



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

MARCOS PAULO JERÔNIMO DOS SANTOS

Desenvolvimento e avaliação de desempenho de um sistema de
posicionamento automático de placas fotovoltaicas.

Cabo de Santo Agostinho - PE

2024

MARCOS PAULO JERÔNIMO DOS SANTOS

Desenvolvimento e avaliação de desempenho de um sistema de posicionamento automático de placas fotovoltaicas.

Monografia apresentada ao Curso de Bacharel em Engenharia Eletrônica da Universidade Federal Rural de Pernambuco -Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Reinel Beltrán Aguedo

Cabo de Santo Agostinho - PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

S237d Santos, Marcos Paulo Jerônimo dos.
Desenvolvimento e avaliação de desempenho de um sistema de posicionamento automático de placas fotovoltaicas / Marcos Paulo Jerônimo dos Santos. - Cabo de Santo Agostinho, 2024.
86 f.; il.

Orientador(a): Reinel Beltrán Aguedo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Cabo de Santo Agostinho - UACSA, Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Cabo de Santo Agostinho, BR-PE, 2024.

Inclui referências.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Energia solar . 3. Sistemas de energia fotovoltaica . 4. Controladores PID
5. Sistemas de comunicação móvel.
I. Aguedo, Reinel Beltrán, orient. II. Título

CDD 621.3

MARCOS PAULO JERÔNIMO DOS SANTOS

Desenvolvimento e avaliação de desempenho de um sistema de posicionamento automático de placas fotovoltaicas.

Monografia apresentada ao Curso de Bacharel em Engenharia Eletrônica da Universidade Federal Rural de Pernambuco -Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 05/03/2024

Banca Examinadora

Prof. Dr. Reinel Beltrán Aguedo
Orientador, UACSA, UFRPE

Prof. Dra. Ania Lussón Cervantes, UACSA,
UFRPE
Examinadora

Prof. Dr. Marcel Ayres De Araújo, UACSA,
UFRPE
Examinador

RESUMO

A crescente demanda por energia renovável tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e acessíveis, destacando a energia fotovoltaica como uma das principais fontes de energia limpa. No entanto, a eficiência dos painéis solares atuais ainda não supre a elevada demanda energética, pois depende diretamente do alinhamento das placas solares em relação ao sol. Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver um protótipo de rastreador solar e avaliar métodos de rastreamento solar como estratégias para aumentar a eficiência das placas fotovoltaicas. Por meio de uma análise comparativa, foram exploradas diferentes formas de automatizar o posicionamento dos painéis solares, incluindo sistemas de rastreamento em um e dois eixos, com e sem a utilização de controladores PID. Para isso, foi desenvolvida uma plataforma de testes capaz de simular o posicionamento do sol ao longo do dia, permitindo que o protótipo acompanhasse com precisão a trajetória da luz. Os dados foram coletados utilizando um sistema supervisorio SCADA, possibilitando uma análise detalhada da eficiência dos diferentes métodos de rastreamento, evidenciando a superioridade do rastreador de dois eixos. Os resultados comprovam que a utilização de controladores PID pode proporcionar ganhos significativos na eficiência energética.

Palavras-chaves: energia fotovoltaica; rastreamento solar; controladores PID; eficiência energética; SCADA.

ABSTRACT

The growing demand for renewable energy has driven the development of more efficient and accessible technologies, highlighting photovoltaic energy as one of the main sources of clean energy. However, the efficiency of current solar panels is still insufficient to meet the high energy demand, as it directly depends on the alignment of the solar panels relative to the sun. This research aims to develop a solar tracker prototype and evaluate solar tracking methods as strategies to increase the efficiency of photovoltaic panels. Through a comparative analysis, different approaches to automate the positioning of solar panels were explored, including single-axis and dual-axis tracking systems, with and without the use of PID controllers. For this purpose, a testing platform was developed to simulate the sun's position throughout the day, allowing the prototype to accurately follow the path of the sunlight. Data were collected using a SCADA supervisory system, enabling a detailed and controlled analysis of the efficiency of the different tracking methods, highlighting the superiority of the dual-axis tracker. The results confirm that the use of PID controllers can provide significant gains in energy efficiency.

Keywords: photovoltaic energy; solar tracking; PID controllers; energy efficiency; SCADA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Linha do tempo da Energia Fotovoltaica	19
2	Infográfico Absolar de Energia Solar - pt.1	22
3	Infográfico Absolar de Energia Solar - pt.2	23
4	Declinação Solar	24
5	Posicionamento da Terra	25
6	Camadas das placas solares	28
7	Módulo bifacial e tradicional	28
8	Efeito fotovoltáico	29
9	Célula fotovoltaica	30
10	Célula de Silício Monocristalino	31
11	Célula de Silício Monocristalino (Amostra)	32
12	Célula de Silício Policristalino	33
13	Célula de Silício Policristalino (Amostra)	33
14	Modelo Célula fotovoltaica	34
15	Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de $25^{circ}C$	34
16	Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de $1.000W/m^2$, espectro AM1,5	35
17	Classificação dos rastreadores solares.	37
18	Controlador PID	39
19	Estrutura do protocolo MODBUS	44
20	Peças da estrutura para impressão - Parte 2.	46
21	Peças da estrutura para impressão - Parte 2.	47
22	Diagrama de blocos da estrutura.	48
23	Protótipo Rastreador Solar	49
24	Placa solar Fotovoltaica	50
25	Arduino Uno	50
26	Servomotor TowerPro MG995	51
27	Sensor LDR	52
28	Sensor de Corrente DC INA219	54
29	Sensor de Temperatura e Umidade - DHT11	55
30	Luxímetro Digital Minipa MIm-1011	56
31	Ambiente de calibração de baixo custo	57
32	Circuito utilizado para a calibração dos LDRs	57
33	Resultado das leituras dos sensores pelo Arduino	58
34	Data Source configurado para o projeto do rastreador solar	60

35	Data Points configurados para o projeto do rastreador solar	61
36	Data Point do valor do sensor LDR A	61
37	Data Point de posicionamento do motor de altitude	62
38	Interface gráfica desenvolvida para o rastreador	63
39	WatchList dos Data Points do projeto	63
40	Diagrama de Blocos do Rastreador Solar.	65
41	Diagrama dos sensores do Seguidor Solar.	66
42	Esquema Elétrico do Seguidor Solar.	67
43	Ação de controle com os Parâmetros: $Kp = 0,8 - Ki = 0,8 - Kd = 1,2$	68
44	Ação de controle com os Parâmetros: $Kp = 1,2 - Ki = 0,8 - Kd = 1,2$	68
45	Ação de controle com os Parâmetros: $Kp = 1,2 - Ki = 0,8 - Kd = 0,8$	69
46	Ação de controle com os Parâmetros: $Kp = 1,2 - Ki = 0,8 - Kd = 0,3$	69
47	Ação de controle com os Parâmetros: $Kp = 1,2 - Ki = 0,8 - Kd = 0$	69
48	Plataforma de Testes	71
49	Experimento do Rastreador Solar de 2 Eixos	72
50	Gráficos de Tensão e Corrente do Rastreador Solar Fixo	73
51	Gráficos de Tensão em Volts do Rastreador Solar Fixo	73
52	Gráficos de Tensão e Corrente do Rastreador Solar de 1 Eixo	74
53	Gráficos de Tensão Rastreador Solar de 1 Eixo	74
54	Gráficos de Tensão e Corrente do Rastreador Solar de 2 Eixos	75
55	Gráficos de Tensão Rastreador Solar de 2 Eixos (V)	75
56	Gráfico de Tensão do Rastreador Solar de 2 Eixos com PID	76
57	Gráfico de Corrente do Rastreador Solar de 2 Eixos com PID	76
58	Gráficos de Tensão dos Rastreadores Solares	77
59	Gráficos de Corrente dos Rastreadores Solares	77
60	Gráficos de Tensão dos Rastreadores Solares com PID	78
61	Gráficos de Corrente dos Rastreadores Solares com PID	78
62	Gráficos de Tensão dos Rastreadores Solares com PID	79
63	Gráficos de Corrente dos Rastreadores Solares com PID	79
64	Gráficos da Média da Potência Gerada Durante os Experimentos	80

LISTA DE TABELAS

1	Custo dos principais componentes.	56
2	Leitura Luxímetro	57
3	Leitura LDRs	58
4	Valores dos potenciômetros	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
DDP	Diferença de Potencial
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
IHM	Interface Homem-Máquina
CCO	centro de controle operacional
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
CLP	Controlador Lógico Programável

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Geral	13
1.2.2	Específicos	14
1.3	Organização do trabalho	14
2	O RASTREADOR SOLAR	15
2.1	Estado da arte	15
3	ENERGIA SOLAR	17
3.1	História da Energia Solar	17
3.2	História da Energia Fotovoltaica no Brasil	20
3.2.1	Energia Solar nos Dias Atuais	20
3.3	Irradiação Solar	24
3.4	Placas Solares Fotovoltaicas	27
3.4.1	Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica	29
3.4.2	Células Fotovoltaicas de Silício Monocristalino e Policristalino	31
3.4.2.1	Células de Silício Monocristalino	31
3.4.2.2	Células de Silício Policristalino	32
3.4.3	Parâmetros Externos que Afetam as Características Elétricas	33
3.4.3.1	Irradiância Solar	34
3.4.3.2	Temperatura	35
4	RASTREADORES SOLARES	36
4.1	Classificação Dos Rastreadores Solares	36
4.2	Fatores Limitantes em Sistemas de Rastreamento Solar	37
5	CONTROLE	39
5.1	Controle PID	39
6	SISTEMA SUPERVISÓRIO	42
6.1	Sistemas SCADA	42
6.2	Protocolo de comunicação Modbus	43
6.3	SCADABR	44
7	MATERIAIS E MÉTODOS	46

7.1	 Materiais	46
7.1.1	Estrutura	46
7.1.2	Painel Solar	49
7.1.3	Microcontrolador - Arduino	50
7.1.4	Servomotores	51
7.1.5	Sensores	52
7.1.5.1	Sensor LDR	52
7.1.5.2	Sensor de Corrente - INA219	53
7.1.5.3	Sensor de Temperatura - DHT11	54
7.2	 Investimento no projeto	55
7.3	 Métodos	55
7.3.1	Calibração dos Sensores LDR	55
7.3.2	Aquisição de Dados	59
7.3.2.1	<i>Data Source</i> e <i>Data Points</i>	59
7.3.2.2	Interface e Visualização de Dados	62
7.3.3	Princípio de Funcionamento do Protótipo do Rastreador Solar	64
8	 RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
8.1	 Parâmetros do Controlador PID	68
8.2	 Experimentos	70
8.2.1	Plataforma de Testes	70
8.2.2	Rastreador Solar Fixo	72
8.2.3	Rastreador Solar 1 Eixo	73
8.2.4	Rastreador Solar 2 Eixos	74
8.2.5	Rastreador Solar Com PID	75
8.2.6	Comparação entre Rastreadores	76
8.3	 Cálculo do Ganho de Eficiência entre Rastreadores	80
9	 CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
	 REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento gradativo da energia elétrica a nível mundial é uma realidade atual, visto que, a sociedade contemporânea possui a energia elétrica como uma demanda indispensável para o seu progresso. Por outro lado, distúrbios ambientais têm sido acentuados pelo uso de fontes não renováveis na geração de energia elétrica. Portanto, é relevante atentar-se ao uso de tais fontes, as quais são bastante danosas ao meio ambiente, e optar pelo uso de fontes de energia limpa.

Neste sentido, a energia solar fotovoltaica é considerada uma possibilidade dentre os variados tipos de energia limpa, sendo uma das mais utilizadas a nível mundial. No Brasil, e especificamente no Nordeste, devido a sua tropicalidade e luz solar em afluência durante quase todo o ano, faz uma região de elevada disponibilidade e regularidade de irradiância solar e, consequentemente, de conversão em energia fotovoltaica (Almeida, 2021). Dentre as vantagens dos sistemas fotovoltaicos estão sua fácil instalação e manutenção, não são poluentes, além de ser livres de ruído e sustentáveis. No entanto, sua baixa eficiência e alto custo podem ser citadas como suas principais desvantagens, as quais tem sido foco dos principais fabricantes e pesquisadores na busca de soluções para sua mitigação.

Uma das soluções para aumentar a captação de radiação solar pelos painéis fotovoltaicos é movimentá-los de forma a alcançar um posicionamento perpendicular à luz do sol. Um painel instalado em um ângulo fixo ou em uma posição incorreta pode sofrer perdas significativas de energia (10%-100%) devido à variação do ângulo do sol em relação ao painel fotovoltaico, já que a energia coletada depende diretamente dessa posição (Campos *et al*, 2021). Portanto, para otimizar o aproveitamento da energia solar no processo de conversão, é essencial que os raios solares incidam perpendicularmente à superfície do painel, algo que não é possível em uma instalação fixa.

Neste contexto, para manter o painel fotovoltaico perpendicular à radiação solar incidente, os sistemas de rastreamento solar são os melhores dispositivos, maximizando a energia coletada pelo painel fotovoltaico. Desta forma, a potência máxima pode ser extraída do painel quando seu ângulo de inclinação é sincronizado com as mudanças diárias e sazonais dos movimentos do sol. Contudo, os rastreadores solares ainda são pouco usados, mesmo aumentando a eficiência na geração de energia, geralmente entre 10% a 50%. Isto se deve ao seu custo elevado de implantação e à necessidade de manutenção se comparados aos de instalação fixa, o que faz necessário um compromisso entre eficiência e custo para que os sistemas de rastreamento solar se tornem competitivos.

Na atualidade existe uma ampla diversidade de trabalhos comparando a eficiência e uso de rastreadores solares. Por exemplo, em Frosi *et al*. (2018) realiza-se uma análise compara-

tiva de produção de energia de dois módulos de 250 Wp idênticos em um sistema fixo e um seguidor solar de eixo duplo instalados na cidade de Farroupilha, Rio grande do Sul, Brasil, onde foi observado um ganho da geração do seguidor da ordem de 36%. Já em Silva *et al.* (2019) realiza-se um estudo considerando diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos em sistemas com e sem o uso de seguidores solares. O estudo modelou cada tipo de sistema fotovoltaico no *software* PVsyst, simulando a geração no período de um ano em uma instalação para Sergipe, situado na Região Nordeste. Considerando o equilíbrio dos custos para implementação do sistema e da economia gerada ao longo dos meses, um melhor retorno financeiro foi obtido usando um sistema de eixo único e utilizando módulos policristalinos. Por outro lado, em Melo *et al.* (2020) descreve-se o protótipo de um sistema de supervisão e controle para orientar um painel solar de bancada. Resultados de simulações demonstraram um aumento de eficiência máxima de até 37% para declinação da cidade do Rio de Janeiro.

Torna-se evidente que a escolha de um tipo específico de módulo e rastreador solar depende de diversos fatores. Diante disso, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) propõe o desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo, capaz de operar com rastreamento em um ou dois eixos. O objetivo é comparar e comprovar o aumento de eficiência na geração de energia de acordo com os diferentes métodos de posicionamento dos painéis solares.

1.1 Justificativa

O protótipo proposto neste trabalho permitirá a realização de estudos comparativos entre modelos de rastreamento solar e a utilização de técnicas de controle para otimizar o rastreamento, comprovando a eficácia do sistema otimizado. Além disso, incentiva a continuidade das pesquisas neste campo de estudo dentro da Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UFRPE-UACSA), uma vez que os resultados deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) contribuirão para o desenvolvimento de projetos futuros e para o avanço do conhecimento em tecnologias de rastreamento solar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo geral do presente trabalho é projetar um rastreador solar de baixo custo de forma a captar e converter o máximo da radiação solar incidente.

1.2.2 Específicos

- Estudar a fundamentação teórica referente a conceitos de sistemas de controle e posicionamento de painéis solares fotovoltaicos;
- Projetar um protótipo de rastreador solar de baixo custo de forma a garantir a maior eficiência do rastreamento;
- Desenvolver um Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), com o intuito de analisar os dados experimentais obtidos a fim de analisar a eficiência na geração;
- Definir e apresentar os critérios comparativos de eficiência que permitam avaliar de forma quantitativa a eficiência do rastreador;
- Analisar e apresentar resultados de forma prática.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em 8 capítulos, sendo o presente capítulo voltado para a contextualização do tema abordado, as motivações para seu desenvolvimento e os objetivos propostos.

Nos capítulos 2, 3, 4 e 5, são abordados os temas referentes à fundamentação teórica necessária para o entendimento e amparo técnico dos capítulos que se seguem. Começando com os princípios básicos sobre energia solar até a geração da mesma, exemplificando também os tipos de rastreadores e explicando como funcionam. Esses capítulos também abordam a fundamentação teórica sobre o controle e o sistema supervisorio utilizados.

Já o capítulo 6 objetiva detalhar a metodologia aplicada neste trabalho e também os materiais que foram empregados na construção do protótipo, bem como as plataformas de testes desenvolvidas. Também trata da apresentação da interface gráfica desenvolvida para aquisição de dados e envio de instruções.

Os resultados obtidos, seja de modo teórico ou prático, estão presentes no capítulo 7, no qual também é realizada uma comparação entre os métodos aplicados no projeto.

Por fim, o capítulo 8 apresentando as conclusões derivadas dos resultados, são também abordadas as considerações finais, além de explorar oportunidades de aprimoramento e potenciais direções para pesquisas futuras.

2 O RASTREADOR SOLAR

2.1 Estado da arte

Na atualidade existe uma ampla diversidade de trabalhos comparando a eficiência e uso de rastreadores solares. Por exemplo, em Araújo (2015) se apresenta a implementação de um sistema de controle de posição a ser aplicado no rastreador solar construído no Laboratório de Eletrônica de Potência e Energias Renováveis, situado na UFRN. A variação da velocidade do motor foi realizada por meio de um inversor tipo fonte de tensão cujo comando PWM para acionamento das chaves foi gerado por um dispositivo microcontrolador dedicado. O sensor utilizado para medição da inclinação do painel foi um sensor de estado sólido do tipo acelerômetro interfaceado ao microcontrolador. A posição solar também foi calculada pelo microcontrolador à partir das coordenadas geográficas do ponto de instalação, e da data e hora locais obtidas a partir de um dispositivo RTC (Real-Time Clock). Um protótipo de rastreador solar polar de um eixo, movimentado por um motor CC, foi montado para atestar o funcionamento do sensor e verificar se o rastreamento foi realizado de forma eficiente.

Por outro lado, o objetivo de Alves (2018) foi desenvolver o protótipo de um rastreador solar controlado via plataforma Arduino, possuindo um supervisor baseado no software ScadaBR. A combinação entre Arduino e ScadaBR facilitou a programação do Rastreador Solar e possibilitou a execução de melhorias no protótipo durante as medições realizadas.

Já o trabalho de Carmo (2019), mostra uma alternativa atraente para encontrar o ganho monetário líquido obtido pelo aumento da eficiência na produção de energia elétrica gerado pelos rastreadores solares e se analisar a sua viabilidade econômica. Este trabalho constrói um sistema contendo quatro rastreadores solares. Em que cada um destes rastreadores é responsável pela movimentação de um módulo fotovoltaico. A partir dos resultados relacionados aos ganhos obtidos com a utilização de rastreadores solares e das estimativas dos gastos de manutenção produzidos pelo sistema foi possível concluir que os rastreadores, de fato aumentam a eficiência de uma instalação fotovoltaica, no entanto, como este tipo de sistema tem um alto custo para ser implementado e para ser mantido em funcionamento a sua utilização pode se tornar inviável financeiramente.

O objetivo principal do trabalho de Godoy (2019) foi junto ao LAFEA, Laboratório de Fontes Alternativas de Energia, iniciar uma linha de estudos sobre rastreadores por meio do desenvolvimento de Projetos de Graduação, apresentando o desenvolvimento de um protótipo de rastreador digital, de um eixo vertical, em contraponto a um projeto anterior de um rastreador analógico.

Adicionalmente, Campos e Silva (2020) desenvolve um sistema de rastreamento com

dois eixos ativos e a estrutura feita a partir de impressão 3D. O modelo utiliza elementos de fixação e componentes comerciais, eletrônica de baixo custo e módulo fotovoltaicos (FV) de 1 W. O protótipo foi construído e testado, sendo utilizado um controle baseado no posicionamento do Sol. Os resultados se mostraram satisfatórios, visto que o dispositivo obteve erro máximo de 1 grau.

Além disso, o trabalho de Engin (2023) demonstra um rastreador solar de eixo duplo com o objetivo de resistir a ventanias, controlado por um controlador PID. O funcionamento do rastreador é baseado em coordenadas e cálculos que determinam a posição solar. O controlador é utilizado para reposicionar os motores por meio das leituras dos encoders instalados nos motores DC. O rastreador de dois eixos foi comparado ao painel fixo e apresentou um aumento na energia coletada de cerca de 32,5%.

3 ENERGIA SOLAR

3.1 História da Energia Solar

A história da energia fotovoltaica teve início por volta do século XIX com a descoberta do físico francês Edmond Becquerel em 1839. Essa descoberta, conhecida como efeito fotovoltaico, evidenciou a geração de uma diferença de potencial quando a luz é absorvida por uma célula eletroquímica. No entanto, o desenvolvimento da primeira célula fotovoltaica ocorreu em 1883, após um certo avanço na tecnologia. A primeira célula foi produzida com selênio e possuía uma eficiência de conversão de aproximadamente 1% apenas (Fadigas, 2012).

Segundo Pinho (2014), um catalisador importante para a energia fotovoltaica ocorreu nas décadas de 1950 e 1960, durante a corrida espacial. As células solares tornaram-se a solução ideal para fornecer energia a equipamentos eletrônicos no espaço devido ao seu baixo peso e custo. Posteriormente, em 1973, ocorreu a crise do petróleo, reavivando o interesse pela energia fotovoltaica no contexto de equipamentos eletrônicos terrestres. Isso levou a uma busca por reduções significativas nos custos de produção das células fotovoltaicas.

Com a rápida disseminação da tecnologia fotovoltaica, a partir de 1978, a produção mundial de energia fotovoltaica começou a aumentar, superando 1 MWp/ano. Durante a maior parte da década de 1990, os Estados Unidos lideraram o mercado, mas políticas governamentais na Alemanha e no Japão promoveram um crescimento significativo na demanda por essa tecnologia. Fatores importantes que influenciaram essas políticas foram o Protocolo de Kyoto e o compromisso com a redução na emissão de CO_2 (Pinho, 2014).

Um crescimento acelerado foi observado no ano 2000, com um aumento de mais de 30% no mercado de energia fotovoltaica em alguns países para estimular o mercado conectado à rede. Houve um programa no Japão de 70.000 telhados que impulsionou a produção japonesa em 1999 numa taxa de 63%, enquanto na Alemanha uma lei de feedback foi aprovada, estabelecendo uma taxa de desconto de 0,5 /kWh para eletricidade gerada por energia fotovoltaica. Essa taxa, combinada com um programa de 100.000 telhados já em vigor, fez com que a energia fotovoltaica se tornasse mais acessível (Goetzberger; Hebling; Schock, 2003).

A produção global de células fotovoltaicas atingiu a marca de 150 MWp em 1998, utilizando o silício como matéria-prima predominante. O mercado observou um grande crescimento com a ascensão da produção chinesa a partir de 2006, o que levou a China a se tornar líder na fabricação de módulos fotovoltaicos em 2009. Em países mais desenvolvidos, há incentivos governamentais impulsionando a instalação de sistemas fotovoltaicos, mesmo que a energia solar ainda seja subutilizada (Pinho, 2014).

