UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

VITOR TADASHI TAMURA

RASTREADOR SOLAR DE UM EIXO CONTROLADO PELA PLATAFORMA ARDUINO

Ilha Solteira
2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

VITOR TADASHI TAMURA

RASTREADOR SOLAR DE UM EIXO CONTROLADO PELA PLATAFORMA ARDUINO

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

Dra.Suely Cunha Amaro Mantovani
Orientadora

Ilha Solteira
2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T159r

Tamura, Vitor Tadashi.
Rastreador solar de um eixo controlado pela plataforma Arduino / Vitor Tadashi Tamura. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
98 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025

Orientadora: Suely Cunha Amaro Mantovani

Inclui bibliografia

1. Sistema rastreador solar. 2. Painel fotovoltaico. 3. Arduino UNO. 4. Fontes renováveis de energia.

Sandra Montibeller - CRB-8/060

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

No dia primeiro de julho do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente **Vitor Tadashi Tamura**, matriculado sob o nº **172054559**, tendo como banca examinadora a sua orientadora, *a* Profa. Dra. Suely Cunha Amaro Mantovani, o Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão e o Prof. Dr. Falcondes José Mendes de Seixas, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**RASTREADOR SOLAR DE UM EIXO CONTROLADO PELA PLATAFORMA ARDUINO**", obtendo a nota 10,0 (dez) e conceito Aprovado.

Profa. Dra. Suely Cunha Amaro Mantovani
- Orientadora -

Vitor Tadashi Tamura
- Discente -

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão
- Membro da Banca -

Prof. Dr. Falcondes José Mendes de Seixas
- Membro da Banca -

Faculdade de Engenharia – Departamento de Engenharia Elétrica
Avenida Professor José Carlos Rossi, 1370 - CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP - Brasil
Tel (18) 37431150 - Fax (18) 3742-2735 - www.feis.unesp.br

DEDICATÓRIA

A Deus, que tem me permitido crescer e seguir em constante aprendizado.

Aos meus pais, que dedicaram suas vidas para me oferecer oportunidades e me preparar para os desafios da vida, a quem dedico este projeto, fruto de muito esforço, dedicação e superação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais Nelson N. Tamura e Alessandra A. B. Tamura e irmãos Renan M. Tamura, Fabiula G. Borelli e Letícia S. Silva, pelo apoio incondicional e amor em cada etapa desta caminhada.

À minha orientadora Suely Cunha Amaro Mantovani, pela paciência e orientação ao longo do processo.

E à minha rede de apoio, especialmente minhas amigas Larissa e Isabella, por cada palavra de motivação, escuta e companheirismo nos momentos mais desafiadores.

"I believe in the person I want to become.
I believe in the freedom of the open road."
Lana Del Rey – Ride (2012)

RESUMO

Com a expansão constante do uso de fontes renováveis, como a fotovoltaica, para produção de energia no mundo, observa-se a necessidade de estudos que possam contribuir para aumentar a sua eficiência no processo captação de energia. Tem-se como proposta o desenvolvimento de um Sistema Rastreador Solar de um eixo, visando obter a máxima incidência da luz do sol em um painel fotovoltaico. Para isso, utiliza-se um painel solar de 12V, 10W adequado para trabalhos didáticos, com controlador de carga configurável, fotosensores e servomotores controlados pela plataforma Arduino UNO R3. Na medição de tensão e corrente é usado o INA219 que fornece esses dados e a potência gerada enviados via *Bluetooth* para um terminal serial para gerar os resultados gráficos. Os resultados gráficos são comparados a um painel sem rastreamento (sistema fixo convencional) visando validar o protótipo implementado, sendo possível verificar pelas médias, da corrente e da tensão gerada pela placa com controle de posição versus placa de eixo fixo, um melhoramento de eficiência de mais de 30%.

Palavras-chave: Sistema rastreador solar, Painel fotovoltaico, Arduino UNO, Fontes renováveis de energia

ABSTRACT

With the constant expansion of the use of renewable energy sources, such as photovoltaic energy, for electricity generation worldwide, there is a growing need for studies that can contribute to increasing efficiency in the energy capture process. This work proposes the development of a single-axis Solar Tracking System aimed at maximizing sunlight incidence on a photovoltaic panel. For this purpose, a 12V, 10W solar panel suitable for educational purposes is used, along with a configurable charge controller, photosensors, and servomotors controlled by the Arduino UNO R3 platform. Voltage and current measurements are carried out using the INA219 sensor, which provides these data along with the generated power, transmitted via Bluetooth to a serial terminal to produce graphical results. These graphical results are compared to a non-tracking panel (conventional fixed system) in order to validate the implemented prototype. By analyzing the average current and voltage generated by the panel with position control versus the fixed-axis panel, an efficiency improvement of over 30% was observed.

Keywords: Solar tracking system, Photovoltaic panel, Arduino UNO, Renewable energy sources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Complexo Solar Janaúba..... 15
Figura 2 - Seguidor Solar Passivo..... 16
Figura 3 - Exemplo de rastreador solar (ativo) com a) eixo horizontal Norte-Sul. b) eixo horizontal e base giratória..... 17
Figura 4 - Participação de Fontes na geração de energia elétrica - ano 2023..... 24
Figura 5 - Comparando fontes de energia do mês de março nos anos 2024 x 2025. 25
Figura 6 - Unidade Geradora Hidrelétrica..... 27
Figura 7 - Princípio de funcionamento de um Aerogerador..... 29
Figura 8 - Painel de acompanhamento de geração de energia eólica em 03/2025... 30
Figura 9 - Esquema de geração de energia em usinas nucleares..... 32
Figura 10 - Forno Solar de Odeillo..... 34
Figura 11 - Localização geográfica e quantidade anual de conexão de 2019 à 2025 para MMGD..... 35
Figura 12 - Painel de análise da geração solar fotovoltaica de 2020 à 2025..... 36
Figura 13 - Componentes da placa fotovoltaica..... 38
Figura 14 - Células fotovoltaicas em cristal de silício ou camada fina..... 40
Figura 15 - Células de silício: a) Monocristalino. b) Policristalino..... 40
Figura 16 - Modelos de conexões.a) PV em série.b) PV em paralelo. c) PV Série paralelo..... 41
Figura 17 - Movimentos astronômicos..... 44
Figura 18 - Trajetória do movimento aparente do Sol (vista do Hemisfério Norte)..... 44
Figura 19 - Posição do Sol e ângulos notáveis..... 45
Figura 20 - Painel de resultados de performance e capacidade das coordenadas geográficas do PVGIS..... 46
Figura 21 - Resultados da CEPEL para coordenadas geográficas desta pesquisa..... 47
Figura 22 - Arduino UNO R3..... 48
Figura 23 - Shields para as placas Arduino..... 48
Figura 24 - Estrutura física de um LDR..... 51
Figura 25 - Estrutura do fotoresistor..... 52
Figura 26 - Sensor de corrente e tensão – módulo INA 219..... 53
Figura 27 - Módulo HC-05..... 55
Figura 28 - Representação construtiva para os servomotores..... 56
Figura 29 - Servomotor MG995 e conexões..... 57
Figura 30 - Diagrama de blocos para o Sistema Fotovoltaico Geral..... 60
Figura 31 - Diagrama de blocos para o Sistema Fotovoltaico *offgrid*..... 60
Figura 32 - Diagrama de blocos para o Sistema *ongrid*..... 60
Figura 33 - Diagrama de blocos para o Sistema Híbrido Manual..... 61

Figura 34 - Controlador de carga, Modelo KNUP 10A PWM KP-AD10A 12V / 24V.... 62
Figura 35 - Bateria Energy Power Chumbo-Ácido..... 64
Figura 36 - Tela inicial do CoolTerm..... 65
Figura 37 - a) Suporte com um grau de liberdade ou um eixo. b) Suporte fixo..... 68
Figura 38 - Teste de desempenho dos painéis fotovoltaicas com multímetro..... 68
Figura 39 - Diagrama ilustrativo do sistema de geração fotovoltaica de energia para os dois painéis..... 69
Figura 40 - Circuito do divisor de tensão usado para aferir a tensão nos LDRs..... 70
Figura 41 - Gráfico da tensão na saída do LDR x Resistência. (a) LDR1. b)LDR2..... 70
Figura 42 - Visualização superior e inferior das PCBs do circuito com LDRs.a) 3D e b) Impressas e soldadas..... 71
Figura 43 - a) PCB conecta os LDRs e servo com o Arduino.b) PCB real no Arduino 73
Figura 44 - Diagrama de conexões do sistema de controle de posição..... 74
Figura 45 - a) Sistema de controle de posição real.b) Posição do LDR..... 75
Figura 46 - Fluxograma do sistema de controle de posição..... 76
Figura 47 - Sensores com endereçamento adaptado..... 77
Figura 48 - Diagrama de conexões do sistema de aquisição remota de dados..... 78
Figura 49 - Fluxograma do sistema de aquisição remota de dados..... 80
Figura 50 - Gráficos gerados no teste em 25 de maio: a)Tensões.b) Correntes. c) Potências..... 81
Figura 51 - Gráficos gerados no teste em 31 de maio: a)Tensões.b) Correntes. c) Potências..... 82
Figura 52 - Sistema completo de painéis fotovoltaicos para o estudo da eficiência energética..... 85
Figura 53 - Tela do terminal Coolterm mostrando dados:Tensões, Correntes e Potências..... 86

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Comparando a eficiência entre tecnologias de células fotovoltaicas.. 40
Tabela 2 – Energia gerada (Wh) pelos painéis..... 84
Tabela 3 – Média dos parâmetos dos painéis fotovoltáicos..... 84
Tabela 4 – Teste dos LDRs..... 95
Tabela 5 – Tabelas de valores das resistências dos LDR para R=1 KΩ e 10 KΩ. 95

Quadro 1 – Especificações técnicas da placa Arduino UNO R3..... 50
Quadro 2 – Especificações técnicas para o LDR..... 52
Quadro 3 – Especificações técnicas para o módulo INA 219..... 54
Quadro 4 – Especificações técnicas para o HC-05..... 55
Quadro 5 – Especificações técnicas para o servomotor MG995..... 58
Quadro 6 – Especificações técnicas para painel fotovoltáico RSM010P..... 59
Quadro 7 – Especificações técnicas para o controlador Modelo KNUP 10A PWM KP-AD10A 12V / 24V..... 62
Quadro 8 – Especificações de tipos de bateria conforme material..... 63
Quadro 9 – Especificações técnicas da bateria Energy Power Chumbo-Ácido 64
Quadro 10 – Especificações do software CoolTerm..... 66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1. Objetivo 17
1.2. Organização do Texto 17
2 REVISÃO DE LITERATURA 19
3 FONTES LIMPAS DE ENERGIA 23
3.1. Geração Hidrelétrica de Energia 26
3.2. Geração Eólica de Energia 27
3.3. Geração Nuclear de Energia 30
3.4. Geração Solar Fotovoltáica de Energia 33
3.4.1. Painel Fotovoltaico – como funciona 36
3.4.2. Componentes e Tecnologias 37
3.4.3. Comparando os tipos de células fotovoltaicas 39
3.5. Por que Investir em Painéis Fotovoltáicos 42
3.5.1. Eficiência Energética 43
4. HARDWARE E SOFTWARE 48
4.1. Plataforma de controle 48
4.2. Sensores 51
4.2.1. Sensor LDR 51
4.2.2. Sensor INA 219 53
4.3. Módulo *Bluetooth* HC-05 54
4.4. Servomotor 56
4.4.1. Servomotor MG995 57
4.5. Páinel Fotovoltaico 58
4.6. Controlador de Carga 59
4.7. Bateria 63
4.8. Sistema Supervisório 65
5. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO 67
5.1. Sistema de Geração Fotovoltáica de Energia 67
5.2. Sistema de Controle de Posição 69
5.3. Sistema de Aquisição Remota de Dados 76
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES 80
7. CONCLUSÃO 87
REFERÊNCIAS BiBLIOGRÁFICAS 88
APÊNDICE A 94
APÊNDICE B 95
APÊNDICE C 97

1 INTRODUÇÃO

A tendência mundial é o aumento da utilização de energias no planeta por fontes renováveis, dentre as matrizes, cujo consumo deverá aumentar, está a energia elétrica fotovoltaica. Esta forma de geração e utilização de energia se apresenta cada dia mais importante na matriz energética global.

O uso da energia solar para produzir eletricidade data de 1839, quando Edmond Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico - notou o surgimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica, ao expô-la à luz solar (PINHO; GALDINO, 2014).

Em 1876, William Grylls Adams e Richard Evans Day observaram que o Selénio produz eletricidade ao ser exposto à luz solar. Depois disso, Charles Fritts, em 1883, inventou a primeira célula solar da história, feita de Selênio (SANTOS, 2018).

A primeira célula solar de Silício (elemento usado atualmente na produção de células fotovoltaicas) apareceu em 1954, após pesquisas por Calvin Fuller, Daryl Chapin e Gerald Pearson, pesquisadores da Bell Labs. Esta célula possuía uma eficiência de conversão de luz solar em eletricidade, de aproximadamente 4%, representando menos de um quarto da eficiência das células atuais (ENERGYSAGE, 2017).

Com a crise do petróleo em 1973, aumentou o interesse na energia solar fotovoltaica. Grandes avanços na produção de células fotovoltaicas foram obtidos com o passar dos anos, e com os processos de dopagem foram obtidos rendimentos dos painéis em laboratório em cerca de 25 % (ALVES, 2018).

Com ênfase no estudo de energias renováveis, países tropicais são grandes apostas do mercado de energia limpa e renovável, como energia solar e eólica. Atualmente, é cada vez mais comum ver painéis solares instalados nos telhados de residências devido ao preço mais acessível dos módulos fotovoltaicos, aumentando a demanda de mercado a cada dia, tornando-se uma forma de energia alternativa bastante procurada pelos consumidores.

Além disso, também aumentou a criação de parques solares, onde são instalados milhares de painéis fotovoltaicos para a produção de energia elétrica em larga escala. Localizado ao norte do estado de Minas Gerais, o Complexo Solar Janaúba, mostrado na Figura 1, está em operação acrescendo em 244MWp, sendo o

maior do Hemisfério Sul e das Américas, com capacidade instalada de 1.617MWp, evitando uma emissão anual de aproximadamente 859 mil toneladas de CO (Gás de efeito estufa) na atmosfera e estimado para suprir um consumo residencial de 1,2 milhão de pessoas. O investimento foi realizado em 2,9 milhões de módulos solares distribuídos em 27 usinas fotovoltaicas, ocupando uma área de 3,8 mil hectares (ELERA, 2025).

Figura 1 - Complexo Solar Janaúba.

Fonte: Elera (2025).

A tendência tem sido o aumento dos Parques Solares, onde em geral, existe um grande esforço dos operadores para que a usina opere com a melhor eficiência possível, evitando gastos em demasia com manutenções.

A eficiência energética consiste em se obter um melhor aproveitamento usando menos energia, utilizando a energia de modo mais racional. Na energia solar, a eficiência energética está no próprio uso dessa fonte renovável de energia, o aumento do consumo nas cidades, contribuem na diminuição do uso da energia proveniente de termoelétricas e hidrelétricas (MUNDO DA ELÉTRICA, 2023; ENERGIA TOTAL, 2023).

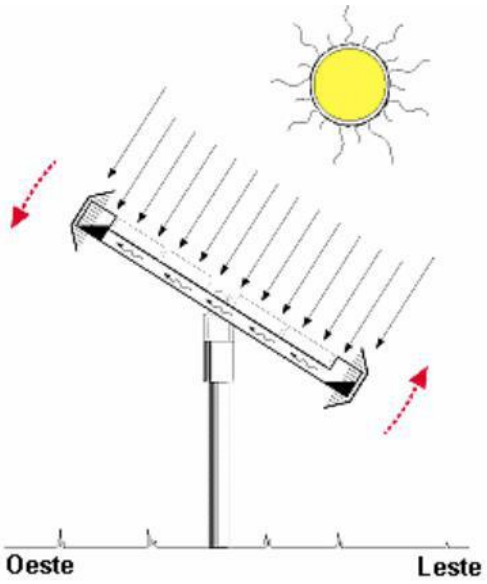
Um painel fotovoltaico produz eletricidade a partir da componente de radiação solar que incide em sua superfície, fazendo com que haja uma maior geração quando o painel está em 90 graus em relação a incidência dos raios solares durante o maior período de tempo possível, aumentando a produção de energia.

Para captar o máximo possível de luz solar ao longo do dia e aumentar o rendimento de um painel solar, uma maneira consiste em adicionar um sistema de

controle usando sensores e atuadores ligados a uma plataforma controladora fazendo com que o sistema de placas solares acompanhe durante todo o dia, a luz do sol, ou seja, um rastreador ou seguidor solar e um sistema supervisório para a inspeção do sistema formado pela placa e pelo mecanismo do seguidor.

De acordo com Castañeda (2011), existem dois tipos de rastreadores solares, os passivos e os ativos. Os passivos não utilizam nenhum controle eletrônico, sendo que sua movimentação ocorre devido a radiação solar que incide sobre o mecanismo que possui em cada extremidade da placa, um vaso cilíndrico abastecido com um fluido mantido a certa pressão. No início do dia o painel está inclinado para a direção Oeste, como o Sol nasce a Leste, o fluido que está no lado Leste evapora, sendo transferido para o lado Oeste. Dessa forma a placa se move pelo desequilíbrio de massa provocado no sistema, conforme exemplo mostrado na Figura 2.

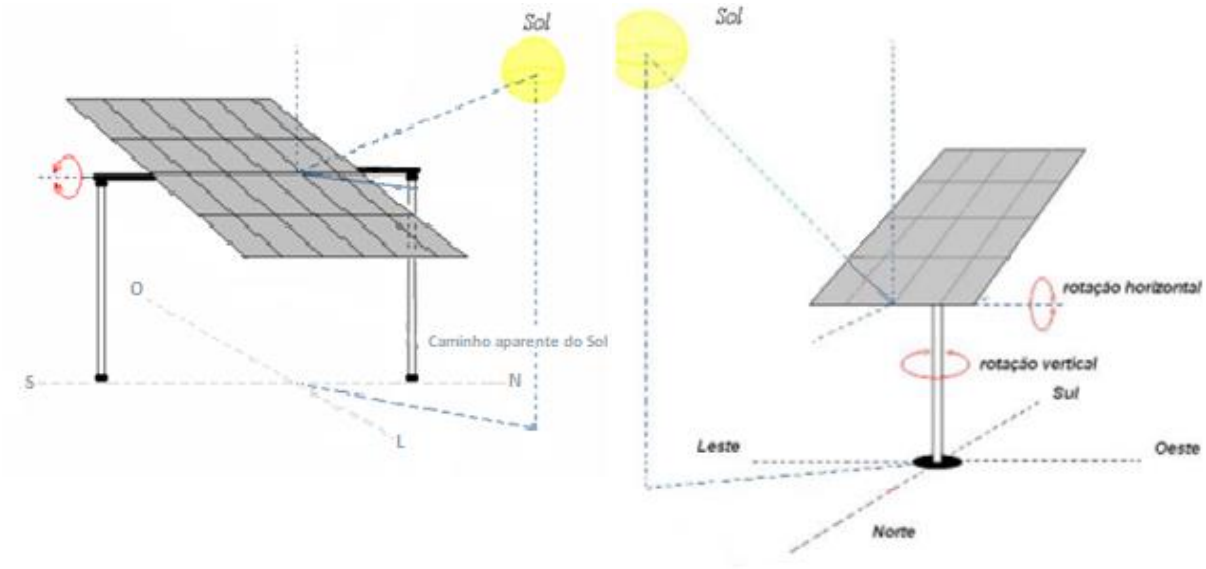
Figura 2 - Seguidor Solar Passivo.



Fonte: Oliveira (2007).

Os rastreadores ativos possuem um sistema eletrônico que controla a posição da placa solar em função da leitura de sensores de luminosidade ou fotosensores, o movimento é feito por meio de atuadores, como os motores de passo ou servo motores O seguidor solar ativo pode trabalhar com um ou dois eixos, se for de um eixo, esse eixo fica na direção Norte-Sul, com seu arranjo girando de Leste a Oeste para se alinhar com o Sol ao longo do dia, conforme mostrado na Figura 3.(a) O seguidor de dois eixos possui um segundo eixo que permite o ajuste da inclinação da placa, podendo se adaptar às inclinações do Sol ao longo do ano, mostrado na Figura 3 (b).

Figura 3 - Exemplo de rastreador solar (ativo) em : a) Com eixo horizontal Norte-Sul. b) Com eixo horizontal e base giratória



(a) (b)

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2007.

A energia solar fotovoltaica tem evoluido desde o início de sua história, sendo considerada atualmente como a principal fonte de energia renovável em termos de capacidade total instalada e simultaneamente é a que mais cresce em capacidade ano a ano (IRENA, 2025).

1.1. Objetivo

Desenvolver um protótipo de um rastreador solar de um único eixo automatizado visando melhorar a eficiência de captação da luz do sol de um painel fotovoltaico para minimizar as perdas de rendimento resultante da variação do ângulo de incidência dos raios solares. Para isso, são usados sensores de luminosidade (fotosensores), servomotores, uma plataforma de controle Arduino UNO R3 e um controlador de carga que faz o controle de alimentação e carregamento da bateria.

1.2. Organização do Texto

Depois desta introdução faz-se no capítulo 2, uma revisão de literatura onde se apresenta a descrição de alguns trabalhos considerados relevantes e que serviram de base para o desenvolvimento deste estudo.

No capítulo 3 são abordados os tipos de fontes limpas e/ou renováveis de energia, com ênfase na geração fotovoltaica de energia, com conceitos, especificações e características das placas solares e o conceito de eficiência energética.

Descrevem-se no capítulo 4 as especificações e característidas dos vários dispositivos que foram utilizados no desenvolvimento do projeto.

No capítulo 5 detalha-se a contrução do projeto, montagem das três partes que o compõe, Geração fotovoltaica de energia, Controle de posição e Aquisição remota de dados.

No capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados que foram obtidos pelos testes do projeto realizados em campo.

Apresenta-se a conclusão no capítulo 7, relacionando os resultados obtidos referente ao objetivo do estudo., em seguida vem as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento do projeto e um Apêndice.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Com a ideia de tornar a geração de energia por placas fotovoltaicas, fonte de energia renovável, mais eficiente, foi realizada uma pesquisa sobre as tecnologias aplicadas nesta área. Nesta revisão de literatura foram selecionados alguns trabalhos que são descritos a seguir, que forneceram o embasamento necessário para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ozerdem e Shahin (2014) descrevem em seu artigo, um estudo realizado sobre sistemas de rastreamento solar para a obtenção de máxima eficiência energética, sendo observado que uma placa tem maior aproveitamento quando o grau de incidência dos raios solares, em relação a placa, são de 90º. Para isso, estudaram maneiras de movimentar a placa para que se mantenha esse grau de amplitude usando três métodos, o método tradicional, modelo de controle PID (Controle Proporcional, Integral e Derivativo) e o controle por orientação solar baseado na localização e tempo. Para o caso do método tradicional foram usados servos motores que possuem alto torque e fácil controle, célula solar, LDR (Resistor dependente de luz) e um microcontrolador Arduino. Usaram o método tradicional com dois LDRs (east and west) para testar o ângulo do painel solar com a luz do sol e outro controle com 4 sensores LDRs buscando corrigir a posição por servo motores onde a placa se apoia nesses dados, processados no software MatLab/SimuLink. Outro método foi o uso de um controlador PID também montado com sensores LDR, tendo os dados determinados com apoio da ferramenta MatLab PID e como o sistema é lento, apenas o controlador integral basta e assim é feito a comparação entre o ângulo da placa solar e do sol e o erro determina a ação para correção da posição dos servo motores; no caso da orientação solar utilizam coordenadas geográficas e angular (Zênite e Azimute) para determinar a posição do objeto e seu grau em relação ao sol, assim, o tempo é programado para que seja feita a correção da posição da placa fotovoltaica ao longo do dia, à medida que o ângulo deixe de ser 90º. Dos resultados das comparações entre estes métodos foi observado que no método de controle tradicional a performance do sistema não é boa o suficiente, para ser aplicado em projetos da vida real, tendo bom tempo de resposta, mas a estabilidade e performance não são bons, com probabilidade alta de erro, principalmente quando comparado ao controle PID. Concluíram nas suas pesquisas que os resultados do método de orientação solar baseado no Tempo e Localização fornecem alta precisão e permite

uma performance com mais eficiência, por causa da estabilidade do sistema ser alta e com baixa probabilidade de erro. Este método é melhor para sistemas de rastreamento solar de plantas de energia renováveis, mas o grande problema é o custo, necessita de base de dados e dispositivos de armazenamento do sistema de Coordenadas Geográficas.

