP32, em parceria com a empresa Flex de Divinópolis, MG. A pesquisa foi uma continuação de um projeto iniciado pelo grupo GESEP e contou com o financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), em que o autor atuou como bolsista. A motivação principal foi a necessidade de reduzir custos em sistemas de rastreamento solar, tornando essa tecnologia mais acessível e viável para aplicações em diferentes escalas.

Os resultados indicaram que o sistema com ESP32 apresentou-se como uma boa alternativa, sendo capaz de manter um posicionamento adequado dos módulos fotovoltaicos tanto em uma planta de menor porte quanto em uma usina de 109 kWp. A análise quantitativa das curvas de potência revelou que, embora o sistema com ESP32 apresente um desempenho ligeiramente inferior ao CLP (entre 5% e 10% menor), ele supera significativamente os sistemas fixos, especialmente em dias com condições climáticas adversas.

Os dados experimentais mostraram que o seguidor solar baseado em ESP32 gerou entre 17,51% e 30,42% mais energia do que a usina fixa, dependendo das condições meteorológicas. Entretanto, a geração foi até 9,50% menor quando comparada ao sistema com CLP. Este desempenho pode ter sido influenciado por fatores como: usinas em diferentes localizações, apesar de estarem na mesma cidade, o que implica na análise sobretudo em dias nublados ou parcialmente nublados; valores de potência de pico distintos, o que pode gerar perdas no momento da comparação; diferentes condições de sujidade dos módulos fotovoltaicos; eficiência do inversor; entre outros.

A análise de custos destacou a viabilidade econômica do sistema baseado em ESP32, com um custo total significativamente menor em comparação com o sistema convencional baseado em CLP. Este fator, aliado à flexibilidade e facilidade de implementação do ESP32, torna-o uma alternativa atrativa para aplicações em larga escala, principalmente em usinas menores.

Além disso, a análise do consumo do sistema revelou que o consumo energético do painel de controle, incluindo o controlador ESP32 e o atuador, é significativamente menor em comparação à energia gerada. A medição do consumo ao longo do dia demonstrou picos de corrente relacionados aos acionamentos do motor, mas o consumo total de 0,65 kWh mostrou-se inferior à energia gerada, destacando a eficiência do sistema.

A análise semanal da geração de energia na usina Gráfica mostrou que o sistema com o controlador proposto superou consistentemente a geração da usina fixa, com um aumento médio de aproximadamente 18,3%. Mesmo considerando eventos específicos como a limpeza dos módulos fotovoltaicos, o desempenho do sistema com ESP32 manteve-se superior, reforçando a sua eficiência e viabilidade.

Em termos de futuras pesquisas, sugere-se a implementação de técnicas de otimização dos algoritmos de rastreamento para tentar aumentar ainda mais a eficiência do sistema. Por exemplo, a integração de sensores adicionais para monitoramento em tempo real de variáveis e ajustes automáticos pode contribuir para melhorar a precisão e a robustez do sistema de rastreamento solar baseado em ESP32, criando uma metodologia de rastreio que funde dois ou mais métodos de seguimento solar. Trabalhos futuros também poderiam focar na criação de um seguidor solar de dois eixos ou, se não for possível, focar no estudo da viabilidade da implementação desse tipo de seguidor em usinas com potências de pico na ordem de kW.

Em conclusão, a utilização de microcontroladores como o ESP32 em sistemas de rastreamento solar se mostra uma abordagem viável e eficiente, com potencial para aumentar a geração de energia e reduzir custos. A continuidade dessa linha de pesquisa poderá proporcionar avanços significativos no campo das energias renováveis, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável e, sobretudo, acessível.

Bibliografia do Autor



Eduardo Santos de Almeida.

Eduardo Santos de Almeida é engenheiro mecatrônico formado pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Campus Divinópolis em 2023. Ao longo de sua formação, desenvolveu um forte interesse em áreas como máquinas elétricas, eletrônica de potência e robótica, além de uma sólida experiência em programação e desenvolvimento de sistemas embarcados.