Em 2012, a produção mundial de células fotovoltaicas ultrapassou 36,2 GWp, refletindo

um crescimento médio anual de 54,2% nos últimos onze anos. Esse crescimento significativo ilustra o crescente reconhecimento e adoção da energia fotovoltaica como uma fonte de energia limpa e renovável (Pinho, 2014). Na Figura 1, é apresentada a linha do tempo da energia solar, começando com a descoberta do selênio (Se) até o marco de potência instalada em 2012. Entre os grandes acontecimentos desse período, destacam-se a descoberta do efeito fotovoltaico por Becquerel em 1840 e o efeito fotocondutivo no selênio por Smith, que deu o verdadeiro pontapé inicial para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica. A partir daí, é possível acompanhar a evolução dessa tecnologia por meio de marcos históricos importantes.

Figura 1 – Linha do tempo da Energia Fotovoltaica



Fonte: Pinho (2014)

3.2 História da Energia Fotovoltaica no Brasil

O território brasileiro apresenta condições favoráveis para a utilização de tecnologias fotovoltaicas devido aos elevados índices de irradiação solar, apesar dos desafios enfrentados no desenvolvimento dessa tecnologia ao longo das décadas. O avanço tecnológico teve início por volta da década de 1950, com pesquisas e simpósios dedicados à energia solar. Instituições como o INT, CTA e USP foram pioneiras no desenvolvimento de células fotovoltaicas de silício cristalino e filmes finos, sendo responsáveis pelo crescimento da tecnologia no país e sua evolução (Pinho, 2014).

Infelizmente, o progresso enfrentou barreiras nas décadas seguintes, com uma redução significativa de incentivos e a migração de grupos de pesquisa para outras áreas. Mesmo com o estabelecimento de diversas fábricas de módulos fotovoltaicos de silício cristalino nos anos 70 e 80, muitas delas decaíram devido à falta de apoio, resultando no fechamento das mesmas (Pinho, 2014).

Com o objetivo de promover o engajamento no campo da energia fotovoltaica no Brasil, foi criada a ABENS em 1978. Sua reorganização em 2005 resultou na realização de congressos e programas de desenvolvimento (Pinho, 2014).

No Brasil, a primeira usina solar foi instalada em agosto de 2011, situada no município de Tauá, no sertão do Ceará. Com uma extensão de 340 km e equipada com 4.680 painéis fotovoltaicos, sua capacidade inicial era de gerar 1 megawatt, um marco considerável na época. De acordo com a Agência Reguladora do Estado do Ceará (ARCE), a usina é capaz de fornecer energia suficiente para atender mais de mil famílias (A história..., 2023).

As áreas rurais e remotas foram os lugares com principal foco de implementação de sistemas fotovoltaicos no Brasil de programas de eletrificação e universalização do acesso à energia elétrica. Em 2012 houve a regulação de sistemas conectados à rede estabelecida pela Aneel através da Resolução Normativa nº 482, ou RN/482. Abrindo assim, as portas do crescimento para o setor de energia fotovoltaica embora desafios persistam, como custos elevados, restrições das distribuidoras e falta de conscientização dos consumidores (A história..., 2023).

3.2.1 Energia Solar nos Dias Atuais

Nos últimos anos, a energia solar fotovoltaica tem experimentado um desenvolvimento significativo no Brasil. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), houve um aumento de 9,3 GW em capacidade instalada em 2022, elevando a capacidade operacional da fonte para mais de 23 GW e registrando um avanço de aproximadamente 66% no período (Dados. . . , 2022)

Tamanho foi a evolução que, em 2020, o Brasil ascendeu para a 16ª colocação no ranking global de energia fotovoltaica elaborado pela *International Renewable Energy Agency* (IRENA),

consolidando-se como um dos 20 principais países em capacidade instalada. Em comparação, em 2017, ocupávamos a 27^a posição (A história..., 2023).

Diversos fatores influenciaram esse crescimento, destacando-se as condições climáticas favoráveis do país, com altos índices de irradiação solar. Essas condições permitem um maior aproveitamento da radiação solar em certas regiões, o que amplifica a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, resultando em um desempenho mais satisfatório na transformação de energia (Dados. . . , 2022).

Além do fator natural, políticas públicas e iniciativas do setor privado têm contribuído para a popularização da energia solar fotovoltaica. Os investimentos nesse tipo de energia se tornaram mais acessíveis, pois linhas de financiamento específicas para projetos de energia solar estão oferecendo meios de pagamento que tornam a possibilidade de instalação mais alcançável. Houve também uma redução nos custos de aquisição de painéis solares, tornando a energia solar mais competitiva em relação às fontes tradicionais de energia (Dados. . . , 2022).

Dessa forma, o Brasil está trilhando um caminho promissor no aproveitamento da energia solar fotovoltaica, aproveitando seus recursos naturais e adotando medidas que fomentam o desenvolvimento sustentável e a diversificação da matriz energética nacional. Este crescimento tem impactos significativos não apenas na geração de energia, mas também na redução das emissões de gases de efeito estufa e na promoção da independência energética do país. Nas Figuras 2 e 3, é possível observar claramente o crescimento da energia solar no Brasil por meio do gráfico que apresenta a evolução dessa fonte, evidenciando sua crescente adesão e aplicação no país. Em 2023, a energia solar alcançou o marco de 37.293 MW, tornando-se a segunda maior fonte de energia no Brasil. Além disso, é possível notar a redução nos custos dos painéis solares, o que tem contribuído para aumentar a viabilidade e a popularidade desses sistemas.

Figura 2 – Infográfico Absolar de Energia Solar - pt.1



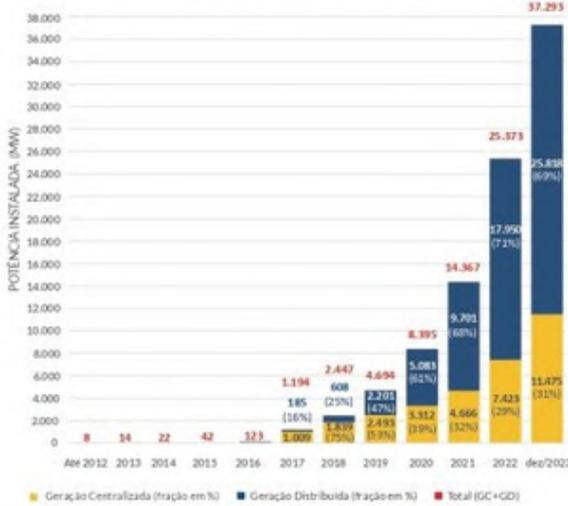
Benefícios da Fonte Solar Fotovoltaica ao Brasil

Fonte: ABSOLAR, 2023.



Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023.



Geração Distribuída Ranking Estadual

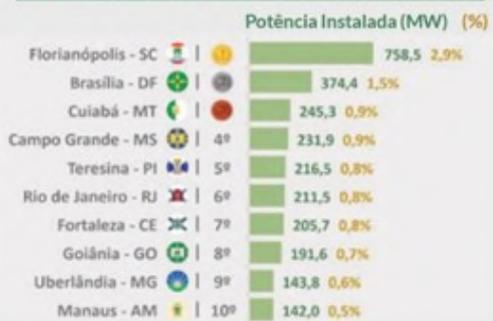
Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023.



*A potência total da matriz não inclui a importação e segue critério aplicado pelo MME, que adiciona nos valores de capacidade instalada, as quantidades de mini e microgeração distribuída associadas a cada tipo de fonte.

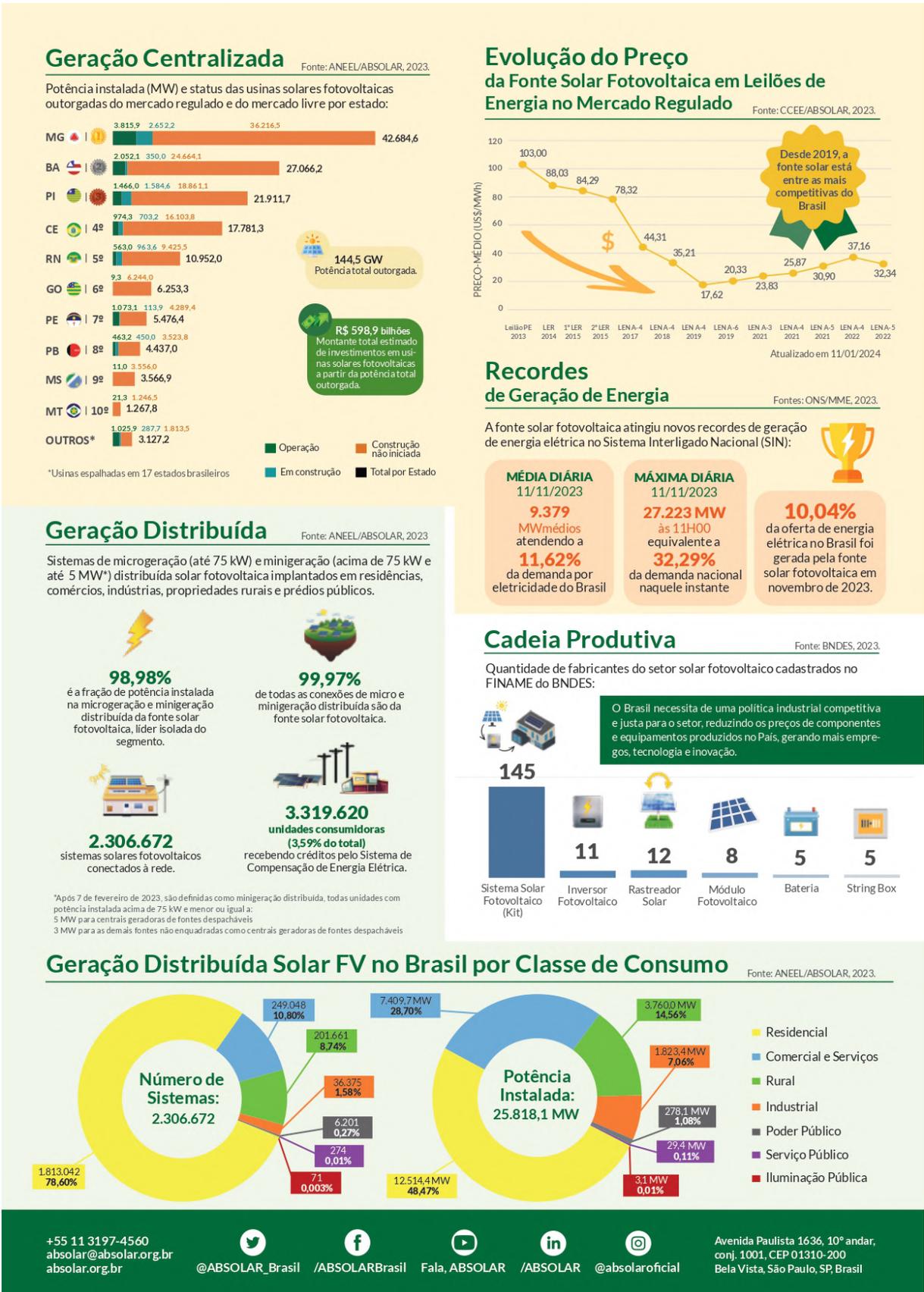
Ranking Municipal

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023.



Fonte: Absolar (<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em 14 de jan. de 2024)

Figura 3 – Infográfico Absolar de Energia Solar - pt.2



Fonte: Absolar (<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em 14 de jan. de 2024)

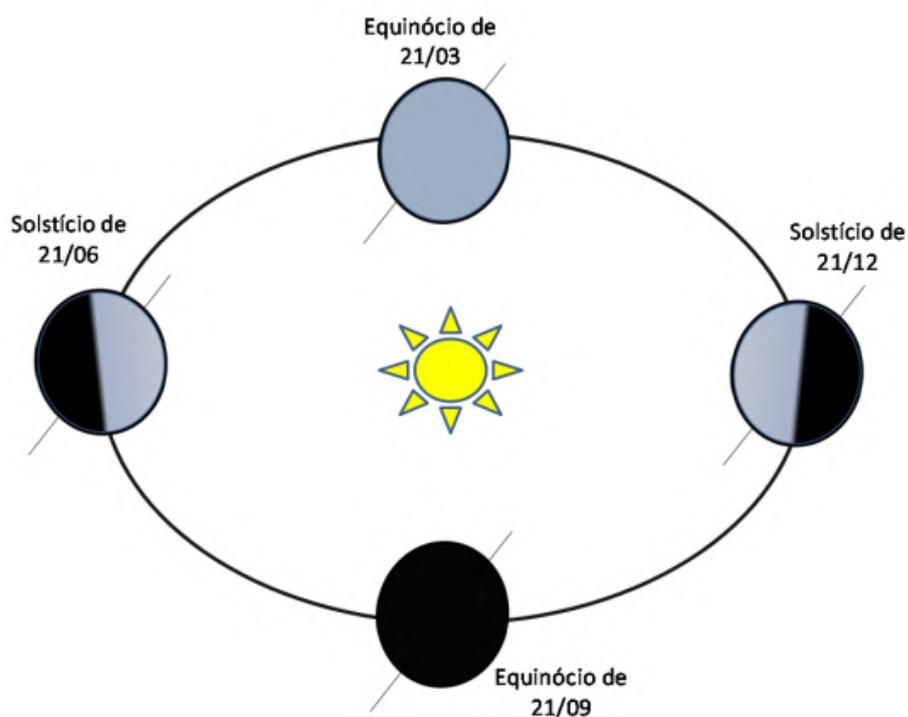
3.3 Irradiação Solar

A radiação extraterrestre, que é a que alcança o topo da atmosfera da Terra, é constante, porém a que alcança a superfície vai variar por vários fatores. Como, a energia que é absorvida ou refletida pela atmosfera, variações de níveis de vapor de água, nuvens e poluição, latitude do local, estação do ano, data e hora do dia (Barbosa, 2016).

O movimento da Terra em torno do sol, durante o ano, é realizado por uma trajetória elíptica tendo que o sistema de Ptolomeu, defini-se a distância entre o centro da Terra e o do excêntrico do astro que se observa, denominado por excentricidade, que é equivalente a ($\epsilon \approx 0,017$). Dessa forma, para o movimento de rotação no seu eixo norte e sul, que é perpendicular à linha do Equador, gera uma inclinação ou obliquidade em relação ao plano normal à elipse, de aproximadamente $23,45^\circ$. Com essa inclinação e com o movimento de translação, dão-se origem às estações do ano (Barbosa, 2016).

Essa inclinação da Terra vai variar ao longo do ano quando atingir o plano equatorial, devido os raios do Sol, ao meio dia solar, ao longo do ano. O ângulo que é gerado ao longo dessa inclinação, tem um desvio do Sol que é medido diretamente a partir da linha do equador, sendo denominado Declinação Solar (δ) e varia entre $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$, sendo positivo quando incide no hemisfério Norte e negativo no hemisfério Sul (Barbosa, 2016), como mostrado na Figura 4:

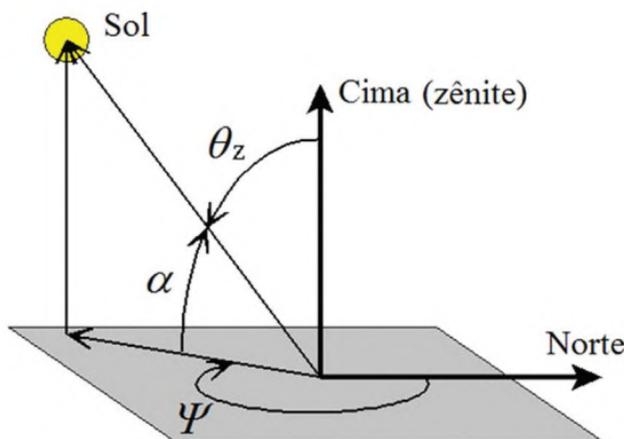
Figura 4 – Declinação Solar



Fonte: Campos e Alcântara (2013)

Para obter a posição solar, junto com a localização e a hora que foi observada, é necessário determinar os ângulos solares. Sendo eles, o ângulo de azimute (Ψ), altitude solar (α) e ângulo de zênite (θ_z), como é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Posicionamento da Terra



Fonte: Campos e Alcântara (2016)

Os ângulos solares são necessários equações referentes a cada um desses ângulos definidos que serão expostos a seguir:

- **Ângulo de incidência dos raios solares**

Para o cálculo do ângulo de incidência dos raios solares é necessário que os módulos fotovoltaicos sejam orientados visando a melhor captação de energia solar em uma determinada localização geográfica. A Terra realiza dois movimentos principais: rotação (em torno do seu eixo) e translação (movimento da terra na órbita elíptica em torno do sol). Assim, o ângulo de incidência do sol dependerá do horário do dia. Considerando que a cada hora a Terra gira 15° (equivalente a $360^\circ/24$), então o ângulo horário do Sol é dado por:

$$\omega = (T - 12) \times 15^\circ \quad (3.1)$$

em que, T é o horário solar no local considerado, variando entre 0 e 24h e ω representa o ângulo horário do Sol, em graus (Campos; Alcântara, 2016).

- **Declinação Solar**

A declinação solar é o ângulo entre o equador terrestre e a linha imaginária que passa pelo plano do Sol variando entre $-23^\circ 27'$ e $+23^\circ 27'$. Assim, inclinação do eixo terrestre faz com que a orientação da Terra em relação ao Sol mude ao longo do ano. Podendo ter o solstício entre

os dias 21 e 22 de junho, para o hemisfério sul apresentando uma inclinação que caracteriza o inverno nessa região. Já no solstício ocorrido entre os dias 21 e 22 de dezembro, o hemisfério sul apresenta uma inclinação que o aproxima do Sol, caracterizando assim o verão nessa região.

Dessa forma, é recomendado o cálculo da declinação solar para estimar o ângulo que os módulos fotovoltaicos devem possuir durante o ano. Segundo (Campos; Alcântara, 2013), a declinação percebida por um observador na linha do equador, em um determinado dia do ano, é apresentada na Equação 3.2:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen}[360 \cdot (J - 80)/365] \quad (3.2)$$

Para obter-se a posição solar, junto com a localização e a hora da observação, utiliza-se o cálculo do dia Juliano, equivalente aos dias do ano contados de forma contínua. A partir disso, é realizada a correção diária da declinação solar ao longo do ano. Na equação anterior "23,45" representa a variação angular da declinação solar e J o número de dias Julianos.

• **Altitude Solar**

A altitude solar indica o ângulo entre a direção do feixe de radiação e a projeção desta mesma direção no plano horizontal.

$$\alpha = \sin^{-1}(\text{sen}\delta \cdot \text{sen}\Phi + \text{cos}\delta \cdot \text{cos}\Phi \cdot \text{cos}\omega) \quad (3.3)$$

Na equação anterior, Φ representa a latitude do local de observação, além disso quanto menor o ângulo α , maior é o percurso dos raios solares na atmosfera.

• **Ângulo azimute**

O ângulo do azimute solar (Ψ), é o ângulo medido no plano da superfície terrestre, entre a direção do polo norte e a projeção da trajetória de incidência direta da irradiação solar na superfície terrestre. Este ângulo é positivo se medido no sentido horário a partir do polo norte. Sendo calculado por

$$\Psi = \cos^{-1} \frac{-\text{sin}\alpha \cdot \text{sin}\Phi + \text{sin}\delta}{\text{cos}\alpha \cdot \text{cos}\Phi} \quad (3.4)$$

• **Ângulo Zenite**

A partir do ângulo da latitude terrestre (Φ) subtraído da declinação solar (δ), se o horário de referência for o meio dia, se obtém o ângulo de zênite (θ_z). Esse ângulo de zenite (θ_z) indicará o ângulo de elevação do módulo fotovoltaico pelo norte ou sul, de maneira que os raios solares incidam perpendicularmente ao plano do mesmo ao meio dia. Assim,

$$\theta_z = \Phi - \delta \quad (3.5)$$

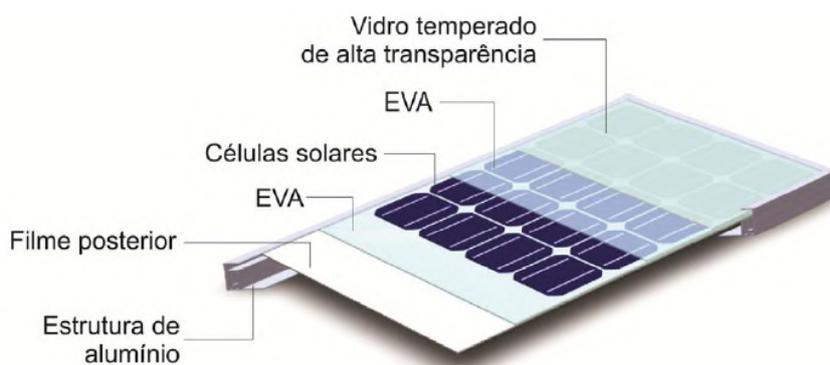
3.4 Placas Solares Fotovoltaicas

As placas solares comumente comercializadas são compostas pela junção de várias células solares ligadas em série e encapsuladas por algumas camadas de proteção, com o intuito de gerar uma maior potência por meio dessa união. Essas placas solares também são conhecidas como módulos fotovoltaicos e podem ser fabricadas tanto por maquinário quanto por manufatura (Carvalho; Lima, 2023).

Segundo Carvalho e Lima (2023) e Pinho (2014), como mostrado na Figura 6, existem algumas camadas de proteção e isolamento que são essenciais para encapsular um conjunto de células, visando a construção de uma placa solar. Essas camadas são:

- Uma lâmina de vidro temperado: esta camada protege as células solares contra danos mecânicos, como impactos e arranhões, além de permitir a passagem da luz solar para as células.
- Um material orgânico, como o EVA (etileno -vinil -acetato): geralmente feita de EVA (etileno acetato de vinila) ou outros materiais poliméricos, essa camada ajuda a fixar as células solares e a protegê-las contra umidade e agentes atmosféricos.
- Camada de células solares: o conjunto de células solares é o componente ativo que converte a luz solar em eletricidade.
- Mais uma lâmina de EVA (ou similar): esta camada, muitas vezes também feita de material encapsulante, fornece suporte adicional e proteção contra a penetração de umidade pela parte traseira das células solares.
- Uma cobertura, que pode ser vidro, tedlar, PVC, ou outros polímeros: geralmente feita de alumínio ou outro material resistente, a estrutura de suporte oferece estabilidade mecânica à placa solar e permite sua montagem em sistemas fotovoltaicos.

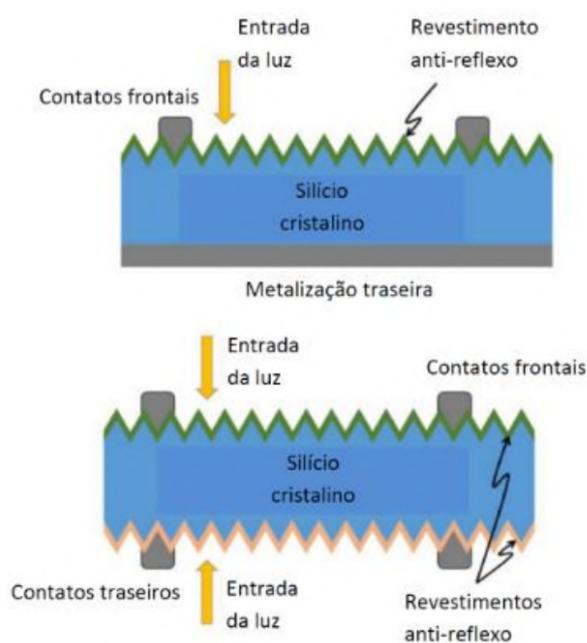
Figura 6 – Camadas das placas solares



Fonte: Pinho (2014)

Há também os módulos fotovoltaicos bifaciais, que utilizam células bifaciais e se diferenciam das tradicionais por permitirem a absorção de luz solar pela parte traseira. Enquanto as células convencionais possuem uma camada metálica que impede a entrada de luz e são recobertas por um *backsheet* opaco, os módulos bifaciais são equipados com uma lâmina de vidro na parte traseira, permitindo a captação de luz em ambos os lados. Essa é a principal diferença construtiva entre módulos convencionais e bifaciais (Lira, 2022). Na Figura 7, é possível observar a diferença estrutural entre os painéis convencionais e bifaciais, destacando a configuração da parte traseira dos painéis.