Outro importante trabalho foi desenvolvido por Costa Neto (2018) um protótipo de rastreamento solar fotovoltaico automatizado de baixo custo, visando obter um melhor aproveitamento da irradiação solar provida pelo Sol incidente em painéis fotovoltaicos e consequentemente uma maior geração energética. O projeto desenvolvido foi baseado no modelo de dois eixos tendo elevação solar e inclinação azimutal contando com uma plataforma Arduino Uno e sensores fotodetectores sendo utilizada com a criação de um algoritmo para rastreamento do máximo ponto de incidência solar na superfície do painel fotovoltaico no horário solar. Pela análise comparativa da geração fotovoltaica com e sem o sistema móvel, foram obtidas as curvas de eficiência para os dois modelos de rastreamento. Os resultados dessa análise indicaram que o controle da posição do módulo fotovoltaico em função do posicionamento azimutal fixo, contribuiu para o aumento de aproximadamente 26,21% da radiação incidente no painel em média, ao longo de um dia parcialmente nublado.

Buscando por alternativas viáveis e sustentáveis de geração de energia entre os métodos disponíveis, Pergher (2023) em seu trabalho de graduação, desenvolveu um sistema de rastreamento solar microcontrolado, que por meio da medição das saídas dos fotodetectores, tentam manter os painéis solares perpendiculares ao Sol, ao longo do tempo, visando obter uma maior eficiência do sistema. Compara a eficiência do sistema com painel microcontrolado, a um painel fixo em condições equivalentes. Dos resultados obtidos por meio dos testes realizados em campo, observou que o sistema móvel proposto teve uma eficiência de captação de energia maior do que o painel de posição fixa, sendo esta 26,1% superior durante o período medido. Descontando a energia gasta para controle e movimentação, a energia gerada foi 16,2% maior.

Em Oliveira (2007) em sua dissertação de mestrado é apresentado um modelo de rastreador solar direcionado, desenvolvido nos laboratórios do grupo de pesquisas em fontes alternativas de energia, da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências – Departamento de Energia Nuclear que utiliza um circuito de controle de baixo custo, como forma de diminuir os custos da tecnologia

fotovoltaica comparado aos custos da energia produzida por sistemas convencionais. Este rastreador utiliza em seu circuito de controle componentes eletrônicos simples e de baixo custo, sendo que utiliza a energia gerada pelo módulo fotovoltaico do sistema proposto para realizar o acompanhamento ao longo do dia.

No trabalho de Lopes, Viana, Pereira e Tonieto (2022), é apresentada uma proposta de sistema de rastreamento solar de eixo único, para captar a máxima geração de energia elétrica por painéis fotovoltaicos. Esta se baseia na automação do ajuste da posição do painel em relação ao Sol, utilizando conceitos de Internet das Coisas (IoT) para permitir o controle e o monitoramento remoto do sistema em tempo real. O sistema é composto por um microcontrolador ESP8266 (NodeMCU), sensores LDR para detecção da posição do Sol, um servo motor responsável pela movimentação do painel e usa a plataforma da web ThingSpeak, que faz a coleta, armazenamento e mostra os gráficos de variação dos sensores. A estrutura visa facilitar o uso da energia solar de residenciais e prédios educacionais, com ênfase na simplicidade e na escalabilidade do projeto. Os testes do sistema com rastreamento foram comparados com um painel fixo mostrando ganhos significativos na eficiência da captação solar com rastreamento, reforçando a viabilidade da solução como alternativa às estruturas comerciais mais caras.

Também na área de eficiência energética e automação de sistemas fotovoltaicos, em Santos, Schwabe e Rubinec (2023), propuseram o desenvolvimento de um sistema de um rastreador solar bidirecional para a captação da radiação solar ao longo do dia, utilizando sensores de luminosidade, LDR, para identificar a posição de maior incidência solar e acionar dois servo motores para a movimentação dos eixos. O controle é realizado por meio de uma placa Arduino Uno R3, que processa os sinais analógicos dos sensores e calcula os parâmetros ideais para o ajuste da posição da placa fotovoltaica. A estrutura mecânica do protótipo foi desenvolvida em software de modelagem 3D (SolidWorks) e fabricada com impressora 3D. Para a análise de dados, os autores desenvolveram um aplicativo capaz de exibir em tempo real, dados da tensão, incidência solar, temperatura e geração energética, o que reforça a integração do projeto com conceitos de Internet das Coisas (IoT). Os testes aconteceram tanto em ambiente controlado, quanto em campo aberto e demonstraram melhorias significativas na captação de energia quando comparado a painéis fixos.

E por fim, em Laurindo (2023) foi desenvolvido um sistema de microgeração de energia solar com rastreamento automático, utilizando um Arduino UNO R3 como plataforma de controle. O principal objetivo do projeto foi a comparação entre o desempenho energético de sistemas fixos e rastreados, mostrando os ganhos de eficiência que o rastreamento proporciona na captação de radiação solar. Foram utilizados sensores LDR, servo motores e placas solares acopladas a estruturas móveis com um ou dois eixos. O protótipo foi testado no município de Álvares Machado (SP), e os dados coletados foram analisados para medir a geração de energia em diferentes configurações. Também foram implementados circuitos de controle de carga, reguladores de tensão e monitoramento da carga das baterias. Pelos resultados foi observado que os sistemas com rastreamento, tanto de eixo único quanto de dois eixos, apresentaram desempenho superior em relação ao sistema fixo, comprovando a efetividade do controle automatizado para a eficiência energética.

Estas referências demonstram diferentes possibilidades e componentes para a construção de um rastreador solar visando a eficiência energética dos painéis fotovoltaicos e a sua comparação com os painéis fixos. Como plataforma de controle usam o Arduino UNO R3, sensores como o LDR para captar a maior incidência de luz e a tecnologia da Internet das Coisas (IoT) que automatiza um processo e proporciona a sua visualização por meio de um aplicativo ou plataforma de análise gráfica de dados, reforçando os conhecimentos e “dicas” de materiais usados nesta pesquisa.

3 FONTES LIMPAS DE ENERGIA

O planeta e seus habitantes tem sofrido com o aquecimento global com extremas consequências como as emergências climáticas, inundações, mortes, muitas chuvas, etc, trazendo uma preocupação constante com o futuro das cidades. Essa preocupação se traduz, nos dias atuais, na maneira de extrair a matéria prima para os meios de produção, até a maneira de consumo e o descarte, chamando a isso de sustentabilidade.

“Na Rio-92 consagrou-se o conceito de desenvolvimento sustentável, surgido em 1987, com a publicação do relatório intitulado "Nosso Futuro Comum", também conhecido como o relatório Brundtland” (MMA, 2012, p.1).

A intenção era introduzir a ideia de um modelo de crescimento econômico menos consumista e mais adequado ao equilíbrio ecológico. Com esse raciocínio, os países participantes deste encontro, assumiram o compromisso e o desafio de internalizar, em suas políticas públicas, as noções de sustentabilidade e de desenvolvimento sustentável”.

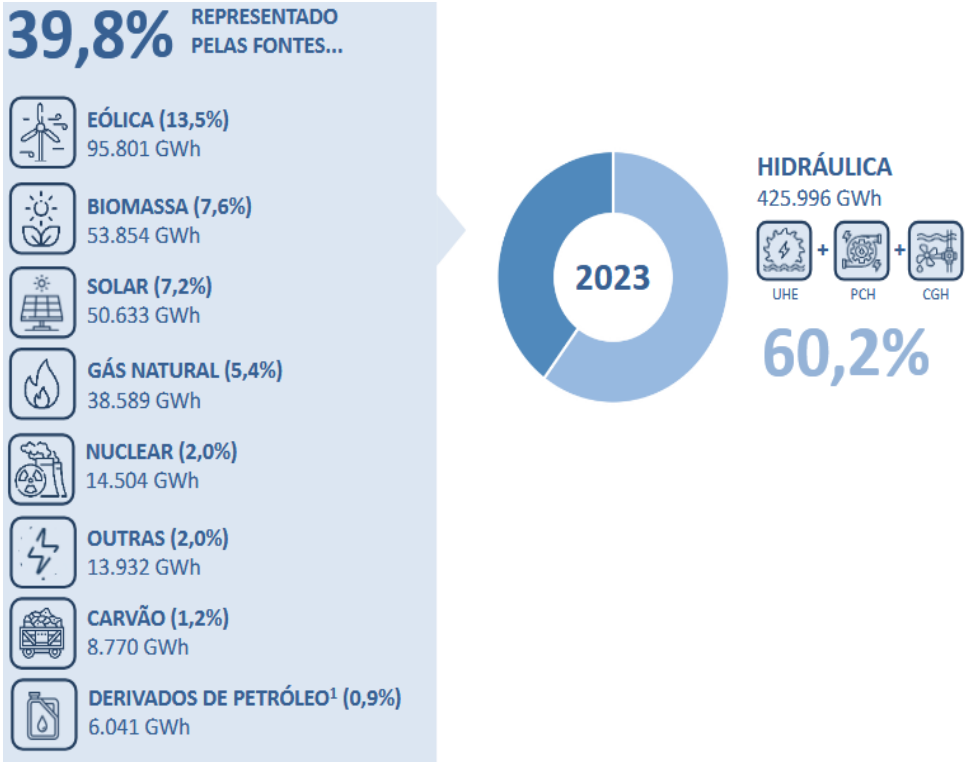
Portanto, toda a cadeia produtiva e de consumo devia ser feita sobre a perspectiva da sustentabilidade. Para isso, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), intitulada como AGENDA 21 e as ODS (plano comum para a paz e a prosperidade das pessoas e do planeta, no presente e no futuro), baseado em 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015).

É interessante observar que o ciclo comercial da energia elétrica no Brasil pode ser gerado por diversos meios como o carvão mineral, o gás natural e o petróleo. Porém, todas essas matérias primas utilizadas na produção de energia elétrica têm em comum, o alto nível de gases de efeito estufa como subproduto e são conhecidos como combustíveis fósseis (matérias primas derivadas de compostos orgânicos, anteriores ao atual período geológico).

Pela visão da sustentabilidade para a geração de energia elétrica, há novas matérias primas com níveis muito baixos de influência no efeito estufa ou quase zero, como as fontes geradoras de energia hidrelétricas, eólicas, de biomassa e solares, sendo que o problema de níveis de poluição dessas fontes de geração de energia está na construção(e como essa construção afeta o meio ambiente) e não no processo de geração de energia (PUCRS, 2025; EPE, 2024).

Segundo a empresa pública federal, Empresa de Pesquisa Energética (EPE) que presta serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME), que trata de estudos e pesquisas de apoio para o planejamento do setor de energia elétrica, petróleo e gás natural (derivados e biocombustíveis), no relatório de 2024 é mostrado que do total de energia gerada no território brasileiro 88,5% dos 226GWh de energia gerados no ano de 2023 são diretamente de fontes renováveis ou limpas. Na Figura 4, é mostrado o volume de produção de energia em GWh (Giga watts hora) distribuído por fonte geradora que foi retirado do Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2024).

Figura 4 - Participação de Fontes na geração de energia elétrica - ano 2023.



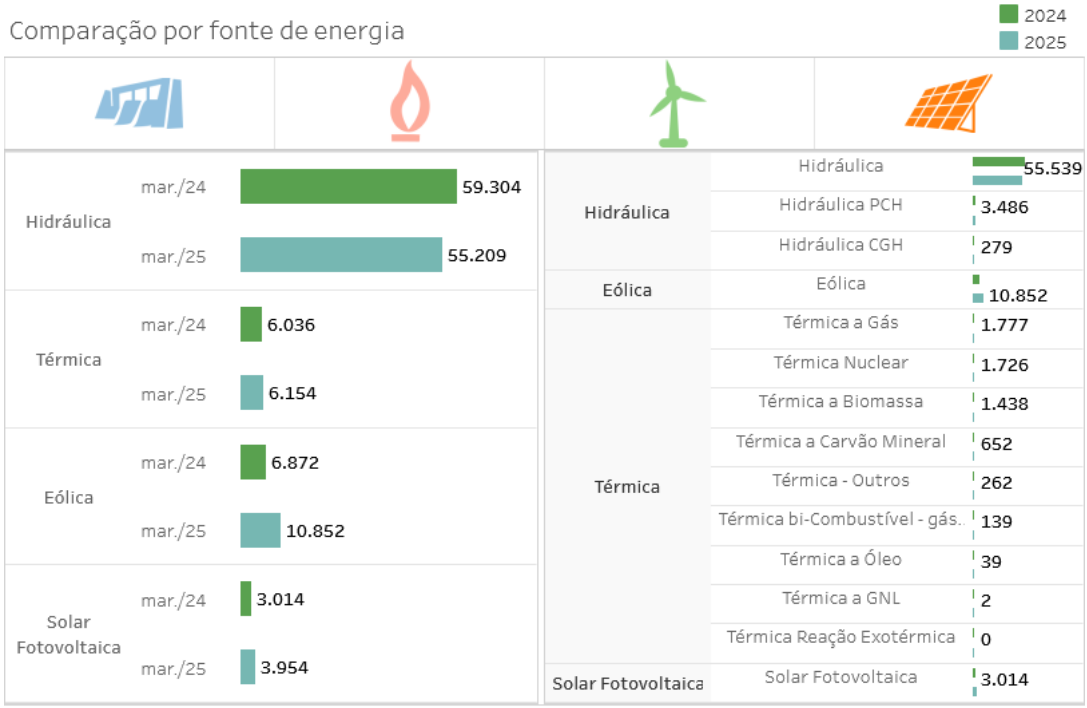
Fonte: Adaptado do anuário EPE (2024).

As fontes de energia de matérias primas disponíveis no planeta são ditas ser renováveis, de modo que, se manipulada adequadamente, tem como subproduto apenas a energia elétrica, sendo devolvida ao meio ambiente sem o fator poluição, tornando-as inesgotáveis, enquanto a energia limpa é a geração de energia que não gera gáses contribuintes para o efeito estufa. Por não gerar subprodutos que influenciam o efeito estufa, a energia gerada de fontes renováveis é considerada energia limpa (EPE, 2024).

Para o ano de 2025, o Brasil apresenta uma matriz geradora de energia composta em 93% de fontes renováveis e limpas, com isso o país é considerado referência mundial, como um dos países com matriz energética mais limpa do mundo.

O gráfico comparativo da análise mensal de geração energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) ano 2024 x 2025 retirado do painel de geração da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), mostrado na Figura 5, apresenta as principais fontes de energia que influenciam o mercado comercial de energia elétrica do país, a hidráulica, térmica, eólica e a solar fotovoltaica (CCEE, 2025).

Figura 5 - Comparando fontes de energia do mês de março nos anos 2024 x 2025.



Fonte: Adaptado do Painel CCEE (2025)

Para se entender a composição de fontes renováveis e transição energética para energia limpa, é importante se abordar as principais fontes geradoras de energia limpa que mais crescem no Brasil, entre essas a geração hidrelétrica de energia, a geração eólica de energia, geração nuclear de energia e geração solar fotovoltáica de energia, tratados a seguir.

3.1. Geração Hidrelétrica de Energia

O Brasil é um país de matriz energética composta em sua maioria por energia limpa, sendo a sua principal fonte de geração as usinas hidrelétricas. Este cenário se desenvolveu pela construção histórica da introdução e expansão da tecnologia hidrelétrica, entre 1883 - 1929.

Começando pela barragem do Ribeirão do Inferno no rio Jequitinhonha em Minas Gerais em 1883, o país teve grande investimento nessa fonte geradora devido a abundância de rios e cachoeiras, em comparação as alternativas fósseis,além da madeira. Este investimento iniciou com a inauguração em 1889 no rio Paraibuna, em Minas Gerais, considerada a primeira usina de grande porte da América do Sul. Mas tinham como objetivo abastecer as indústrias, oficinas, mina ou cidade e o aproveitamento local.

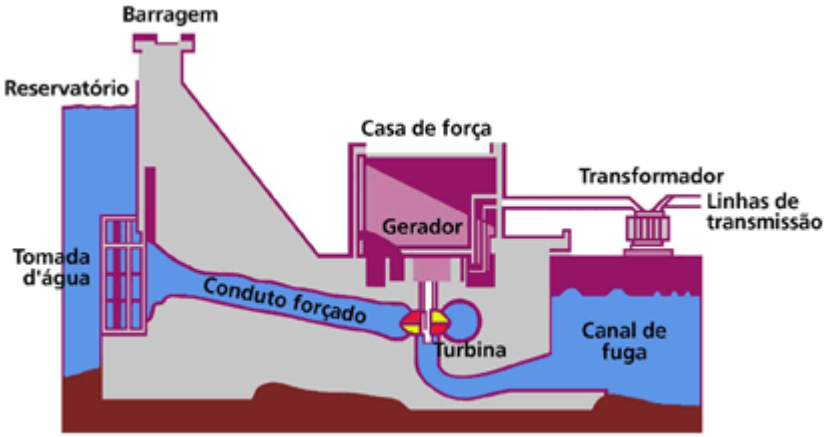
A geração de energia elétrica em usinas hidrelétricas se dá por meio da transformação de energia potencial dos rios, depois de estudos dos seus potenciais hidrelétricos, identificando os locais adequados para a construção da barragem, pela Comissão Geográfica e Geológica criada pelo governo estadual de São Paulo em 1886 ou a Comissão de Forças Hidráulicas do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, a partir de 1920 (LIMA, 2022).

A Resolução Normativa nº 875/2020 classifica as centrais de geração hidrelétrica em:

- Central Geradora Hidrelétrica (CGH) - potência instalada inferior a 5.000kW;
- Pequena Central Hidrelétrica (PCH) - potência instalada entre 5.000kW e 30.000kW, com limite de reservatório de até 3 quilômetros quadrados;
- Usina Hidrelétrica (UHE) - potência instalada acima de 50.000 kW ou entre 5.000kW e 30.000kW se o tamanho do reservatório não se enquadra como PCH (BRASIL, ANEEL, 2020).

Em comum, todas são instaladas em pontos estratégicos onde interceptam um ponto do curso da água, gerando um reservatório que deve estar um nível mais alto do caminho que seguirá, após gerar energia. Nesse sentido, a água é movimentada pela energia potencial gravitacional e esbarra com pás de uma turbina geradora ligada ao eixo do gerador, que transformará a energia mecânica em energia elétrica, como ilustrado na Figura 6 (LIMA, 2022).

Figura 6 - Unidade Geradora Hidrelétrica



Fonte: LIMA (2022).

Segundo o ranking global da Internatinal Energy Agency (IEA), o Brasil ocupa a sexta posição de geração com 677371 GWh, enquanto no ranking regional da América Central e América Latina, ocupa a primeira posição, sendo 60% dessa energia total gerada advinda de hidrelétricas. Destaque para uma análise onde o Brasil aproveita 60% do potencial hidrelétrico estimado em 172 GW, demonstrando enorme potencial ainda de crescimento, caso necessário (IEA, 2025).

3.2. Geração Eólica de Energia

Depois das hidrelétricas, a energia Eólica é a segunda maior fonte geradora de energia elétrica do Brasil, contribuindo com um percentual de 16% dos 213,973MW gerados pelas fontes renováveis, somente no período de março de 2025, de acordo com os dados mais recentes do painel de geração de energia elétrica da CCEE (CCEE, 2025).

O território brasileiro tem geograficamente um enorme potencial de geração de energia, mas dependendo do curso dos fatos, este potencial pode ser submetido a riscos quando analisados sobre um gráfico de oferta e demanda, como a crise do petróleo que motivou o país a buscar alternativas de geração de energia elétrica, para além de combustíveis fósseis, devido a redução de investimentos por parte dos Estados Unidos e ao modelo estatal, acelerando as dívidas do país, gerando esse ciclo retroalimentativo. Este evento originou a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), o CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) e o CNPE (Conselho Nacional de Política

Energética), marcando o início da competitividade do mercado de eletricidade sob regulamentação e fiscalização. Também foi criado no país, novos regimes de comercialização de energia elétrica como:

- Leilões de energia – a precificação considera as características técnicas dos empreendimentos e as fontes alternativas ficam livres das fontes convencionais;
- Ambiente de contratação Regulada (ACR);
- Ambiente de Contratação Livre (ACL).

Essas iniciativas têm como objetivo o aumento de competitividade e garantia de demanda. Enquanto isso, para o planejamento energético integrado brasileiro, surge a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) que é vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME) (EPE, 2024).

Todas essas mudanças serviram apenas para dar apoio a única energia renovável de tecnologia conhecida, mão de obra disponível e capaz de captar investimentos, diminuindo o nível de confiabilidade da malha de geração elétrica do Brasil por causa da dependência de fatores climáticos, sem que o mercado de enegia elétrica tivesse mais competitividade.

Prevendo o risco adquirido devido a possível instabilidade climatológica, surge em 2002 o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), como política de estruturação de mercado com meta de expansão para uso de energia alternativa vendida a uma tarifa-prêmio que fosse atrativa, estabelecimento de cotas de contratação e outros benefícios para driblar as dificuldades e superar a falta de suporte político, dados confiáveis e tecnologia nacional das demais energias renováveis disponíveis. Como resultado, o PROINFA foi responsável por 41 projetos de energia eólica, com potência instalada de 964 MW (ANEEL, 2003).

Essas medidas foram importantes para diversificação de mercado, aumentando a confiabilidade e a concorrência, maior segurança e a queda de custos de produto, além do avanço tecnológico, inserção ao mercado mundial, reconhecimento e outros. O retorno desse investimento foi observado no período de seca vivenciado nos anos de 2013 e 2014, onde as hidrelétricas reduziram a produção e outras fontes também renováveis deixaram de ser alternativa e se tornaram fonte de abastecimento, como a eólica, que utiliza a energia mecânica dos ventos para

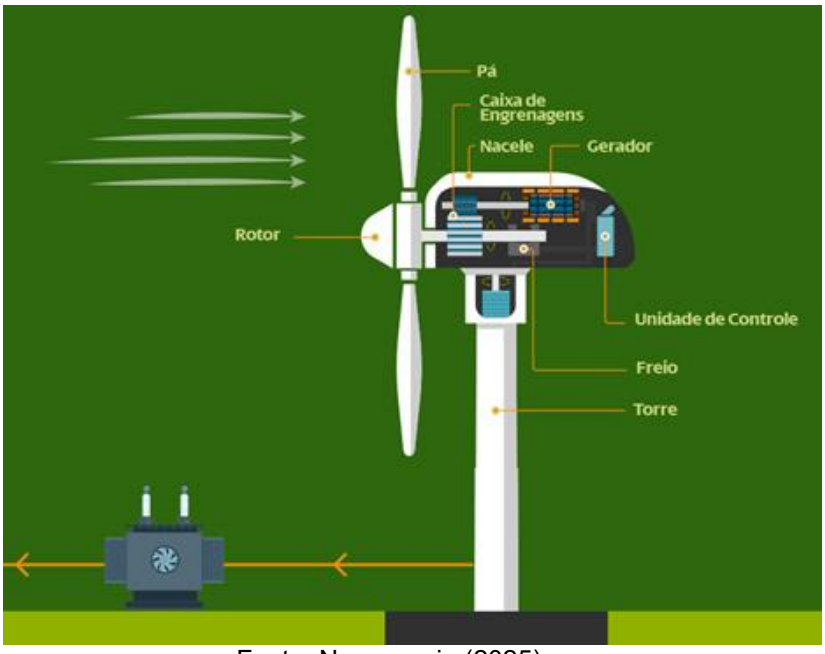
acionar as pás dos aerogeradores, responsáveis por transformar em energia elétrica. Os sistemas eólicos podem ser classificados pelas seguintes categorias:

- Potência Instalada – potência nominal;
- Aplicação – podem operar isolado do Sistema Interligado Nacional (SIN), interligado ao SIN ou híbrido, que é quando está interligado em outras fontes geradoras;
- Alocação do parque eólico - podem ser construídos ao longo da costa marítima ou em terra, denominados Offshore e Onshore, respectivamente (RIBEIRO, 2017).

Estudos geográficos na região (mediante a movimentação de massas de ar ao longo do ano com enfoque no potencial estimado) determinam as escolhas. As instalações são submetidas a adaptações devido a interação de equipamentos metálicos com água para sistemas *offshore*, mas o conceito construtivo de um Aerogerador para ambas as aplicações são os mesmos, conforme mostrado para o Aerogerador na Figura 7.

Figura 7 - Princípio de funcionamento de um Aerogerador

.