Durante a graduação, foi monitor de disciplinas do ciclo básico de engenharia, como Cálculo 1, Cálculo 2 e Geometria Analítica e Álgebra Vetorial (GAAV), por dois semestres consecutivos em 2019. Sua dedicação ao ensino continuou nos anos seguintes, atuando como monitor bolsista nas disciplinas de Dinâmica de Robôs, Robótica Industrial e Laboratório de Robótica Industrial entre 2021 e 2022. Em 2022, também foi monitor nas disciplinas de Dinâmica e Estruturas Dinâmicas.

Sua experiência profissional inclui um estágio como desenvolvedor *web* na empresa HEDRO, assim como desenvolvedor de cursos didáticos sobre programação, elétrica e eletrônica para a empresa CODE8734. Em 2024, concluiu seu mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com entrada no primeiro semestre de 2023. Durante o mestrado, foi bolsista da FAPEMIG e colaborou com a empresa Flex Solar em Divinópolis/MG, onde desenvolveu pesquisas na área de sistemas de rastreamento solar e eletrônica de potência aplicados a sistemas fotovoltaicos.

Referências

ABDALLAH, S. The effect of using sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics. *Energy Conversion and Management*, v. 45, n. 11, p. 1671–1679, 2004. ISSN 0196-8904. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 37.

ABOUZEID, M. Use of a reluctance stepper motor for solar tracking based on a programmable logic array (pla) controller. *Renewable Energy*, v. 23, n. 3, p. 551–560, 2001. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148100001336>>. Citado na página 31.

ADÁN, J. B. Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos. *CENIDET*, v. 1, 2007. Citado na página 31.

AHMED, M.; SALEM, S.; MOHAMED, A. Proposed design for single axis photovoltaic solar tracker. *Bulletin of the Faculty of Engineering. Mansoura University*, v. 45, p. 1–11, 06 2020. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.

AL-MOHAMAD, A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a sun-tracking system. *Applied Energy*, v. 79, n. 3, p. 345–354, 2004. ISSN 0306-2619. Citado 3 vezes nas páginas 18, 22 e 26.

ALEXANDRU, C.; POZNA, C. Different tracking strategies for optimizing the energetic efficiency of a photovoltaic system. In: *2008 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 3, p. 434–439. Citado na página 31.

Amazon Web Services. *What is MQTT?* 2024. Acessado em: 30 de junho de 2024. Disponível em: <<https://aws.amazon.com/pt/what-is/mqtt/>>. Citado na página 56.

Arctech Solar. *SkyLine II Independent Row 1P Tracker*. [S.l.], 2022. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://www.arctechsolar.com>>. Citado na página 15.

Arctech Solar. *SkyLine Tracking System*. [S.l.], 2022. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://www.arctechsolar.com>>. Citado na página 15.

Arctech Solar. *SkySmart II Independent Row 2P Tracker*. [S.l.], 2022. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://www.arctechsolar.com>>. Citado na página 15.

Arctech Solar. *SkyWings Horizontal Single-Axis Tracker*. [S.l.], 2022. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://www.arctechsolar.com>>. Citado na página 15.

Array Technologies. *Products*. 2024. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://arraytechinc.com/products/>>. Citado na página 16.

ARTANTO, D.; PRASETYADI, A.; PURWADIANTA, D.; SAMBADA, R. Design of a gps-based solar tracker system for a vertical solar still. In: *2016 International Conference*