Figura 7 – Módulo bifacial e tradicional



Fonte: Lira (2022)

Segue a diferenciação entre célula, placa ou módulo e painel solar:

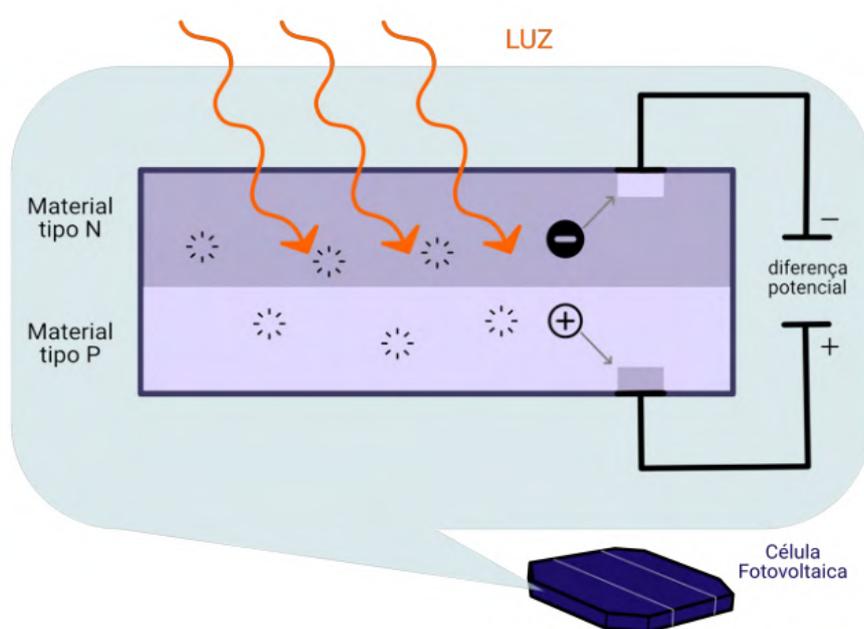
- Célula solar: é a menor unidade de conversão de luz solar em eletricidade.
- Placa ou módulo solar: é um conjunto de células solares interconectadas eletricamente e encapsuladas por algumas camadas como mostrado na Figura 6.
- Painel solar: este termo pode ser utilizado para se referir a placa ou módulo solar. No entanto, algumas vezes, pode referir-se a um conjunto de vários módulos solares ou placas, montados em uma estrutura para formar um sistema fotovoltaico de maior porte, como aqueles usados em parques solares ou fazendas solares.

Em resumo, as células se referem as unidades individuais que fazem a conversão de energia solar, as placas ou módulos solares são o conjunto de células conectadas em série entre camadas de encapsulamento e estrutural, já os painéis podem se referir tanto aos módulos quanto ao conjunto de módulos interligados.

3.4.1 Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica

O efeito fotovoltaico é responsável pelo funcionamento das células fotovoltaicas, as quais convertem energia solar diretamente em eletricidade, como mostrado na Figura 8. Essas células são construídas com materiais chamados semicondutores, que, de forma simplificada, possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução vazia na temperatura do zero absoluto (0 K), comportando-se como isolantes a essa temperatura (Mariano; Urbanetz, 2022).

Figura 8 – Efeito fotoavoltaico



Fonte: Mariano e Urbanetz (2022)

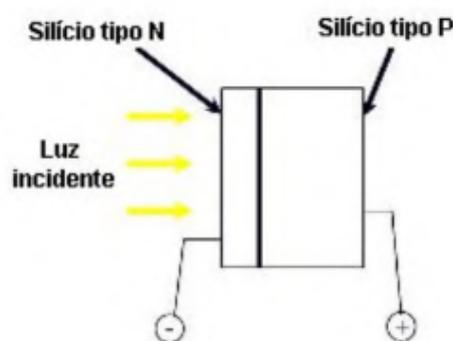
O efeito fotovoltaico ocorre nas células fotovoltaicas por meio da formação de uma diferença de potencial (DDP), também conhecida como tensão elétrica, entre os dois terminais da junção semicondutora representada por uma junção PN, como mostrado na Figura 8. Isso ocorre quando o material é exposto à luz. Após a criação dessa DDP, os elétrons foto gerados são movidos para o material N, enquanto no material P, lacunas são formadas. A DDP mantém os elétrons e as lacunas distantes entre si. Assim, quando um circuito externo é conectado, os elétrons podem circular, gerando corrente elétrica (Mariano; Urbanetz, 2022).

Segundo Nascimento (2004), a intensidade da corrente elétrica irá variar junto com a intensidade da luz que incide na célula. Assim, a corrente elétrica gerada a partir da conexão do circuito à placa terá seu fluxo mantido enquanto houver incidência de luz, sem armazenar energia elétrica em sua estrutura.

Antes de ser utilizado na produção de semicondutores, o silício em sua forma natural é encontrado em grãos, como areia, e passa por certos processos para ser purificado. Para se tornar um semicondutor, é necessário que o material tenha elétrons livres ou uma falta deles. No entanto, o silício puro não possui tal característica. Portanto, é necessário adicionar porcentagens de outros elementos ao silício por meio de um processo chamado dopagem para que o silício possa adquirir as características de um semicondutor (Nascimento, 2004).

Um exemplo de dopagem citado por Nascimento (2004), demonstra que a dopagem do silício com fósforo cria um material com características do tipo N, enquanto se a dopagem for realizada com boro, o material terá características inversas, sendo um material do tipo P. Cada célula fotovoltaica requer uma junção de um material com elétrons livres (material tipo N) e outra com elétrons faltantes (material tipo P), sendo a camada do tipo N mais fina que a camada do tipo P, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Célula fotovoltaica



Fonte: Nascimento (2004)

Na construção das células fotovoltaicas, os materiais semicondutores mais comuns utilizados pertencem aos grupos 14 e 16 da tabela periódica. Alguns desses materiais incluem o

carbono (C), silício (Si), germânio (Ge), arsênio (As), fósforo (P), selênio (Se) e telúrio (Te). Além desses elementos, compostos binários, ternários e quaternários também são empregados como semicondutores na fabricação das células (Pinho, 2014).

Segundo Pinho (2014), esses compostos recebem sua nomenclatura de acordo com os grupos da tabela periódica dos elementos que os formam. Os compostos são nomeados de acordo com os grupos da tabela periódica dos elementos que os formam. Por exemplo, o arsenieto de gálio (GaAs) e o nitreto de gálio (GaN) são conhecidos como semicondutores do tipo III-V, o telureto de cádmio (CdTe) como do tipo II-VI, e o disseleneto de cobre-índio como I-III-(VI)₂. Exemplos de semicondutores quaternários incluem o InGaAsP e o AlInGaN, frequentemente utilizados na fabricação de LEDs (Pinho, 2014).

A espessura é um fator determinante no projeto das células fotovoltaicas. Células com grande espessura tendem a perder eficiência graças à recombinação, que ocorre devido aos comprimentos de difusão dos elétrons fotogerados no material. Por outro lado, células muito finas tendem a perder eficiência devido ao coeficiente de absorção óptica do material. Encontrar um equilíbrio adequado entre esses dois fatores é crucial para maximizar a eficiência das células fotovoltaicas (Pinho, 2014).

3.4.2 Células Fotovoltaicas de Silício Monocristalino e Policristalino

3.4.2.1 Células de Silício Monocristalino

As células de silício monocristalino são fabricadas a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino usando fornos especiais. Essas barras são cortadas em pastilhas finas com espessura de (0,4 a 0,5 mm^2) (Nascimento, 2004).

Figura 10 – Célula de Silício Monocristalino



Fonte: Mariano e Urbanetz (2022)

A coloração dessa célula, devido ao seu alto grau de pureza, adquire um tom azul escuro, como mostrado na Figura 10 e apresenta um aspecto mais uniforme, sendo representada

pelo símbolo m-Si. Segundo Carvalho e Lima (2023), a eficiência de conversão de energia fotovoltaica dessas células é entre 15% a 18%, sendo o tipo de célula mais eficiente, porém mais caras. Na Figura 11 é possível ver uma amostra de uma célula de silício monocristalino com mais clareza.

Figura 11 – Célula de Silício Monocristalino (Amostra)



Fonte: Nascimento (2004)

3.4.2.2 Células de Silício Policristalino

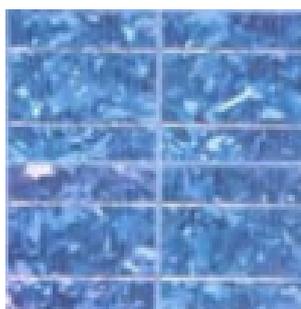
O processo de produção do silício policristalino (p-Si) é um pouco diferente do silício monocristalino. Na produção do p-Si, a solidificação do material é feita em forma de um bloco composto por pequenos cristais com dimensões da ordem de centímetros, geralmente. As lâminas utilizadas na fabricação das células fotovoltaicas são produzidas a partir do corte de um bloco de p-Si (Pinho, 2014). Segundo Carvalho e Lima (2023), as células de silício policristalino possuem uma taxa de conversão de luz solar ligeiramente menor se comparadas com as células de silício monocristalino. Além da diferença da taxa de conversão, as células de p-Si são mais baratas, pois não requerem um grau de pureza tão alto quanto as células de silício monocristalino. Na Figura 13 é possível ver uma amostra de uma célula de silício Policristalino com mais clareza e na Figura 12 o painel completo.

Figura 12 – Célula de Silício Policristalino



Fonte: Mariano e Urbanetz (2022)

Figura 13 – Célula de Silício Policristalino (Amostra)



Fonte: Nascimento (2004)

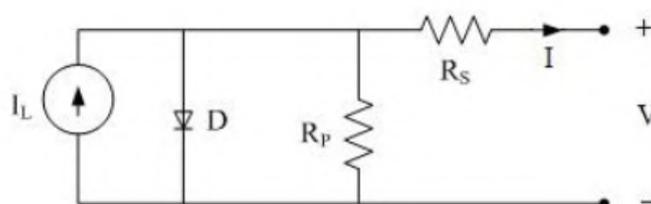
3.4.3 Parâmetros Externos que Afetam as Características Elétricas

Dois principais fatores afetam o desempenho das células fotovoltaicas: a temperatura e a irradiância incidente, juntamente com sua distribuição espectral, mesmo em condições de irradiação solar padrão de 1 sol ($1.000W/m^2$). Uma maneira de aumentar a eficiência das células fotovoltaicas é utilizando dispositivos ópticos, como lentes ou espelhos, para realizar a concentração da luz incidente, aumentando assim a irradiância. No entanto, essa eficiência pode ser ainda mais aumentada se a temperatura for controlada, impedindo que ela diminua a eficiência adicional alcançada (Pinho, 2014).

Nos casos de alta e baixa irradiância, há perda de rendimento devido aos efeitos provenientes das variações nas resistências indicadas na Figura 14, este modelo representa as células fotovoltaicas, nas quais os componentes representam características específicas da célula: a resistência em série representa a junção metal-semicondutor, as malhas metálicas, as regiões

dopadas, etc. As resistências em paralelo representam os pontos de curto-circuito na junção pn. Por fim, o diodo representa a participação da junção pn no escuro (Pinho, 2014).

Figura 14 – Modelo Célula fotovoltaica



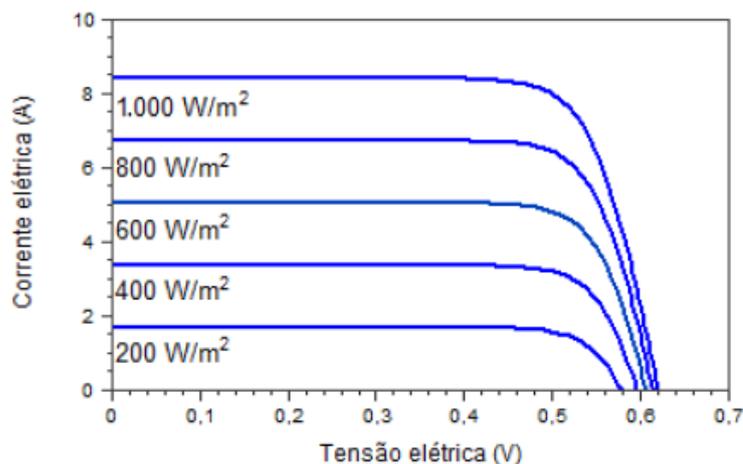
Fonte: Pinho (2014)

Segundo Pinho (2014), eficiência do módulo não é um indicador isolado de qualidade, devendo-se considerar outros fatores como custo, durabilidade e reputação do fabricante ao escolher um módulo fotovoltaico. A área disponível para instalação pode ser um fator determinante apenas se for limitada.

3.4.3.1 Irradiância Solar

Altos níveis de irradiância podem reduzir a eficiência devido à resistência série (R_s), enquanto baixos níveis podem afetar a potência devido à resistência paralela (R_p), conforme o modelo representado na Figura 14. Caso a temperatura seja mantida constante, a corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica aumenta linearmente com o aumento da irradiância, enquanto a tensão aumenta de forma logarítmica, conforme demonstrado na Figura 15 (Pinho, 2014).

Figura 15 – Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25^{circ}C .

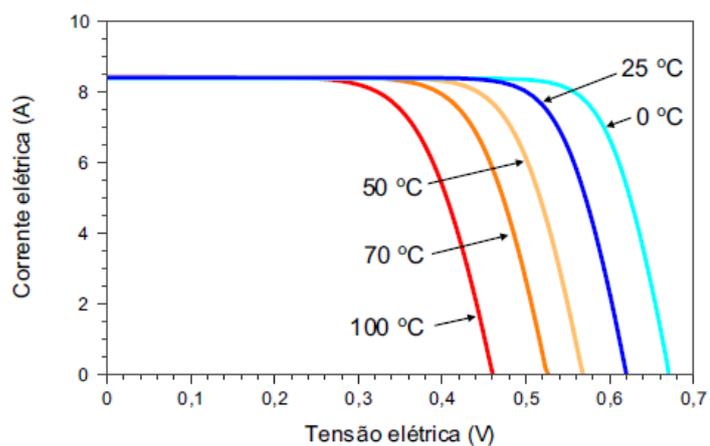


Fonte: Pinho (2014)

3.4.3.2 Temperatura

A temperatura influencia significativamente o rendimento das células fotovoltaicas. Com o aumento da irradiância, a temperatura pode aumentar, causando uma perda considerável de tensão e um ganho ínfimo de corrente. A Figura 16 demonstra a influência da temperatura na corrente e na tensão da célula (Pinho, 2014).

Figura 16 – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de $1.000W/m^2$, espectro AM1,5)



Fonte: Pinho (2014)

4 RASTREADORES SOLARES

Os rastreadores solares são uma forma de aumentar a eficiência da produção de energia fotovoltaica. Esses rastreadores podem utilizar várias formas de movimentação e captação de dados, mas todos têm um único propósito: manter as placas fotovoltaicas voltadas diretamente para o sol, garantindo que os raios solares incidam o mais perpendicularmente possível na placa (Barbosa, 2016).

4.1 Classificação Dos Rastreadores Solares

Os sistemas de rastreamento solar podem ser classificados por seus graus de rotação em duas categorias principais (Gour; Pandey; Verma, 2020):

- Rastreador solar de eixo único: um rastreador solar de eixo único acompanha o movimento do sol em um único eixo, seja na horizontal ou na vertical, sendo o modelo horizontal ideal para regiões tropicais, onde o sol atinge seu ponto mais alto ao meio-dia, apesar dos dias mais curtos. Em por outro lado, o tipo vertical de rastreador solar é empregado em regiões com elevações onde o sol não precisa chegar alta, mas os dias de verão costumam ser longos (ver Figura 17).
- Rastreador solar de eixo duplo: um rastreador solar de eixo duplo, com dois graus de rotação, é capaz de rastrear o sol tanto horizontal quanto verticalmente, podendo ser utilizado em qualquer lugar do mundo e garantindo máxima eficiência na captação de energia solar. O desenho do sistema de rastreamento de eixo duplo é complexo em comparação com rastreamento e operação de eixo único ou mesmo fixo. No entanto, para a produção de energia solar em grande escala, o rastreamento de eixo duplo é mais factível (ver Figura 17).

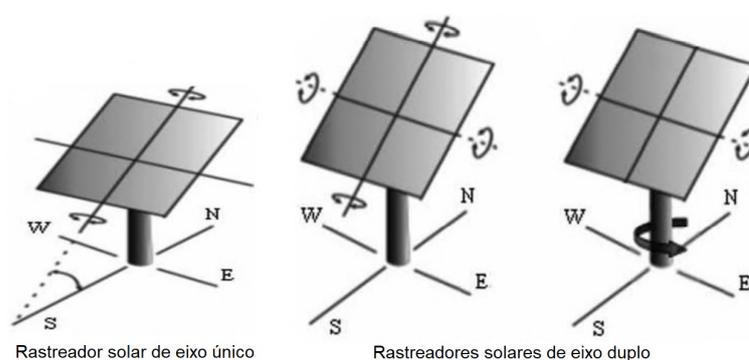
Mais ainda, os métodos de rastreamento solar podem ser classificados como (Gour; Pandey; Verma, 2020):

- Rastreamento passivo: este método não usa sensores, o movimento é conseguido em resposta ao desequilíbrio de pressão entre dois pontos nas extremidades do rastreador. Este desequilíbrio de pressão é causado pelo calor do sol que cria pressão de gás a partir de pressão comprimida move a estrutura.
- Rastreamento ativo: este método sim usa sensores e a posição do sol é continuamente seguida durante o dia de forma que o painel fotovoltaico sempre enfrente os raios do sol de forma perpendicular. Este tipo de rastreamento possui uma maior precisão, mas o

principal problema ocorre principalmente durante os dias nublados, quando os sensores não conseguem discriminar as medições e podem dar uma medição falsa ou mesmo se perderem.

- Rastreamento cronológico: o sistema de rastreamento é baseado na temporização, onde o painel é movido a uma taxa fixa ao longo do dia, uma vez que o sol se move no céu a uma taxa fixa de cerca de $15^\circ/h$. Neste tipo de sistema, o armazenamento/transmissão de dados e cálculos consome energia e a movimentação pode ser desnecessária quando a luz do sol é muito baixa.

Figura 17 – Classificação dos rastreadores solares.



Fonte: Gour, Pandey e Verma (2020)

O método mais adequado dependerá do local de instalação e da finalidade de geração, sendo que, atualmente, existem rastreadores que combinam os três métodos para maximizar a eficiência.

4.2 Fatores Limitantes em Sistemas de Rastreamento Solar

Segundo Gour, Pandey e Verma (2020), existem alguns problemas associados aos sistemas de rastreamento, mas nem todos são exclusivos dos sistemas móveis, pois algumas das principais dificuldades estão relacionadas a todos os tipos de sistemas, sejam eles móveis ou não. Geralmente é comprovado o aumento da eficiência energética por trás do rastreamento, mas problemas como a perda de rastreabilidade devido ao céu nublado e falhas mecânicas e/ou elétricas nos atuadores e sensores são fatores problemáticos dos sistemas móveis.

Tirando os problemas mais específicos, algumas dificuldades podem ser citadas (Gour; Pandey; Verma, 2020):

- Condições ambientais e climáticas da área
- Materiais e tecnologia

- Equipamentos auxiliares do sistema
- Conexão da rede ao gerador fotovoltaico
- Custos e disponibilidade do sistema de rastreamento solar

5 CONTROLE

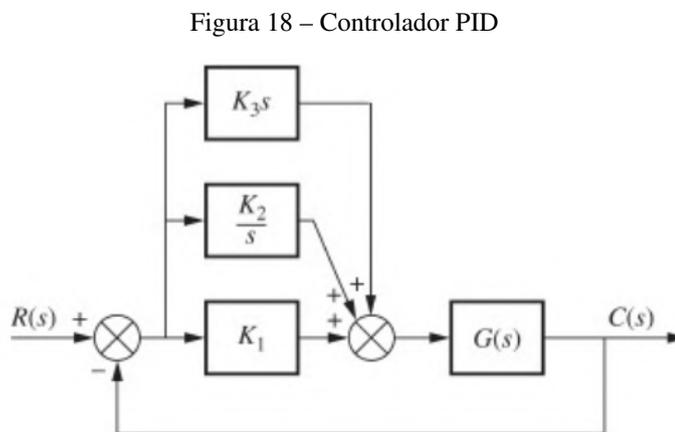
Atualmente, na era da automação, os controles fazem parte do cotidiano de praticamente todo ser humano. Entretanto, a história por trás dos sistemas de controle começou há muito tempo, pois grande parte da teoria geral que ainda é aplicada nos dias de hoje, com o intuito de aprimorar o desempenho dos sistemas de controle automático, é proveniente dos estudos e pesquisas do russo Nicholas Minorsky. Nascido em 1885, Nicholas formulou e implementou teorias sobre sistemas de controle aplicadas à condução automática de navios, desenvolvendo o que atualmente conhecemos como controladores proporcional, integral e derivativo (PID), ou controladores de três modos. (Nise, 2013).

Rastreadores solares também podem ser incluídos na ampla lista de aplicações relacionadas a sistemas de controle. Nesta seção, serão apresentados os princípios básicos das técnicas de controle, uma vez que será implementado um sistema de controle para o rastreador, permitindo a realização de comparações com outros tipos de rastreadores.

5.1 Controle PID

O controle PID é uma técnica de controle amplamente empregada em sistemas de controle de processos industriais, automação e robótica. Seu objetivo é regular sistemas dinâmicos, ajustando a saída de controle com base no erro entre o valor de referência aplicado e a saída atual.

O controlador PID funciona a partir de três principais parâmetros: ganho proporcional, ganho integral e ganho derivativo. A partir do ajuste desses três parâmetros é possível determinar a melhor forma de funcionamento do sistema que utiliza o controlador PID (Ogata, 2010). Na Figura 18 mostra-se o diagrama de blocos do controlador PID.



Fonte: Nise (2013)

Segundo Ogata (2010), o controlador PID é composto por 3 parâmetros:

1. Proporcional (p): O termo proporcional contribui diretamente para a redução do erro do sistema e é diretamente proporcional ao erro atual, ou seja, à diferença entre o valor de referência e o valor da saída, como mostrado na equação (5.3).

$$u_p(t) = K_p e(t) \quad (5.1)$$

Na Figura 18 o ganho proporcional é representado como K_1 .

2. Integral (i): O termo integral tem como objetivo eliminar o erro acumulado ao longo do tempo. Isso é possível porque o termo integral ajusta a saída com base na integral do erro, eliminando, assim, o erro em regime estacionário (ver equação (5.2)).

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (5.2)$$

Na Figura 18 o ganho integral é representado como K_2 .