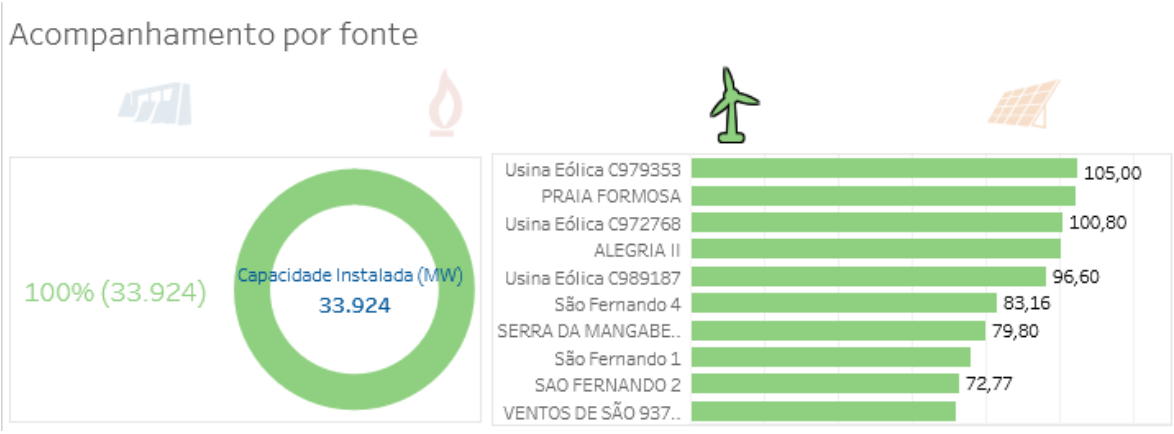
Fonte: Neoenergia (2025)

O vento colide com as pás do Aerogerador, gerando movimento. Esse movimento das pás é transmitido para um multiplicador composto por engrenagens, que realiza o aumento da velocidade de giro que chega no rotor do gerador e assim é

transformada a energia mecânica em elétrica. O gerador é diretamente ligado a um transformador para que a energia vá para o SIN, sem necessidade de um controlador de carga ou inversor, uma vez que há uma unidade de controle integrada ao Aerogerador.

Mesmo superada a crise hídrica e sem perspectiva de recorrência, o setor Eólico tem ganho destaque na geração de energia. Segundo o relatório anual da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEOLICA), o Brasil terminou o ano de 2023 com 123 novos parques eólicos (4,8 GW de nova capacidade) e com 18,79% de crescimento da potência em relação a dezembro de 2022, contando 30,45GW no ano de 2023 (ABEEólica, 2024). Comparando esses resultados com os dados mostrados na Figura 8, referentes a capacidade instalada da geração eólica no período de 03/2025 segundo a CCEE, nota-se o crescimento iminente e sem limites, da energia eólica.

Figura 8 - Painel de acompanhamento de geração de energia eólica em 03/2025



Fonte: Adaptação do CCEE (2025).

3.3. Geração Nuclear de Energia

Usinas nucleares são industrias geradoras de energia elétrica pela transformação da energia calorifica gerada a partir da fissão nuclear nos reatores. Nesse processo não há emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa, o que torna a energia nuclear uma fonte geradora de energia limpa, mas não renovável, pois a matéria prima é o Urânio, que é desgastado no processo de geração de energia. Mesmo que não contribuia para o efeito estufa, a indústria nuclear enfrenta grandes

barreiras para se estabelecer no mercado devido a falta de informação dos elementos nucleares.

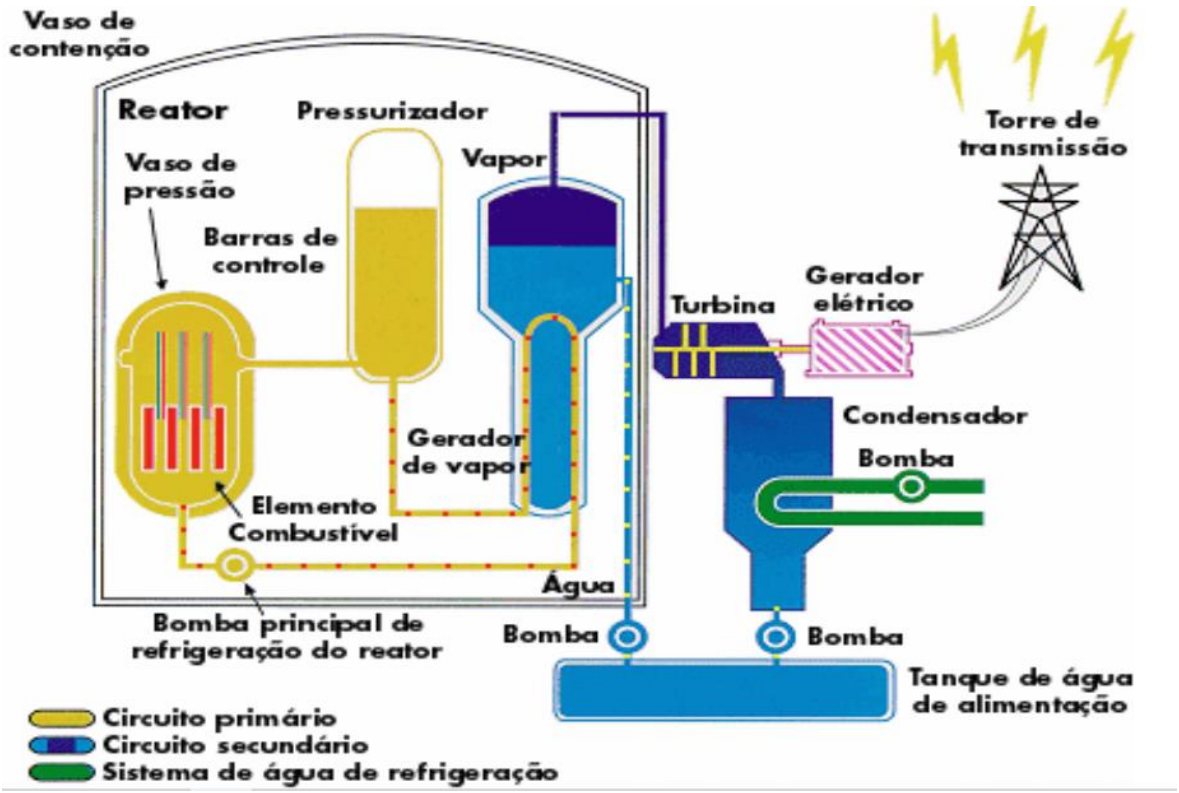
O Brasil tem iniciativas de geração de energia elétrica por usinas nucleares desde a década de 1940, mas ganhou o apoio necessário para crescer em 1953 com o surgimento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob coordenação pioneira do marinheiro, químico e professor Almirante Álvaro Alberto da Motta e Silva. Além da promoção ao desenvolvimento econômico, industrial e científico, a energia núclear no Brasil é estimulada pela vantagem competitiva baseada na geografia local que disponibiliza a sexta maior reserva de Urânio no mundo (CARVALHO, 2021).

O Urânio é um dos elementos químicos capaz de transformar massa em energia. O aproveitamento da energia gerada no momento da trasnformação pode ocorrer por fissão nuclear, como ocorre para o uso de urânio que se dá pela divisão atômica nuclear em particulas ou fusão nuclear, que consiste na união de núcleos leves, produzindo um novo elemeto. O método mais utilizado atualmente, é a fissão nuclear, mas o Urânio não é um material naturalmente físsil, tornando-se necessário o beneficiamento, que consiste na manipulação da concentração dos isótopos de urânio U-238 e U-235 numa amosta. Até chegar nas usinas nucleares, o urânio passa por processamento fabril, chamado de processo de mineração e beneficiamento do urânio (ELETRONUCLEAR, 2025).

Para que a fissão ocorra de maneira ordenada para gerar energia, são utilizados os reatores nucleares, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema de geração de energia em usinas nucleares

.



Fonte: Eletronuclear (2025).

No esquema é mostrado o caminho dos elementos que trocam calor, os componentes geradores de energia elétrica e o sistema de segurança. O elemento combustível (Urânio) aquece a água mantida em pressão 157 vezes maior que a atmosférica, para que não entre em ebulição e a uma temperatura de 320º Celsius, que será mandada para o reator. Em seguida é realizada a troca de calor entre águas dos circuitos fechados no gerador de vapor. O vapor gerado passa por uma turbina geradora e segue para o condensador, onde perde calor para a água do mar e volta para o ponto de contato com o gerador de vapor. A turbina está ligada ao eixo do gerador onde faz a transformação da energia do movimento do vapor para energia elétrica.

O setor de energia nuclear no Brasil tem perspectivas de crescimento. No Relatório Anual da Eletronuclear de 2023 sobre a unidade de Angra dos Reis - RJ descreve que a produção de energia passou de um resultado líquido de R$ 30 milhões em 2022 para R$ 318 milhões em 2023. Também está em processo de construção de uma nova planta denominada Angra 3, com expectativa de ampliação da capacidade

de geração em 1.405 MW, além da extensão da licença das demais plantas em 20 anos a partir de 2024, devido ao projeto de extensão da vida útil de Angra 1 conhecido como Operação de Longo Prazo (LTO) que entregou à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), a terceira reavaliação periódica de segurança de Angra 1 (ELETRONUCLEAR, 2023).

3.4. Geração Solar Fotovoltáica de Energia

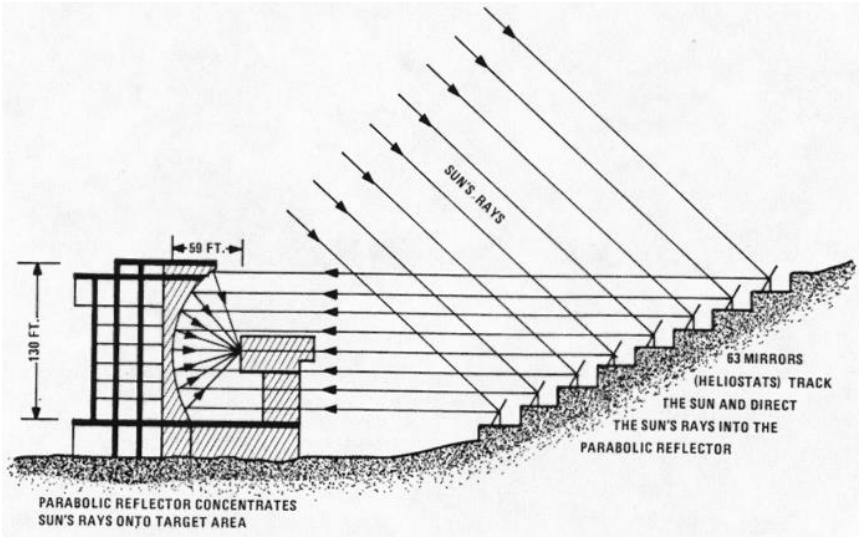
A energia solar é uma fonte limpa e renovável que tem se tornado cada vez mais popular. Para isso, utiliza-se uma placa solar ou painel fotovoltaico (do inglês, Photovoltaic – PV), que capta a luz do sol e a converte em energia elétrica ou térmica, impulsionada pela busca por sustentabilidade e pela necessidade de reduzir o impacto ambiental das fontes de energias tradicionais.

As placas solares são uma solução promissora e acessível dentro do contexto energético atual, marcado pela busca de alternativas limpas e eficientes, cuja aplicação abrange desde instalações residenciais e comerciais até grandes usinas de geração, fornecendo energia renovável e contribuindo para a redução dos custos com eletricidade (CRESESB, 2025).

A geração de energia térmica conhecida como Heliotermica ou Concentração Solar Térmica (CST) consiste no posicionamento de espelhos para concentração de radiação em um único ponto, gerando altíssimas temperaturas, como mostrado o modelo esquemático do Forno Solar de Odeillo na Figura 10.

Construído na França, é operado pelo Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) ou Centro Nacional de Pesquisa Científica da França e está direcionado apenas para pesquisas científicas e tecnológicas em altas temperaturas. O mesmo conta com espelhos heliostáticos que direcionam a luz solar para um refletor parabólico, responsável pela concentração de raios solares em um ponto focal, gerando uma temperatura de até 3000 ºC. Para essa energia térmica ser transformada em energia elétrica é necessário um sistema de transformação de energia – gerador movimentado pela passagem de vapor gerado pelo ponto de alta temperatura (GEORGIA TECH RESEARCH INSTITUTE, 1975).

Figura 10 - Forno Solar de Odeillo.

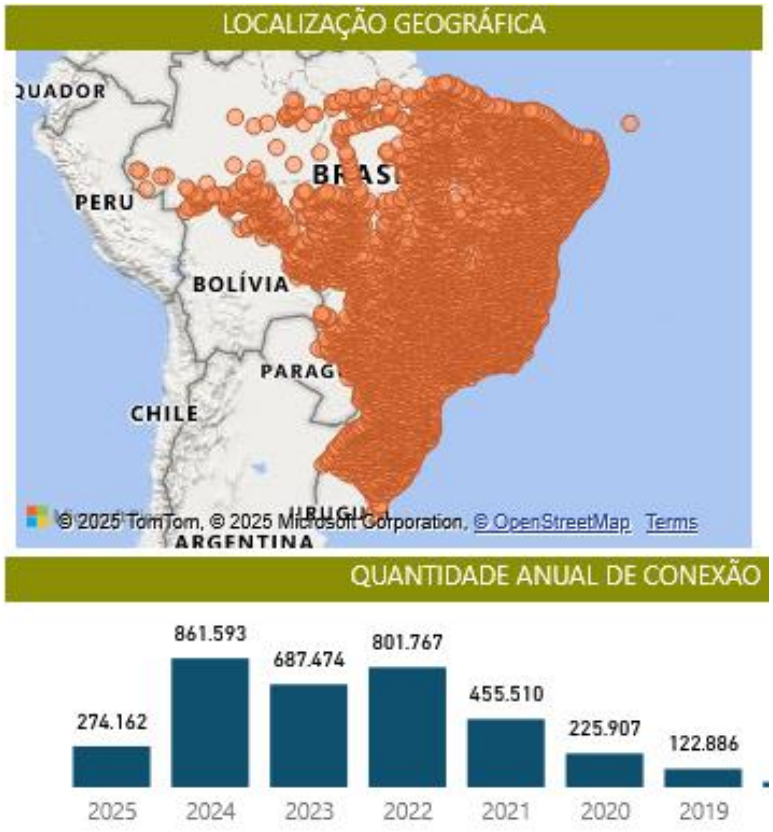


Fonte: Georgia Tech Research Institute (1975).

Na prática, o Brasil não possui uma usina Heliotérmica conectada diretamente ao SIN. Mesmo sendo um país com grande capacidade calorífica, essa fonte de energia vem enfrentando dificuldades comerciais devido ao valor de estabelecimento e políticas relacionadas a viabilização e fiscalização. Porém, seu conceito vem sendo aplicado no aquecimento de água para abastecimento residencial e industrial, resultando em economia no consumo de energia elétrica para essas finalidades (JOHANN, 2025).

Por outro lado, o mercado de energia solar gerada pelas placas fotovoltaicas tem ganho cada vez mais espaço no Brasil, conforme apresentado na Figura 11 no painel interativo da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), do gráfico de quantidade anual de conexão da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD). Somente no primeiro trimestre de 2025 foi ultrapassado os 2 GW de potência, contabilizando uma potência instalada no país de aproximados 34,44 GW. Destaca-se que a energia gerada pela MMGD não é computada pela CCEE, devido ao diferente nicho de fornecimento e classe consumidora, fruto do investimento em políticas relacionadas a viabilização da implementação da geração de energia fotovoltaica (ANEEL, 2025).

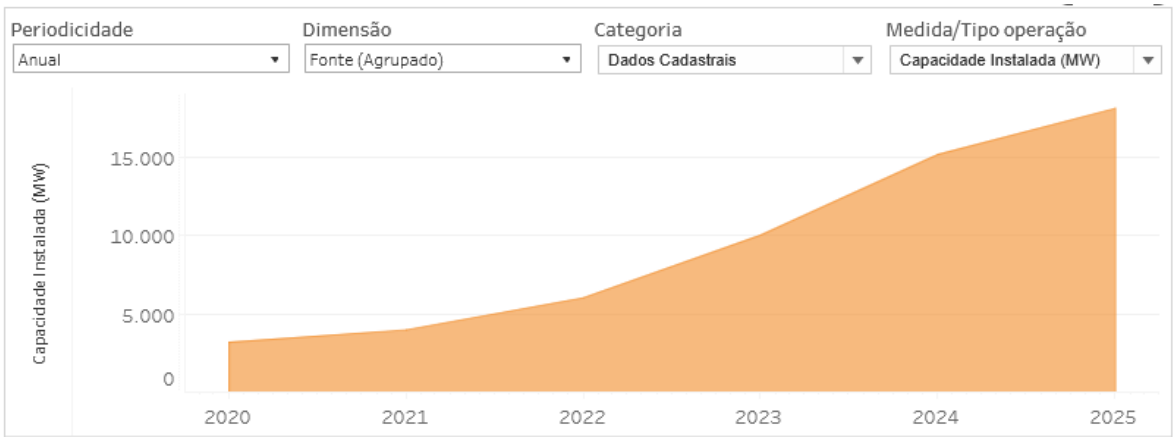
Figura 11 - Localização geográfica e quantidade anual de conexão de 2019 à 2025 para MMGD



Fonte: Adaptado da ANEEL (2025),

Os números referentes a MMGD são expressivos, mas são complementares em relação ao comercio da geração de energia solar fotovoltaica no território nacional. A energia centralizada que é comercializada no âmbito da CCEE também segue uma tendência de crescimento muito elevada nos últimos anos, conforme mostrado no gráfico de análise da Capacidade Instalada de Geração fotovoltaica, período de março de 2020 a março de 2025 apresentado na Figura 12, sendo considerado tanto o Ambiente de Comercialização regulada (ACR), como no Ambiente de Comercialização Livre (ACL) e grandes Autoprodutores de Energia Elétrica (APE). A energia solar fotovoltaica tem grande potencial e não contribui para o aquecimento global, evitando a produção de 50 milhões de toneladas de CO2, apenas no ano de 2024 (ABSOLAR, 2024).

Figura 12 - Painel de análise da geração solar fotovoltaica de 2020 à 2025



Fonte: Adaptado do CCEE (2025)

3.4.1. Painel Fotovoltaico – como funciona

O funcionamento de uma placa solar se baseia no efeito fotovoltaico, um fenômeno físico que converte a energia da luz solar diretamente em energia elétrica. O processo, embora simples, envolve alguns detalhes importantes.

Inicialmente, a luz solar incide sobre as células fotovoltaicas, que são os componentes básicos da placa solar, estas células são compostas por um material semicondutor, tipicamente o silício, que é dopado com impurezas para criar uma junção P-N (positiva-negativa).

Quando os fótons (partículas de luz) da radiação solar atingem as células solares, eles transferem energia para os elétrons do material semicondutor. Essa energia extra faz com que os elétrons se libertem de seus átomos, criando um fluxo de elétrons, ou seja, uma corrente elétrica do tipo Corrente Contínua (CC).

A corrente contínua gerada pelas placas solares é convertida em corrente alternada, uma vez que a maioria dos aparelhos e sistemas elétricos convencionais utilizam Corrente Alternada (CA). Essa conversão é realizada por um dispositivo chamado inversor solar. O inversor transforma a corrente CC em corrente CA, utilizada para alimentar equipamentos elétricos ou ser injetada na rede elétrica (VILLALVA, 2012).

Esse processo de conversão de energia solar em eletricidade é intrinsecamente silencioso, eficiente e sustentável — as placas solares contribuem para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação do impacto ambiental da geração de energia.

3.4.2. Componentes e Tecnologias

As placas solares são compostas por uma estrutura complexa de componentes que operam para realizar a conversão energética. Entre os principais elementos, destacam-se as células fotovoltaicas, que são os elementos ativos responsáveis pela absorção dos fótons da luz solar e sua conversão em elétrons livres, gerando a corrente elétrica. A moldura, geralmente feita de alumínio, proporciona suporte estrutural e proteção contra danos mecânicos. A camada de vidro temperado ou material similar, posicionada na parte frontal, além de permitir a passagem da luz solar, protege as células solares de intempéries e impactos. Neste tópico são abordadas as células fotovoltaicas, tipos, acabamento e conexões.

As células fotovoltaicas são o principal componente da placa solar que converte luz solar em eletricidade, sendo a maioria feita de silício, um material semicondutor eficiente. A dopagem e fabricação definem o tipos de células:

- **Monocristalinas:** compostas por um único cristal de silício, oferecem maior eficiência e durabilidade, sendo ideais para espaços limitados;
- **Policristalinas:** compostas por múltiplos cristais de silício, são mais acessíveis, mas com eficiência ligeiramente menor;
- **TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact):** as células TOPCon utilizam uma camada de óxido ultrafina que reduz as perdas de energia e aumentam a eficiência na conversão da luz solar em eletricidade. São adequadas para regiões com climas quentes e para projetos que buscam o máximo desempenho e durabilidade;
- **HJT (Heterojunção Technology):** combinam silício cristalino e silício amorfo para aumentar a eficiência. O silício amorfo é um tipo de silício não cristalino com estrutura desordenada, empregado em tecnologias de filmes finos. Além disso, essas células apresentam excelente desempenho em locais quentes, superando até mesmo a tecnologia TOPCon;
- **Tandem:** combina silício monocristalino e perovskita, um material promissor composto por diferentes elementos químicos. Essa tecnologia tem potencial para alcançar maior eficiência e inovação na conversão de energia solar.

O vidro temperado protege as células fotovoltaicas contra intempéries e danos físicos, sem comprometer a passagem da luz, contendo um filme antirreflexivo

aplicado sobre sua superfície, para minimizar a perda de luz por reflexão, garantindo uma maior absorção pelas células.

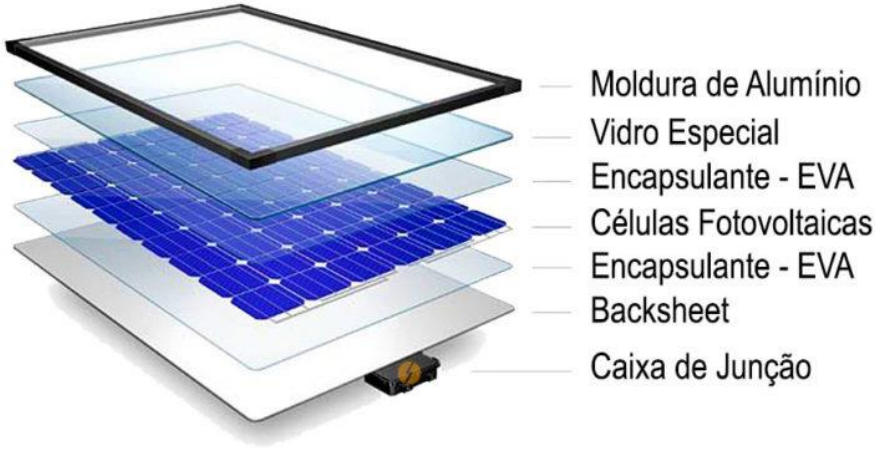
A estrutura de alumínio anodizado fornece suporte e fixação, sendo leve, resistente à corrosão e durável, auxiliando a manter a placa no ângulo ideal para a máxima captação de luz.

Os encapsulantes usados atualmente são feitos de materiais poliméricos como Etileno Acetato de Vinila (EVA), Polietileno Expandido (EP) Elastômero de Poliolefina (POE), protegendo células fotovoltaicas contra poeira, umidade e vibrações, garantindo adesão e reduzindo a perda de luz.

O Backsheet, camada traseira, pode ser transparente ou leitoso, feito de materiais plásticos ou compostos, assim protege as células da umidade e outros danos, além de garantir a segurança elétrica. O backsheet pode ser substituído por vidro duplo em alguns casos (BYD ENERGIA, 2025).

Esses componentes são agrupados e mantidos unidos pela moldura de alumínio anodizado que além de leve, protege a placa contra torções, enquanto o contato dos terminais das strings das células fotovoltaicas que são ligados com o circuito elétrico capaz de circular energia é feito pela caixa de junção, conforme ilustração na Figura 13.

Figura 13 - Componentes da placa fotovoltaica



Fonte: Mrksolar (2025)

A escolha de uma placa solar ideal depende de diversos fatores como, finalidade, espaço disponível, orçamento, condições do local de instalação e principalmente visando ter o máximo desempenho do seu sistema fotovoltaico e de atender às necessidades específicas do projeto.

3.4.3. Comparando os tipos de células fotovoltaicas

Os processos de dopagem e modelo de fabricação da célula fotovoltaica são de extrema importância, pois é quando se define a potência, eficiência e o custo x benefício gerado pela placa solar. Na Tabela 1 mostra-se uma comparação de eficiência entre as diversas tecnologias de células fotovoltaicas.

Tabela 1 – Comparando a eficiência entre tecnologias de células fotovoltaicas.

Material da célula fotovoltaica	Eficiência da célula em laboratório	Eficiência da célula comercial	Eficiência dos módulos comerciais
Silício monocristalino	24,7%	18%	14%
Silicio policristalino	19,8%	15%	13%
Silicio cristalino de filme fino	19,2%	9,5%	7,9%
Silicio amorfo	13%	10,5%	7,5%
Silicio micromorfo	12%	10,7%	9,1%
Célula solar hibrida	20,1%	17,3%	15,2%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
Telureto de cádmio	16,4%	10%	9%
Dados: Fraunhofer /SE, Universidade de Stuttgart, 26th IEEE PVSC, NREL, UNSW, folhas de dados de vários fabricantes. Adaptada de "Energia fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação", Portugal, 2004.			