- on *Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 140–143. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- BADRA, M. *Trina Solar acquire espanhola Nclave e entra no segmento de tracker*. 2020. <<https://canalsolar.com.br/trina-solar-acquire-espanhola-nclave-e-entra-no-segmento-de-tracker/>>. Acesso em: 12 de maio de 2024. Citado na página 16.
- BARROS, R. C. de; CALLEGARI, J. M. S.; MENDONÇA, D. d. C.; AMORIM, W. C. S.; SILVA, M. P.; PEREIRA, H. A. Low-cost solar irradiance meter using ldr sensors. In: *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 72–79. Citado na página 33.
- BRITO, M. C.; Pó, J. M.; PEREIRA, D.; SIMÕES, F.; RODRIGUEZ, R.; AMADOR, J. C. Passive solar tracker based in the differential thermal expansion of vertical strips. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 11, n. 4, p. 043701, 07 2019. ISSN 1941-7012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.5100492>>. Citado 2 vezes nas páginas e 31.
- CARRASCO, M.; MANCILLA-DAVID, F.; ORTEGA, R. An estimator of solar irradiance in photovoltaic arrays with guaranteed stability properties. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 61, p. 3359–3366, 07 2014. Citado na página 23.
- CASTRO, G. A.; LOPES, L. A. G.; GONÇALVES, D.; SOUSA, R. O. D.; CUPERTINO, A. F.; PEREIRA, H. A. Can off-grid system be improved to be smart? how internet of things can change the game. In: *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6. Citado na página 56.
- CHEN, S.; LI, C.; XIE, Y.; LI, M. Global and direct solar irradiance estimation using deep learning and selected spectral satellite images. *Applied Energy*, v. 352, p. 121979, 2023. ISSN 0306-2619. Citado na página 24.
- CHU, T.-P.; GUO, J.-H.; LEU, Y.-G.; CHOU, L.-F. Estimation of solar irradiance and solar power based on all-sky images. *Solar Energy*, v. 249, p. 495–506, 2023. ISSN 0038-092X. Citado na página 24.
- CLIFFORD, M.; EASTWOOD, D. Design of a novel passive solar tracker. *Solar Energy*, v. 77, n. 3, p. 269–280, 2004. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X04001483>>. Citado na página 31.
- CORTEZ, R. J. M. Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica. *FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO*, v. 1, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 34, 36 e 37.
- CRESESB. *CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito*. 2024. <<https://www.cresesb.cepel.br/index.php>>. Acessado: 14 de agosto de 2024. Citado na página 83.

- EL-ADAWI, M.; EL-NIKLAWI, M.; KUTUB, A.; AL-BARAKATI, G. Estimation of the hourly solar irradiance on a horizontal surface. *Solar Energy*, v. 36, n. 2, p. 129–134, 1986. ISSN 0038-092X. Citado na página 23.
- Eletrodex. 2024. <<https://www.eletrodex.net/>>. Acessado em: 04 maio 2024. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 88.
- ePowerBay. *Fabricantes de Seguidores Solares para a Geração Centralizada no Brasil*. 2020. <<https://www.epowerbay.com/single-post/fabricantes-de-seguidores-solares-para-a-geracao-centralizada-no-brasil>>. Acesso em: 12 de maio de 2024. Citado 2 vezes nas páginas e 18.
- GÓMEZ-GIL, F. J.; SIMÓN-MARTÍN, M. D.; SIMÓN-MARTÍN, M. D.; PELÁEZ-VARA, J.; RUIZ-CALVO, J. A review of solar tracker patents in Spain. *Conference: 3rd International Conference on Renewable Energy Sources*, v. 2, p. 292 – 297, 2009. Citado na página 30.
- HAFEZ, A.; SOLIMAN, A.; EL-METWALLY, K.; ISMAIL, I. Tilt and azimuth angles in solar energy applications – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 77, p. 147–168, 2017. ISSN 1364-0321. Citado na página 32.
- HARIRI, N. G.; ALMUTAWA, M. A.; OSMAN, I. S.; ALMADANI, I. K.; ALMAHDI, A. M.; ALI, S. Experimental investigation of azimuth- and sensor-based control strategies for a PV solar tracking application. *Applied Sciences*, v. 12, n. 9, 2022. ISSN 2076-3417. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- HULD, T.; CEBECAUER, T.; ŠÚRI, M.; DUNLOP, E. D. Analysis of one-axis tracking strategies for PV systems in Europe. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 18, n. 3, p. 183–194, 2010. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.948>>. Citado na página 32.
- International Electrotechnical Commission. *Photovoltaic systems - Design qualification of solar trackers*. [S.l.], 2014. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/7442>>. Citado na página 25.
- JAAFAR, S.; MAAROF, H. Influence of micro-controller-based single axis solar tracker system on solar panel's performance: Case study. *NTU Journal of Renewable Energy*, v. 3, 09 2022. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- JUNQUEIRA, R.; OLIVEIRA, L. G. M.; GODOY, N. R. D. de; CARNEIRO, M. T. D.; VILLOZ, M. P.; GALDINO, M. A. Projeto JÁlba solar: Objetivos, metodologia para definição do local de instalação, tecnologias e simulações computacionais através do pvsyst. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 5, n. 1, p. 34–43, 2014. Acesso em: 15 ago. 2024. Disponível em: <<https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/106>>. Citado na página 23.
- KJAER, S. B.; PEDERSEN, J.; BLAABJERG, F. A review of single-phase grid connected inverters for photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Brasília - DF, v. 5, 2005. Citado na página 14.