3. Derivativo (d): O termo derivativo é proporcional à taxa de variação do erro, como mostrado na equação (5.3). Esse termo auxilia na prevenção de oscilações excessivas e melhora a resposta transitória do sistema. De certa forma, o termo derivativo antecipa tendências futuras do erro em comparação com seu comportamento atual.

$$u_d(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.3)$$

Na Figura 18 o ganho derivativo é representado como K_3 .

Assim, como o PID é a soma desses parâmetros, o resultado pode ser visto na equação (5.4)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.4)$$

Ou, reescrevendo em termos do ganho proporcional:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.5)$$

Assim, as equações mostradas na Figura 18 são obtidas através da aplicação da transformada de Laplace à equação (5.5):

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (5.6)$$

Como mostrado em Vásconez *et al.* (2023), o controlador PID que deve ser utilizado no rastreador para controlar os motores será o PID discreto. A expressão da lei de controle PID discreto, derivada da equação 5.5, é:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{K_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \quad (5.7)$$

- $u[k]$ é a saída do controlador no instante de tempo k .
- $e[k]$ é o erro no instante de tempo k .
- K_p é o ganho proporcional.
- K_i é o ganho integral.
- K_d é o ganho derivativo.

Nesta forma discreta, k representa os instantes de tempo discretos.

6 SISTEMA SUPERVISÓRIO

O sistema supervisório é um software que apresenta numa tela geralmente gráfica, a operação de um processo e suas variáveis (corrente, tensão, vazão, pressão, temperatura) a depender do processo, que estão presentes em um sistema automatizado de produção. Essa interface gráfica também é conhecida como interface homem-máquina (IHM). Ela é criada com uma aparência semelhante à planta da fábrica, introduzindo componentes gráficos que a torne o mais próximo possível do mundo real.

6.1 Sistemas SCADA

O Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*) corresponde à integração entre sistemas de controle e sistemas supervisórios possibilitando a automatização dessas tarefas. O SCADA tem como objetivos importantes a obtenção e registro de dados, o monitoramento do sistema e o desenvolvimento de uma interface que proporcione o operador fiscalizar e alterar variáveis se preciso, a chamada Interface Homem-Máquina (IHM).

Segundo Bezerra (2020), Um sistema SCADA recebe dados do processo automatizado de uma planta industrial por meio de sensores conectados a um controlador lógico programável (CLP) ou microcontrolador. Ele traduz essas informações em uma forma gráfica exibida em uma tela de computador ou painel em um centro de controle operacional (CCO). Isso permite que os usuários do sistema inspecionem, atuem e monitorem a produção industrial de maneira compreensível e eficiente.

A seguir, são relatadas as funções de um sistema SCADA Bezerra (2020):

- Supervisão: Envolve o acompanhamento das variáveis do processos como elaboração de relatórios e gráficos de tendências.
- Operação: Inclui ações de ligação e desligamento de máquinas através da tela ou painel de operação.
- Controle: Abrange o preparo do sistema produtivo de maneira automática sem interferência de operadores.

Em geral, as principais aplicações são:

- Engine de Alarmes e Eventos parametrizáveis;
- Alarmes Sonoros;

- Sistema de Permissões por Usuários;
- Relatórios de Variáveis, Alarmes e Eventos;
- *Engine de scripts* para controle, automação e *batches*, entre outros;
- Acesso em *Browser* (Desktop, mobile);
- API com exemplos em Java, *Visual Basic*, PHP e Python, entre outros;
- Aquisição de dados em mais de 20 protocolos como: Modbus TCP/IP e Serial, OPC, DNP3, IEC, Serial ASCII, HTTP;
- Variáveis calculadas (com funções matemáticas, estatísticas, e lógica em geral)
- Visualização de dados em tempo real;
- Registro contínuo das variáveis em Banco de Dados (*Historian/ Datalogger*);
- Construção de telas gráficas (HMI ou Sinópticos).

Esse sistema é empregado também em grandes finalidades, como sistemas de automação industrial, de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Por causa da sua capacidade de comunicação em vários protocolos, permite a integração com grande parcela dos controladores acessíveis no mercado. A rede ou *network* é uma das partes da arquitetura SCADA. Ela é empregue para estipular a conexão entre o sistema de controle distribuído e controle supervísório simultaneamente com outros subsistemas relativos ao sistema SCADA, por meio de um grupo de regras chamado protocolo. Um dos protocolos precedentes de comunicação é o *Modbus*, desenvolvido pela *Modicon* em 1979, se tornando parâmetro na indústria e mantendo-se até os dias de hoje, em aplicações do SCADA, por não demandar tributos de licenciamento o tornando uma possibilidade acirrada.

6.2 Protocolo de comunicação Modbus

Para que aconteça uma comunicação entre dois ou mais computadores, é preciso determinar algumas regras que especificam como e quando os dados devem ser enviados e para onde os dados serão enviados. Essas regras particularizam um protocolo de comunicação de dados. O Modbus pode ser determinado como um protocolo de comunicação industrial da camada de aplicação, a sétima camada do modelo OSI, e é definido por garantir a comunicação cliente/servidor entre dois dispositivos conectados por um meio físico (Zurawski, 2017).

O protocolo contém quatro tipos de registradores de dados (Zurawski, 2017):

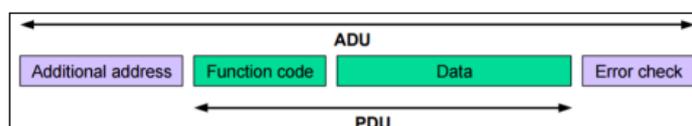
- *Coil Status* - Conhecido como *Discret Output*, é uma variável binária que é escrita pelo usuário ou operador do sistema.

- *Input Status* - Variável binária que só pode ser lida, sua função é ser monitorada.
- *Holding Register* - Variável de 16 bits que pode ser escrita.
- *Input Register* - Variável de 16 bits que só pode ser lida.

O Modbus transformou-se no padrão na automação industrial por ter seu uso muito propagado. Agora é o protocolo com maior assistência entre os dispositivos de automação industrial (Zurawski, 2017).

Na Figura 19 pode-se observar a representação da estrutura do protocolo MODBUS:

Figura 19 – Estrutura do protocolo MODBUS



Fonte: Modbus... (2012)

Segundo Modbus... (2012), caso ocorra algum tipo de falha durante a transação, o bloco *Function Code* deixa de levar o código da função para levar o código do erro referente à função original e o respectivo bloco de dados leva a descrição do erro. Além disso, os códigos das funções são previamente definidos pelo protocolo e seu tamanho é limitado em um byte. O bloco de dados, por sua vez não tem limite de tamanho e pode variar conforme a necessidade da aplicação. Sua única restrição é que somente é enviado um byte de dados por transação

Este protocolo emprega os padrões RS-232, RS-485 ou Ethernet como meios físicos de comunicação, liberando um mestre e até 247 escravos. Os padrões RS falados usam a transmissão serial, em que os bits exclusivos de informação são externados em longas séries, sendo usado em conexões de impressoras por exemplo e até mesmo num Arduino UNO com um computador. O protocolo Modbus serial mostra duas variações em função do número de bytes transmitidos, podendo ser Modbus RTU ou Modbus ASCII, sendo o primeiro o mais utilizado (Raysaro, 2012).

6.3 SCADABR

O ScadaBR é um software livre, gratuito e de código-fonte aberto, concebido para atender às necessidades de vários nichos, como profissionais de automação, universidades, escolas técnicas e empresas de todos os portes. Ele oferece uma solução acessível para o desenvolvimento de sistemas supervisórios, seja para controlar algo à distância ou simplesmente monitorar dados adquiridos pelo sistema (Scadabr... , 2024).

O projeto do ScadaBR teve início em 2006, criado pela MCA Sistemas (atualmente Sensorweb), que convidou outras empresas da região de Florianópolis, como a Unis Sistemas e a Conetec, juntamente com a Fundação CERTI e a Universidade Federal de Santa Catarina, para desenvolver um sistema SCADA completo, gratuito, em Português e de código aberto, direcionado especialmente a micro e pequenas empresas (Scadabr... , 2024).

Com apoio da FINEP, SEBRAE e CNPq, conseguiram desenvolver, através do software Mango (na época desenvolvido pela *Serotonin Software* no Canadá), uma solução ideal para comunicação com dispositivos, registro de dados (historiador ou *datalogger*), construção de IHMs (Interfaces Homem-Máquina) e automação de processos em geral (Scadabr... , 2024).

Abaixo são listadas algumas funcionalidades deste (Scadabr... , 2024):

- Relatórios de Variáveis, Alarmes e Eventos;
- Ambiente de Desenvolvimento para Aplicações SCADA;
- Acesso em *Browser (Desktop, mobile)*;
- Aquisição de dados em mais de 20 protocolos como: Modbus TCP/IP e Serial, OPC, DNP3, IEC, Serial ASCII, HTTP;
- Registro contínuo das variáveis em Banco de Dados (Historian/ Datalogger);
- Construção de telas gráficas (HMI ou Sinópticos).

7 MATERIAIS E MÉTODOS

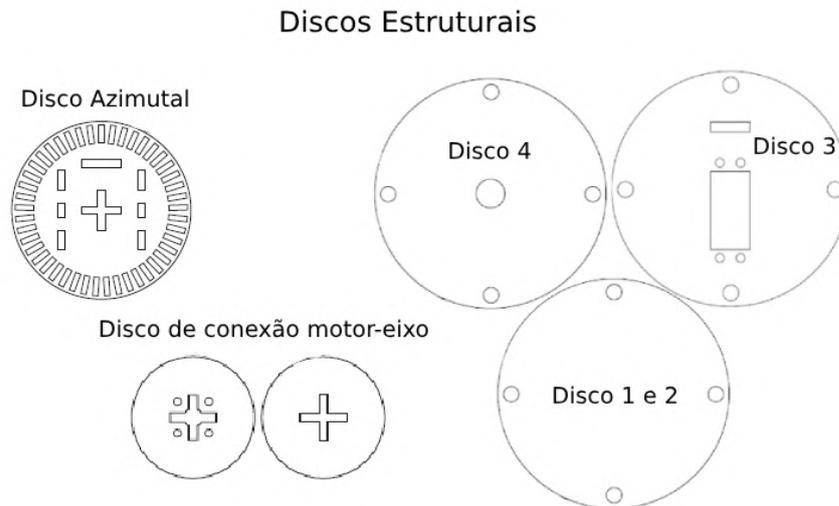
7.1 Materiais

Nesta seção do trabalho, serão demonstrados os materiais utilizados na construção do protótipo do rastreador solar e da base de testes que foi utilizada para simular a trajetória do sol. Mesmo com várias estruturas já desenvolvidas, o foco na estruturação do projeto foi a utilização de materiais reciclados.

7.1.1 Estrutura

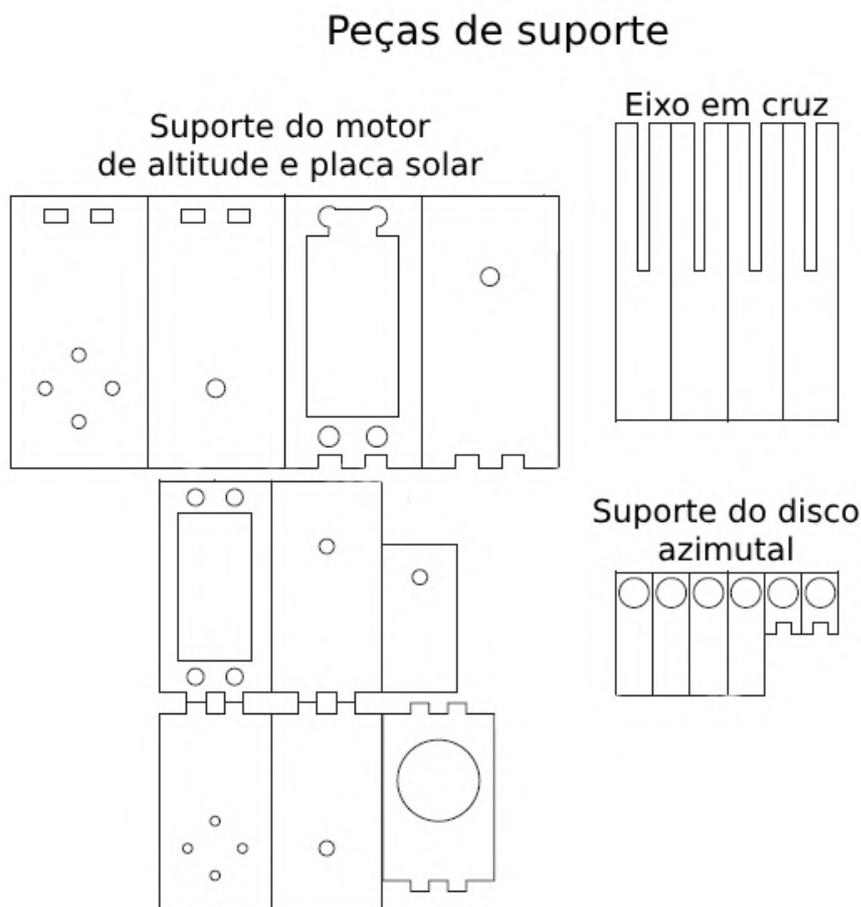
A estrutura proposta é compacta e permite que o dispositivo seja apoiado sobre uma superfície na horizontal ou fixado na vertical. Consiste basicamente em uma base fixa feita de MDF que serve para sustentar um suporte móvel de celular, usado como base para o módulo fotovoltaico. Para a movimentação no ângulo de inclinação, foi utilizado um servo motor fixado no eixo de rotação azimuthal. Dessa forma, o rastreador pode se movimentar simultaneamente em ambos os ângulos. Grande parte da estrutura do rastreador foi feita utilizando MDF, sendo cortada em impressora a laser. As Figuras 20 e 21 apresentam as peças para impressão.

Figura 20 – Peças da estrutura para impressão - Parte 2.



Fonte: O autor (2024)

Figura 21 – Peças da estrutura para impressão - Parte 2.

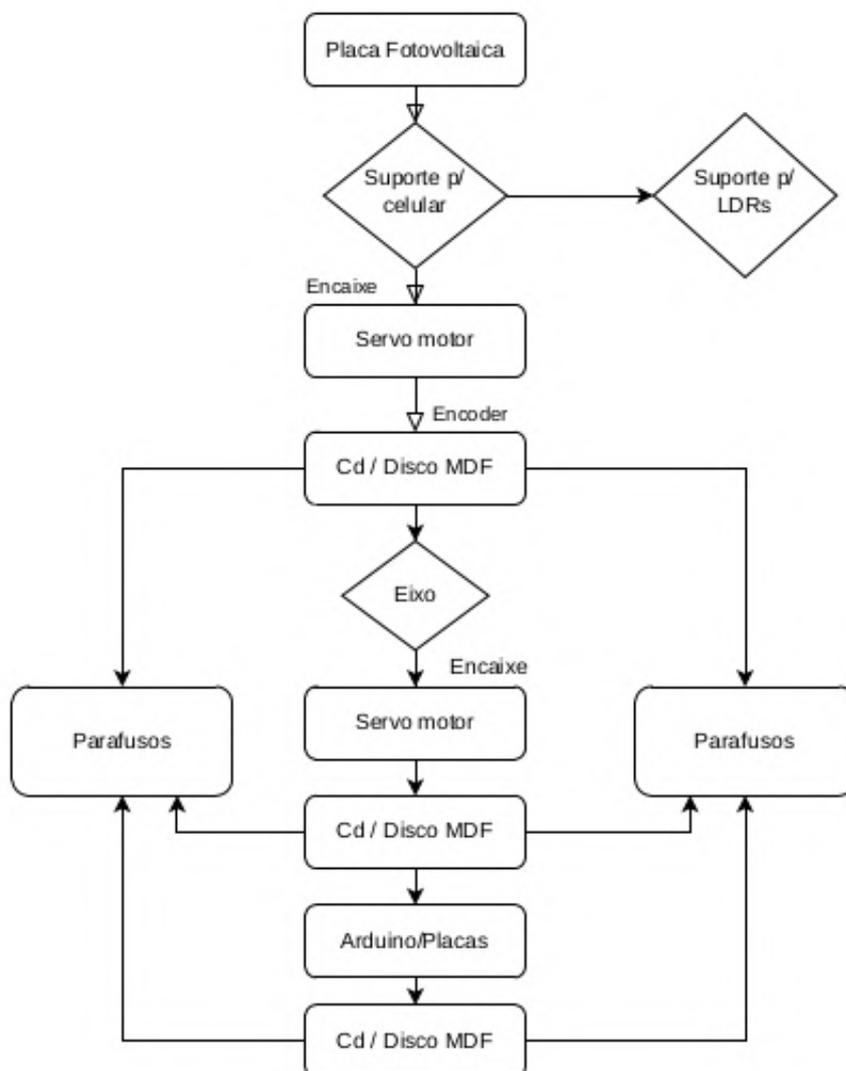


Fonte: O autor (2024)

Para acomodar os quatro LDRs, foi criada uma divisória entre os sensores, com a finalidade de garantir que cada LDR receba sua parcela específica de luz solar conforme o sol se move ao longo do dia, como mostrado na Figura 23. Isso gera diferenças nas leituras entre os LDRs posicionados nos quatro cantos da placa solar, permitindo a implementação da lógica que controla o posicionamento da placa. O objetivo é manter as leituras dos LDRs semelhantes, indicando que a placa solar está posicionada perpendicularmente em relação à fonte de luz.

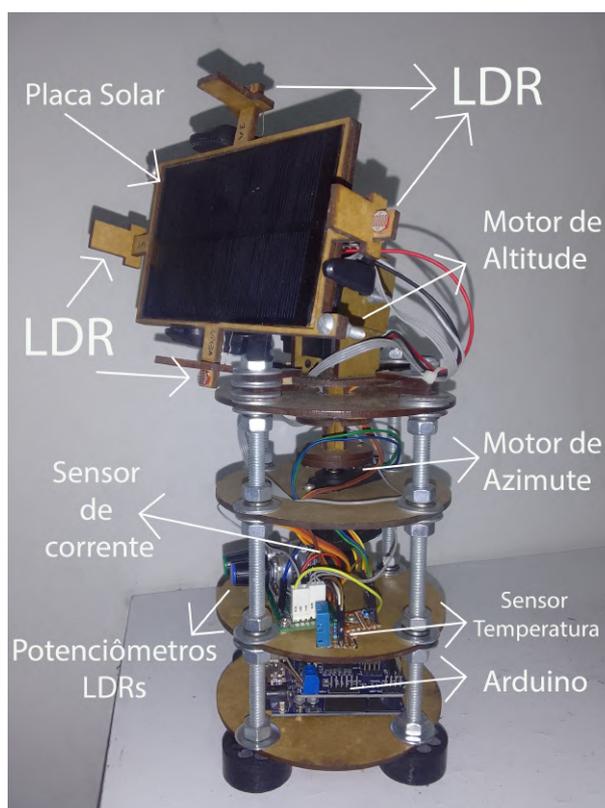
A Figura 22 mostra um diagrama de blocos da estrutura de projeto, contendo as etapas para a montagem do projeto.

Figura 22 – Diagrama de blocos da estrutura.



Fonte: O autor (2024)

Figura 23 – Protótipo Rastreador Solar



Fonte: O autor (2024)

Na Figura 23, é apresentada a estrutura completa do rastreador, composta por discos em diferentes níveis. O primeiro disco, localizado na base, abriga o Arduino e o módulo de sensores conectado a ele. No segundo disco estão posicionados os sensores (Temperatura, corrente e tensão) e as placas de circuito destinadas a seus ajustes. O terceiro disco acomoda o motor de azimute, responsável por girar a parte superior do protótipo, enquanto o quarto disco suporta o sistema de posicionamento da placa solar, que é composta pelo motor de altitude, pela placa solar, pelos sensores LDR e por toda a estrutura que os sustenta. O protótipo possui as seguintes dimensões:

- Altura: 30cm min e 32cm máx
- Diâmetro: 15cm
- Espaçamento entre discos: 6cm
- Altura do sistema de posicionamento: 10cm min e 12cm máx

7.1.2 Painel Solar

Na Figura 24, é apresentada a placa solar de silício policristalino utilizada. Este modelo foi escolhido para o protótipo devido ao seu tamanho compacto, facilidade de uso e simplicidade

de instalação.

Figura 24 – Placa solar Fotovoltaica



Fonte: O autor (2024)

Algumas características da placa podem ser vista abaixo:

- Tensão de trabalho: 5 V
- Potência de saída: 1 W
- Corrente de trabalho: 0-200 mA
- Tamanho da placa: 110x69x2,5 mm

7.1.3 Microcontrolador - Arduino

O Arduino mostrado na Figura 25, desde a sua criação, tem sido uma forma mais acessível de prototipagem para estudantes e até mesmo para aplicações profissionais. Outra característica interessante dessas placas é que são placas de microcontroladores de código aberto.

Figura 25 – Arduino Uno



Fonte: Arduino (2022)

O microcontrolador ao qual o Arduino é baseado é o ATmega328P da Microchip Technology (anteriormente Atmel). Esse microcontrolador possui um conjunto de recursos suficientemente poderoso para uma ampla gama de aplicações. Muitos desenvolvedores utilizam essa placa porque sua CPU de 8 bits e clock de até 16 MHz oferecem uma boa combinação de desempenho e eficiência energética para muitos projetos (Arduino, 2022).

A grande razão que rege a popularidade do Arduino é a acessibilidade e quantidade de informação disponível por meio da grande comunidade de desenvolvedores. Por ser de código aberto, há uma gama de bibliotecas e exemplos disponíveis online. A versatilidade e a facilidade em prototipação foram os motivos da escolha do Arduino como o sistema microprocessado do projeto.

O Arduino é responsável por coletar os dados dos sensores LDR, de temperatura e de corrente, processando essas informações para determinar o posicionamento adequado da placa solar. Ele envia os comandos necessários aos motores, que ajustam a posição da placa para mantê-la sempre perpendicular à fonte de luz. Além disso, o Arduino transmite todos os dados dos sensores e atuadores para o SCADABR e também recebe e processa os comandos do supervisor.

7.1.4 Servomotores

O servomotor escolhido para o protótipo foi o Servo TowerPro MG995 Metálico, conforme mostrado na Figura 26. Este servomotor possui engrenagens metálicas e um bom torque que viabilizaram a construção desse protótipo de forma mais simples e eficaz, pois permitem o controle de posição referente aos ângulos da rotação e também da velocidade de rotação.

Figura 26 – Servomotor TowerPro MG995



Fonte: Servo... (2022)

Abaixo seguem algumas especificações (Servo..., 2022):

- Tipo de Engrenagem: Metálica;
- Tensão de operação: entre 4,8 V e 7,2 V;
- Velocidade de operação em 4,8 V e sem carga: 0,17seg/60°;
- Velocidade de operação em 6,0 V e sem carga: 0,13seg/60°;
- Torque em 4,8 V: 9,4 kg.cm;
- Torque em 6,0 V: 11,0 kg.cm;
- Faixa de Rotação: 120°;
- Modulação: Analógica;
- Tamanho cabo: 300 mm;
- Dimensões: 40 mm x 19 mm x 43 mm;
- Peso: 69 g.

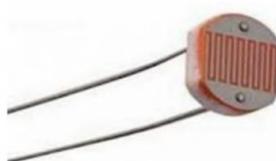
7.1.5 Sensores

Os sensores são componentes essenciais para o projeto, pois são indispensáveis para realizar as medições e coletar os dados necessários ao controle do protótipo de rastreamento.