Fonte: Villalva (2012).

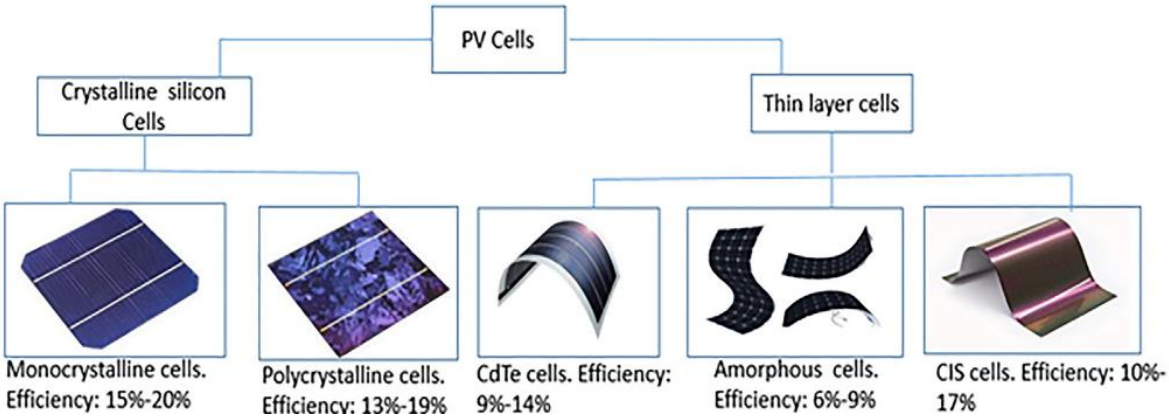
As placas fotovoltaicas fabricadas em Silício Monocristalino são feitas com Silício ultrapuro (cristal único) e usinadas pelo método Czochralski (lingote – wafer – célula), deste modo, possuem um custo maior pela técnica delicada de produção, ainda acessível pelo uso do silício que é abundante. As placas formadas por Silício Policristalino são ainda mais acessíveis, pois o processo de produção não faz seleção de tamanho e orientação dos cristais e a modelagem é por fusão simples que barateia o processo, mas tem uma leve queda de eficiência.

Os modelos de filme fino são disponibilizados em diferentes materias ou estruturas como o Silício Amorfo (a-Si), que consiste no Silício não ordenado (não está em forma cristalina) e essa desordem resulta em menor custo, menor eficiência e qualidade. O Silício Microcristalíno (μc-Si) possui a configuração de cristal, mas em grãos microscópicos. As placas finas de Telureto de Cádmio (CdTe) são compostas de cádmio (Cd) e telúrio (Te) e são os filmes mais finos disponíveis no mercado, mas tem uma composição tóxica por conta do cádmio e de alto custo, por conta do telúrio.

Os filmes de CIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selênio) possuem boa condutividade, mas tem um preço muito elevado (SIRIUS, 2021).

Por fim, o modelo híbrido que combina células cristalinas com células de filme fino em adição a camada intrínseca sem impurezas. Possui preço competitivo e está em desenvolvimento da tecnologia, alguns dos principais modelos são mostrados na Figura 14.

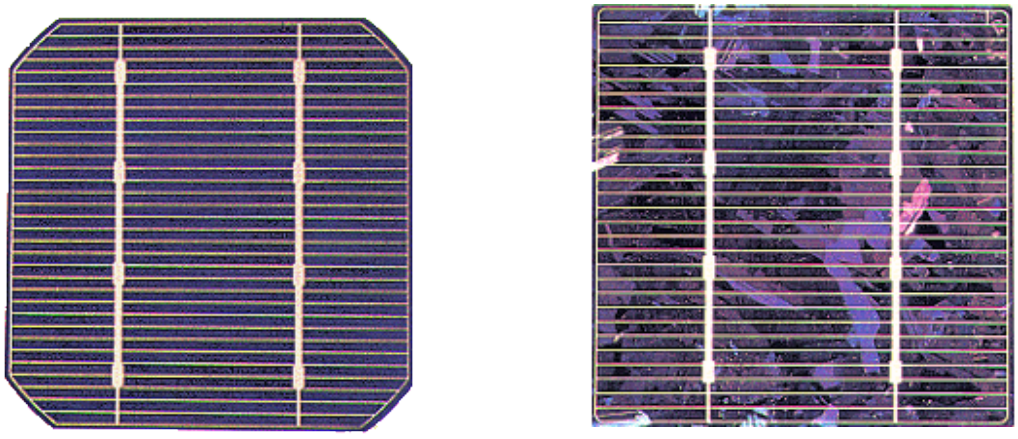
Figura 14 - Células fotovoltaicas em cristal de silício ou camada fina.



Fonte: Th.S et al. (2024).

Atualmente no mercado, devido ao custo x benefício em relação aos investimentos feitos em tecnologias para aprimoramento na produção e eficiência, e atendendendo às regras de sustentabilidade, tem-se que os modelos de células fotovoltaicas mais comercializados atualmente, são as células de silício monocristalino e de silício policristalino, mostradas na Figura 15.

Figura 15 - Células de silício: a) Monocristalino. b) Policristalino.



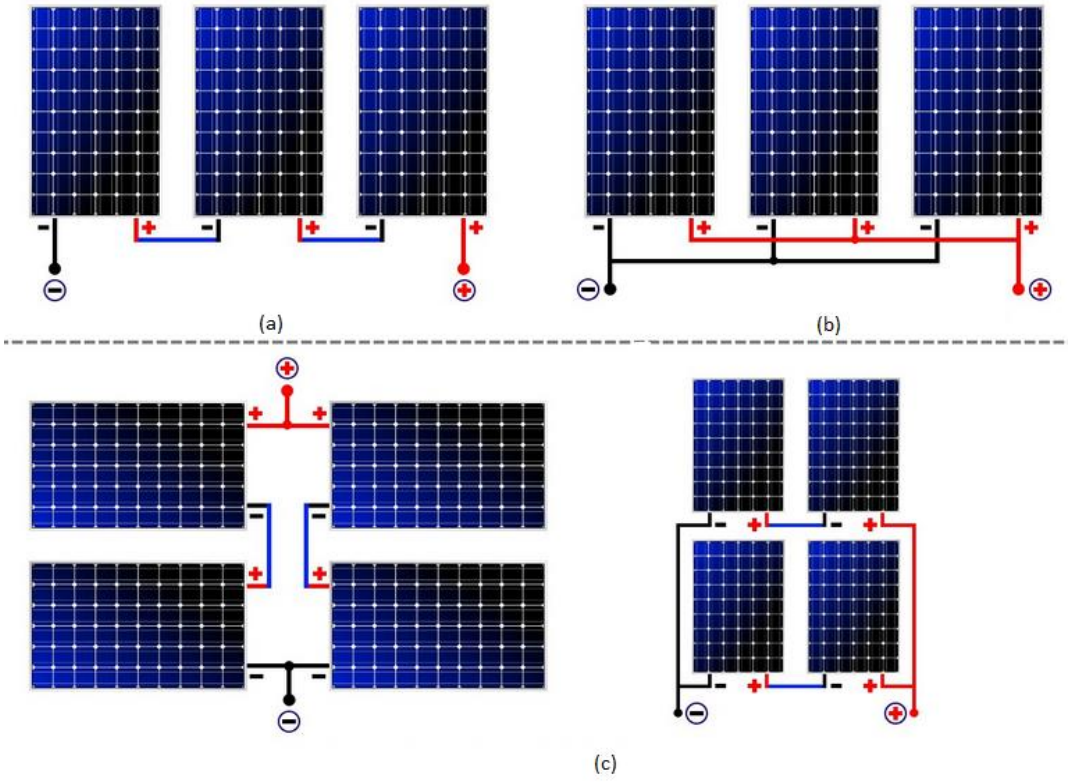
(a) (b)

Fonte: Cresesb (2025)

O que separa o tipo de placa fotovoltaica (Photovoltaic – PV), além dos materiais construtivos são a finalidade de aplicação, interferindo diretamente na montagem do circuito elétrico do módulo e no tipo de ligação dos módulos na montagem estrutural do projeto. As células fotovoltaicas podem ser arranjadas em série ou paralelo, a depender da curva de carga desejada.

A curva de carga é definida pela tensão (V) e corrente (I) no circuito elétrico, podendo ser ajustada pelo tipo de ligação feito entre as células fotovoltaicas. Ao ligar as células fotovoltaicas em paralelo, o circuito é mais seguro e requer diodo by-pass (diodo de livre passagem). Porém, como a ligação em paralelo mantem a tensão das células e soma as correntes, no fim é gerada uma tensão de aproximadamente 0,6 V por célula e a corrente vai depender do número de células. A montagem em série permite a soma de tensões, sem aumentar a corrente, porém é necessário um diodo by-pass de segurança, para que o defeito de um módulo não afete todo o sistema de geração. Para casos muito específicos, existe a possibilidade da conexão série-paralelo (MGF ROBOTS, 2025), Figura 16.

Figura 16 - Modelos de conexões.a) PV em série.b) PV em paralelo. c) PV Série paralelo.



Fonte: Adaptado de MFG Robots (2025).

Todas essas possibilidades construtivas e de configuração das placas fotovoltaicas devem ser consideradas no tipo de instalação a ser feita, podendo ser um sistema de geração de energia Off-Grid, onde o produtor é o próprio consumidor e deve armazenar a energia elétrica gerada em bancos de baterias ou se estará conectado ao SIN como um sistema On-Grid, onde conecta sua geração por um inversor, gerando crédito energético que será descontado em cobranças de um número X de pontos conectados ao SIN ou até vendido para um outro consumidor conectado ao SIN por mercado livre.

Os tópicos abordados colaboram isoladamente e combinados para o crescimento do investimento comercial e em pesquisa em torno da energia fotovoltaica.

3.5. Por que Investir em Painéis Fotovoltáicos

Ao longo deste tópico observou-se como as placas solares transformam a luz do sol em energia elétrica de forma eficiente, oferecendo uma alternativa limpa e econômica às fontes tradicionais, tornando o investimento em placas solares uma decisão inteligente e sustentável.

Para o mercado, o indicador da qualidade e eficiência de um sistema fotovoltaico está no *payback time*, que é o tempo que leva para que o investimento comece a gerar lucros. É estimado que sistemas fotovoltaicos retornem o investimento realizado em um tempo de 2,7 a 6,2 anos dependendo da aplicação, por exemplo, a MMGD residencial 4kWp (kilowatt pico) que possui um *payback time* estimado em 4 anos, para o cenário de 2023 (ABSOLAR, 2023).

O investimento em sistemas fotovoltaicos garantem operacionalmente 25 anos de vida útil, com uma queda estimada de 20% da potência nominal. Mesmo que os componentes permitam que esse tempo seja extendido, o retorno deixa de ser interessante (EVOSOLAR, 2020).

Os sistemas fotovoltaicos tem enfrentado os mesmos desafios de dispositivos tecnológicos ao longo da história, que é a maximização do desempenho e da eficiência, com baixo custo. Um dos conceitos que aborda essa melhora dos sistemas é a eficiência energética, procurando aprimorar a captação de raios solares, tornando importante o entendimento de conceitos geométricos e de interações dos corpos celestes.

3.5.1. Eficiência Energética

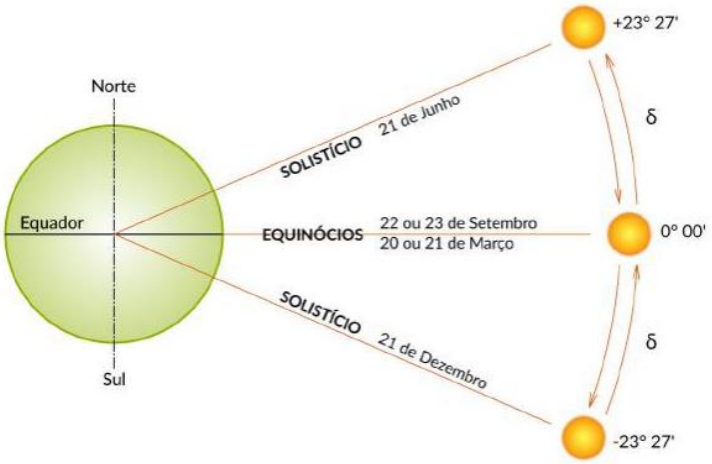
No estudo da eficiência energética na geração por placas fotovoltaicas, deve ser considerado a posição do Sol em relação a Terra e todas as variáveis relacionadas, de forma a definir a angulação e movimentação do painel solar mais adequado para suas coordenadas geográficas ao longo do tempo (dias ou anos).

O Sol é uma fonte de energia inesgotável que fornece energia na forma de insolação para toda a superfície do planeta Terra. A insolação é composta por ondas eletromagnéticas contidas em uma ampla faixa do espectro eletromagnético, na sua maioria composta pelos raios visíveis, ultravioleta e infravermelho. Anualmente, a Terra é irradiada com uma média de 1.366 W/m², conhecida como constante solar, mas é abastecida com 1.000 W/m² devido ao efeito de proteção da atmosfera, sendo que o consumo mundial de energia elétrica é de 620 EJ (Hexa Joule) (ENERGY INSTITUTE, 2024)

Ainda que a energia fornecida pelo Sol seja muitas vezes maior que o consumo total, a distribuição em toda superfície do planeta não é homogênea, com certa variabilidade espacial e temporal que se dá pelos movimentos astrais ao longo do ano e suas interações geométricas, mas pode ser otimizado com a aplicação de conceitos de eficiência energética para sistemas fotovoltaicos, a partir da correção de posicionamento.

O planeta Terra orbita o Sol completando uma volta em um período de 365 dias, descrito em formato elíptico, com estimativas de distâncias máximas e mínimas equivalentes a $1{,}47.10^8$ km e $1{,}52.10^8$ km, respectivamente, movimento conhecido como translação. O planeta Terra também realiza movimento em torno do seu próprio eixo, denominado rotação, que ocorre em um período de 24 horas chamado de dia. A relação dos eixos referentes aos movimentos da Terra é descrita em uma angulação de 23° 27’ denominada declinação solar (δ) (PEREIRA et al., 2017). A combinação desses movimentos resultam nos períodos do ano conhecido como estações, descrito pelo tempo de irradiação na superfície ao longo das 24 h, sendo o equinócios quando o dia e noite tem 12 h e solstícios quando o período de dia é maior ou menor que a noite, conforme apresentado na Figura 17.

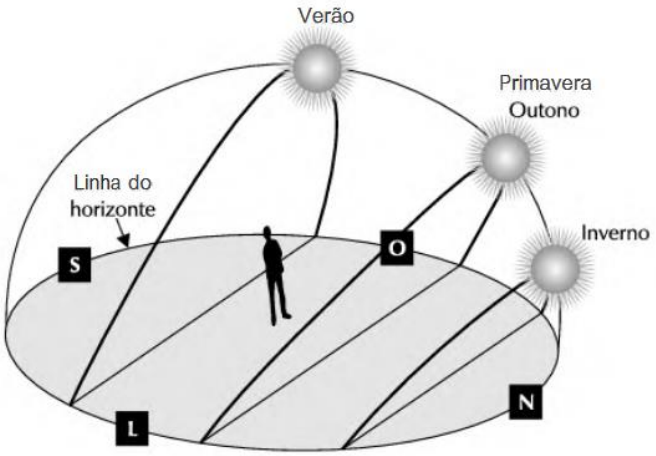
Figura 17 - Movimentos astronômicos.



Fonte: Adaptado de Pereira *et al*. (2017, p 16).

No decorrer das estações, a trajetória do Sol atinge pontos mais altos ou mais baixos com acentuação da magnitude, a depender do ponto de vista na superfície terrestre em relação a sua latitude, como mostrado na Figura 18, o esquema de trajetórias do movimento aparente do Sol, de acordo com as estações.

Figura 18 - Trajetória do movimento aparente do Sol (vista do Hemisfério Norte).



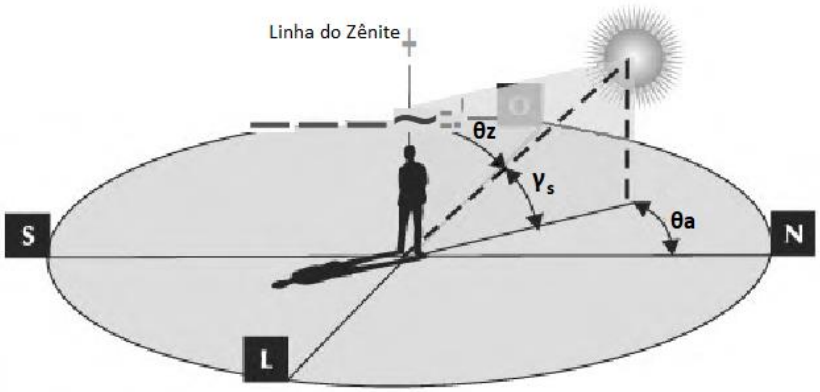
Fonte: Villalva (2025)

A superfície terrestre é orientada em faixas verticais e horizontais, respectivamente, conhecidas como Linha do Equador e Meridiano de Greenwich, que se referem a latitude e longitude, variando ao se aproximar ou distanciar das referenciais zeros. A Linha do Equador é aferida como ponto de 0°de latitude, variando

em até +90° para o Hemisfério Norte e até -90° no sentido do Hemisfério Sul, enquanto o Meridiano de Greenwich como ponto 0° de longitude, varia em até +180’ para o Hemisfério Oriental (Leste) e até -180’ para o Hemisfério Ocidental (Oeste).

A combinação dessas coordenadas geográficas define os pontos específicos na Terra em relação aos Hemisférios, primeiro passo de orientação na Terra em relação ao Sol, mostrado geometricamente os ângulos notáveis da posição do Sol em relação a um ponto da Terra na Figura 19.

Figura 19 - Posição do Sol e ângulos notáveis.



Fonte: Villalva (2025)

Definida uma coordenada geográfica, perpendicular ao plano da Terra imagina-se a Linha do Zênite que é perpendicular ao plano da Terra. No plano horizontal visto do eixo da linha do Zênite, se forma um ângulo do norte geográfico até o eixo do Sol (paralelo a linha do Zênite), que é denominado ângulo azimutal (θa). No plano vertical, da linha do Zênite descendo até o centro do Sol, encontra-se o ângulo Zenital Solar (θz) e o seu complementar até o plano horizontal, ângulo da Altura Solar (γ_S) (VILLALVA, 2025).

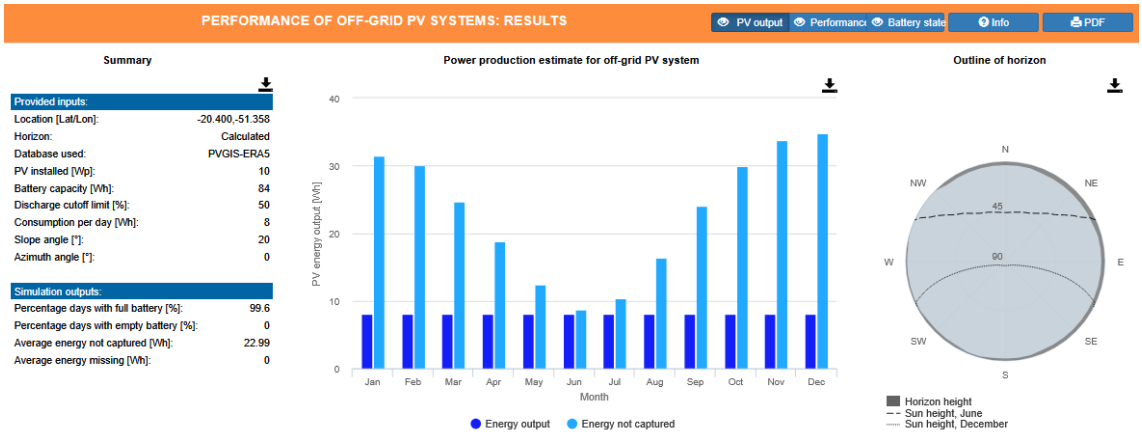
Com a expansão do estudo da implementação da energia fotovoltaica, foi criado o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) uma Instituição Brasileira criada pelo convênio entre o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e o Ministério de Minas e Energia, com apoio do Ministério da Ciência e Tecnologia, assim como foi criado o Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), plataforma desenvolvida pelo Centro Comum de Pesquisa da Comissão Europeia, ambos são ferramentas para o planejamento, análise e dimensionamento de sistemas de energia solar.

Definido no mapa as coordenadas, o painel fornece a configuração dos dados de:

- Potência nominal da placa instalada;
- Capacidade nominal da bateria;
- Limite mínimo de descarga da bateria;
- Consumo real diário;
- Inclinação da placa;
- Azimut.

Configurado um sistema para os dados de construção e posição utilizados, no painel de resultados do (PVGIS) é mostrado a capacidade anual do sistema e o que está deixando de produzir, mediante a capacidade fornecida pelo Sol para aquele ponto geográfico, Figura 20.

Figura 20 - Painel de resultados de performance e capacidade das coordenadas geográficas do PVGIS.



Fonte: Adaptação de Joint Research Centre (2025)

No site do CEPEL também fornece dados de capacidade de geração sobre uma coordenada geográfica brasileira para sistemas no plano horizontal e com adaptação, a partir dos conceitos geométricos indicados anteriormente, apresentando também índices de maior e menor média anual, como mostrado no painel de resultados aplicado para uma coordenada geográfica igual a utilizada neste projeto, Figura 21.

Figura 21 - Resultados da CEPEL para coordenadas geográficas desta pesquisa.

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Ilha Solteira
Município: Ilha Solteira , SP - BRASIL
Latitude: 20,401° S
Longitude: 51,349° O
Distância do ponto de ref. (20,399° S; 51,357° O) :,9 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]												
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
☑	Plano Horizontal	0° N	5,86	6,03	5,49	4,95	4,17	3,83	4,02	4,97	4,91	5,60	5,98	6,35	5,1
☑	Ângulo igual a latitude	20° N	5,34	5,76	5,62	5,52	5,02	4,80	4,96	5,78	5,17	5,47	5,51	5,69	5,3
☑	Maior média anual	19° N	5,38	5,79	5,63	5,51	4,99	4,76	4,92	5,75	5,17	5,49	5,55	5,73	5,3
☑	Maior mínimo mensal	27° N	5,07	5,56	5,55	5,60	5,21	5,04	5,18	5,93	5,15	5,31	5,25	5,36	5,3

Irradiação Solar no Plano Inclinado -Ilha Solteira-Ilha Solteira, SP-BRASIL

20,401° S; 51,349° O

Fonte: adaptação de Cresesb (2025).

4. HARDWARE E SOFTWARE

Neste tópico são descritas as tecnologias de hardware e software utilizados no rastreador solar e na supervisão da coleta de dados. Inicia-se pela plataforma de controle, sensores e atuadores, e a placa solar, em seguida são apresentados os software utilizados no projeto.

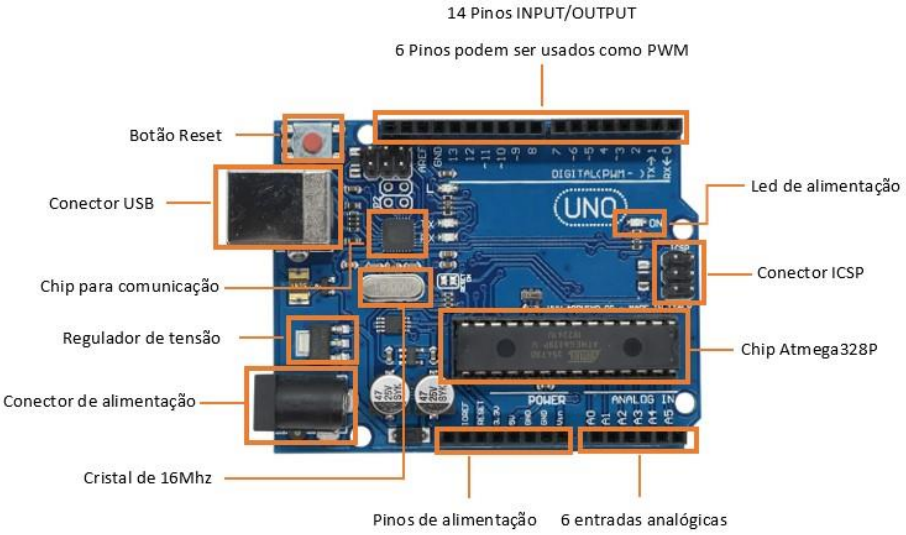
4.1. Plataforma de controle

Atualmente são inúmeras as plataformas de controle que estão disponíveis no mercado de componentes eletrônicos, dentre estas têm-se a família de Arduinos, Raspberry Pi, ESP8266, ESP32, enfim, com os mais variados recursos e preços, de forma que é necessário optar pelas características que mais se adaptam a aplicação desejada. como, frequência de operação, saídas digitais e analógicas, comunicação *wifi,* fácil manuseio e preço.