- LENZ, J. M.; SARTORI, H. C.; PINHEIRO, J. R. Mission profile characterization of pv systems for the specification of power converter design requirements. *Solar Energy*, v. 157, p. 263–276, 2017. ISSN 0038-092X. Citado na página 25.
- LENZ, J. M.; SARTORI, H. C.; PINHEIRO, J. R. Defining photovoltaic mission profile for the pre-design of static converters. *IEEE Latin America Transactions*, v. 16, n. 5, p. 1402–1409, 2018. Citado na página 25.
- LIRA, J. R. V. Desenvolvimento de um rastreador solar do tipo polar com ajuste do ângulo de inclinação. *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, v. 1, n. 1, 2014. Citado na página 31.
- LOS, N. A. Elaboração de um controle eletrônico para seguidor solar horizontal com limpeza automática. *UTFPR*, v. 1, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 36.
- MANCILLA-DAVID, F.; RIGANTI-FULGINEI, F.; LAUDANI, A.; SALVINI, A. A neural network-based low-cost solar irradiance sensor. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, v. 63, p. 583–591, 03 2014. Citado na página 23.
- MARTINS, F. O. Seguidor solar de dois eixos com motores passo-a-passo. *Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa*, v. 1, 2016. Citado na página 37.
- MASTERS, G. M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. 1. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley Sons, Inc., 2004. 676 p. Citado 7 vezes nas páginas , 25, 38, 39, 40, 44 e 45.
- MEIKAP, S.; DEY, S. Development of a low-cost optimum power tracking prototype for solar energy. In: *2016 IEEE Annual India Conference (INDICON)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- MeteoBlue. *MeteoBlue*. 2024. <<https://www.meteoblue.com/>>. Acessado em: 06 de junho de 2024. Citado na página 77.
- MOUSAZADEH, H.; KEYHANI, A.; JAVADI, A.; MOBILI, H.; ABRINIA, K.; SHARIFI, A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 8, p. 1800–1818, 2009. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109000318>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 30.
- MUNANGA, P.; CHINGUWA, S.; NYEMBA, W. R.; MBOHWA, C. Design for manufacture and assembly of an intelligent single axis solar tracking system. *Procedia CIRP*, v. 91, p. 571–576, 2020. ISSN 2212-8271. Enhancing design through the 4th Industrial Revolution Thinking. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- MUÑOZ, I.; GUINDA, A.; OLIVARES, G.; DÍAZ, S.; GRACIA-AMILLO, A. M.; CASAJÚS, L. Evaluation of horizontal single-axis solar tracker algorithms in terms of energy production and operational performance. *Solar RRL*, v. 8, n. 1, p. 2300507, 2024. Citado na página 21.