7.1.5.1 Sensor LDR

O LDR (Light Dependent Resistor) ou resistor dependente de luz, é um dispositivo que possui resistência elétrica variável. Essa variação ocorre de acordo com a luz que incide em sua superfície. Também conhecido como fotoresistor ou célula fotocondutiva, o LDR é um componente semiconductor que possui dois terminais, como mostrado na Figura 27. Ele exibe alta resistência na ausência de luz e baixa resistência quando iluminado. Sua operação baseia-se na movimentação de elétrons da camada de valência para a camada de condução quando exposto à luz, o que aumenta o número de elétrons e reduz a resistência elétrica proporcionalmente à intensidade luminosa (Gonçalves, 2019).

Figura 27 – Sensor LDR



Fonte: Gonçalves (2019)

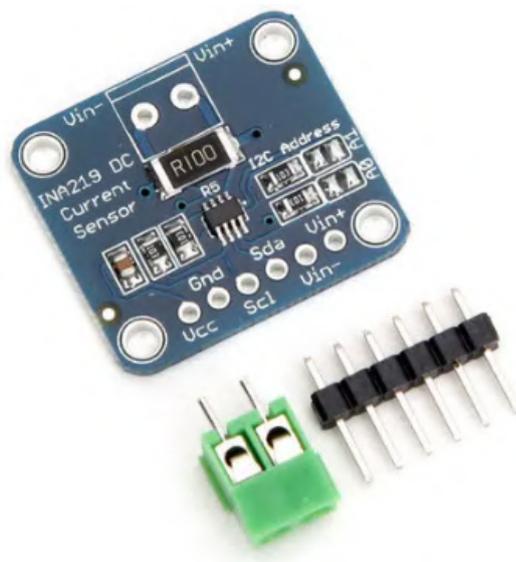
Especificações:

- Modelo: GL5528
- Diâmetro: 5 mm
- Tensão máxima: 150 VDC
- Potência máxima: 100 mW
- Temperatura de operação: -30°C a 70°C
- Espectro: 540 nm
- Comprimento com terminais: 32 mm
- Resistência no escuro: 1 M (Lux 0)
- Resistência na luz: 10-20 K (Lux 10)

7.1.5.2 Sensor de Corrente - INA219

O INA219 representado na Figura 28 é o componente responsável pela aquisição de dados de corrente e tensão, fazendo a medição da geração de energia solar da placa, pois ele foi projetado para monitorar grandezas elétricas DC. Ele é capaz de monitorar linhas de alimentação de 0 a 26 VDC e a corrente, com o limite máximo dependente do resistor shunt utilizado. O sensor utiliza uma interface i2c para comunicação e possui um conversor ADC interno de 12 bits. O método de medição de corrente empregado é o high-side, pois o resistor shunt é posicionado entre a fonte de alimentação e a carga. Esse método possibilita que o dispositivo meça tanto a corrente circulante quanto a tensão na carga (Amaral, 2017).

Figura 28 – Sensor de Corrente DC INA219



Fonte: Amaral (2017)

Especificações do sensor de corrente DC INA219:

- Controlador INA219 (datasheet)
- Tensão de alimentação: 3 à 5.5VDC
- Faixa de tensão no barramento de teste: 0 à 26VDC
- Corrente máxima de operação: $\pm 3.2A$ com resolução de 0.8mA
- Medições de corrente e potência
- Interface I2C
- Seleção de endereço I2C
- Temperatura de operação: 40°C a 125°C

7.1.5.3 Sensor de Temperatura - DHT11

Os sensores DHT11 e DHT22 são amplamente utilizados para medir temperatura, com uma faixa de operação de 0 a 50°C e uma precisão de 2 graus, além de também monitorarem a umidade relativa do ar. Eles possuem a vantagem de necessitar apenas de um fio para comunicação e ainda por cima, são compatíveis com operações em 3,3V e 5V, simplificando sua conexão a microcontroladores. No entanto, a dificuldade reside no software, pois o protocolo de comunicação desses sensores baseia-se em tempos curtos, da ordem de microssegundos. A solução convencional para lidar com isso é manter o processador do microcontrolador preso em

um loop, com interrupções desativadas, enquanto os tempos são gerados e medidos. Contudo, essa abordagem não é viável em linguagens interpretadas, como o MicroPython, devido à sua natureza de execução assíncrona. Isso pode requerer estratégias alternativas para lidar com a comunicação com esses sensores nesse tipo de ambiente de programação (Quadros, 2021). O sensor utilizado para o protótipo foi o DHT11 demonstrado na Figura 29.

Figura 29 – Sensor de Temperatura e Umidade - DHT11



Fonte: Quadros (2021)

A leitura da temperatura e da umidade é fundamental para monitorar as condições do ambiente, pois essas variáveis podem causar variações nos dados captados pelos sensores.

7.2 Investimento no projeto

A lista dos principais materiais se mostra na Tabela 1 para ter uma estimativa do custo do protótipo, enfatizando o baixo custo, considerando que o resto dos materiais foram reciclados, tais como:

- Fios e Conectores;
- Suporte de Celular;
- Resistores;
- Porcas e arruelas;
- Todos os materiais da base de testes

7.3 Métodos

7.3.1 Calibração dos Sensores LDR

Os sensores LDR são os principais componentes utilizados no protótipo. Antes da sua utilização deve ser realizada a calibração dos mesmos utilizando um luxímetro, equipamento responsável por realizar medições da luminosidade. Lux (símbolo lx) é a unidade usada para a

Tabela 1 – Custo dos principais componentes.

Componentes	Quantidade	Preço	Total (R\$)
Estrutura (Corte, fusos e porcas)	1	90,00	90,00
Arduino UNO R3 + cabo USB	1	60,00	60,00
Sensor Shield V5.0	1	11,53	11,53
Servomotores TowerPro MG995 Metálico	2	50,00	100,00
LDRs	4	1,96	7,84
Potenciômetros	4	2,50	10,00
DHT11	1	10,00	10,00
Célula Fotovoltaica	1	59,90	59,90
Sensor INA219	1	29,45	29,45
Total			378,72

Fonte: O autor (2024)

medição do fluxo luminoso por unidade de área, ou seja, da densidade de intensidade luminosa conhecida por iluminância. A mesma corresponde à incidência perpendicular de um fluxo luminoso de 1 lúmen sobre uma superfície com 1 metro quadrado, ou seja, $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$. A Figura 30 mostra o luxímetro utilizado.

Figura 30 – Luxímetro Digital Minipa MIm-1011



Fonte: O autor (2024)

O ambiente de calibração desenvolvido foi construído a partir de uma caixa, como mostrado na Figura 31. Como fonte luminosa, foi utilizada uma lâmpada inteligente da Elgin. Assim, foi possível controlar a intensidade da luz através do aplicativo, gerando a variação de luminosidade onde foi possível realizar a calibração a partir da medição de amostras baseadas na porcentagem de potência da lâmpada.

Figura 31 – Ambiente de calibração de baixo custo



Fonte: O autor (2024)

Antes da calibração dos LDRs, o luxímetro foi utilizado para calibrar a caixa, transformando porcentagens de potência em lux. Com o equipamento de medição fixado no centro da caixa, foi possível obter as amostras necessárias na mesma posição em que os LDRs a serem calibrados serão colocados. A Tabela 2 mostra os valores em lux das porcentagens utilizadas para a calibração dos sensores.

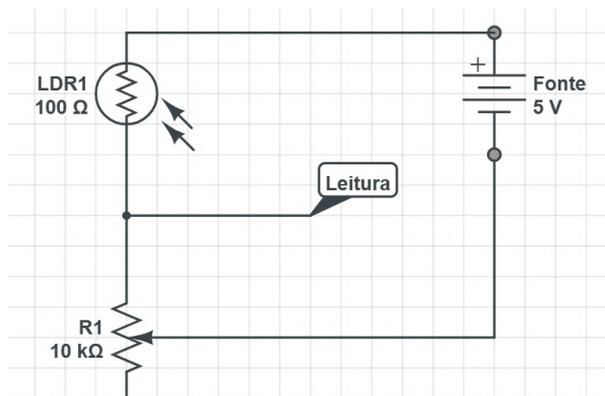
Tabela 2 – Leitura Luxímetro

Potência (%)	Amostra 1 (lux)	Amostra 2 (lux)	Amostra 3 (lux)	Média (lux)
1%	168	166	165	166,3
20%	479	466	470	471,6
40%	762	757	752	757
60%	1040	1028	1024	1030,6
80%	1284	1280	1270	1278
100%	1524	1513	1506	1514,3

Fonte: O autor (2024)

Após estabelecidas as medidas de luminosidade das amostras, foi realizada a calibração dos LDRs utilizando a mesma caixa da Figura 31. Para captar as leituras dos LDRs, foi construído o circuito da Figura 32, onde o potenciômetro serve para ajustar os sensores.

Figura 32 – Circuito utilizado para a calibração dos LDRs



Fonte: O autor (2024)

O resultado das leituras dos LDRs e as médias das leituras como resultado da calibração podem ser vistas na Figura 33.

Figura 33 – Resultado das leituras dos sensores pelo Arduino

```
Leitura 1:701
Leitura 2:698
Leitura 3:699
Leitura 4:700
Leitura 5:701
Média das leituras: 699.00
Leitura 1:812
Leitura 2:812
Leitura 3:812
Leitura 4:812
Leitura 5:812
Média das leituras: 812.00
Leitura 1:851
Leitura 2:851
Leitura 3:851
Leitura 4:851
Leitura 5:851
Média das leituras: 851.00
Leitura 1:872
Leitura 2:872
Leitura 3:871
Leitura 4:872
Leitura 5:872
Média das leituras: 871.00
```

Fonte: O autor (2024)

Tabela 3 – Leitura LDRs

Potência (lux)	LDR Amarelo	LDR Azul	LDR Verde	LDR Vermelho
166,3	702	697	707	699
471,6	815	811	821	814
757	853	851	857	853
1030,6	872	872	877	872
1278	885	885	887	885
1514,3	892	893	895	893

Fonte: O autor (2024)

A Tabela 3 mostra os valores referentes às leituras dos LDRs para cada amostra com base na potência da lâmpada, enquanto a Tabela 4 representa o resultado final da calibração dos sensores quanto aos potenciômetros.

Os valores presentes na Tabela 3 mostra como o ajuste com o potenciômetro pode diminuir o erro entre eles. O controle do rastreador é baseado na comparação entre os LDRs, então quanto menor o erro entre eles, mais facilmente o sistema consegue se estabilizar na posição correta.

Na Tabela 4 estão presentes os valores dos potenciômetros utilizados para compensar os LDRs. Portanto, caso seja necessário um reajuste ou troca de componente, é possível retornar à

Tabela 4 – Valores dos potenciômetros

Potenciômetro	Amostra 1 (kΩ)	Amostra 2 (kΩ)	Amostra 3 (kΩ)	Média (kΩ)
Verde	5,12	5,12	5,12	5,12
Azul	2,81	2,80	2,80	2,803
Amarelo	3,36	3,34	3,34	3,346
Vermelho	3,64	3,64	3,64	3,64

Fonte: O autor (2024)

configuração inicial sem realizar outra calibração, a menos que seja necessário trocar o próprio LDR.

7.3.2 Aquisição de Dados

Os dados recolhidos através dos sensores do sistema foram processados e mostrados graficamente pelo software supervisor ScadaBR. O Arduino trabalhou enviando dados dos sensores e atuadores conectado com o ScadaBR através da conexão serial via cabo USB.

7.3.2.1 *Data Source e Data Points*

As Fontes de Dados, tradução de "*Data Sources*", são essencialmente os receptores de dados do ScadaBR. Eles operam de acordo com as configurações do protocolo de comunicação, incluindo a taxa de transmissão de dados, que é conhecida como *baud rate* e representa a velocidade de comunicação em uma conexão serial (Manual... , 2010).

Configurar as Fontes de Dados é o primeiro passo necessário para elaborar um projeto dentro do ScadaBR. A Figura 34 apresenta a configuração do **data source**, destacando a importância de definir corretamente o **baud rate**, que deve coincidir com o do Arduino, além de atribuir um nome apropriado.

Figura 34 – Data Source configurado para o projeto do rastreador solar

Propriedades do modbus serial

Nome: RastreadorSolar

Export ID (XID): DS_456425

Período de atualização: 5 segundo(s)

Quantificação:

Timeout (ms): 500

Tentativas: 2

Apenas quantidades contínuas:

Criar pontos de monitor de escravo:

Máxima contagem de leitura de bits: 2000

Máxima contagem de leitura de registradores: 125

Máxima contagem de escrita de registradores: 120

Porta: ▾

Baud rate: 9600 ▾

Controle de fluxo de entrada: Nenhum ▾

Controle de fluxo de saída: Nenhum ▾

Data bits: 8 ▾

Stop bits: 1 ▾

Parity: Nenhuma ▾

Codificação: RTU ▾

Echo: Desligado ▾

Simultaneidade: Função ▾

Níveis de alarme de eventos

Exceção de data source: Urgente 📢

Exceção de leitura de data point: Urgente 📢

Exceção de escrita em data point: Urgente 📢

Fonte: O autor (2024)

Já os Data Points, ou Pontos de Dados, são onde os dados são armazenados, e no ScadaBR há a possibilidade de configurá-los de várias formas, podendo ter vários tipos na mesma aplicação. Uma funcionalidade do ScadaBR direcionada aos Data Points são os detectores de valor, que conseguem monitorar os dados armazenados de forma que é possível avaliar variações ou padrões nos mesmos (Manual. . . , 2010).

Na Figura 35 são exibidos os Data Points configurados para esse projeto.

Figura 35 – Data Points configurados para o projeto do rastreador solar

Nome	Tipo de dado	Status	Escravo	Faixa	Offset (baseado em 0)
ESTADO_ALT	Binário		1	Status do coil	8
ESTADO_AZI	Binário		1	Status do coil	7
POSI_ALT	Numérico		1	Registrador holding	6
POSI_AZI	Numérico		1	Registrador holding	5
POSI_MODE	Numérico		1	Registrador holding	14
STANDBY_MODE	Binário		1	Status do coil	13
VALOR_CORRENTE	Numérico		1	Registrador holding	1
VALOR_LDRA	Numérico		1	Registrador de entrada	9
VALOR_LDRB	Numérico		1	Registrador de entrada	10
VALOR_LDRC	Numérico		1	Registrador de entrada	11
VALOR_LDRD	Numérico		1	Registrador de entrada	12
VALOR_ONOFF	Binário		1	Status do coil	4
VALOR_POTENCIA	Numérico		1	Registrador holding	3
VALOR_TEMPERATURA	Numérico		1	Registrador de entrada	16
VALOR_TENSAO	Numérico		1	Registrador holding	2
VALOR_UMIDADE	Numérico		1	Registrador de entrada	15

Fonte: O autor (2024)

Conforme mencionado anteriormente, há várias possibilidades de configuração para os Data Points. Nas Figuras 36 e 37, é possível observar as diferenças entre um Data Point de entrada de dados e um que pode servir como entrada e saída de dados, respectivamente.

Figura 36 – Data Point do valor do sensor LDR A

Detalhes do data point

Nome: VALOR_LDRA

Export ID (XID): DP_035852

Id do escravo: 1

Faixa do registro: Registrador de entrada

Tipo de dados modbus: Inteiro de 2 bytes sem sinal

Offset (baseado em 0): 9

Bit: 0

Número de registradores: 0

Codificação de caracteres: ASCII

Configurável:

Multiplicador: 1

Aditivo: 0

Fonte: O autor (2024)

Figura 37 – Data Point de posicionamento do motor de altitude



Detalhes do data point	
Nome	POSI_ALT
Export ID (XID)	DP_113057
Id do escravo	1
Faixa do registro	Registrador holding
Tipo de dados modbus	Inteiro de 2 bytes sem sinal
Offset (baseado em 0)	6
Bit	0
Número de registradores	0
Codificação de caracteres	ASCII
Configurável	<input checked="" type="checkbox"/>
Multiplicador	1
Aditivo	0

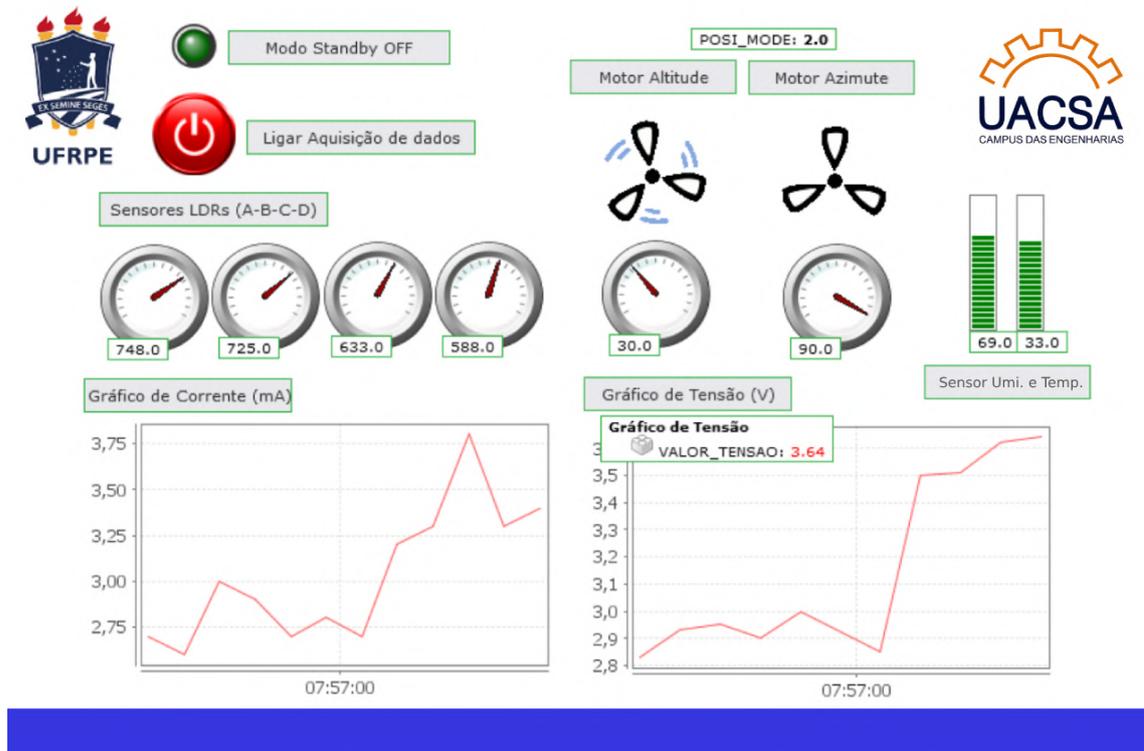
Fonte: O autor (2024)

7.3.2.2 Interface e Visualização de Dados

Segundo Manual... (2010), para o monitoramento dos Data Points, é possível utilizar dois métodos diferentes. Um dos métodos é através da WatchList, que é uma ferramenta que viabiliza o monitoramento dos dados a partir de listas dinâmicas compostas pelos valores dos Data Points atualizados, tempo de atualização desses Data Points e gráficos de informações históricas. O outro método é através da interface gráfica, onde o usuário pode organizar as informações que serão mostradas na tela através de representações gráficas que demonstrarão os valores desses pontos, seja graficamente ou numericamente. Em ambas as formas de visualização de dados, os valores são representados em tempo real sem necessidade de atualização do navegador.

Mesmo com as duas possibilidades de visualização, os dados do projeto foram monitorados por meio da interface gráfica representada na Figura 38. No entanto, é possível observar como ficou organizada a WatchList do projeto na Figura 39.

Figura 38 – Interface gráfica desenvolvida para o rastreador



Fonte: O autor (2024)

Figura 39 – WatchList dos Data Points do projeto

Points	Watch list	Value	Time	Actions
RastreadorSolar - ESTADO_ALT	RastreadorSolar - VALOR_CORRENTE	0.4	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - ESTADO_AZI	RastreadorSolar - VALOR_POTENCIA	0.0	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - POSI_ALT	RastreadorSolar - VALOR_TENSAO	0.52	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - POSI_AZI	RastreadorSolar - VALOR_ONOFF	1	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - POSI_MODE	RastreadorSolar - VALOR_LDRA	409.0	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - STANDBY_MODE	RastreadorSolar - VALOR_LDRB	331.0	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - VALOR_CORRENTE	RastreadorSolar - VALOR_LDRC	291.0	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - VALOR_LDRA	RastreadorSolar - VALOR_LDRD	602.0	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - VALOR_LDRB	RastreadorSolar - POSI_ALT	83.0	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - VALOR_LDRC	RastreadorSolar - POSI_AZI	0.0	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - VALOR_LDRD	RastreadorSolar - ESTADO_AZI	0	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - VALOR_ONOFF	RastreadorSolar - ESTADO_ALT	1	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - VALOR_ONOFF	RastreadorSolar - STANDBY_MODE	0	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - VALOR_POTENCIA	RastreadorSolar - POSI_MODE	2.0	07:26:38	✓ ⚙️ 🔍
RastreadorSolar - VALOR_TEMPERATURA				
RastreadorSolar - VALOR_TENSAO				
RastreadorSolar - VALOR_UMIDADE				

Fonte: O autor (2024)

Alguns tipos de Data Points, como o representado na Figura 37, possuem uma característica que permite o envio de dados por meio da interface gráfica. Essa configuração é a opção "Configurável". A Figura 38 demonstra como os dados foram visualizados, e através dela é possível controlar algumas funcionalidades do protótipo. Por exemplo, no canto superior direito, onde está escrito "POSI_MODE: 2.0", ao clicar nesse rótulo é possível modificar o valor do

Data Point que muda o tipo de rastreamento do protótipo, conforme programado da seguinte forma:

- $POSI_MODE = 0.0$. É o modo livre, onde é possível controlar os motores através do ScadaBR apenas alterando os valores dos Data Points.
- $POSI_MODE = 1.0$ representa o modo de rastreamento com dois eixos, onde os motores são acionados e controlados a partir de uma lógica de programação que utiliza os valores dos LDRs como guia.
- $POSI_MODE = 2.0$ representa o modo do rastreador de um eixo. Nesse modo, apenas o motor de altitude é acionado e também é controlado através dos valores obtidos nos dois LDRs de altitude.
- $POSI_MODE = 3.0$ representa o modo fixo. Nesse modo, ambos os motores são desativados e o painel é automaticamente direcionado para uma posição inicial que simula o posicionamento dos painéis fixos reais.
- $POSI_MODE = 4.0$ representa o modo de rastreamento utilizando o controlador PID. Nesse modo, o controlador funciona através do erro obtido entre os LDRs para reposicionar os dois motores buscando o melhor alinhamento com a luz.

Além disso, na Figura 38, há também outros Data Points desse tipo, como o botão de liga e desliga para a aquisição dos dados do sensor de corrente e os valores dos motores servo. As demais informações são de Data Points não configuráveis. Uma dessas informações é mostrada no canto esquerdo, o "Modo Standby". Esse modo foi implementado para diminuir o gasto de energia do sistema desativando os servo motores durante um certo período de tempo, já que o sol não muda de posição com velocidade suficiente para que seja necessário um monitoramento tão rigoroso. Esse modo é ativado quando os valores dos quatro LDRs chegam a um erro aceitável, indicando que o painel está alinhado perpendicularmente aos raios de sol.

Por fim, as duas barras verticais localizadas no meio da interface representam o valor da umidade e temperatura, respectivamente da esquerda para a direita. O sensor foi instalado com o intuito de monitorar esses parâmetros durante o experimento. Já na parte inferior estão os gráficos dos valores obtidos através do sensor de corrente, que está medindo os valores de tensão e corrente em uma carga conectada à placa solar.