As placas de Arduinos entre eles o Arduino Uno R3 (ATmega328P), Arduino Nano (ATmega328P), Arduino Mega 2560 (ATmega2560), Arduino Leonardo (ATmega32u4), Arduino Micro (ATmega32u4) e outros, são considerados microcontroladores pois não tem integrados interface homem máquina e armazenamento em massa, como os microprocessadores. Os microntroladores possuem processamento e interfaces para acoplamento de sistemas externos, de maneira simplificada e acessível. Comumente as placas Arduino já possuem integrados microcontrolador, pinos digitais (I/O), pinos analógicos, pino GND, pino 5V / 3.3V, conector USB, botão de reset, LED embutido para testes rápidos, regulador de tensão e cristal oscilador.

A família Arduino é uma das mais utilizadas por ser uma plataforma de computação física de código aberto destinada para a criação de pequenos projetos que funcionam de forma autônoma ou em colaboração com outros softwares e um computador, sendo a mais simples a Arduino UNO R3, mostrada na Figura 22.

Figura 22 - Arduino UNO R3



Fonte: STA Eletrônica (2025).

Com o próposito de expandir as funcionalidades das placas Arduino, os seus idealizadores disponibilizam para aquisição as shields, que são placas *plug and play* com acessórios inteligentes tais como, Ethernet, *WiFi*, Bluetooth, LCD, e outros, que se encaixam diretamente na placa Arduino como mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Shields para as placas Arduino

Fonte: Própria do autor

A placa Arduino UNO é a líder de vendas de toda a família Arduino, devido a sua facilidade para iniciantes a eletrônica e programação. Ainda que muito simples conta com robustez para diversas aplicações e por isso é amplamente utilizada no desenvolvimento de projetos eletrônico ou eletromecânico como sistemas de automação, robótica, circuitos eletrônicos interativos educacionais, sistemas de coleta de dados, prototipagem e muitos outros (ARDUINO AG, 2025). Resume-se suas especificações no Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 – Especificações técnicas da placa Arduino UNO R3

Componentes	**Especificações**
Microcontrolador	ATmega328p
Velocidade do clock	16 MHz
Tensão de funcionamento	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7 V – 9 V
Saídas digitais I/O	14 Pin (6 saídas PWM)
Saídas analógicas 3.3V	6
Corrente DC por saída digital I/O	40 mA
Corrente DC por saída analógica	50 mA
Flash memory	32 Kb
SRAM	2 Kb
EEPROM	1 Kb

Fonte: Própria do autor

O software oficial de programação é o ARDUINO IDE – Arduino Integrated Development Environment (Ambiente de Desenvolvimento Integrado do Arduino) que permite escrever código, compilar, enviar e ainda monitorar. Por se tratar de um open source (código aberto), possui vasta biblioteca de componentes e módulos físicos, além de inúmeros exemplos salvos ou online e um portfólio vasto de projetos.

O Arduino IDE é programável em linguagem C++, extensão da linguagem C, tendo a eficiência e controle de baixo nível da linguagem, com acréscimo de recursos de programação orientada a objetos, possuindo alto desempenho, crie algoritmos, manipule dados e controle o hardware diretamente. Por ser uma linguagem de propósito geral, tem funcionalidade nas áreas de sistemas operacionais, sistemas embarcados, softwares científicos, banco de dados e outros (STROUSTRUP, 2013).

4.2. Sensores

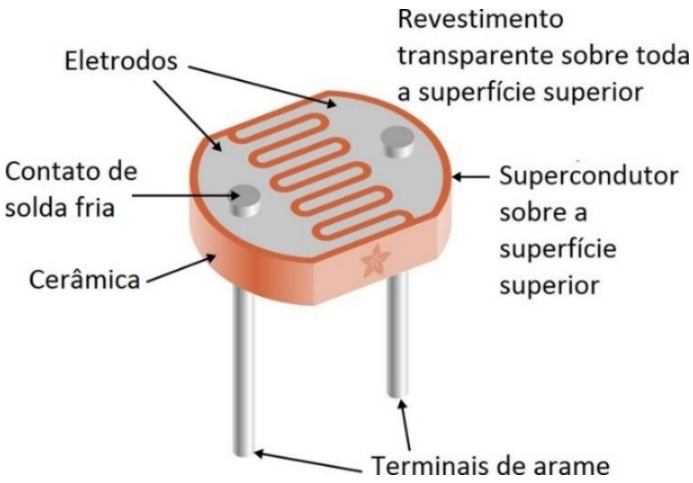
De interesse deste trabalho são utilizados dois sensores, o fotosensor LDR e o Módulo INA 219 descritas a seguir, suas características.

4.2.1. Sensor LDR

O sensor LDR (do inglês "Light Dependent Resistor") significa "sensor de luz dependente" ou "resistor dependente de luz", um resistor especial composto por material fotossensível, que varia sua resistência elétrica de acordo com a incidência de luminosidade ao qual é exposta sua superfície. A resistência do sensor é inversamente proporcional ao fator luminosidade, assim, quanto maior a incidência de fótons sobre a superfície do sensor LDR, menor a resistência e vice-versa.

A superfície superior do componente é construída de material semicondutor de elevada resistência elétrica e sensível a luz visível como Seleneto de cádmio (CdSe), Sulfeto de cádmio (CdS) ou Sulfeto de chumbo (PbS). Este material está depositado em um substrato isolante como a cerâmica ou poliéster, revestido por um material transparente para proteção, mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Estrutura física de um LDR



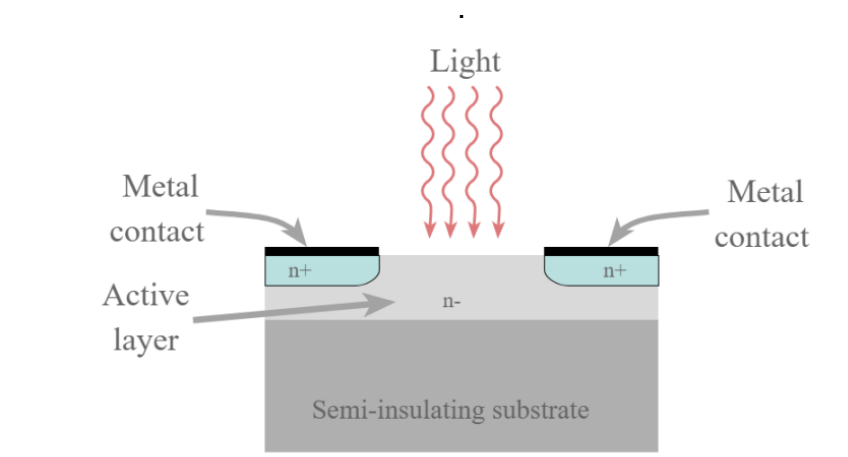
Fonte: Própria do autor

A potência e a resistência desejada são fatores que determinam o formato em ziguezague do material metálico do componente e a variação da resistência é obtida com diferentes graus de intensidade luminosa, enquanto a corrente máxima suportada pelo componente depende da superfície de contacto com os eletrodos do material e da área exposta à luz.

O material do LDR tem frequência suficiente para que os fótons que incidem sobre o semicondutor liberem elétrons e como consequência da maior quantidade de elétrons livres, tem-se que o material apresenta menor resistência, assim possibilita a sua condutividade, quando passa mais elétrons pela camada ativa (n-) de um contato de metal (n+) para o outro como demonstrado a seguir na Figura 25.

Figura 25 - Estrutura do fotoresistor

.



Fonte: Blog Raisa (2023).

O sensor LDR é considerado um componente eletrônico passivo (uma vez que não altera a intensidade de corrente ou a tensão de um circuito, não gera energia), que possui apenas dois terminais sem polaridade definida e é bilateral, funcionando tanto em corrente contínua como em corrente alternada. É preciso atentar-se que é um dispositivo lento um delay entre o início de incidência de luz para a resposta entre os terminais. Tem sido aplicado em projetos como, acendimento automático de lâmpadas, robôs seguidores de linhas, controle de luminosidade em plantações agrícolas e outros projetos (USINAINFO, 2025; BLOG RAISA, 2023). Segue no Quadro 2, um resumo das suas especificações técnicas.

Quadro 2 – Especificações técnicas para o LDR.

Componentes	Especificações
Resistência na Luz	5–10 kΩ (sob ~ 10 lux)
Resistência no Escuro	≥ 1 MΩ
Tensão Máxima	150 VCC
Corrente Máxima	100 mA
Potência Máxima	100 mW
Tempo de Resposta	20 ms – 30 ms
Temperatura de Operação	- 30°C até + 70°C

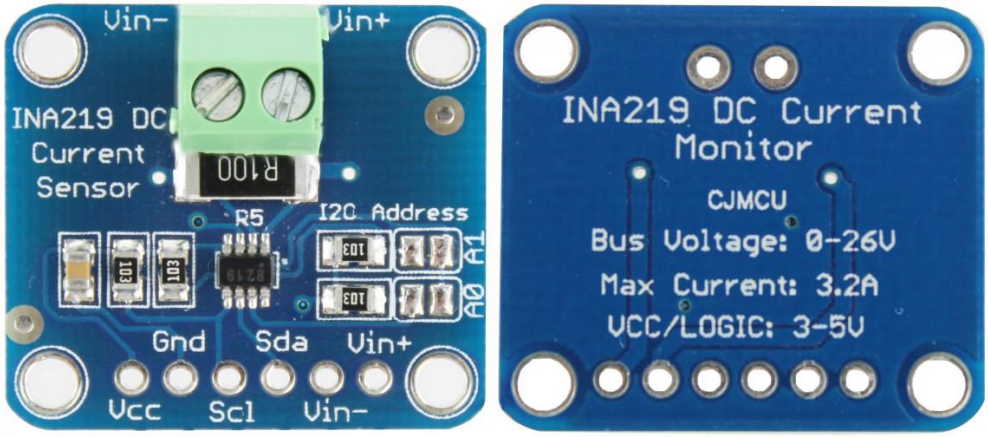
Fonte: Própria do autor

4.2.2. Sensor INA 219

O módulo INA 219 é um sensor bidirecional de corrente, tensão e potência, muito utilizado em projetos com plataformas embarcadas como o Arduino, substituindo o multímetro para monitoramento de circuitos CC (Corrente Contínua).

Este sensor é constituído de uma placa simples com poucos terminais a serem ligados, possuindo entradas e saídas Vin+ Vin- por onde passam a energia gerada pela fonte geradora, VCC e GND para alimentar o módulo e os pinos de comunicação I2C (Inter-Integrated Circuit), placa apresentada na Figura 26.

Figura 26 - Sensor de corrente e tensão – módulo INA 219.



Fonte: UsinaInfo (2025)

O módulo INA 219 utiliza a comunicação I2C para isso possui os pinos Scl (Serial Clock Line) e Sda (Serial Data Line). O controlador que opera como mestre, gera clock pelo Scl e define os bits de endereço e comandos, enquanto os dados são transportados pelo Sda, como a corrente obtida na queda de tensão no resistor shunt interno entre Vin+ e Vin-, tensão obtida da comparação de Vin- em relação ao GND e a potência pelo cálculo da tensão versus corrente (USINAINFO, 2025; AMARAL, 2025).

Com estas características este dispositivo é utilizado em projetos que fazem o monitoramento de baterias (carga e descarga), controle de consumo em motores CC, sistemas solares, monitoramento de fontes de alimentação, projetos IoT com leitura de energia e outros. No Quadro 3 tem-se um resumo das suas especificações técnicas.

Quadro 3 – Especificações técnicas para o módulo INA 219.

Componentes	Especificações
Tensão de Operação	3 V – 5 VDC
Tensão de Barramento	0 V ~ 26 V
Corrente Medida	0 A ~ 3,2 A
Interface	I2C – endereçável
ADC(Conversor Analógico para digital)	12 bits
Margem de erro	± 0,1 mA ~ ± 0,8 mA

Fonte: UsinaInfo (2025).

Além de ser um sistema inteligente, também é versátil, possibilitando que mesmo um microcontrolador limitado por entradas físicas como o Arduino UNO que so permite comunicação I2C pelos pinos analógicos A4 e A5, possam receber mais de um sensor INA219 simultaneamente, apenas configurando o endereçamento fisicamente nas portas A0 e A1 de cada dispositivo e os referenciando devidamente na programação (14CORE, 2025). Os endereços podem ser alterados para 0x41 (soldagem de A0), 0x44 (soldagem de A1), 0x45 (soldagem de A0 com A1) e de fábrica o endereço 0x40, sem soldagem.

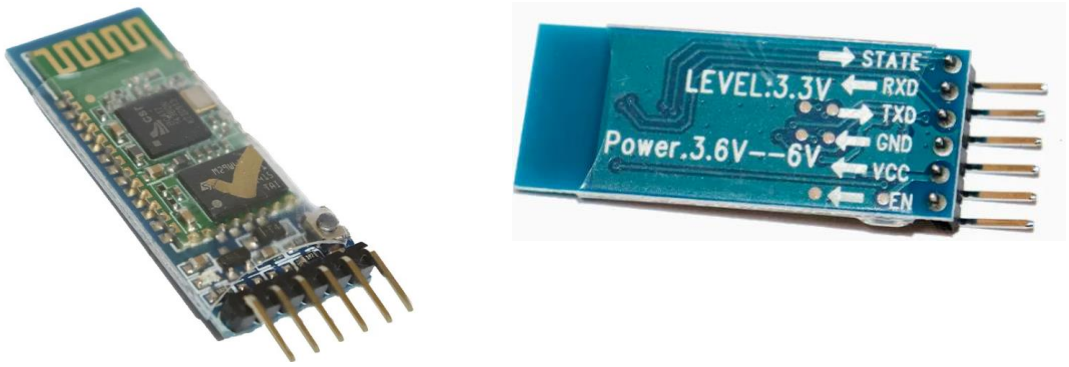
4.3. Módulo *Bluetooth* HC-05

O módulo HC-05 é um dispositivo que permite comunicação serial via Bluetooth, compatível com plataformas de prototipagem como a Arduino.

Este dispositivo realiza comunicação de dados TTL (Transistor – Transistor Logic), enviando e recebendo dados em nível TTL, que são sinais digitais em nível lógico padrão de comunicação. No HC-05 é utilizado a comunicação serial TX (que transmite dados) e RX (que recebe dados) a um *baud rate* (taxa de bits por segundo) a ser definida na comunicação (geralmente 6900) a um nível lógico 0 = 0V e o nível lógico 1 (3.3V). Como o Arduino opera em 5V é necessário a adequação da tensão (por exemplo, um divisor de tensão), para que o dispositivo não seja danificado quando alimentado o pino RX.

Fisicamente, o HC-05 disponibiliza para conexão os pinos STATE (estado do Bluetooth), RXD (Receive Data – recebe dados), TXD (Transmit Data – envia dados), GND (Ground - terra), VCC (Alimentação – tolerância de 6V) e EM (Enable/Key Mode – ativa o modo AT), conforme monstrado na Figura 27.

Figura 27 - Módulo HC-05.



Fonte: Usinainfo (2025).

O módulo HC-05 é uma atualização que permite a operação do microcontrolador ao qual será acoplado em modo Master (mestre) enviando dados ou Slave (escravo) recebendo dados, que o torna versátil e com grande aplicabilidade, simplificando circuitos, agregando valor e acelerando processos (USINAINFO, 2025). As especificações técnicas resumidas do componente Hc-05 são apresentada na Quadro 4.

Quadro 4 – Especificações técnicas para o HC-05.

Componente Versão V2.0 + Edr	**Especificações**
Tensão de Operação	3 V – 6,6 V
Nível de Sinal	3,3 V
Baud Rate	1200 – 1382400 bps (9600 padrão)
Cobertura de Sinal	10 m
Frequência	2,4 GHz ISM
Senha Padrão (PIM)	1234

Fonte: Usinainfo (2025)

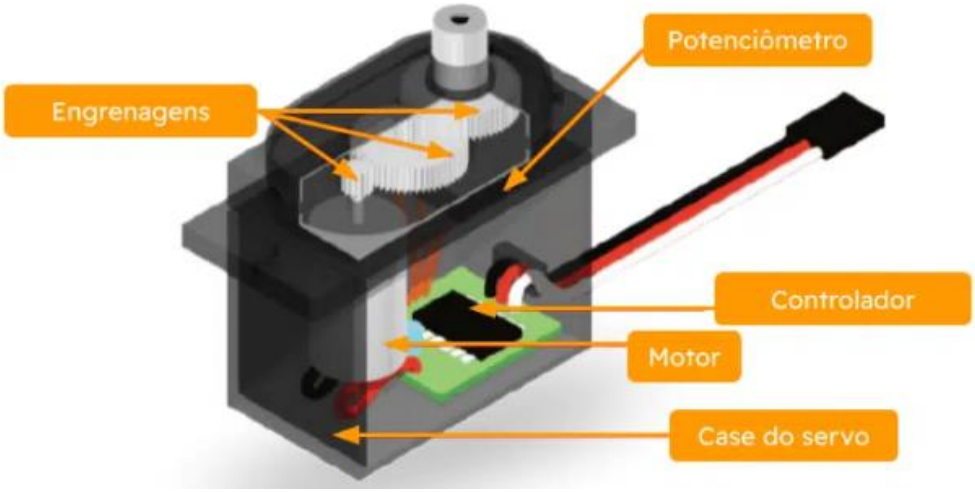
O módulo utiliza comunicação Transmissor-Receptor Assíncrono Universal (UART), que realiza a transmissão e recepção de dados seriais de forma assíncrona entre os dispositivos conectados fisicamente. Na programação deve ser inclusa a biblioteca (SoftwareSerial.h) e devidamente declaradas as pinagens. Já a comunicação entre dispositivos sem ligação física acontece por rádiofrequência, na faixa de 2,4 GHz, através de uma porta serial virtual (COM).

4.4. Servomotor

É um motor eletromecânico que converte energia elétrica em movimento mecânico controlado. Os servomotores são projetados para realizar movimentos precisos e controlados, com capacidade de ajustar sua Posição, Velocidade e Torque em resposta a sinais de controle, diferentemente dos motores convencionais, que giram quando alimentados com eletricidade.

São compostos por um motor de corrente contínua (DC) ou de corrente alternada (AC), um conjunto de engrenagens para reduzir a velocidade e aumentar o torque, um potenciômetro ou outro tipo de sensor para *feedback* de posição, e um circuito de controle eletrônico. Esta realimentação constante sobre a posição do motor permite que o circuito de controle ajuste a rotação do motor para atingir a posição desejada, conforme representação construtiva apresentada na Figura 28.

Figura 28 - Representação construtiva para os servomotores.



Fonte: Makerhero (2024).

Sendo o Motor – o que movimenta as engrenagens e o eixo principal, podendo ser AC (Corrente Alternada) quando é necessário alta potência e velocidade ou DC (Corrente contínua) quando exige acuracidade da velocidade ou torque, em baixa velocidade;

O Potenciômetro ou sensor de feedback – entre o eixo principal e o controlador é um dispositivo de resistência variável que está para o sistema como sensor de posição angular do eixo, para que forneça *feedback* ao controlador, pode também ser usado um encoder.

Controlador - o controlador eletrônico é o cérebro do sistema. Ele recebe sinais de controle externos, geralmente na forma de um pulso de largura modulada (PWM ou em inglês,Pulse Width Modulation), que especifica a posição desejada do motor. O controlador compara a posição atual (fornecida pelo sensor de feedback) com a posição desejada e calcula o erro;

Circuito de Correção - baseado no erro calculado, o controlador ajusta a alimentação elétrica do motor, corrigindo sua posição. Esse ajuste contínuo permite que o motor atinja e mantenha a posição desejada com alta precisão (GUSE, 2024).

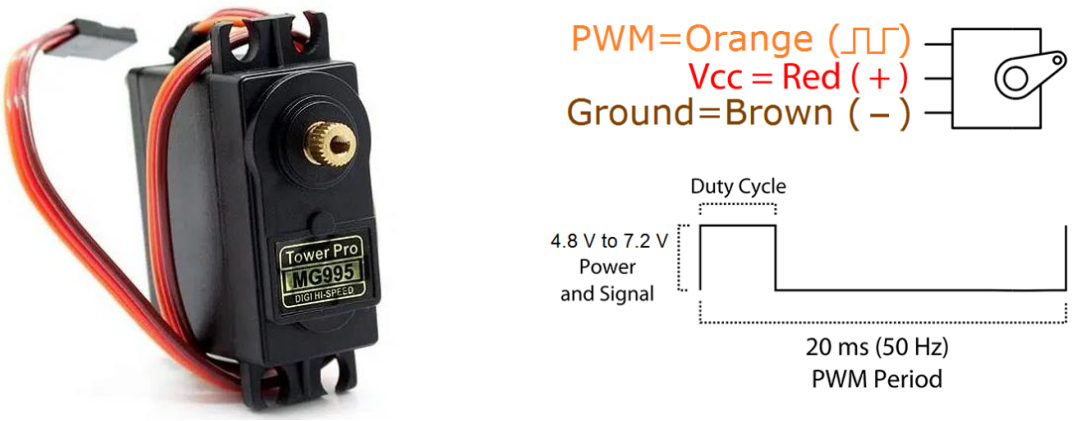
A Modulação por Largura de Pulso (PWM), é uma técnica que permite controlar a potência fornecida a um dispositivo eletrônico ajustando a largura dos pulsos de um sinal digital. Ao invez de ligar ou desligar o dispositivo, como num sinal digital puro, o PWM permite variar a tensão média aplicada ao dispositivo, controlando a quantidade de energia fornecida.

Servomotores são utilizados em aplicações que requerem precisão, controle e repetibilidade, devido à sua capacidade de ajustar e manter a posição, velocidade e torque, por isso muito utilizados na robótica, sistema de automação industrial, aeromodelismo, etc.

4.4.1. Servomotor MG995

O servomotor MG 995 Tower Pro (High Speed Servo Actuator) têm as conexões de alimentação,VCC, aterramento, GND e de sinal, PWM que é responsável pela realimentação da malha de controle, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Servomotor MG995 e conexões.



Fonte: Makerhero (2024).

Este modelo tem precisão de posiciocionamento, alto Torque e engrenagens metálicas, portanto mais resistente. Todas as suas engrenagens são metálicas, possui faixa de rotação de 180 graus e seus conectores são compatíveis com padrão Futaba, Hitec, Sanwa, GWS e outros.

A correção da posição feita pelo potenciômetro que é um resistor variável, no caso do servomotor MG995, gera uma tensão analógica que está relacionada diretamente a posição angular do eixo, podendo variar de 0V = 0º até 7.2V = 180º. Enquanto isso, o controlador é configurado em malha fechada, recebendo as variáveis de posição desejada em PWM externo de 20 milissegundos e a posição real em medida de tensão vinda do potenciômetro. Estes dois sinais são interpretados em um valor de referência e decide por um incremento ou decremento de posição, caso a comparação seja de um valor diferente de zero (GUSE, 2024; USINAINFO, 2025). A seguir são resumidas no quadro 5, as especificações técnicas do servomotor MG995.

Quadro 5 – Especificações técnicas para o servomotor MG995.

Modelo	**Tower Pro MG995**
Tensão de Operação	4,8 V – 7,2 V
Tipode Engrenagem	Metálica
Modulação	Analógica
Velocidade de Operação	0,17 s / 60° (4,8 V sem carga)
Velocidade de Operação	0, 13s / 60° (6 V sem carga)
Torque	13 kg.cm (4,8V) e 15 kg.cm (6,0V)
Faixa de rotação	180^0
Dimensões e peso	40 x 19 x 43mm e 69g

Fonte: Makerhero (2024).

4.5. Páinel Fotovoltaico

As placas fotovoltaicas fazem a transformação da energia solar em energia elétrica por meio de fótons, processo denominado efeito fotovoltaico. Este efeito ocorre quando a luz solar, em forma de fótons, interage com um material semicondutor, como o silício, que libera elétrons e cria uma corrente elétrica.

O modelo RSM010P de placa fotovoltaica da marca RESUN SOLAR POWER é utilizado no projeto, cujas especificações são mostradas no Quadro 6, sobre as

condições estabelecidas pelo IEC 60904-3, norma técnica internacional que define as condições de iluminação padronizada para teste de desempenhos (RESUN, 2025).