- NASCIMENTO, B.; ALBUQUERQUE, D.; LIMA, M.; SOUSA, P. Backtracking algorithm for single-axis solar trackers installed in a sloping field. *International Journal of Engineering Research and Applications*, IJERA, v. 5, n. 12, p. 27–35, 2016. Citado 2 vezes nas páginas e 34.
- NASCIMENTO, B. A. M. Algoritmo de posicionamento e backtracking para seguidor solar. *Instituto Politécnico de Viseu*, v. 1, 2015. Citado na página 33.
- NASCIMENTO, B. A. M. Algoritmo de posicionamento e backtracking para seguidor solar. *Mestrado em Energia e Automação Industrial*, 2015. Citado na página 42.
- Nextracker Inc. *NX Gemini Two-in-Portrait Smart Solar Tracker*. [S.l.], 2022. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://www.nextracker.com>>. Citado na página 15.
- Nextracker Inc. *NX Horizon Smart Solar Tracking System*. [S.l.], 2022. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://www.nextracker.com>>. Citado na página 15.
- NGO, X. C.; NGUYEN, T. H.; DO, N. Y.; NGUYEN, D. M.; VO, D.-V. N.; LAM, S. S.; HEO, D.; SHOKOUHIMEHR, M.; NGUYEN, V.-H.; VARMA, R. S.; KIM, S. Y.; LE, Q. V. Grid-connected photovoltaic systems with single-axis sun tracker: Case study for central vietnam. *Energies*, v. 13, n. 6, 2020. ISSN 1996-1073. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- Nunez Munoz, M.; BALLANTYNE, E. E.; STONE, D. A. Development and evaluation of empirical models for the estimation of hourly horizontal diffuse solar irradiance in the united kingdom. *Energy*, v. 241, p. 122820, 2022. ISSN 0360-5442. Citado na página 24.
- Oferta Elétrica. 2024. <<https://www.ofertaeletrica.com.br/>>. Acessado em: 05 maio 2024. Citado na página 88.
- OLIVEIRA, C. A. A. de. Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias. *Universidade Federal de Pernambuco*, v. 1, 2007. Citado na página 36.
- OLIVEIRA, F. M. d. Rastreamento da máxima potência em arranjos fotovoltaicos sob efeito de sombreamento parcial baseado no método de otimização por enxame de partículas. *UTFP, Paraná - PR*, v. 1, 2015. Citado na página 14.
- OLIVEIRA, M. M. Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, v. 1, 2008. Citado na página 36.
- OLIVEIRA, M. M.; KRENZINGER, A. Análise do desempenho de módulos fotovoltaicos planos com seguidor solar. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, Nov 2008. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 22.
- PAGANI, V.; LOS, N.; MAIDANA, W.; LEITÃO, P.; CASARO, M.; NASCIMENTO, C. Soiling monitoring modelling for photovoltaic system. In: _____. [S.l.: s.n.], 2020. p. 592–601. ISBN 978-3-030-58652-2. Citado na página 14.
- PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 3, p. 1625–1636, 2011. Citado na página 14.