7.3.3 Princípio de Funcionamento do Protótipo do Rastreador Solar

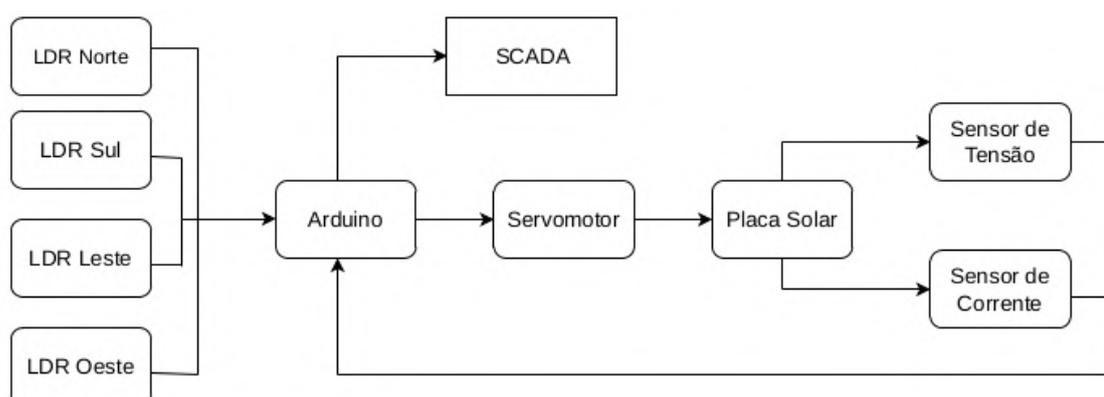
Seguidores solares e também conhecidos como rastreadores solares, têm como objetivo aumentar a produção de energia mantendo os sistemas fotovoltaicos sempre voltados para o

Sol, em posição perpendicular aos raios solares. Deste modo, o rendimento do sistema aumenta devido à maior incidência da componente de energia direta.

Com a utilização de sensores capazes de fazer a localização solar de maior intensidade, os dados são obtidos pelo Arduino e armazenado por um sistema SCADA, neste trabalho o ScadaBR, para então atuar na orientação dos motores deixando os módulos em um ângulo onde os raios solares incidam de forma perpendicular sobre eles.

O Arduino é o encarregado de fazer o rastreador solar funcionar perfeitamente a partir de sua programação e transmitir os dados dos sensores via comunicação serial para o ScadaBR. O funcionamento do sistema está retratado pelo diagrama de blocos resumido na Figura 40. A partir das leituras dos LDR (*Light Dependent Resistor*) feitas através do Arduino, é enviado um comando ao servomotor para se movimentar a leste, oeste, norte, sul, ou que permaneça estático. A placa fotovoltaica é conectada ao servomotor e sua tensão e corrente são medidas em tempo real. Todas as leituras dos sensores, assim como a posição do servomotor são apresentadas em tempo real no supervisório desenvolvido no software ScadaBR.

Figura 40 – Diagrama de Blocos do Rastreador Solar.



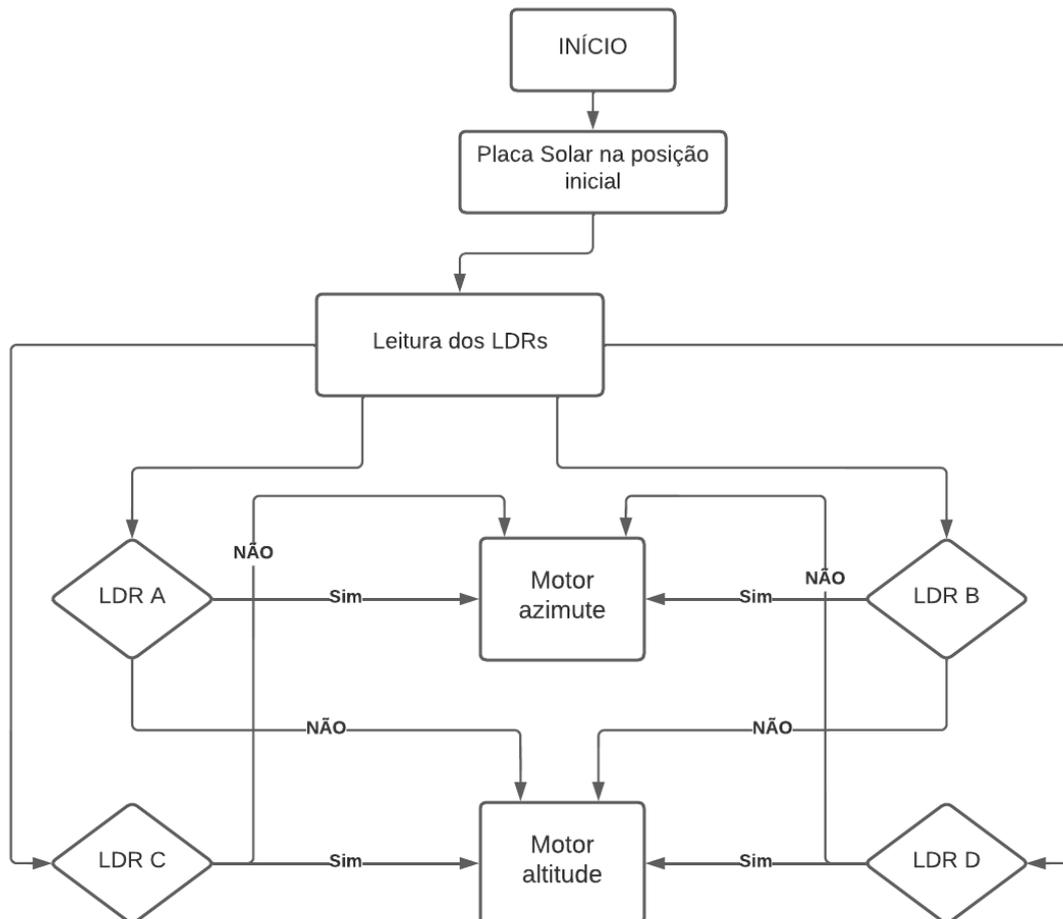
Fonte: O autor (2024)

Com o intuito de simplificar o código de programação, será aproveitada a capacidade do ScadaBR de converter dados na criação dos Data Points, podendo calcular facilmente a tensão e a corrente das placas fotovoltaicas.

Para a movimentação da placa solar, é necessário a leitura dos sensores LDRs, a partir dessa leitura, é possível observar o sensor que possui maior incidência de luz. Com base, nessa informação programa-se os motores para os movimentos específicos, sendo eles, o que averigua o ângulo azimutal e o outro, a altitude, respectivamente, o motor abaixo na estrutura e o motor acima, como mostrada no diagrama da Figura 22. Sendo, o motor abaixo movimenta a placa da direita para esquerda e o motor acima se movimenta de cima para baixo. No projeto possui quatro sensores LDR, o A, B, C e D. Se a incidência de luz estiver mais para os LDRs A ou B, movimenta o motor azimute para a direita e se tiver mais incidência de luz para os LDRs C ou D, o motor azimute gira para esquerda. Já no motor, de cima, se a incidência estiver nos LDRs A

ou B, o motor de altitude irá para baixo e se tiver mais incidência nos LDRs D ou C, o motor de altitude irá para cima. Dessa forma, fazendo a movimentação da placa solar e captando a maior incidência solar que está sendo oferecida naquela localização. Como mostrada no diagrama de funcionamento dos LDRs , apresentado na Figura 41.

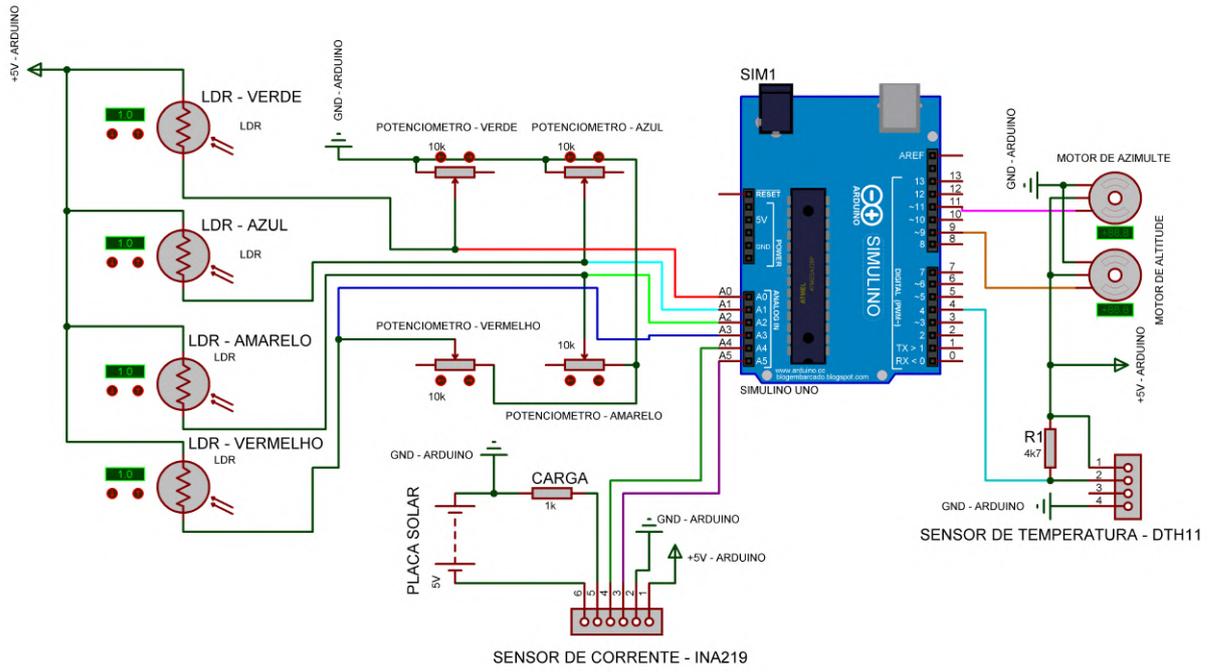
Figura 41 – Diagrama dos sensores do Seguidor Solar.



Fonte: O autor (2024)

Para o funcionamento do circuito é necessário avaliar o esquema elétrico do projeto, como é destacado na Figura 42.

Figura 42 – Esquema Elétrico do Seguidor Solar.



Fonte: O autor (2024)

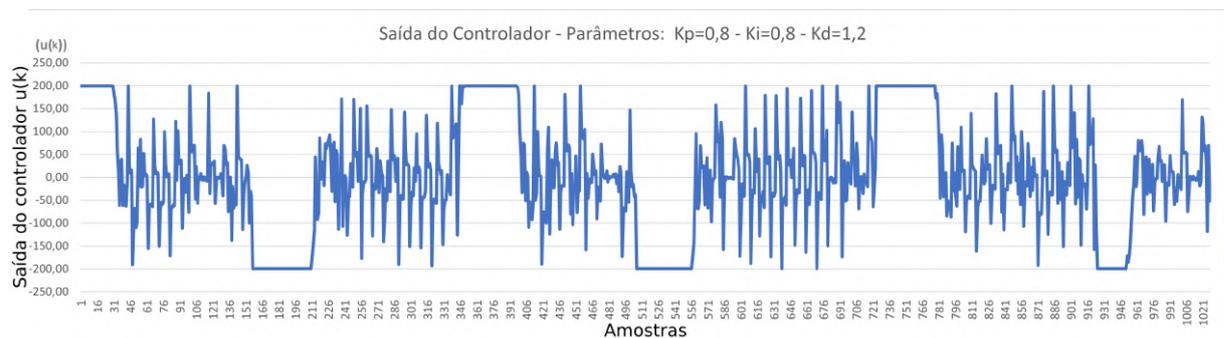
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são demonstrados os resultados obtidos por meio de testes práticos do rastreador solar nos modos fixo, de um e dois eixos, incluindo também o rastreador solar controlado por um controlador PID. Os testes serão realizados com o intuito de comprovar o bom funcionamento do sistema e estudar a diferença de eficiência nos modos de rastreamento encontrados na literatura. Na Figura 23 é mostrada a estrutura do rastreador solar completo.

8.1 Parâmetros do Controlador PID

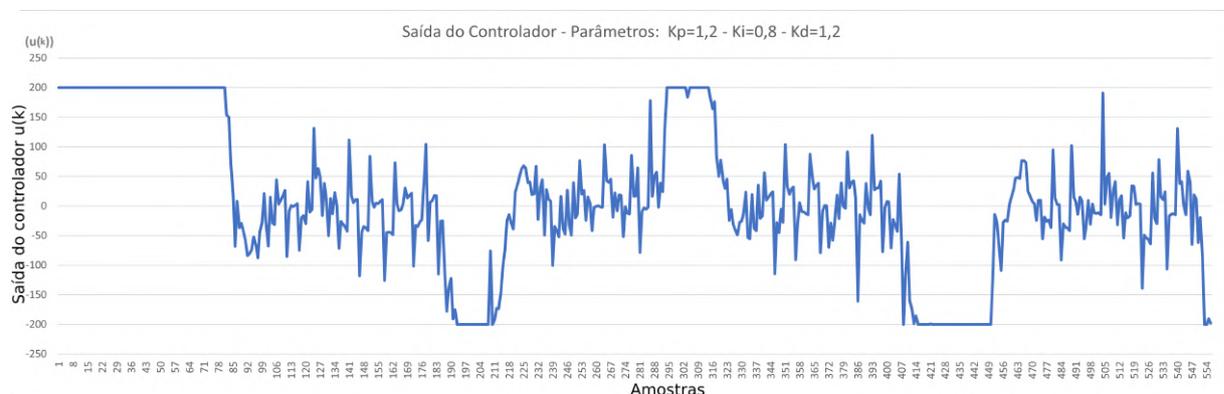
Nas Figuras 43, 44, 45, 46 e 47 se mostra o esforço de controle $u(t)$ em diferentes cenários para encontrar os melhores parâmetros do controlador, utilizando o método da tentativa e erro.

Figura 43 – Ação de controle com os Parâmetros: $K_p = 0,8 - K_i = 0,8 - K_d = 1,2$



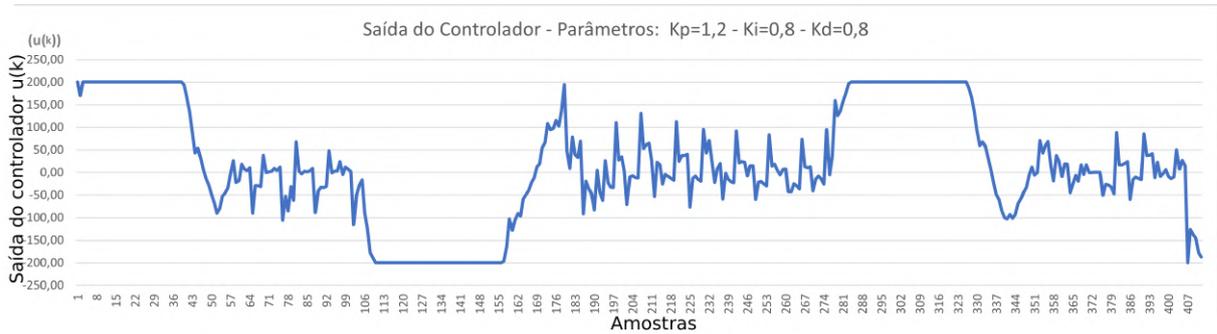
Fonte: O autor (2024)

Figura 44 – Ação de controle com os Parâmetros: $K_p = 1,2 - K_i = 0,8 - K_d = 1,2$



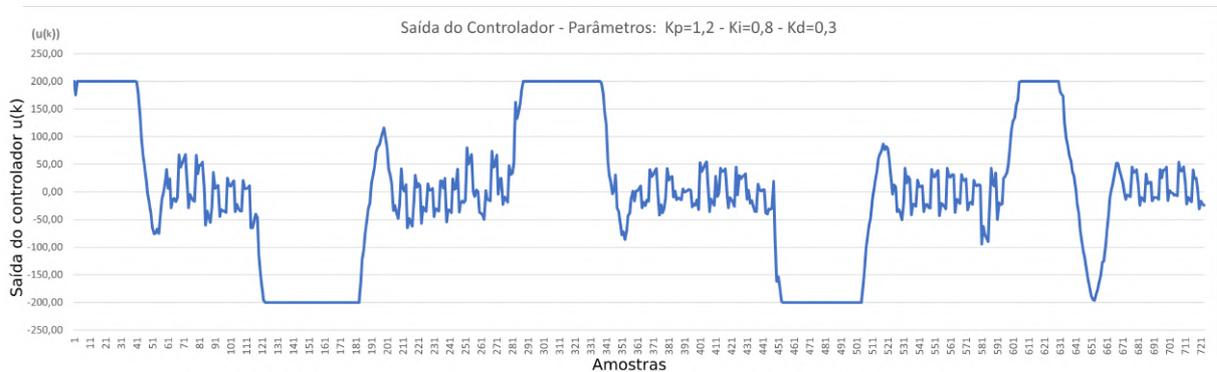
Fonte: O autor (2024)

Figura 45 – Ação de controle com os Parâmetros: $K_p = 1,2 - K_i = 0,8 - K_d = 0,8$



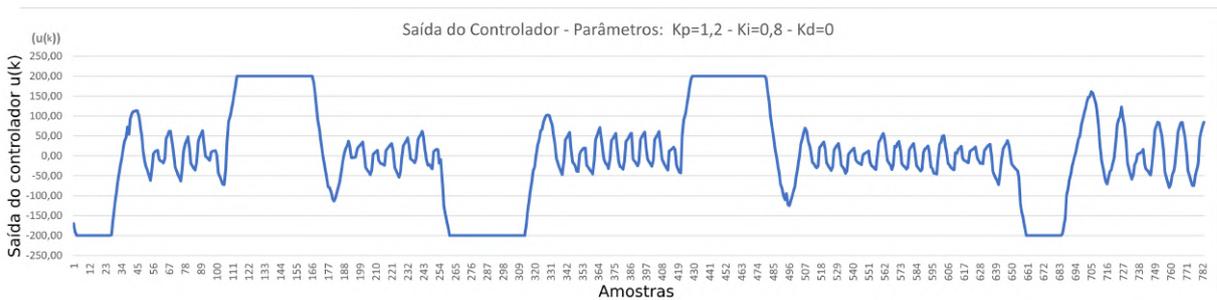
Fonte: O autor (2024)

Figura 46 – Ação de controle com os Parâmetros: $K_p = 1,2 - K_i = 0,8 - K_d = 0,3$



Fonte: O autor (2024)

Figura 47 – Ação de controle com os Parâmetros: $K_p = 1,2 - K_i = 0,8 - K_d = 0$



Fonte: O autor (2024)

Quando o K_d foi zerado (ver Figura 47), o sistema apresentou oscilações mais prolongadas, aumentando o tempo de reajuste e o período em que o sistema permanecia em erro. Desta forma, os melhores parâmetros encontrados foram os da Figura 46, ou seja,

- Ganho proporcional (K_p): 1,2
- Ganho integral (K_i): 0,8
- Ganho derivativo (K_d): 0,3

8.2 Experimentos

Foram realizados experimentos a fim de coletar os melhores dados em relação à tensão e corrente sobre a carga de $1\text{ k}\Omega$ alimentada pela placa solar. Todos os dados coletados para os gráficos foram obtidos sob as mesmas condições de temperatura e umidade (33°C e 69% respectivamente), bem como no mesmo posicionamento do protótipo em relação à plataforma de testes.

Os resultados experimentais do sistema com painel fixo e com rastreamento ativo de eixo único e duplo foram comparados para determinar a elegibilidade do protótipo proposto. Para isso, uma lâmpada Halógena de 40 W foi usada para simular o sol, a qual foi colocada para percorrer 180° no intervalo de 30 mins passando por 30 pontos diferentes respeitando o eixo circular da plataforma de testes para provar o funcionamento horizontal e vertical do rastreador solar em 3 modos diferentes: eixo único, eixo duplo e com o painel fixo. Assim, as grandezas foram registradas em tempo real no ScadaBR a partir da comunicação modbus do Arduino.

O mesmo experimento foi repetido três vezes para uma mesma altura da lâmpada, considerando o sistema fixo e com os dois tipos de rastreadores. A inclinação do sistema fixo foi de 15° , já que a instalação de painéis solares depende das características geométricas de incidência da radiação solar no local. Geralmente, no Brasil, esses painéis devem estar orientados para o norte com ângulos de inclinação que variam com a latitude do local a ser instalado (Krause; Pimenta, 2021).

8.2.1 Plataforma de Testes

A estrutura proposta para realizar o experimento precisava simular o percurso percorrido pelo sol durante o dia. Foi necessário desenvolver uma estrutura que comportasse uma fonte luminosa e a movesse em um percurso em forma de arco de no mínimo 120 graus, para que pudesse ter um bom aproveitamento dos movimentos do rastreador.

Utilizando sucata, foi desenvolvida a estrutura da Figura 48, que comporta uma fonte luminosa fixada na borda da sua parte superior, a qual segue a geometria do equipamento quando rotacionado, desenvolvendo assim um percurso parecido com o do sol durante o dia. As grades da proteção do ventilador servem como medida de espaçamento, sendo assim uma forma de controlar a movimentação.

Figura 48 – Plataforma de Testes

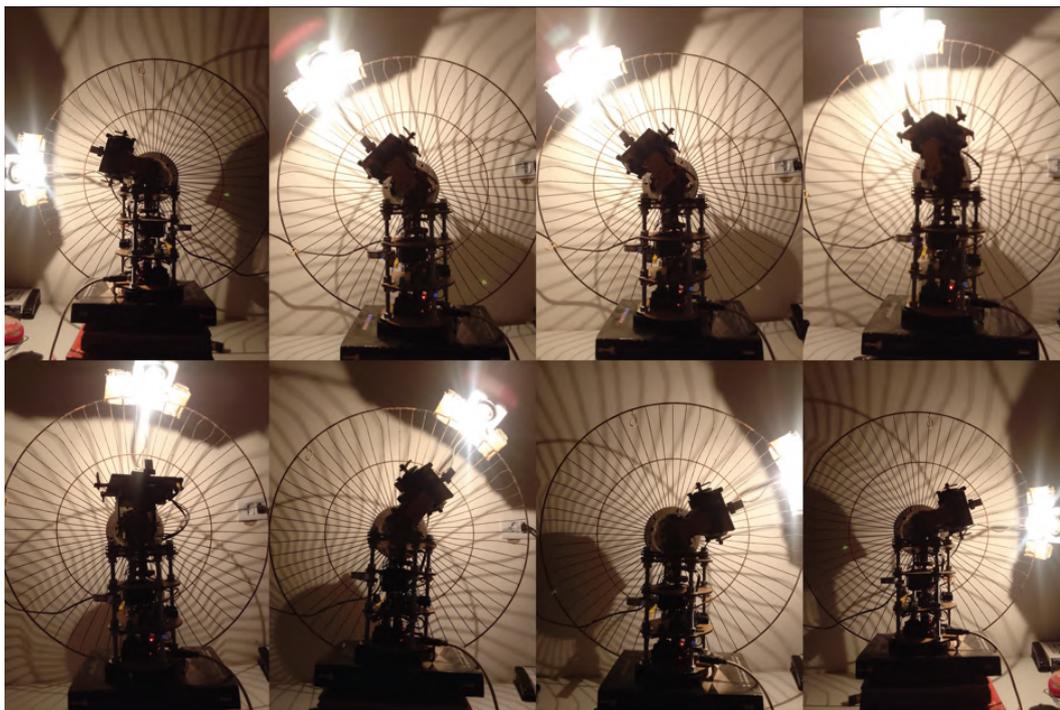


Fonte: O autor (2024)

Foi constatado que para um movimento próximo de 180 graus, são necessários 30 divisões. Assim, a plataforma de testes pode ser utilizada com uma resolução de $\alpha = 6^\circ$.