Quadro 6 – Especificações técnicas para a placa fotovoltaica RSM010P

Modelo	RSM010P
Tipo de célula :	Policristalino
Número de células:	36
Proteção Antirefletivo, hidrofóbico	cargas de vento de 2400Pa e de neve de 5400 Pa
Degradação Anual 0,5 %:	Perspectiva em 30 anos
Características Elétricas :	Condições padrão de teste - STC
Potência nominal em watts (Pmax):	10 W
Tensão de circuito aberto (V):	22,5 V
Corrente de curto-circuito (Isc):	0,59 A
Tensão na potência máxima (Vmp):	18,5 V
Corrente na potência máxima (Imp):	0,55A
Tolerância:	0 ~+5W
Eficiência:	11,9%

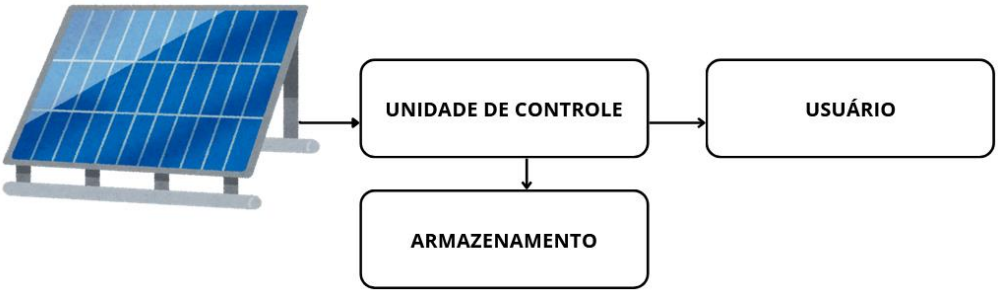
Fonte: Dgtech (2025)

4.6. Controlador de Carga

Um controlador de carga é um dispositivo inteligente que é essencial para sistemas de energia solar. A principal função desse dispositivo é o monitoramento constante de tensão e corrente, regulando a passagem de energia e garantindo que o processo de carregamento seja eficiente e seguro (DGTECH, 2025).

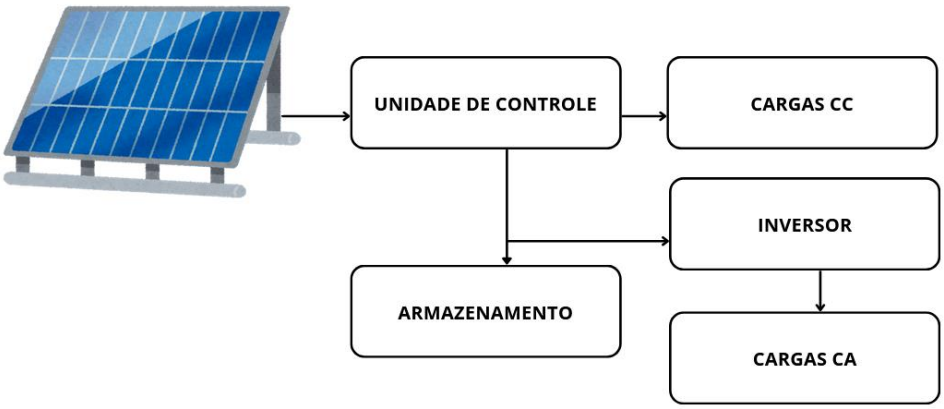
Para qualquer tipo de geração fotovoltaica é necessário o uso de um controlador de carga, cuja configuração geral é formada por uma unidade geradora, uma unidade de controle, uma unidade armazenadora (opcional) e o usuário que pode ser tanto a rede de Distribuição, quanto a unidade geradora, conforme mostrado no diagrama de blocos na Figura 30. Baseado no modelo geral tem-se três diferentes configurações de instalação, dependendo da finalidade tais como, o sistema *off-grid* (ou isolado), sistema *on-grid* e o sistema Híbrido, apresentados nas Figuras 31 a 33.

Figura 30 - Diagrama de blocos para o Sistema Fotovoltaico Geral



Fonte: Própria do autor

Figura 31 - Diagrama de blocos para o Sistema Fotovoltaico *off-grid.*



Fonte: Própria do autor

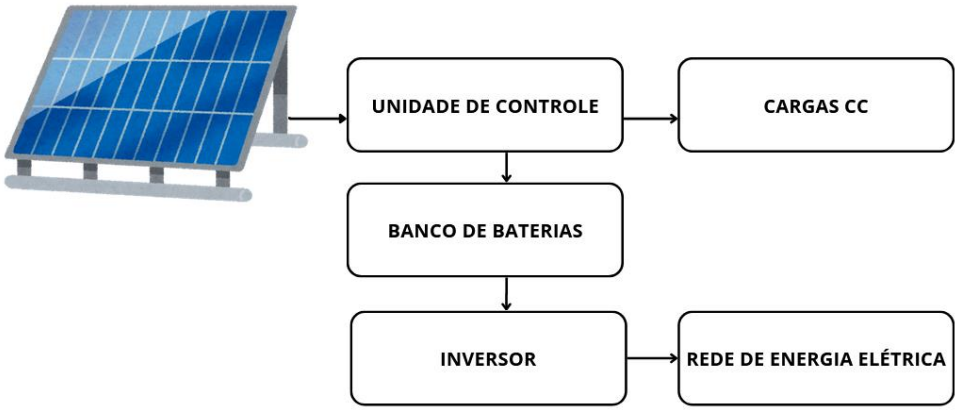
Nesta Figura para o sistema *off-grid*, o controlador serve como distribuidor de carga. Caso o usuário necessite de uma modulação de tensão, deve ser implementado um inversor

Figura 32 - Diagrama de blocos para o Sistema *on-grid.*

Fonte: Própria do autor

Para o sistema *on-grid* nesta Figura, há um inversor inteligente que opera como controlador de carga para ser conectado diretamente a rede elétrica nacional e controlado pela própria concessionária regional.

Figura 33 - Diagrama de blocos para o Sistema Híbrido Manual.



Fonte: Própria do autor

O sistema híbrido manual (com um controlador de carga e inversor) é usado caso o usuário queira utilizar a energia elétrica gerada em DC, antes de ser conectada a rede em AC. Nos sistemas híbridos manuais é importante que haja compatibilidade entre o gerador, baterias, inversor e cargas, pois o inversor consumirá a carga da bateria para alimentar a instalação do usuário primário.

Com as novas tecnologias encontram-se no mercado de componentes eletrônicos modelos (e marcas) diferentes de controladores. Nesta pesquisa o modelo utilizado foi o KNUP 10A, PWM KP-AD10A,12V / 24V, compatível com sistemas solares de 12 ou 24 V, suportando corrente de 10 A e sob regime de trabalho PWM, considerado um modelo simples e de baixa potência, mas eficiente para sistemas DC. Controla a tensão na bateria, regula a carga, têm duas entradas USB, e uma entrada por terminal, todas usadas para alimentação e apresenta um display LCD para visualização de dados e configuração, conforme mostrado na Figura 34 (MUNDO DA ELÉTRICA, 2020).

O controlador de carga PWM funciona como um interruptor eletrônico, regulando a tensão do painel para que se iguale a bateria. Esse dispositivo é ideal para sistemas equipotentes, sendo a tensão do painel solar de valor próximo ao da bateria. Têm sistemas de proteção contra sobrecorrente, curto-circuito, circuito aberto e inversão de polaridade. No circuito há baixa dissipação de calor, por chaveamento de corrente com MOSFETs de baixa resistência e ainda detecção automática de tensão via chip Master (DG TECH, 2025). Para usar o controlador, algumas características devem ser consideradas, mostradas no Quadro 7.

Figura 34 - Controlador de carga, Modelo KNUP 10A PWM KP-AD10A 12V / 24V.

Fonte: Dgtech (2025).

Quadro 7 – Controlador Modelo KNUP 10A PWM KP-AD10A 12V / 24V.

Componente	Especificações Técnicas
Tensão de Operação	12V / 24V (detecção automática)
Corrente nominal	10A, 20A ou 30A
Tensão máxima do painel	12V: até 23V / 24V: até 46V
Baud Rate	1200 – 1382400 bps (9600 padrão)
Tensão de carga flutuante	13,7V (ajustável entre 13V e 15V)
Características Elétricas :	Condições padrão de teste - STC
Potência nominal em watts (Pmax):	10 W
Tensão de circuito aberto (V):	22,5 V
Corrente de curto-circuito (Isc):	0,59 A
Tensão na potência máxima (Vmp):	18,5 V
Corrente na potência máxima (Imp):	0,55A
Tensão de corte por descarga:	10,7V (ajustável)
Tensão de reconexão:	12,6V (ajustável)
Tecnologia:	PWM (Modulação por Largura de Pulso)
Portas USB	2 portas USB (5V / 2A máx. cada)
Tipo de bateria compatível:	Baterias de chumbo-ácido: selada, AGM e GEL
Temperatura de operação:	-35°C a +60°C
Circuito interno:	MOSFET duplo com baixa dissipação de calor

Fonte: DG TECH (2025)

4.7. Bateria

Baterias são elementos que apenas armazenam energia elétrica. A carga e descarga de uma bateria ocorre por uma mudança na configuração do circuito externo que provoca mudança na química interna da bateria e esta reação química tem como subproduto uma corrente elétrica gerada nos terminais.

O processo de carga e descarga não é cem por cento eficiente, pois há perda por efeito Joule, ao fornecer energia e requer carga acima da nominal para que se carregue por completo. É importante observar o tipo de bateria, pois esse processo só é possível em baterias recarregáveis e dependendo do material pode fornecer diferentes rendimentos, como a de chumbo-ácido com 85% de rendimento e a de níquel-cádmio com 65 %.

O modo de aplicação determina o tipo de bateria podendo variar de aplicação automotiva, transporte marítimo e de ciclo profundo[1]. A bateria também pode ser determinada pelo modo de fabricação, variando em fluido (água, ácido), gel ou AGM (Absorbed Glass Mat) (OLIVEIRA, 2022). No Quadro 8 mostra-se as especificações para diferentes materiais.

Quadro 8– Especificações de tipos de bateria conforme material

Tipo de bateria	Especificações
Zinco	Não recarregável
Niquel-Cádmio	Consumo doméstico (celulares, eletrodomésticos), pouco vulnerável a temperatura elevada, alta confiabilidade
Lítio-Ion	Pico de potência específico (>1KW/Kg), precisa de alto aquecimento (70ºC)
Níque-Metal hidro	Movimenta alta carga por baixo tempo, economicamente atrativa
Chumbo-Ácido (Chumbo + Acido sulfúrico)	Tipo automotiva, popular e acessível

Fonte: Própria do autor

[1] Bateria de operação cíclica

A bateria utilizada nesta pesquisa foi a bateria selada de 12 V e 7 AH, mostrada na Figura 35.

Figura 35 - Bateria Energy Power Chumbo-Ácido

Fonte: Nadiel (2025).

Ao dimensionar o banco de baterias para um sistema fotovoltaico, é importante observar as especificações do controlador e placa, por isso, a Chumbo-Ácido selada de 12 V e 7 AH foi estudada para a sua utilização neste projeto (NADIEL, 2025), cujas especificações estão no Quadro 9.

Quadro 9– Especificações técnicas da bateria Energy Power Chumbo-Ácido

Componente	Especificações
Modelo	EP 12-7
Tensão Nominal	12 V
Capacidade	7 AH
Tecnologia	VRLA (Valve Regulated Lead Acid) com eletrólito absorvido em manta de microfibra de vidro (AGM)
Chumbo-Ácido (Chumbo + Acido sulfúrico)	Tipo automotiva, popular e acessível
Corrente máxima de descarga:	105 A (por 5 segundos)
Tensão de Carga Flutuante:	13,5 – 13,8 V
Tensão de Carga Cíclica:	14,5 – 15,0 V
Corrente de Carga:	2,1 A
Composição:	Chumbo + Ácido Sulfúrico

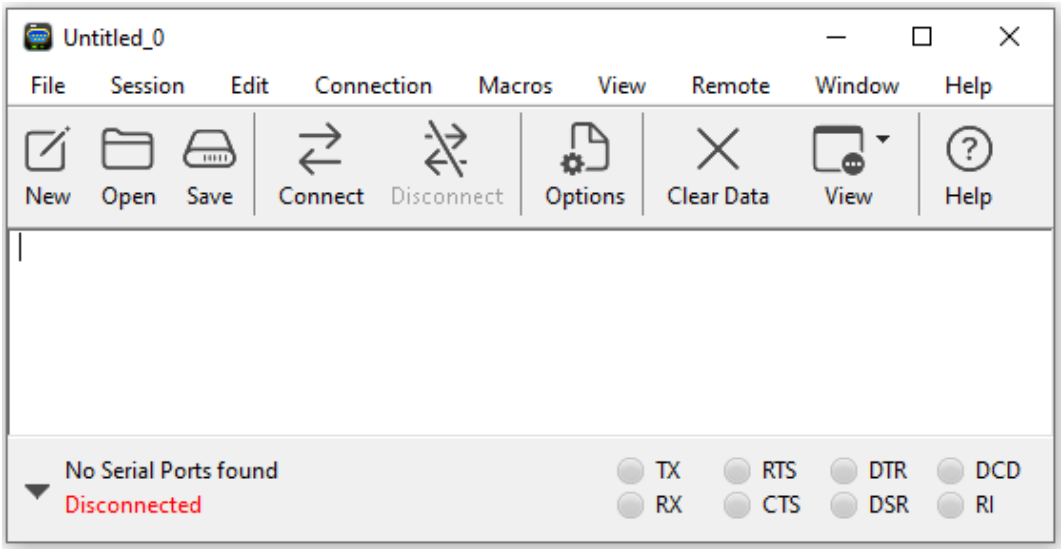
Fonte: Nadiel (2025)

4.8. Sistema Supervisório

Para projetos que exigem monitoramento e controle de processos ou sistemas automatizados, é importante possuir uma interface intermediaria que possibilite a comunicação homem-máquina em tempo real. Para isso, existem alguns softwares supervisórios entre esses o Elipse, o Process View e o SCADABR. Um bastante utilizado é o CoolTerm, devido a sua simplicidade, clareza e robustez.

O CoolTerm é um software supervisório gratuito, que utiliza interface de comunicação serial UART para transmitir e receber dados por meio das portas COM (para o Windows). O CoolTerm apresenta uma interface amigável para iniciantes conforme é mostrado na Figura 36, a tela de início. Pode ser configurado tornando -o útil para utilizações profissionais, basta especificar os parâmetros de comunicação (baud rate, bits de dados, paridade, bits de parada, controle de fluxo), visualização de dados (ASCII ou hexadecimal), envio de dados, gravação de logs e suporte a múltiplas plataformas (MEIER, 2025).Suas especificações para uso estão resumidas no Quadro 10.

Figura 36 - Tela inicial do CoolTerm.



Fonte: Própria do autor.

Quadro 10– Especificações do software CoolTerm.

Componente	Especificações
Tipo de Software;	Terminal Serial (RS-232/RS-485/USB-Serial)
Sistema Operacional:	Windows, MacOS, Linux (via Wine)
Interface:	Gráfica (GUI)
Formatos de Dados:	ASCII e Hexadecimal
Velocidade (Baud Rate)	Personalizável (até 1.000.000 bps)
Controle de Fluxo:	Nenhum, Hardware (RTS/CTS), Software (XON/XOFF)
Conexões Simultâneas:	Suporta múltiplas instâncias (uma por porta serial disponível)
Envio de Dados:	Teclado, colar texto, enviar strings, envio de arquivos.
Recebimento de Dados:	Visual em tempo real
Gravação de Dados:	contínuo ou sob demanda
Licença:	Gratuito para uso pessoal e comercial

Fonte: Própria do autor

5. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Abordados sobre a energia fotovoltaica, componentes e software inicia-se o tópico de explanação do desenvolvimento dos circuitos construídos com as placas solares. A construção do rastreador solar idealizado foi dimensionada e projetada para em seguida serem feitos os testes. Para melhor entendimento a descrição neste tópico foi dividida em três sistemas que compõem todo o projeto:

- Geração fotovoltaica de energia;
- Controle de posição;
- Aquisição remota de dados.

5.1. Sistema de Geração Fotovoltáica de Energia

Neste trabalho há dois sistemas de geração de energia, onde ambos são compostos por :

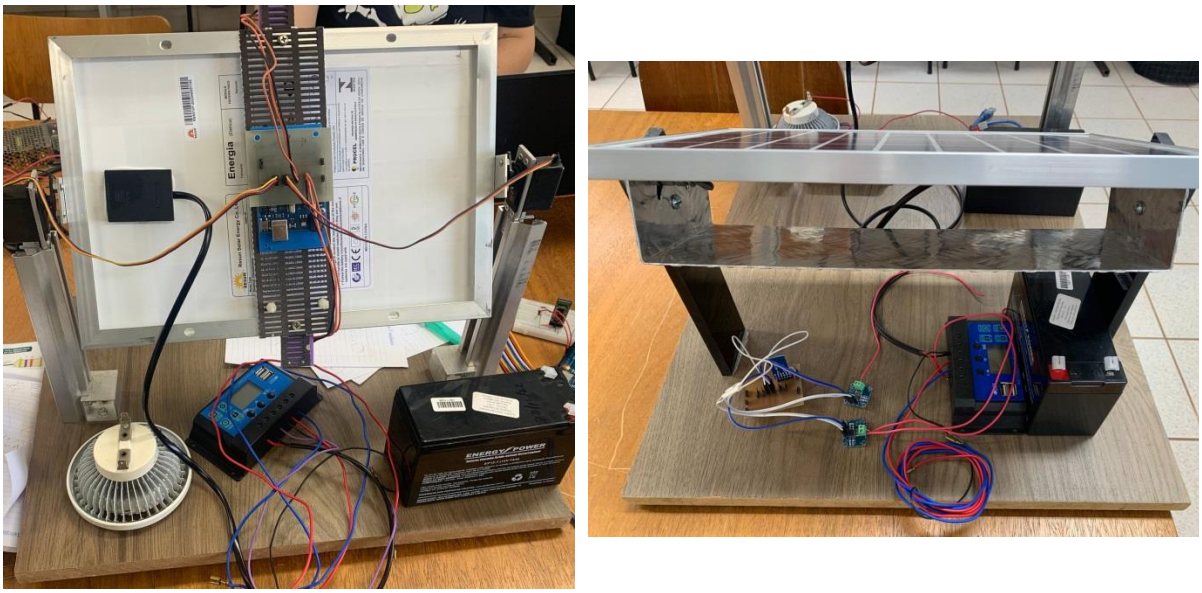
- Placa fotovoltaica de 12/24V 10W (RSM010P);
- Controlador de carga Solar 12/24V 10ª (KNUP – PWM);
- Bateria de chumbo ácido 12V-7AH;
- Carga – lâmpada 12V.
- Suporte;

Um dos sistemas usa sensores LDR e servomotores para gerar a máxima energia usando um sistema de controle de ajuste de posição e o rastreamento solar. Para este caso o suporte tem uma base retangular, onde são fixadas paralelamente duas hastes metálicas a uma distância um pouco maior que a medida da placa solar fotovoltaica (35 cm) devido aos eixos dos servomotores, que estão fixados nas hastes metálicas, de frente um para o outro, para dar movimento controlado. Nos eixos dos servomotores, são fixadas as laterais da placa solar, para dar movimento em 180 graus na placa fotovoltaica, perpendicular aos servomotores. O sistema de rastreamento está em uma placa PCB desenvolvida para fixar os 2 LDRs, um contraposto ao outro, e as conexões aos servomotores e ao Arduino UNO R3 que alimenta todo o sistema de controle, colocado em um suporte (sucata de computador) conforme mostrado na Figura 37(a), com um grau de liberdade.

O outro sistema a placa é colocada em um suporte semelhante, mas sem o sistema com os servomotores, ou seja, com inclinação regulável, onde é possível realizar ajuste angular do painel, essa posição é fixada para garantir no decorrer dos

ensaios da placa, a incidência da luz solar, conforme mostrado na Figura 37(b), suporte fixo.

Figura 37 - a) Suporte com um grau de liberdade ou um eixo. b) Suporte fixo.

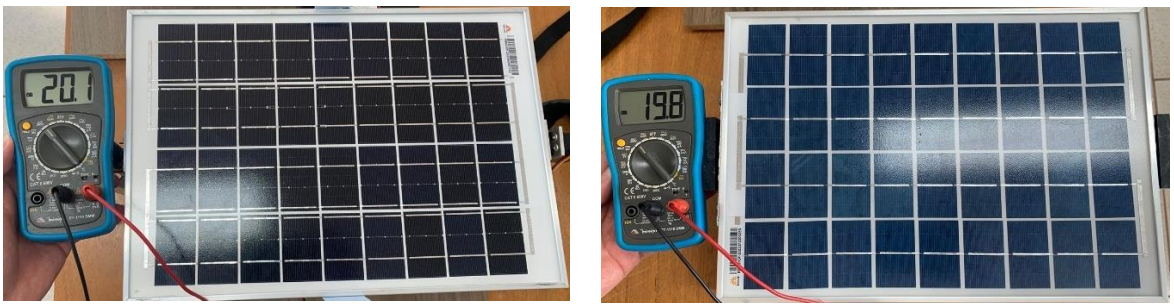


(a) (b)

Fonte: Própria do autor

As placas fotovoltaicas são do mesmo modelo, mas foram submetidas a avaliação com multímetro para atestar se apresentavam o mesmo desempenho, teste mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Teste de desempenho das placas fotovoltaicas com multímetro.



Fonte: Própria do autor

Confirmado que os painéis respondem igualmente ao teste, foi montado o sistema de geração fotovoltaica de energia e juntamente com a bateria e a carga, são ligadas ao controlador de carga, como apresentado no diagrama ilustrativo da Figura 39.

Figura 39 - Diagrama ilustrativo do sistema de geração fotovoltaica de energia para os dois painéis.

Fonte: Própria do autor

A conexão real deve seguir a ordem indicada pelo fabricante do controlador de carga respeitando a sequência de ligar a bateria, em seguida a placa fotovoltaica e caso desejado, as cargas no terminal ou nas entradas USB. Dessa forma, o controlador de carga reconhece o tipo de bateria, delimitando o tipo de placa fotovoltaica e carga que podem ser aplicados no sistema.

Para que a geração seja segura, as configurações no controlador de carga foram setadas com valores de 13,7V para que entre em tensão de flutuação, que é quando a bateria é carregada e a placa é desconectada do circuito; 10,7V para que o controlador desative as cargas conectadas; 12,6V para que as cargas externas fossem acionadas. Por fim, ao ser conectada a bateria ao controlador, este identifica automaticamente o tipo de bateria, sendo utilizada a opção b2 neste projeto, referenta ao nível de tensão.

5.2. Sistema de Controle de Posição

Neste sistema a montagem e o estudo se baseiam na comparação de um sistema de geração de energia com suporte fixo em relação a um sistema de geração de energia com um suporte de um eixo com um sistema de controle de posição usando dois sensores LDRs, Arduino UNO R3, os dois servomotores e a PCB conecta os LDRs, os servomotores e o Arduino.

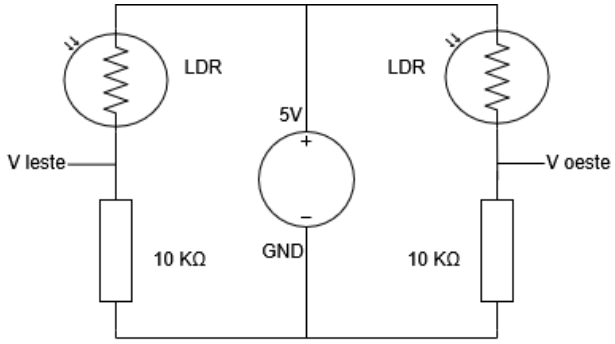
O Arduino UNO (1) faz a comparação entre os sensores LDRs que fornecem uma tensão equivalente a luminosidade e de acordo com a resposta em tensão se atua os servomotores, que fazem a correção da posição para encontrar a maior incidência de luz.

Foram feitos testes nos dois LDRs, para isso foi usado um divisor de tensão transformando a variação de resistência dos LDRs em variação de tensão, conforme mostrado na Figura 40. com o Arduino UNO para medir a tensão na saída do divisor dada pela Equação (1),

$$V = V_{CC} * \frac{R_{LDR}}{R_{LDR} + R_{FIXO}} \quad (1)$$

sendo V tensão equivalente de cada LDR no Arduino, V_{CC} a tensão de alimentação (5V), R_{LDR} é a resistência do LDR e R_{FIXO} é a resistência do resistor em ohms.

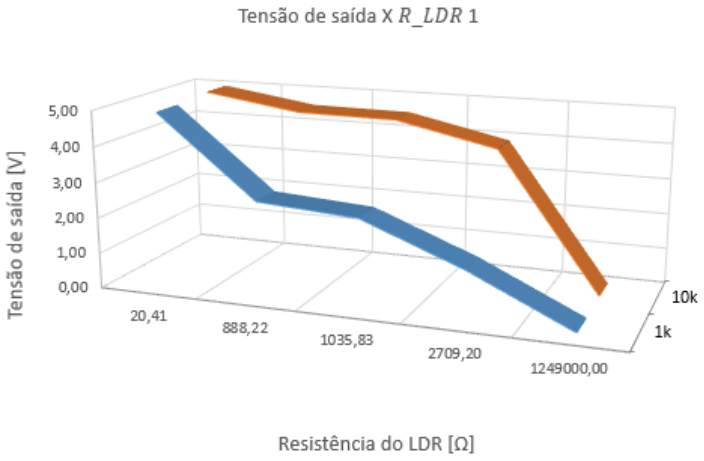
Figura 40– Circuito do divisor de tensão usado para aferir a tensão nos LDRs.