- PARMAR, J. V.; PARMAR, N.; GAUTAM, S. Passive solar tracking system. In: . [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 30.
- PHIRI, M.; MULENGA, M.; ZIMBA, A.; EKE, C. I. Deep learning techniques for solar tracking systems: A systematic literature review, research challenges, and open research directions. *Solar Energy*, v. 262, p. 111803, 2023. ISSN 0038-092X. Citado na página 22.
- PIOTROWSKI, L. J.; FARRET, F. A. Feasibility of solar tracking and fixed topologies considering the estimated degradation and performance of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 244, p. 111834, 2022. ISSN 0927-0248. Citado na página 21.
- PV Hardware. *Solar Trackers: Added Value Benefits*. 2024. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://pvhardware.com/solar-trackers-added-value-benefits/>>. Citado na página 16.
- RAJESH, K.; PRASAD, K. K. B. Hardware realization of single axis solar tracking system by using a cost effective microcontroller. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, IJETT, v. 23, n. 7, p. 326–328, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- REVOREDO, T. C.; RIBEIRO, M. V. dos S.; LEITÃO, P. L. M. Especificação e prototipagem de um sistema de microgeração fotovoltaica com rastreamento solar. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 10, n. 1, p. 64–76, 2019. Acesso em: 15 ago. 2024. Disponível em: <<https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/256>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- RIBEIRO, G. A. G.; ANTÔNIO, A. d. S.; MOREIRA, T. M. S.; MARTINS, G.; PEREIRA, H. A. Development of a sun tracker. In: *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. Citado na página 19.
- RIBEIRO, G. A. G.; QUEIROZ, L.; MARTINS, G.; PEREIRA, H. A. A low-cost prototype for sun tracking. In: *2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- SMALLEY, J. *How does solar backtracking make projects more productive?* 2015. <<https://www.solarpowerworldonline.com/2015/07/how-does-solar-backtracking-make-projects-more-productive/>>. Acesso em: 12 de maio de 2024. Citado na página 34.
- SOARES, G. M. Desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar microcontrolado para painéis solares. *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*, v. 1, 2019. Citado na página 36.
- SOCIETY, A. S. E. Determining the accuracy of solar trackers. *American Solar Energy Society*, 2021. Acesso em: 12 de maio de 2024. Disponível em: <<https://ases.org/wp-content/uploads/2021/11/Determining-the-Accuracy-of-Solar-Trackers-.pdf>>. Citado na página 33.
- Soltec. *Produtos - Soluções*. 2024. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://soltec.com/pt/solucoes/produtos/>>. Citado na página 16.

- SÁNCHEZ-SEGURA, C. D.; VALENTÍN-CORONADO, L.; PEÑA-CRUZ, M. I.; DÍAZ-PONCE, A.; MOCTEZUMA, D.; FLORES, G.; RIVEROS-ROSAS, D. Solar irradiance components estimation based on a low-cost sky-imager. *Solar Energy*, v. 220, p. 269–281, 2021. ISSN 0038-092X. Citado na página 24.
- TAN, R. H. G.; TAI, P. L. J.; MOK, V. H. Solar irradiance estimation based on photovoltaic module short circuit current measurement. In: *2013 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–4. Citado na página 23.
- TIBA, C.; CAMPOS, M. H. S. nptrack: A n-position single axis solar tracker model for optimized energy collection. *Energies*, v. 14, n. 4, 2021. ISSN 1996-1073. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- Trina Solar Co., Ltd. *Vanguard 2P Single-Axis Solar Tracker*. [S.l.], 2021. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://www.trinasolar.com>>. Citado na página 15.
- Valmont Industries, Inc. *Convert-1P Single-Axis Solar Tracker*. [S.l.], 2022. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://www.valmont.com>>. Citado na página 15.
- Valmont Industries, Inc. *Convert-2P Single-Axis Solar Tracker*. [S.l.], 2022. Accessed: 2024-08-04. Disponível em: <<https://www.valmont.com>>. Citado na página 15.
- WU, J.; HOU, H.; YANG, Y. Annual economic performance of a solar-aided 600mw coal-fired power generation system under different tracking modes, aperture areas, and storage capacities. *Applied Thermal Engineering*, v. 104, p. 319–332, 2016. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116307141>>. Citado na página 30.
- ZEČEVIĆ, ; ROLEVSKI, M. Neural network approach to mppt control and irradiance estimation. *Applied Sciences*, v. 10, n. 15, 2020. ISSN 2076-3417. Citado na página 23.
- ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. d. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*. São Paulo: Oficina de Texto, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 77, 79 e 82.
- ŞEN, Z. Fuzzy algorithm for estimation of solar irradiation from sunshine duration. *Solar Energy*, v. 63, n. 1, p. 39–49, 1998. ISSN 0038-092X. Citado na página 23.