A Figura 49 mostra a plataforma de testes durante o experimento com o protótipo de rastreador solar de 2 eixos. Os experimentos com os 4 tipos de rastreadores foram realizados nas mesmas condições e com a mesma duração. A movimentação da fonte luminosa foi realizada por meio da rotação com base nos espaçamentos a cada 1 minuto, totalizando um tempo de 30 minutos por experimento para uma movimentação de 180 graus.

Figura 49 – Experimento do Rastreador Solar de 2 Eixos

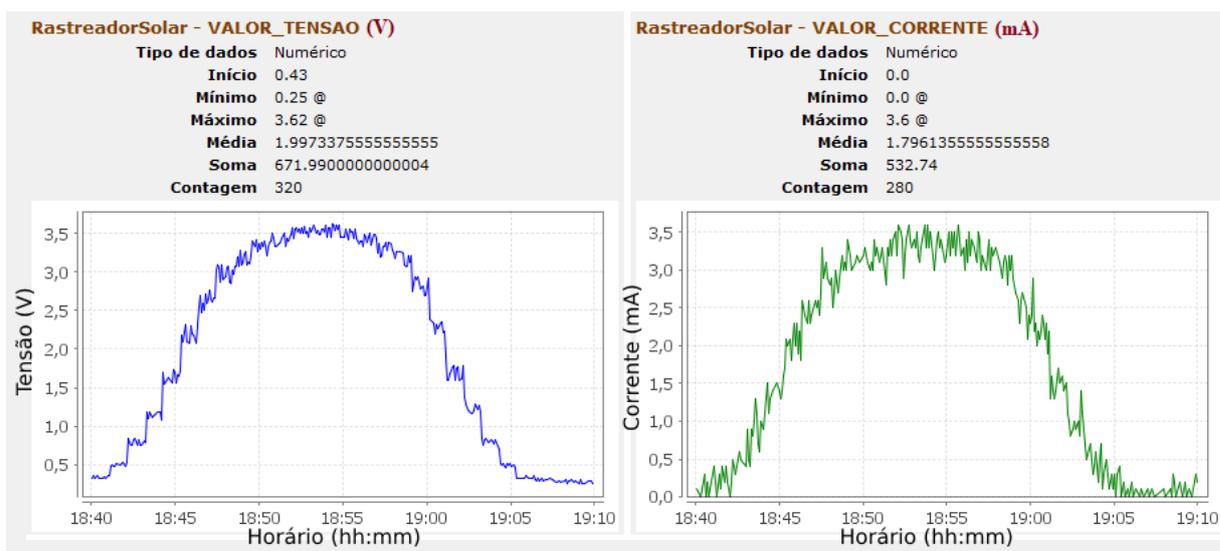


Fonte: O autor (2024)

8.2.2 Rastreador Solar Fixo

Os gráficos obtidos através do experimento com o rastreador no modo fixo com uma altitude de $\alpha = 15^\circ$ e com um ângulo azimutal de $\Psi = 15^\circ$, podem ser visualizados na Figura 50 e representam bem a geração de energia de um painel fixo durante um dia. Onde é possível ver claramente quando os raios de luz incidiram perpendicularmente ao painel solar e houve uma queda significativa da geração nas pontas.

Figura 50 – Gráficos de Tensão e Corrente do Rastreador Solar Fixo



Fonte: O autor (2024)

Na Figura 51, é possível analisar o gráfico com melhor visualização. Esse é o gráfico da tensão sobre a carga alimentada pelo painel solar.

Figura 51 – Gráficos de Tensão em Volts do Rastreador Solar Fixo

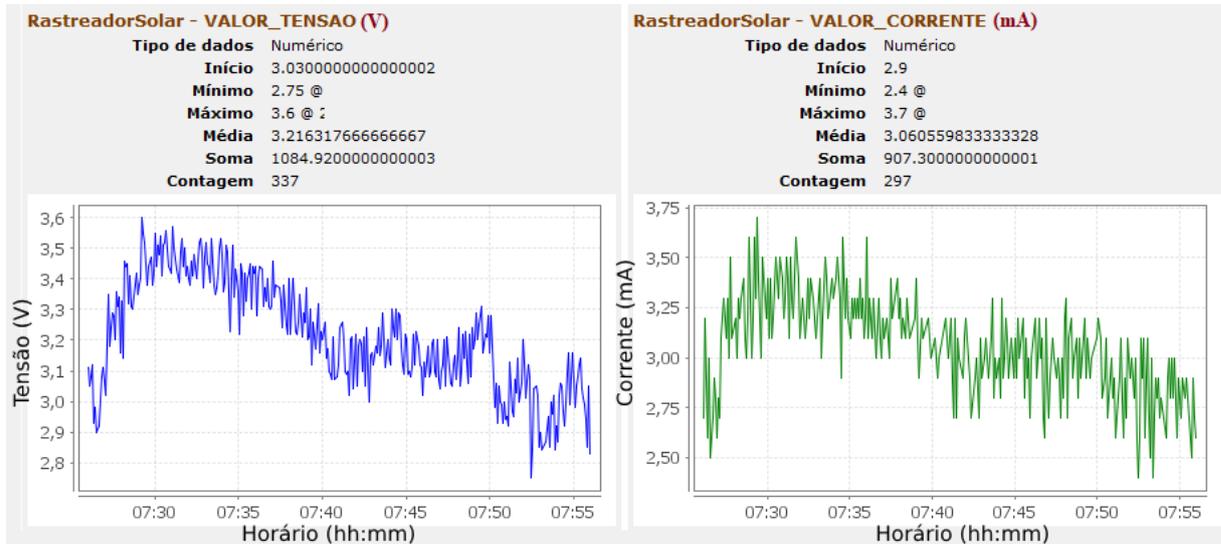


Fonte: O autor (2024)

8.2.3 Rastreador Solar 1 Eixo

Os gráficos obtidos através do experimento com o rastreador de 1 eixo com Azimute alinhado com a plataforma de testes, podem ser visualizados na Figura 52 e representam bem a geração de energia de um painel de 1 eixo durante um dia. É possível ver claramente que o painel tende a manter a geração de energia linear, mas como foi aplicado uma angulação no azimute a queda na geração aconteceu nas amostras finais do experimento, pois o rastreador não consegue se ajustar com o ângulo azimutal, apenas o ângulo referente a altitude.

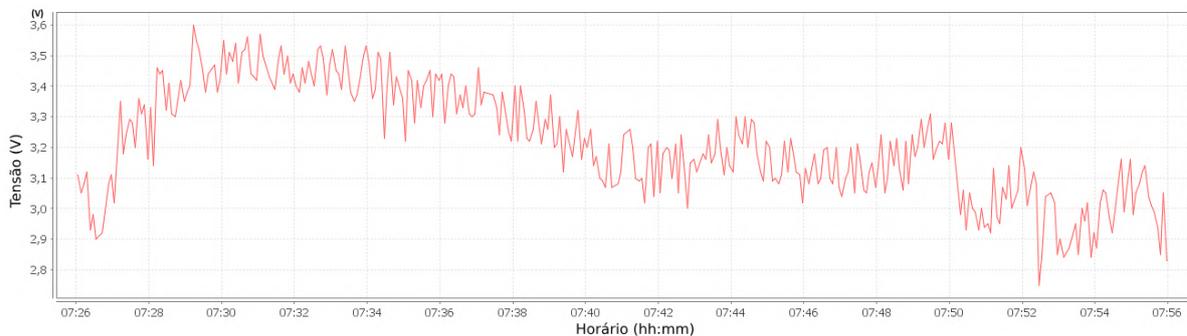
Figura 52 – Gráficos de Tensão e Corrente do Rastreador Solar de 1 Eixo



Fonte: O autor (2024)

Na Figura 53, é possível analisar o gráfico com melhor visualização. Esse é o gráfico da tensão sobre a carga alimentada pelo painel solar.

Figura 53 – Gráficos de Tensão Rastreador Solar de 1 Eixo

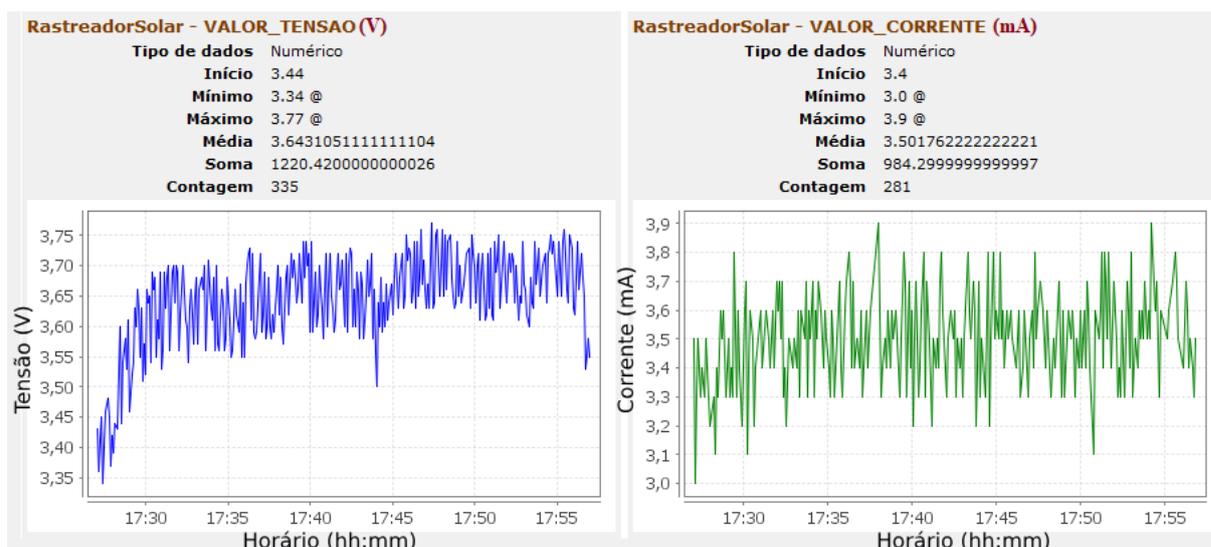


Fonte: O autor (2024)

8.2.4 Rastreador Solar 2 Eixos

Os gráficos obtidos através do experimento com o rastreador de 2 eixos com um ângulo azimutal de $\Psi = 15^\circ$ alinhado com a plataforma de testes, podem ser visualizados na Figura 54 e representam bem a geração de energia de um painel de 2 eixos durante um dia. Onde é possível ver claramente que o painel tende a manter a geração de energia linear e mesmo com a angulação no azimute, a tensão se mantém, pois o rastreador conseguiu se posicionar sempre perpendicular a fonte luminosa.

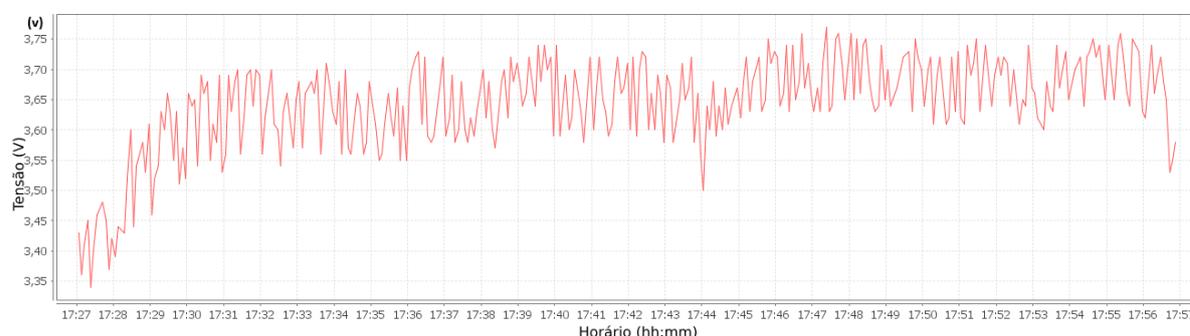
Figura 54 – Gráficos de Tensão e Corrente do Rastreador Solar de 2 Eixos



Fonte: O autor (2024)

Na Figura 55, é possível analisar o gráfico com melhor visualização. Esse é o gráfico da tensão sobre a carga alimentada pelo painel solar.

Figura 55 – Gráficos de Tensão Rastreador Solar de 2 Eixos (V)

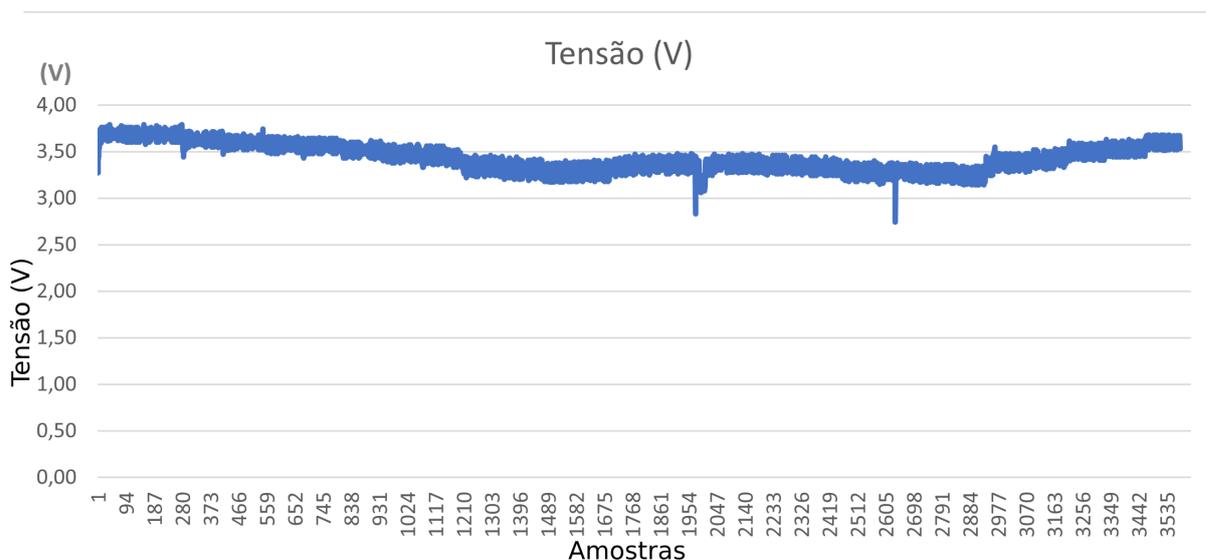


Fonte: O autor (2024)

8.2.5 Rastreador Solar Com PID

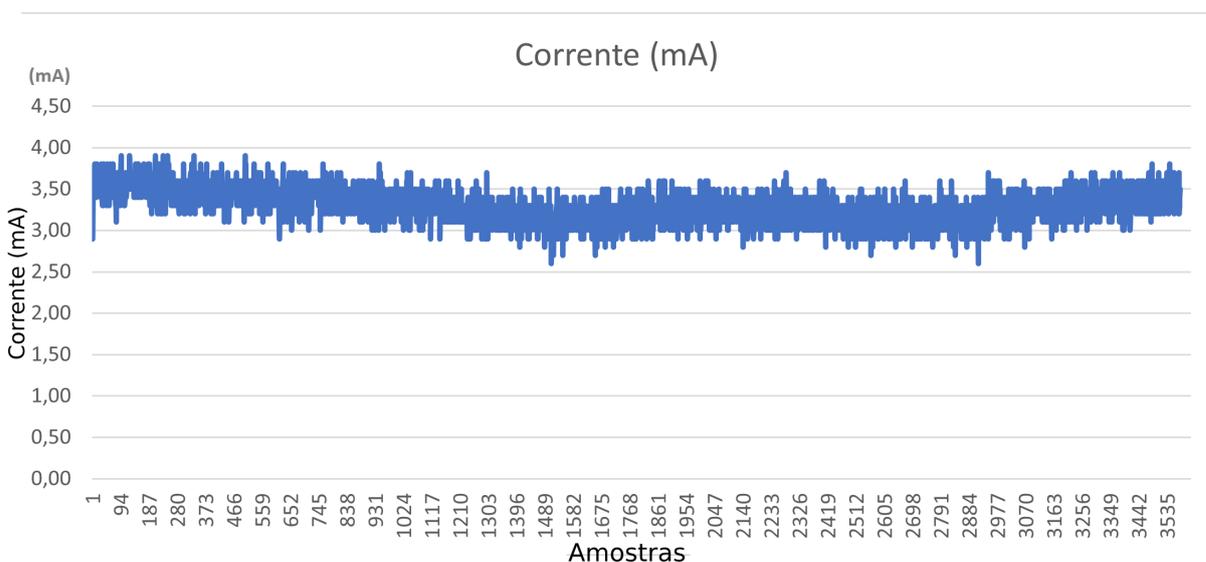
Os gráficos obtidos através do experimento com o rastreador de 2 eixos com um ângulo azimutal de $\Psi = 15^\circ$ alinhado com a plataforma de testes, podem ser visualizados nas Figuras 56 e 57 representam bem a geração de energia de um painel de 2 eixo durante um dia. Onde é possível ver claramente que o painel tende a manter a geração de energia linear e mesmo com a angulação no azimute, a tensão se mantém, pois o rastreador conseguiu se posicionar sempre perpendicular a fonte luminosa.

Figura 56 – Gráfico de Tensão do Rastreador Solar de 2 Eixos com PID



Fonte: O autor (2024)

Figura 57 – Gráfico de Corrente do Rastreador Solar de 2 Eixos com PID

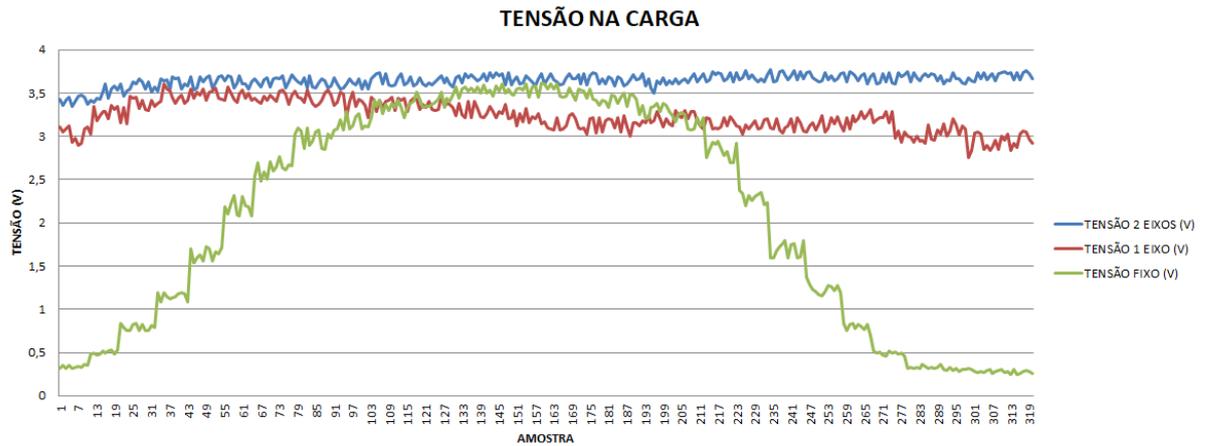


Fonte: O autor (2024)

8.2.6 Comparação entre Rastreadores

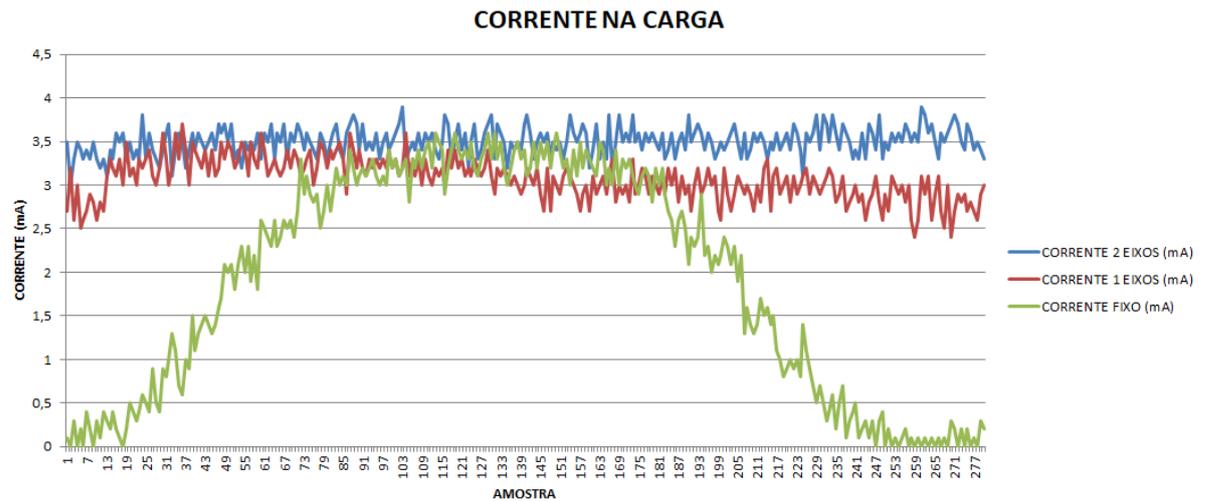
Os resultados experimentais são apresentados na Figura 58 para a tensão gerada e na Figura 59 para a corrente, onde é possível observar que os sistemas com rastreamentos seguem o movimento da luz, não obstante, se comparados os dois sistemas com rastreamento, o de eixo duplo consegue uma melhor captação dos raios de luz.