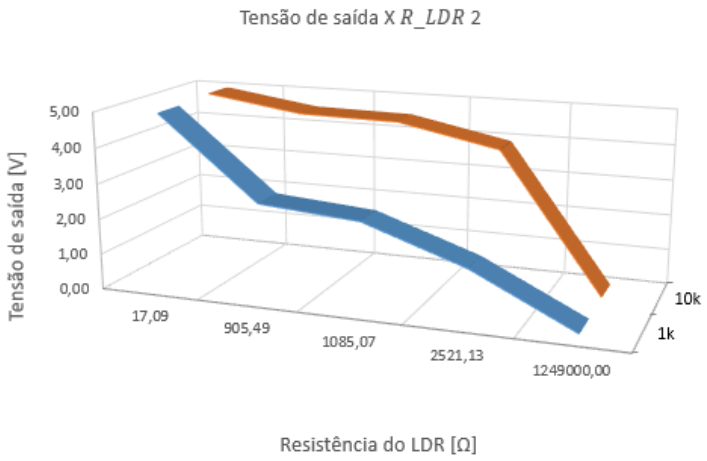
Fonte: Própria do autor

Com estas informações foram montadas as tabelas mostradas no Apêndice A, gerando os gráficos do comportamento dos LDRs, como mostrado na Figura 41 (a) e (b).

Figura 41 - Gráfico da tensão na saída do LDR x Resistência. (a) LDR1. b)LDR2.



(a)

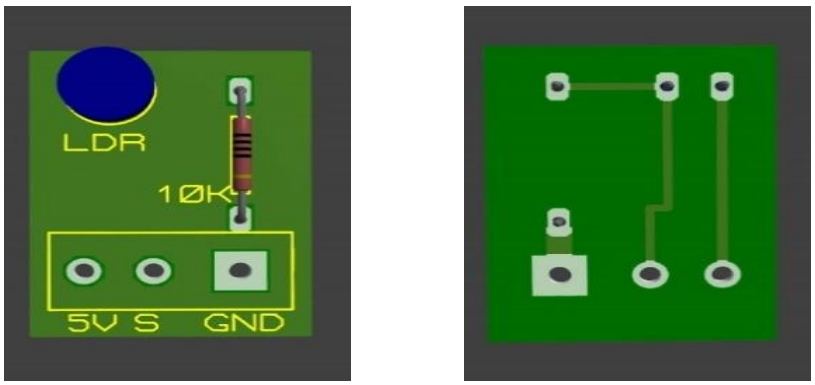


(b)

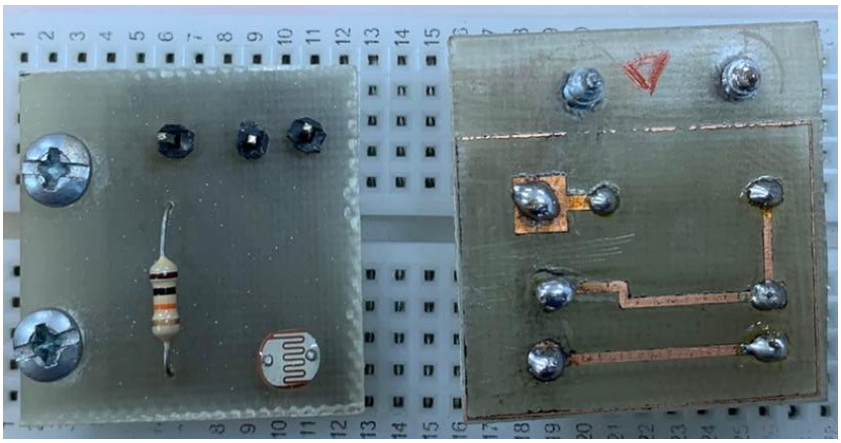
Fonte: Própria do autor

Comparadas as curvas características dos dois LDRs observa-se que a resistência fixa de 10 KΩ possui um comportamento aproximadamente linear para os dois casos, sendo também a de maior amplitude. Depois destes testes, foram criadas as Placas de Circuito Impresso (PCB) dos rastreadores solares, Figura 42. desenvolvidas no software Protheus Isís.

Figura 42 - Visualização superior e inferior das PCBs do circuito com LDRs.a) 3D e b) Impressas e soldadas.



(a)



(b)

Fonte: Própria do autor

O servomotor MG995 tem Torque e Força peso que permite que se realize a definição de sua carga máxima suportada descrito matematicamente pela Equação (2),

$$m = \frac{\tau}{g * r} \tag{2}$$

sendo m [kg] a massa máxima do objeto suportada, definida pela relação de Torque, τ [N.m] com g = aceleração da gravidade (9,81) [m/s^2] e r = distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação.

Esses valores podem ser definidos pela Equação (3) onde F = força [N] é dada pela relação de m [kg] massa e aceleração da gravidade (9,81) [m/s^2] = g e pela Equação (4) que define o Torque τ [N.m] pela relação de F = força tangencial [N] com r, que é distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação

$$F = m * g \tag{3}$$

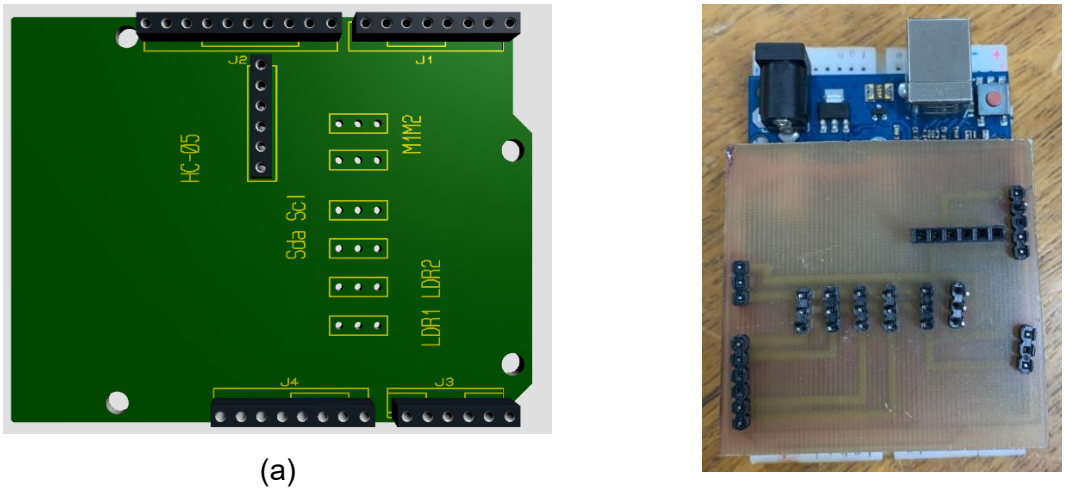
$$\tau = F * r \tag{4}$$

Este servomotor é alimentado em 5V, fornece diretamente no eixo Torque= 1,275 N. O eixo conectado ao centro da lateral menor da placa solar, r equivale 0,175m, g=9,81 m/s^2. Portanto, fazendo os cálculos a massa máxima suportada no eixo é de m=0,74g.

A placa fotovoltaica é de 1Kg e por isso requer um sistema de repetibilidade nos centros laterais menores da placa, dobrando o limite de carga suportada no sistema para 1,48 Kg, tornando o projeto adequado e seguro.

Para integrar os LDRs e os servomotores ao Arduino, foi realizada outra PCB usando o Protheus Isís, apresentada na Figura 43. Este mesmo modelo de PCB foi projetado para atender também o sistema de aquisição remota de dados.

Figura 43 - a) PCB conecta os LDRs e servo com o Arduino.b) PCB real no Arduino

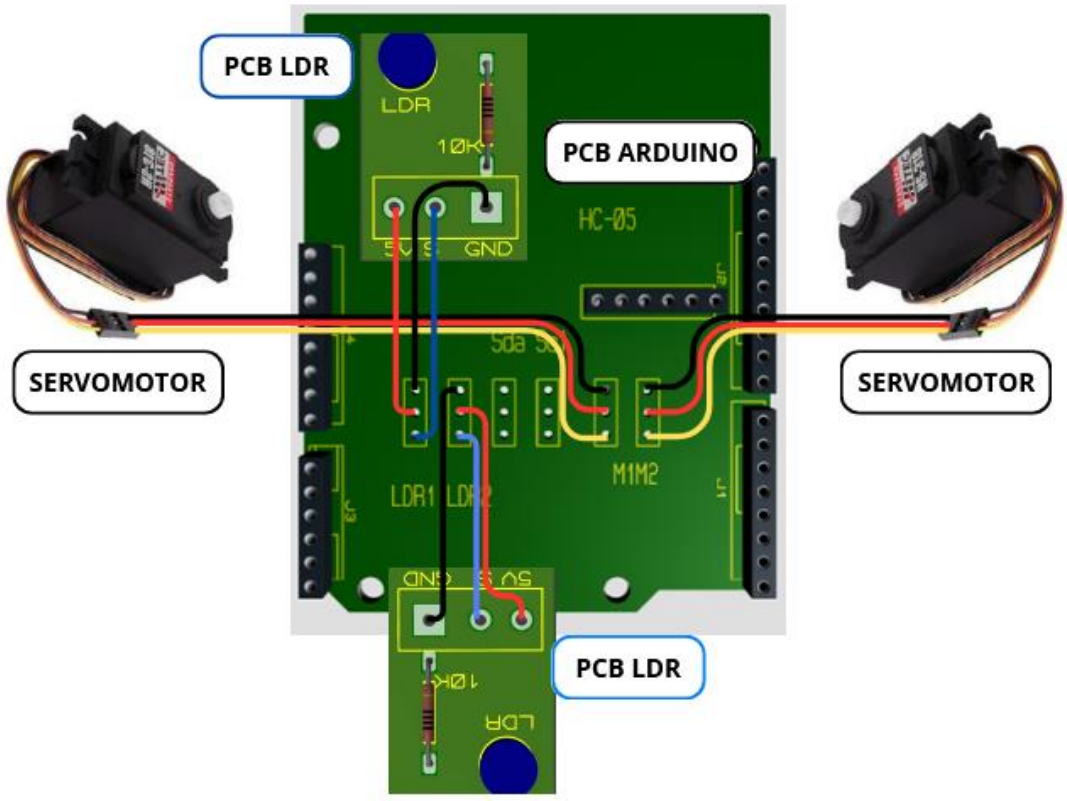


(a) (b)

Fonte: Própria do autor

A PCB foi projetada com camada única de trilhas e servomotores foram ligadas as portas digitais PWM D3 e D5 do Arduino UNO, os LDRs são conectados às portas analógicas A0 e A1, diagrama ilustrativo é mostrado na Figura 44.

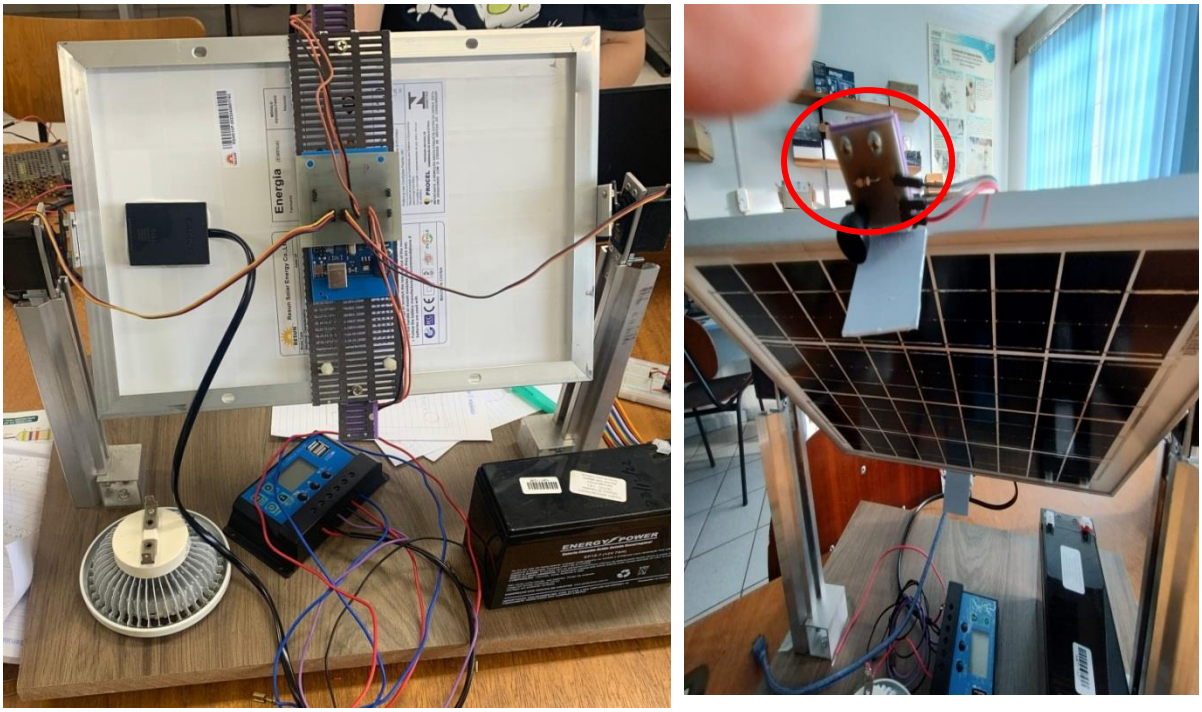
Figura 44- Diagrama de conexões do sistema de controle de posição.



Fonte: Própria do autor

Os servomotores conectam o suporte a placa fotovoltaica, enquanto são alimentados pelo próprio Arduino que está fixado na chapa metálica na parte de trás da placa solar, Figura 45(a) junto as PCBs dos LDRs que estão nas duas extremidades da placa, com a superfície dos LDRs voltadas para cima, conforme mostrado na Figura 45(b).

Figura 45 - a) Sistema de controle de posição real.b) Posição do LDR.



Fonte: Própria do autor

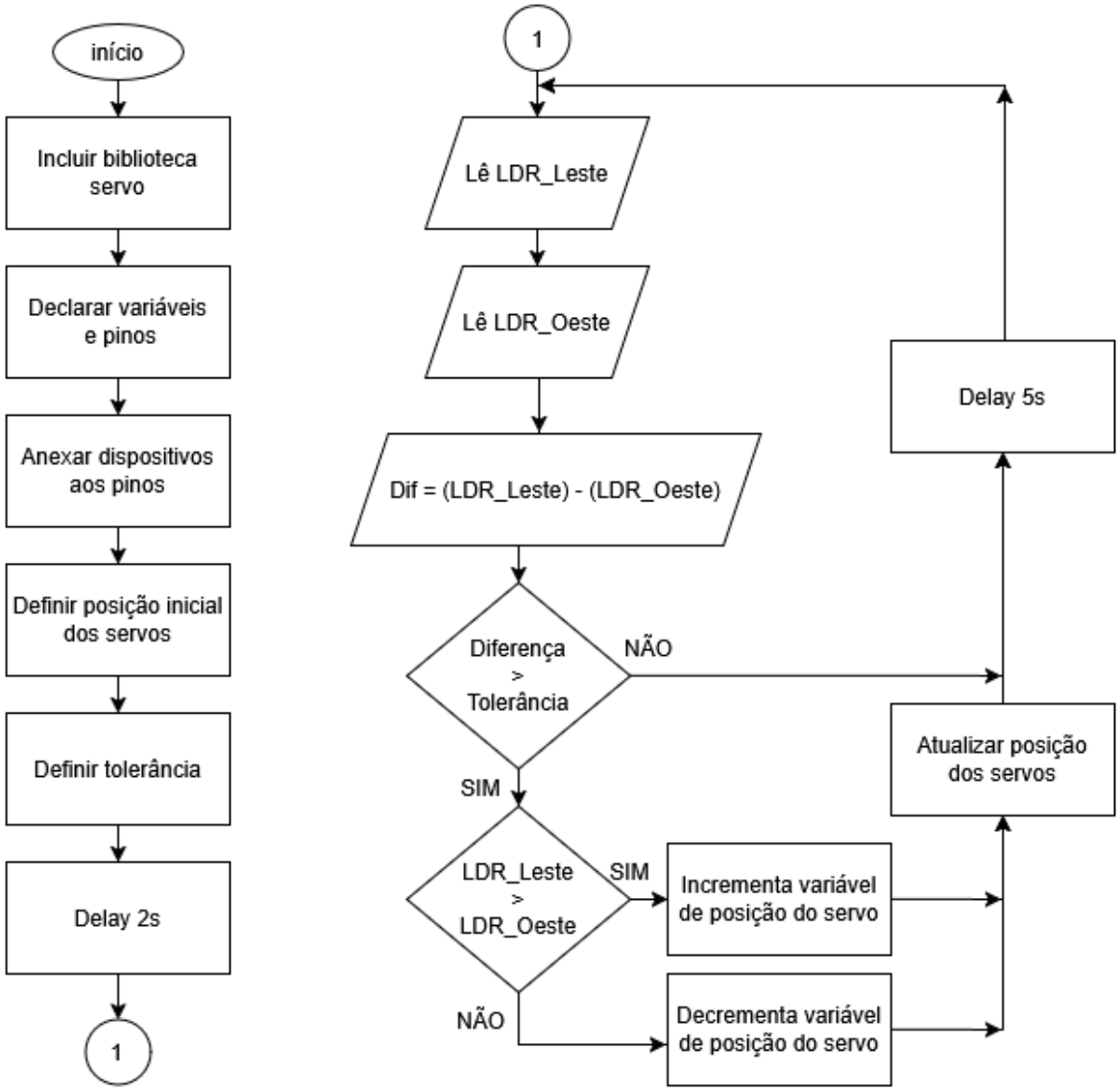
Esse sistema identifica o ângulo azimutal, por meio da diferença da incidência de luz nos LDRs e o programa embarcado no Arduino realiza o ajuste de posição pelos servomotores, até que a diferença nos LDRs seja menor que a tolerância definida na programação como 20, valor definido conforme orientação das referências bibliográficas utilizadas (LAURINDO,2023).

Apresenta-se na Figura 46, o fluxograma do sistema de controle de posição realizado, que tem as especificações a seguir:

- o Arduino (1) lê os dados dos LDRs;
- compara e toma decisão de movimentação dos servomotores.

Para rastreabilidade, os servomotores foram nomeados como “Servo_Norte” o que está fisicamente mais para o norte geográfico e conectado à porta D3 e o servo mais para o sul foi denominado “Servo_Sul” e ligado a porta D5, enquanto o LDR na porta A0 foi denominado “LDR_LESTE” por estar fisicamente mais para o leste e o LDR da porta A1 foi nomeado “LDR_OESTE”.

Figura 46 - Fluxograma do sistema de controle de posição.



Fonte: Própria do autor

5.3. Sistema de Aquisição Remota de Dados

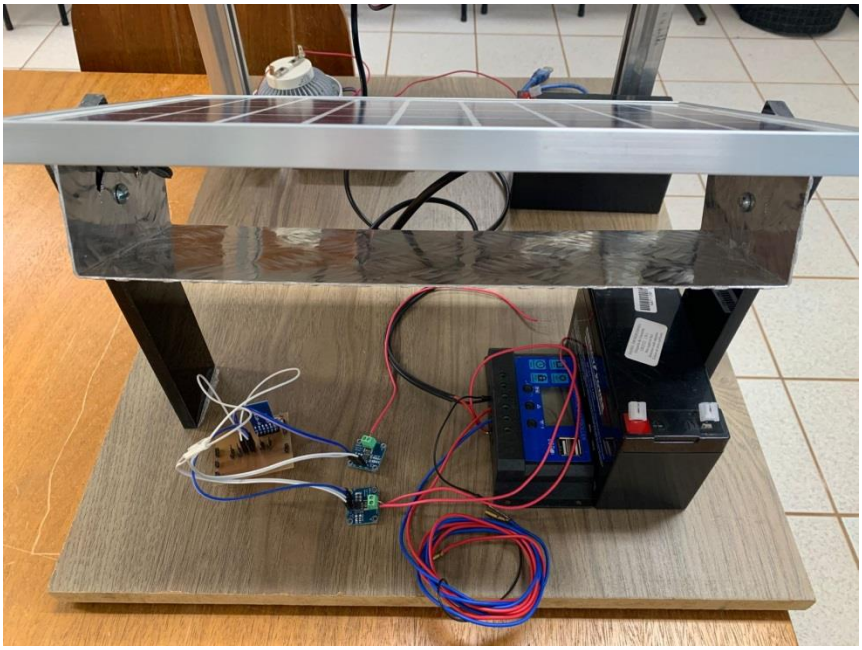
Por fim, tem-se o sistema de aquisição remota de dados ligado a um Arduino que tem um *Bluetooth* que transmite para o terminal Coolterm (PC) a tensão, corrente e potência dados pelos sensores INA219, conectados diretamente, cada um em uma placa fotovoltaica. No terminal pode-se acompanhar o desempenho nas duas placas e criar um banco de dados para estudos comparativos. Para a aquisição remota de dados tem-se os seguintes componentes :

- 1x Arduino UNO(2);
- Módulo Bluetooth HC-05;
- Dois sensores de Corrente e Tensão, INA219.

Do Arduino UNO(2) foi usado o canal de comunicação I2C, localizadas nos pinos A4 e A5 destinadas a Linha de Dados Seriais (SDA) e a Linha de Clock Serial (SCL), respectivamente. Como são dois sistemas de geração de energia sob análise, e há dois sensores de corrente e tensão INA219, um para cada placa, ambos realizam transmissão de dados pela comunicação *Bluetooth* pelo mesmo Arduino (2), basta ser devidamente endereçados.

Assim, o sensor INA219 conectado a placa com sistema de controle de posição (Placa1) manteve a configuração de endereçamento 0x40, enquanto o segundo sensor foi endereçado em 0x41 (soldagem do pino A0), conectado a placa de eixo fixo (Placa2). Portanto, os dois sensores INA219 podem ser conectados a mesma porta analógica do Arduino sem comprometimento na transmissão dos dados, bastando referenciar adequadamente os endereços na programação. Na Figura 47 apresenta-se as conexões dos dois INA 219 no projeto.

Figura 47 - Sensores com endereçamento adaptado.



Fonte: Própria do autor

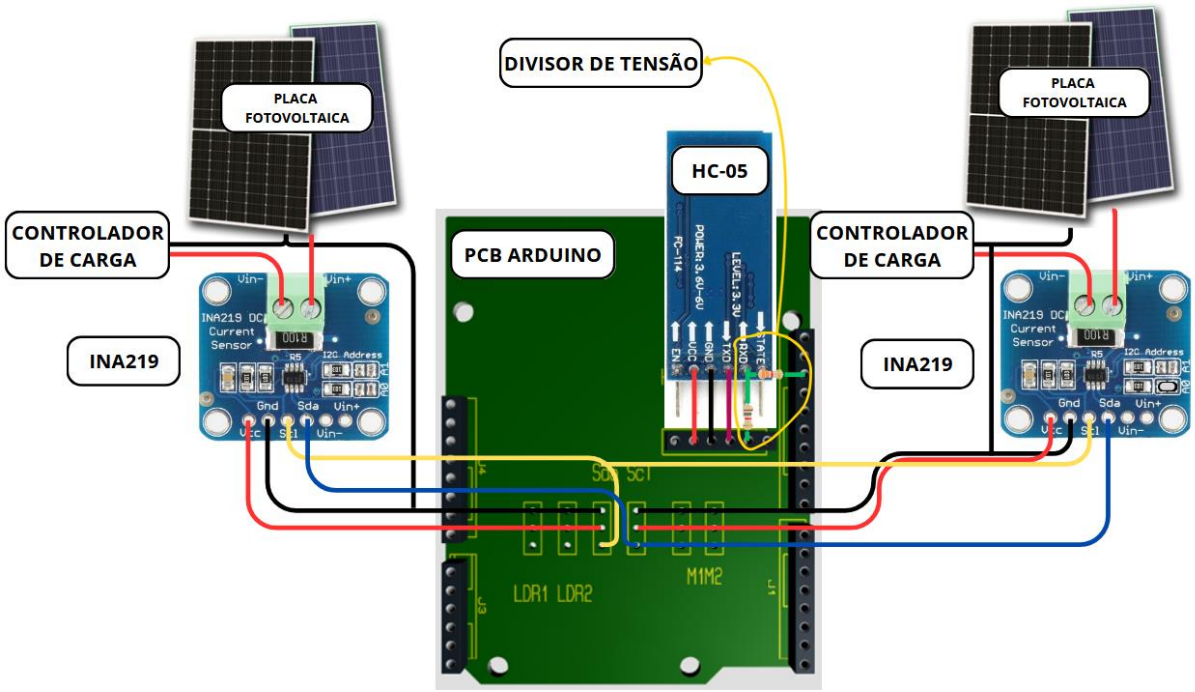
Para uso da programação usando o módulo *Bluetooth* com o Arduino deve ser inclusa a biblioteca “SoftwareSerial.h” que possibilita a transmissão de dados seriais com as pinagens declaradas. Neste projeto, na conexão do Arduino com o *Bluetooth,* configura-se os pinos do TX (transmissor) e RX (receptor), portas D11 e D10, do Arduino, respectivamente. Deve-se atentar que o RX do Arduino deve ser conectado

ao TX do *Bluetooth* e o TX do Arduino deve estar conectado ao RX do *Bluetooth*, para que os dois enviem e recebam dados adequadamente.