Figura 58 – Gráficos de Tensão dos Rastreadores Solares



Fonte: O autor (2024)

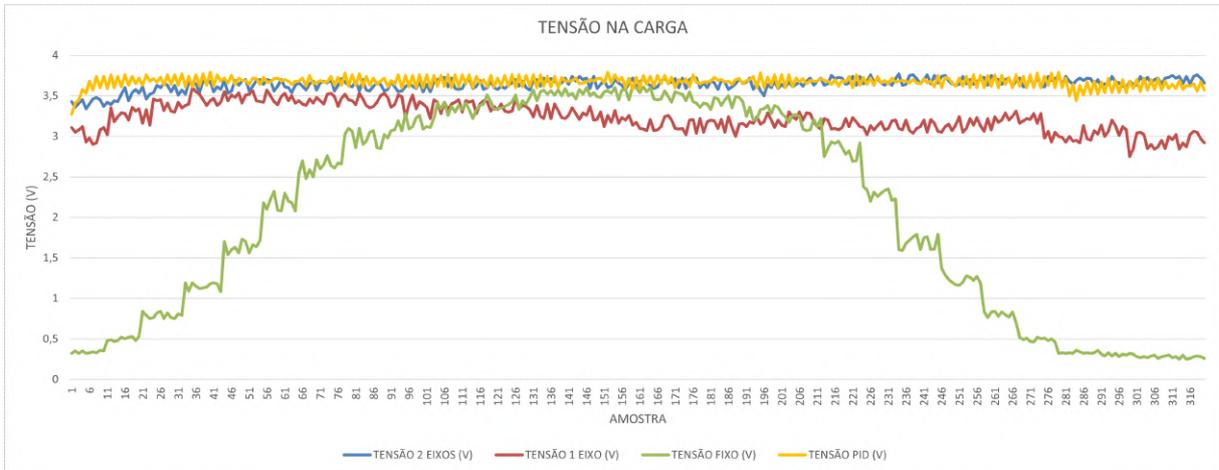
Figura 59 – Gráficos de Corrente dos Rastreadores Solares



Fonte: O autor (2024)

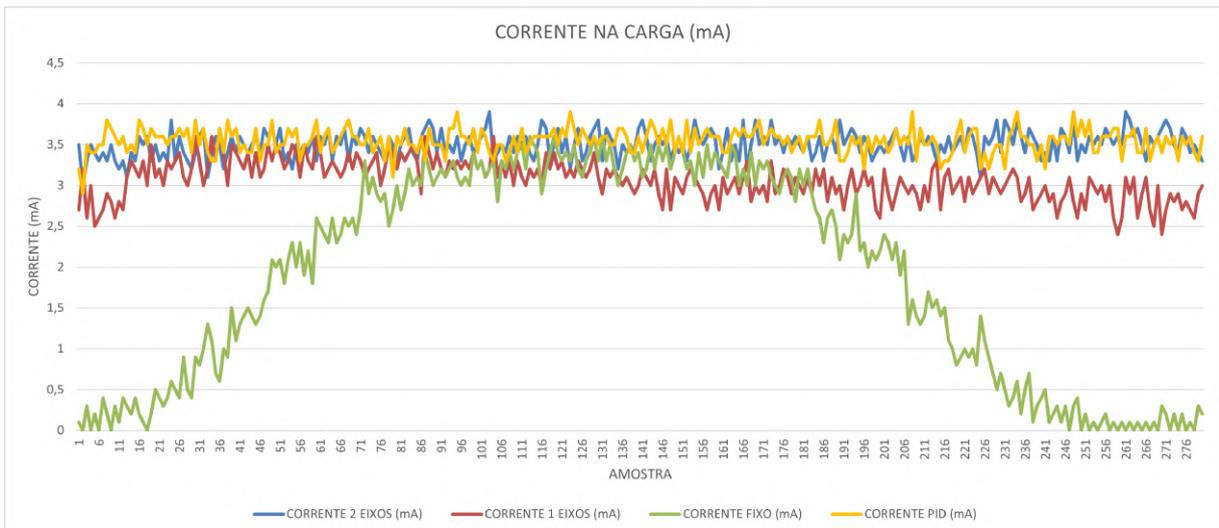
Para comparação nas Figuras 60 e 61, foi adicionado a curva da geração referente ao controlador PID .

Figura 60 – Gráficos de Tensão dos Rastreadores Solares com PID



Fonte: O autor (2024)

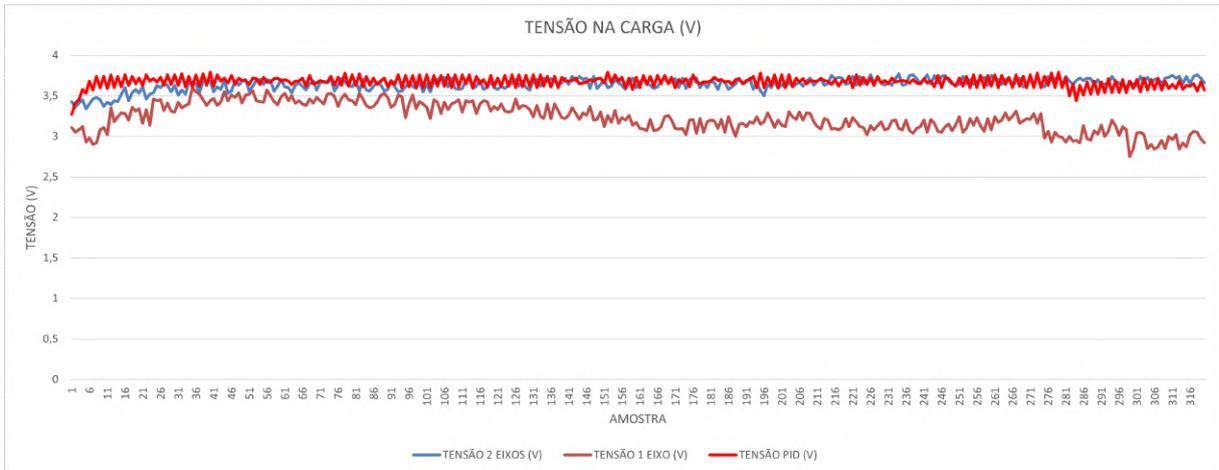
Figura 61 – Gráficos de Corrente dos Rastreadores Solares com PID



Fonte: O autor (2024)

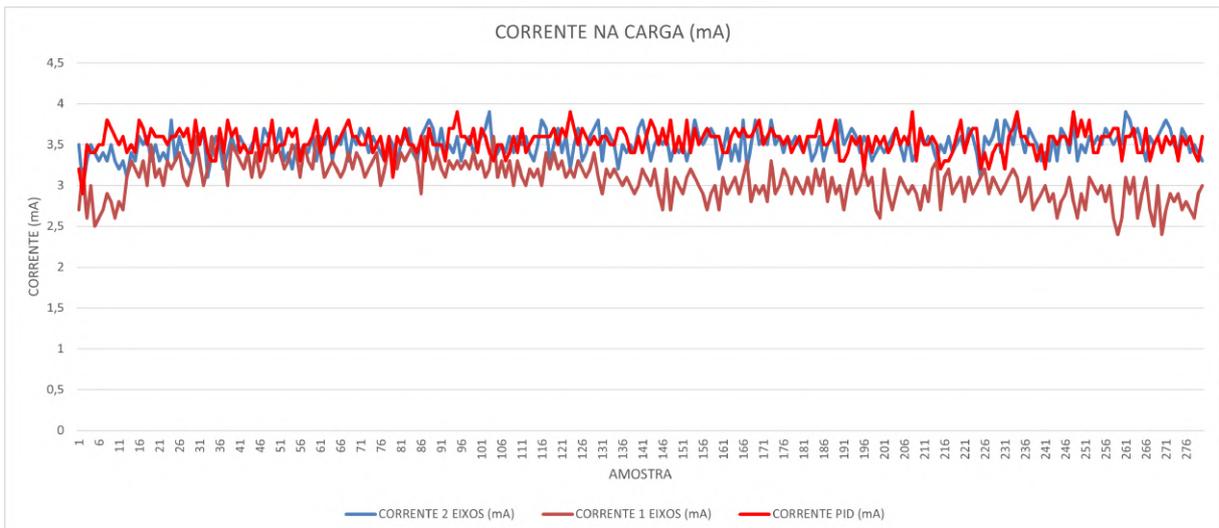
Dando mais foco nos rastreadores, nas Figuras 62 e 63 se apresentam uma forma melhor de observar que o rastreador com o controlador PID se mostra relativamente mais estável em relação aos ajustes e também na velocidade de resposta.

Figura 62 – Gráficos de Tensão dos Rastreadores Solares com PID



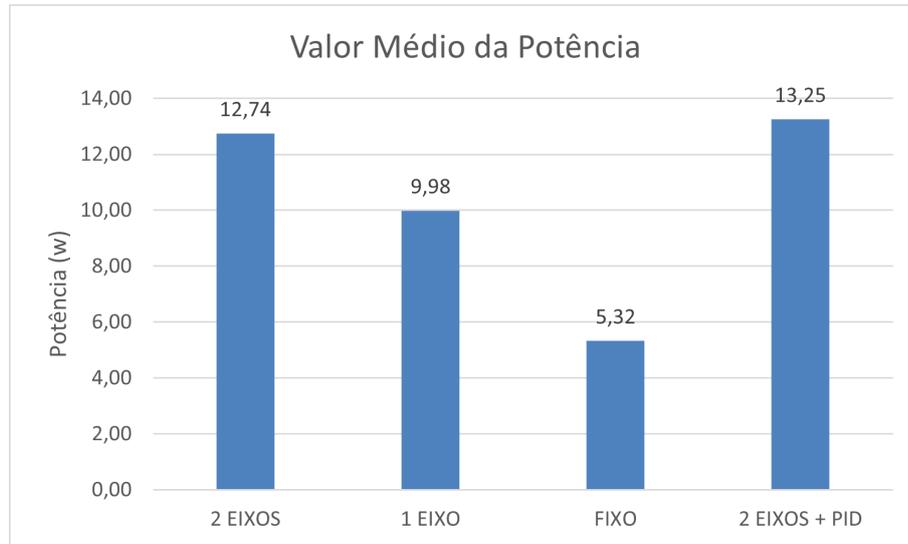
Fonte: O autor (2024)

Figura 63 – Gráficos de Corrente dos Rastreadores Solares com PID



Fonte: O autor (2024)

Figura 64 – Gráficos da Média da Potência Gerada Durante os Experimentos



Fonte: O autor (2024)

O gráfico na Figura 64 mostra os valores médios da potência gerada durante o experimento a partir dos dados adquiridos do sensor de corrente e tensão, evidenciando que o rastreador utilizando o controlador PID foi o mais eficiente na geração de energia solar.

8.3 Cálculo do Ganho de Eficiência entre Rastreadores

De forma geral, pode-se calcular o ganho de eficiência entre os sistemas, usando a equação (8.1).

$$\eta\% = \frac{\sum(V_y - V_x)}{V_x} 100\%, \quad (8.1)$$

onde V_x e V_y é o valor médio das amostras do rastreador x e y , respectivamente.

Utilizando o valor médio das amostras, tem-se que $V_F = 2,1V$, $V_1 = 3,23V$, $V_2 = 3,64V$, $V_P = 3,67V$, onde V_F é a média das amostras do rastreador fixo, V_1 a média das amostras do rastreador de 1 eixo, V_2 a média das amostras do rastreador de 2 eixos e V_P a média das amostras do rastreador de 2 eixos com PID, tem-se que:

- Ganho de eficiência do rastreador solar de 1 eixo em comparação ao fixo.

$$\eta\% = \frac{\sum(V_1 - V_F)}{V_F} 100\% = \frac{3,23 - 2,1}{2,1} 100\% = 53,81\%$$

- Ganho de eficiência do rastreador solar de 2 eixos em comparação ao fixo.

$$\eta\% = \frac{\sum(V_2 - V_F)}{V_F} 100\% = \frac{3,64 - 2,1}{2,1} 100\% = 73,33\%$$

- Ganho de eficiência do rastreador solar de 2 eixos em comparação ao de 1 eixo.

$$\eta\% = \frac{\Sigma(V_2 - V_F)}{V_F} 100\% = \frac{3,64 - 3,23}{3,23} 100\% = 12,7\%$$

- Ganho de eficiência do rastreador solar de 2 eixos em comparação ao rastreador solar de 2 eixos com PID.

$$\eta\% = \frac{\Sigma(V_2 - V_F)}{V_F} 100\% = \frac{3,67 - 3,64}{3,64} 100\% = 0,82\%$$

A comparação entre os modos de geração de energia solar mostrou significativas informações sobre o ganho de eficiência. Os resultados evidenciaram que o rastreador solar de um eixo apresentou um ganho de eficiência de 53,81% em relação ao sistema de rastreamento fixo. Por sua vez, o de dois eixos teve um aumento ainda maior de 73,33% quando comparado com o rastreador fixo. Por outro lado, O sistema de dois eixos teve um ganho de eficiência de 12,7% em relação ao de um eixo. Por fim, uma comparação entre sistemas de dois eixos revelou que o sistema com controle PID teve um ganho de eficiência marginal de 0,82% em relação ao sistema de dois eixos sem o controle PID. Esses resultados destacam a importância do rastreamento solar na maximização da eficiência da geração de energia fotovoltaica, com diferenças significativas entre os diferentes tipos de sistemas de rastreamento estudados.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi projetado, implementado e testado um rastreador solar capaz de operar como fixo, de um eixo ou de dois eixos. Durante este estudo, foram realizadas simulações do movimento solar e observada a geração de energia pelos diferentes tipos de rastreadores analisados por meio do sistema supervisorio proposto.

Os resultados obtidos demonstram claramente que os sistemas de rastreamento solar, especialmente os de dois eixos com e sem controlador PID, apresentam um desempenho significativamente superior em comparação com os rastreadores fixos e de um eixo. O fato de o sistema rastreador ser capaz de manter a placa solar o mais perpendicular possível aos raios incidentes resultou em uma maior aproveitamento de radiação, levando a uma maior produção de energia.

A análise comparativa entre os diferentes tipos de rastreadores revelou que os de um eixo realmente possuem um ganho superior em relação aos painéis fixos. No entanto, os rastreadores de dois eixos apresentam vantagens além do rastreador de um eixo, pois têm a capacidade de se ajustar em locais onde a variação da inclinação solar é mais acentuada ao longo do ano. Além disso, a implementação de controladores PID, como demonstrado pelos resultados obtidos, torna o sistema mais estável e robusto, permitindo que ele enfrente as mudanças climáticas associadas à variação na iluminação com maior eficácia.

Contudo, os resultados apresentados no trabalho foram condizentes com as expectativas, pois, por meio da comparação prática dos diferentes modos de rastreamento, foi possível alcançar os resultados esperados. Foi observado um aumento na geração de energia solar enquanto o painel solar se manteve na posição ideal para captar luz solar, com o controlador PID mostrando melhores resultados. Portanto, este estudo contribui para o desenvolvimento do conhecimento sobre os rastreadores solares e seu papel no aumento da geração de energia.

Com base em todo o material produzido, é viável dar continuidade à linha de pesquisa sobre o aumento na eficiência da geração por meio do uso de rastreadores solares e diversas técnicas de controle, focando na implementação de melhorias destinadas a aumentar a eficiência do dispositivo, as quais podem ser exploradas por meio de testes de estresse, com o objetivo de superar os desafios enfrentados pelas usinas solares. Em pesquisas futuras, seria possível implementar um protótipo robusto e realizar medições em diferentes condições climáticas, utilizando métodos de controle e sensoriamento. Isso poderia contribuir significativamente para o desenvolvimento de tecnologias mais confiáveis e eficientes no campo da energia solar.

REFERÊNCIAS

- A HISTÓRIA da energia solar no Brasil. Origo Energia. 2023. Disponível em: <https://origoenergia.com.br/blog/energia/a-historia-da-energia-solar-no-brasil>. Acesso em: 20 dez. 2023.
- ALMEIDA, Ednaldo de Ceita Vicente de. **Potencialidade da energia solar fotovoltaica no semiárido nordestino e sua relação com o desenvolvimento sustentável**. 2021. 83 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional - PPGDR) — Universidade estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2021. Disponível em: <http://tede.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/tede/3794/2/Arquivo%20do%20trabalho%20PDF%20-%20EDNALDO%20DE%20CEITA%20VICENTE%20DE%20ALMEIDA.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- ALVES, Gabriel de Oliveira. **Rastreador solar controlado por arduino**. 2018. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) — Faculdade de Ciências Biológicas e Ambientais, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/bitstream/prefix/2070/1/GabrieldeOliveiraAlves.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- AMARAL, H. **Medindo corrente e tensão com o módulo INA219**. [S.l.]: Makerhero, 2017. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/medindo-corrente-e-tensao-modulo-ina219/>. Acesso em: 26 dez. 2023.
- ARAÚJO, Jonas Damasceno Batista de. **Protótipo de rastreador solar de um eixo baseado em microcontrolador**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/21041/1/JonasDamascenoBatistaDeAraujo_DISSERT.pdf. Acesso em: 09 jan. 2024.
- ARDUINO. **Arduino Uno REV3**. 2022. Disponível em: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 26 dez. 2023.
- BARBOSA, Danielle Alves. **Análise Energética E Financeira De Um Dispositivo De Seguimento Solar Para A Geração Fotovoltaica**. 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/20643/1/2016_dis_dabarbosa.pdf. Acesso em: 10 jan. 2024.
- BEZERRA, Djailson de Assis. **Um sistema embarcado para monitoramento e detecção de falhas em máquinas de refrigeração de um data center usando um supervisorio**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Sistemas de Informação) — Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2020. Disponível em: https://www.cin.ufpe.br/~tg/2020-3/TG_SI/tg_dab2.pdf. Acesso em: 09 jan. 2024.
- CAMPOS, G. A. do P.; SILVA, J. P. G. da. Rastreador solar impresso: um projeto open source. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR*, 8., 2020, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: ABENS, 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/917/917>. Acesso em: 20 dez. 2023.

CAMPOS, G. R. M.; SOARES, F. C.; MEDEIROS, K. de S.; SILVA, F. G. Análise da eficiência energética de usinas fotovoltaicas ao longo de um dia. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 38157–38169, Paraná, abr. 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/28144/22285>. Acesso em: 10 jan. 2024.

CAMPOS, M. S.; ALCÂNTARA, L. D. Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso sobre a radiação solar em Belém/PA para uso em sistemas fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 31, p. 570–579, Belém, dez. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150065>. Acesso em: 27 dez. 2023.

CAMPOS, M. S.; ALCÂNTARA, L. D. S. Programa para o cálculo da variação da direção de incidência dos raios solares ao longo do ano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 41., Gramado, 2013. **Anais [...]**. Gramado: ABENGE, 2013. Disponível em: https://turing.pro.br/anais/COBENGE-2013/pdf/117056_1.pdf. Acesso em: 20 dez. 2023.

CARMO, Geovanni Henrique Rosa do. **Análise comparativa de um sistema de rastreamento solar**: Ganho na geração de energia e custos de manutenção. 2019. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019. Disponível em: <https://www.eng-mecatronica.divinopolis.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/195/2019/12/Geovanni-do-Carmo.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024.

CARVALHO, A. de P.; LIMA, L. O. Estudo de energia utilizando células fotovoltaicas. In: WORKSHOP DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 7., 2023, Francisco Beltrão. **Anais [...]**. Francisco Beltrão: UTFPR/FB, 2023. Disponível em: https://wcti.fb.utfpr.edu.br/anais/individuais/2023/3_25_anais.pdf. Acesso em: 05 jan. 2024.

DADOS do mercado de energia solar no Brasil. Portal Solar. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>. Acesso em: 02 jan. 2024.

ENGIN, M. Controller design for parallel mechanism solar tracker. **Machines**, v. 11, p. 372, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/machines11030372>. Acesso em: 08 jan. 2024.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Solar Fotovoltaica**: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. 2012. 71 p. — Grupo de Energia Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/117242096/Energia_Solar_Fotovoltaica_Fundamentos_Conversão_Viabilidade_Técnico_Econômica_1_. Acesso em: 10 jan. 2024.

FROSI, F.; CHESINI, D.; GABE, I. J.; BONA, J. C. D. Análise comparativa da produção de energia de um seguidor solar de dois eixos para a região de farroupilha-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: ABENS, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/161/161>. Acesso em: 20 dez. 2023.

GODOY, Lucas Gonçalves Kolblinger de. **Projeto de um rastreador solar digital de um eixo comparado a um rastreador analógico**. 2019. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10031315.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024.

GOETZBERGER, A.; HEBLING, C.; SCHOCK, H.-W. Photovoltaic materials, history, status and outlook. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, ELSEVIER, v. 40, p. 1–46, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00092-X). Acesso em: 06 jan. 2024.

GONÇALVES, Edevânio João. **Uso de um dispositivo LDR para o ensino de semicondutores fotoresistivos**. 2019. 43 p. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) — Departamento Acadêmico De Física, Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Medianeira, PR, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4740/1/dispositivoldrsemicondutoresfotoresistivos%20%281%29.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024.

GOUR, A.; PANDEY, M.; VERMA, B. D. A review paper on solar tracking system for photovoltaic power plant. *In: INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY*. [S.l.]: IJERT, 2020. v. 9. Disponível em: <https://www.ijert.org/research/a-review-paper-on-solar-tracking-system-for-photovoltaic-power-plant-IJERTV9IS020103.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2024.

KRAUSE, M. O.; PIMENTA, M. A. Um estudo sobre a incidência solar e o posicionamento geográfico da cidade de Ilhéus, Bahia, como fator relevante para a instalação de sistemas fotovoltaicos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 8, p. 82779–82795, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/34754/pdf>. Acesso em: 06 jan. 2024.

LIRA, Alcidemar Galdino de. **Análise comparativa entre módulos solares fotovoltaicos dos tipos monocristalino half-cell, bifacial e PERC, aplicação de estudo de caso em uma usina de mineração**. 2022. 11 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/da3dab14-7924-411c-b455-baca26148473/content>. Acesso em: 27 dez. 2023.

MANUAL do Software - ScadaBR 0.7 Sistema Open-Source para Supervisão e Controle. [S.l.]: Sensorweb, 2010. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ofuchi/sistemas-embarcados-el68e/laboratorio-final-comunicacao/ManualScadaBR.pdf/at_download/file. Acesso em: 12 jan. 2024.

MARIANO, J.; URBANETZ, J. **Energia solar fotovoltaica: Princípios fundamentais**. Paraná: Atena Editora, 2022. 138 p. *E-book*. ISBN 978-65-258-0075-2. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.752221803>. Acesso em: 03 jan. 2024.

MELO, C. L. *et al.* Controle de um painel solar para rastreamento de orientações de máxima geração de potência. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA*, 23., 2020, [S.l.]. **Anais [...]**. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Automática, 2020. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/1094/1050. Acesso em: 05 jan. 2024.

MODBUS application protocol specification. [S.l.]: Modbus Organization, 2012. Disponível em: https://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf. Acesso em: 12 jan. 2024.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação *lato-sensu* em Fontes Alternativas de Energia) — Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras,

MG, 2004. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/12545076/principio-de-funcionamento-da-celula-fotovoltaica-solenerg>. Acesso em: 20 dez. 2023.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: GEN-LTC, 2013. 760 p. ISBN 978-8521621355.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010. 824 p. ISBN 978-8576058106.

PINHO, M. A. G. J. T. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL, 2014. Disponível em: https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 20 dez. 2023.

QUADROS, D. **Como utilizar o PIO da Raspberry Pi Pico para Comunicar sensores DHT11 ou DHT22**. [S.l.]: MakerHero, 2021. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/como-utilizar-o-pio-da-raspberry-pi-pico-para-comunicar-sensores-dht11-ou-dht22/>. Acesso em: 26 dez. 2023.

RAYSARO, Márcio Coiado. **Sistema open-source de supervisão controle e aquisição de dados**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Sistemas de Informação) — Cuiabá: Faculdade de Tecnologia da Universidade de Cuiabá, Cuiabá, MT, 2012.

SCADABR. *Homepage*. [S.l.]: SENSORWEB, 2024. Disponível em: <https://scadabr.org/>. Acesso em: 12 jan. 2024.

SERVO TowerPro MG995 Metálico. [S.l.]: MakerHero, 2022. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/servo-towerpro-mg995-metalico/>. Acesso em: 26 dez. 2023.

SILVA, M. S. S.; SILVA, V. S.; FORTES, D. R. d. O.; MAIA, F. C. T. Comparação técnico-econômica da implantação de sistemas fotovoltaicos com diferentes tecnologias no nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 22., 2018, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa: Sociedade Brasileira de Automática, 2019. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/916/858. Acesso em: 03 jan. 2024.

VÁSCONEZ, L. *et al.* Controlador de posicion y velocidad con pid discreto en motor dc con codificación. **EcoSur: Innovación, Tecnología y Desarrollo Sostenible de América Latina**, EcoSur, v. 2, p. 12, 10 2023. Disponível em: <https://ecosur.gopsapp.com/index.php/Vo1/article/view/9/5>. Acesso em: 03 jan. 2024.

ZURAWSKI, R. **Industrial communication technology handbook**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2017. 1756 p. ISBN 978-1138071810.