Ainda com relação ao *Bluetooth*, embora a limentação seja de 5V, para o sinal de TX foi necessário fazer uma conversão de tensão DC-DC, para isso foi usado um divisor de tensão básico para abaixar a tensão do sinal TX para 3,3V. Para o divisor de tensão foram usados os resistores de 1,8kΩ e 3,3kΩ., visto no diagrama de conexões do sistema de aquisição remota de dados, na Figura 48 e também é mostrada a conexão a PCB secundária do projeto igual a PCB do sistema de controle posição.

Ainda na Figura 48 tem-se o sensor INA219 conectado em série com o fio positivo da placa pelas entradas Vin e para manter a referência, um jumper do fio de aterramento da placa deve ser conectado ao GND do sensor, colocando o INA219 em série para leitura da corrente e possibilitando a comparação da queda da tensão.

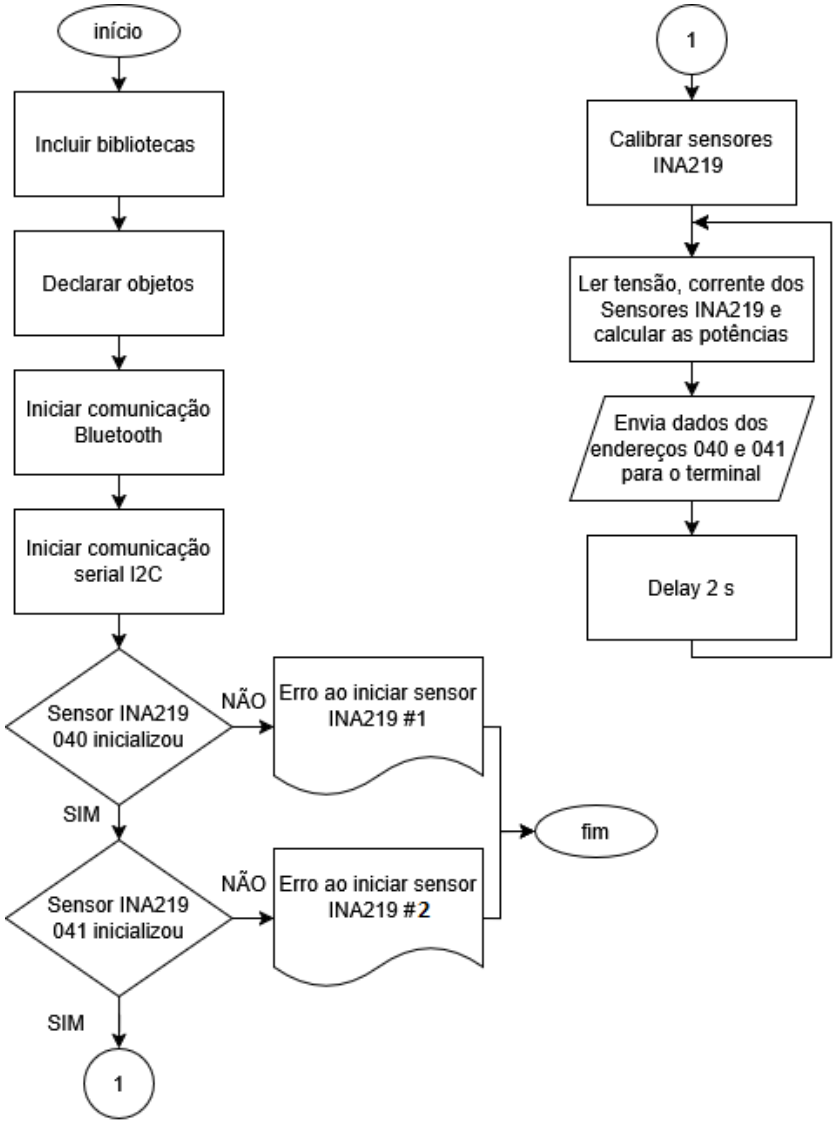
Figura 48 - Diagrama de conexões do sistema de aquisição remota de dados.



Fonte: Própria do autor

Depois de feitas todas as conexões a PCB ligada ao Arduino UNO (2), deve ser feito o *upload* do programa do sistema de aquisição remota de dados, cujo fluxograma é apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Fluxograma do sistema de aquisição remota de dados.



Fonte: Própria do autor

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste captílo são apresentados os resultados obtidos com o hardware montado, juntamente com os dois paineis solares didáticos em testes e os programas visando mostrar a eficiência energética na captação de energia desta fonte renovável e limpa.

Foram feitas coletas de dados em campo para ajustar o funcionamento e duas destas coletas foram armazenadas para compor os bancos de dados usados na análise do desempenho do projeto em campo.

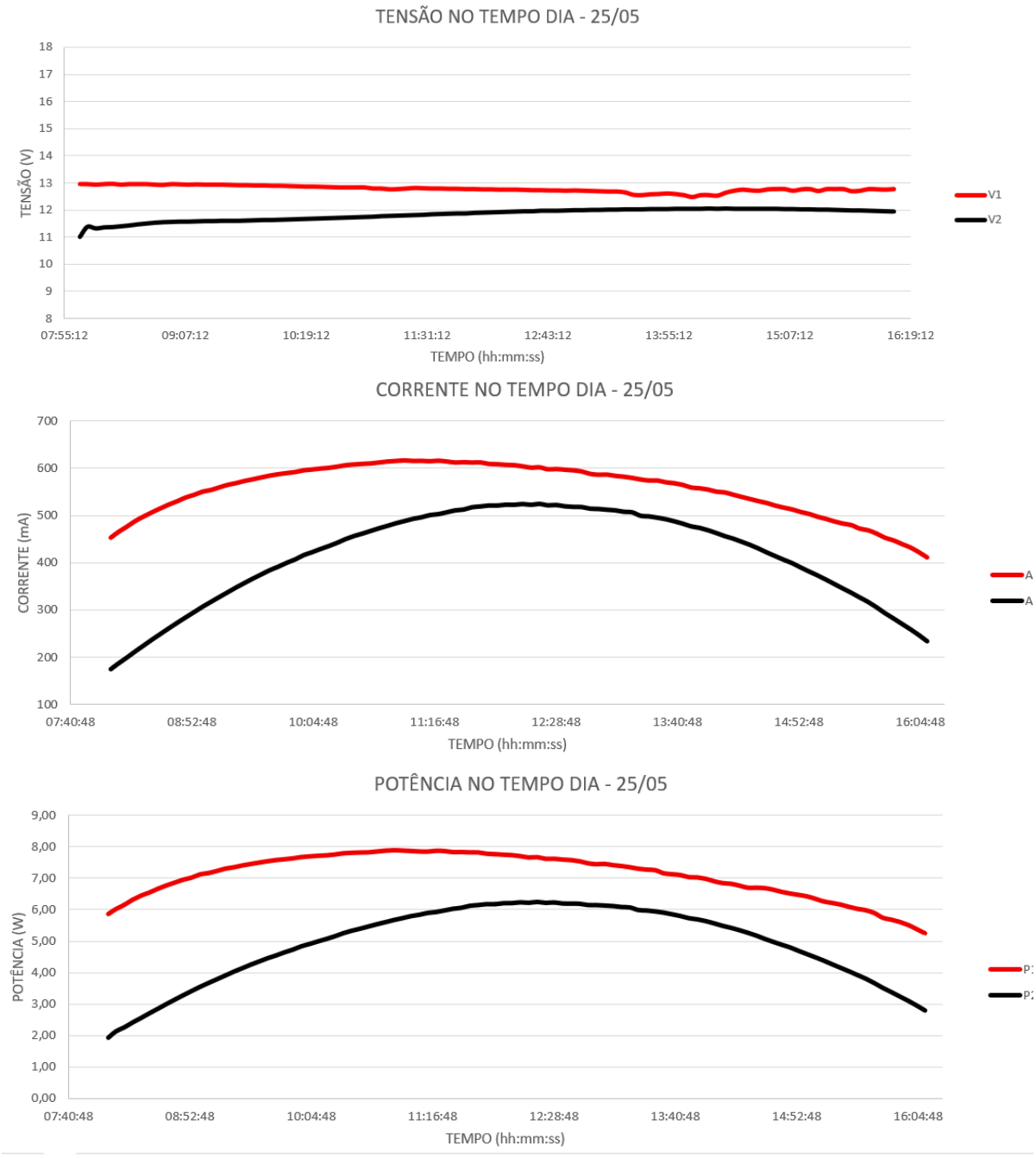
Os testes em campo armazenados foram os dias 25 e 31 de maio, no Campus III - Universidade Estadual de São Paulo, localizado na cidade de Ilha Solteira-SP.

Para iniciar os testes foi feita uma consulta ao Instituto Nacional de Meteorologia[2] (INMET) nas referidas datas e não constava previsão de chuvas nestes dias, somente boa incidência solar durante o dia e temperatura controlada. Com a ocorrência de temperaturas mais baixas, é reduzido o efeito de dilatação de materiais semicondutores, o que pode influenciar negativamente na geração de energia, enquanto a ocorrências de chuva impediriam os testes, uma vez que o sistema não tem proteção contra água.

Com os dados coletados nas duas datas obteve-se um banco de dados suficiente para construir os gráficos de tensão, corrente e potência, cujas legendas têm o índice 1, referentes as grandezas da PLACA1(com controle de posição) e índice 2 para as grandezas referentes a PLACA2 (eixo fixo) e com curvas nas cores vermelha para painel com controle de posição e preta para painel com eixo fixo. Na Figura 50 têm-se os gráficos dos dados coletados no teste do dia 25 de maio.

[2] Órgão do governo federal vinculado ao Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) que fornece dados de históricos diários de temperatura, chuva, umidade, vento e outros através do seu site (INMET, 2025)

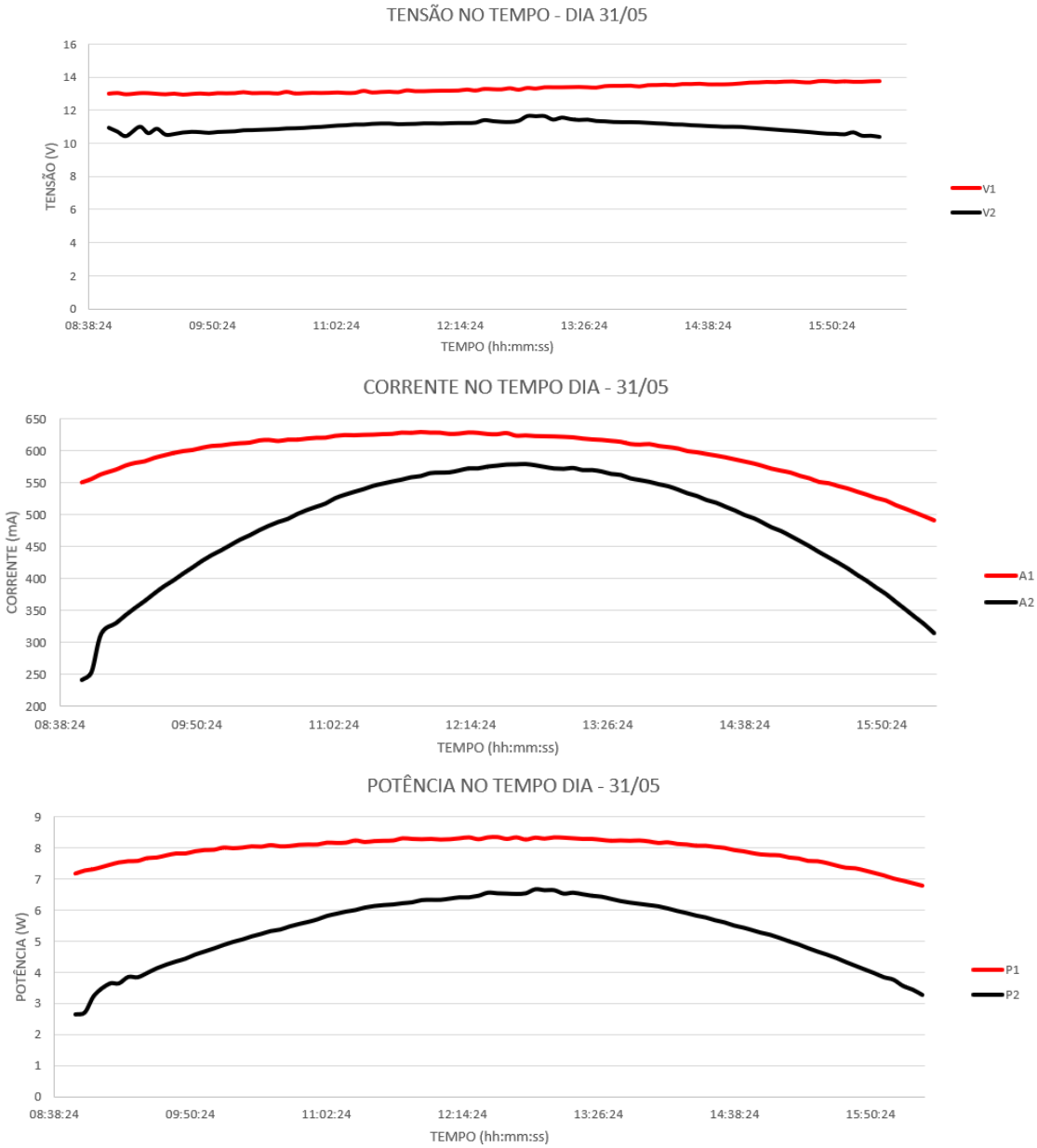
Figura 50 - Gráficos gerados no teste em 25 de maio: a)Tensões.b) Correntes. c) Potências.



Fonte: Própria do autor

Os gráficos de tensão, corrente e potência mostrados na Figura 51, seguem a mesma estrutura de montagem e legenda dos dados, mas abordam o banco de dados da coleta realizada no teste do dia 31 de maio.

Figura 51 - Gráficos gerados no teste em 31 de maio: a)Tensões.b) Correntes. c) Potências.



Fonte: Própria do autor

Analisando os gráficos da tensão para os dois dias de testes, observa-se a que o painel com correção da posição (PLACA 1) tem a bateria recarregada mais próximo da tensão nominal (setada em 13,7V pelo controlador de carga), protegendo a vida útil desta bateria, minimizando a variação da tensão e mantendo mais próximo da carga desejada. Ao contrário, o painel com eixo fixo (PLACA 2) está com valores abaixo da tensão nominal setada.

Comparando os gráficos das correntes geradas para os dois dias de testes, há um pico de geração do painel com eixo fixo (PLACA 2), enquanto o painel com

correção da posição (PLACA 1) tem um comportamento de uma curva mesnos acentuada, com captação aproximadamente constante durante todo o dia, com ênfase nas extremidades que referem-se ao amanhecer e entardecer.

O resultado da tensão versus a corrente dá a potência calculada no próprio medidor, sendo observado que a PLACA 1 tem um aproveitamento dos raios solares melhor durante todo o dia e com menor variação na captação. A partir dos gráficos de potência para os dois dias, foram calculados os valores de energia gerada que é referente as áreas das curvas de potência. Esses dados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Energia gerada (Wh) pelos painéis.

PARÂMETRO	DIA 25/MAIO/2025		DIA 31/MAIO/2025	
	PAINEL COM CONTROLE	PAINEL EIXO FIXO	PAINEL COM CONTROLE	PAINEL EIXO FIXO
Energia Gerada	54,28Wh	38,45 Wh	57,29 Wh	39,12 Wh

Fonte: Própria do autor

Na Tabela o valor de energia gerado é considerado baixo devido a serem utilizados no projeto do sistema de geração de energia, painéis com propósito didático e suficiente para o estudo realizado, ou seja, analisar a eficiência energética a partir dos painéis com correção de posição. Então, se conclui pelas diferenças do Wh para os dois painéis, que o painel com correção de posição gera maior valor de energia.

Outro estudo realizado, a partir dos bancos de dados obtidos nos testes, foi a construção de uma tabela para análise quantitativa das médias dos parâmetos (tensão, corrente e potência) dos painéis, apresentado na Tabela 3. Essa análise deve reforçar os resultados obtidos anteriormente, permitindo validar o comportamento e a tendência das curvas observadas nos gráficos.

Tabela 3 – Média dos parâmetos dos painéis

PARÂMETRO	DIA 25/MAIO/2025			DIA 31/MAIO/2025		
	PAINEL COM CONTROLE	PAINEL EIXO FIXO	COMPARAÇÃO	PAINEL COM CONTROLE	PAINEL EIXO FIXO	COMPARAÇÃO
Média da Tensão (V)	12,77	11,83	7,37%	13,33	11,00	17,47%
Média da Corrente (mA)	556,13	413,05	25,73%	594,50	483,87	18,61%
Média da Potência (W)	7,10	5,00	31%	7,92	5,34	32,51%

Fonte: Própria do autor

Nesta Tabela, comparando as médias da corrente, da tensão e potência, observa-se um melhor resultado na geração de energia, de mais de 30%,dada pela potência, para o painel com correção de posição. Assim, o sistema proposto atingiu seu objetivo, ou seja, mostrar a eficiência de captação de energia solar para um sistema de rastreamento, comparado a um outro sistema de placa solar de eixo fixo.

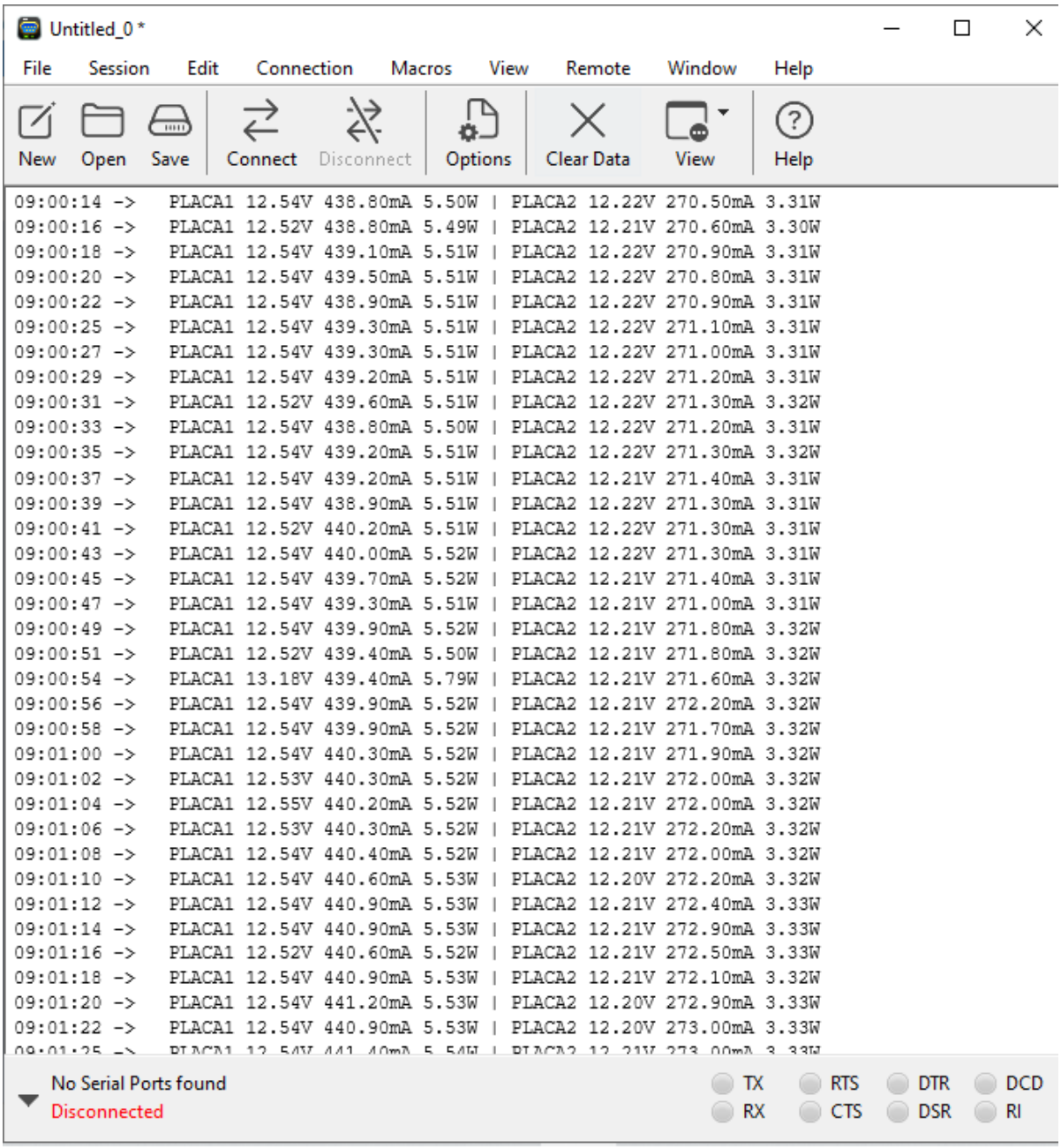
Na Figura 52 mostra-se o sistema completo operando no mesmo dia e hora e instalados em campo, sobre mesmas condições climáticas e posicionamento adequado, com setas em vermelho indicando o Norte geográfico.

Figura 52 - Sistema completo de placas solares para o estudo da eficiência energética

Fonte: Própria do autor

Os dados de tensão, corrente e potência analisados foram coletados no Terminal Coolterm, Figura 53.

Figura 53 – Tela do terminal Coolterm mostrando os dados coletados.



Fonte: Própria do autor

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho de graduação foi realizado o projeto de um rastreador solar para o estudo da eficiência energética, minimizando as perdas de rendimento resultante da variação do ângulo de incidência dos raios solares.. Foi usado um rastreador solar de um único eixo automatizado, sensores de luminosidade servomotores, uma plataforma de controle e um controlador de carga.

Os resultados dos testes obtidos em campo para o painel com rastreador solar foi comparado com os resultados de um painel de eixo fixo permitindo concluir que a automação dos painéis fotovoltaicas aumenta o seu desempenho e a eficiência na geração de energia elétrica, avaliada a partir da potência gerada.

Essa automação do painel fotovoltaico com rastreador, mantendo a incidência de raios solares em 90º com a superfície deste, ao longo do dia, a geração de energia elétrica resulta em médias de potências de mais de 30%., em relação ao painel de eixo fixo.

Ainda que a aplicação de rastreamento solar em painéis fotovoltaicos necessite de um investimento a mais na instalação dos componentes da lógica de controle e correção da posição, demonstrou-se por esta pesquisa ser um método válido, podendo diminuir o tempo de retorno do investimento, pois a geração de energia é acrescida instantaneamente.

Para trabalhos futuros, sugere-se fazer rastreadores de 2 eixos, estudo de carga (banco de baterias), estudar problemas com sujidade e descarte dos painéis.

REFERÊNCIAS BiBLIOGRÁFICAS

ALLIL, Alexandre Silva. Estudo, desenvolvimento e implementação do sistema de controle e automação de um Rastreador Solar. Trabalho de graduação. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018. Acesso em: 30 mai. 2024.

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Payback de energia solar cai mesmo com as novas regras da 14.300. São Paulo, SP, 20 set. 2023. Disponível em: absolar.org.br/noticia/payback-de-energia-solar-cai-mesmo-com-as-novas-regras-da-14-300/. Acesso em: 30 mai. 2025.

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Energia solar já evitou 50 milhões de toneladas de CO2 no Brasil. ABSOLAR -Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltáica. São Paulo, SP, Brazil, 2024. Disponível em: absolar.org.br/energia-solar-ja-evitou-50-milhoes-de-toneladas-de-co2-no-brasil/. Acesso em: 01 abr. 2025.

IEA - Agência Internacional de Energia. Brazil Energy Mix. IEA – International Energy Agency. Paris, França, 2025. Disponível em: iea.org/countries/brazil/energy-mix. Acesso em: 25 mar. 2025.

ALVES, Gabriel de Oliveira. Rastreador solar controlado por Arduino. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica,75p. Universidade Federal da Grande Dourados-MS. 2018. 29 abr. 2024.

AMARAL, Haroldo. Medindo corrente e tensão com o módulo INA219. MakerHero, 27 abr. 2017. Disponível em: makerhero.com/blog/medindo-corrente-e-tensao-modulo-ina219/. Acesso em: 24 mai. 2024.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Expansão da micro e minigeração distribuída ultrapassou 2 GW no primeiro trimestre de 2025. gov.br – ANEEL. Brasília, DF, Brasil, 2025. Disponível em: gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/expansao-da-micro-e-minigeracao-distribuida-ultrapassou-2-gw-no-primeiro-trimestre-de-2025. Acesso em: 01 abr. 2025.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. RALIE – Relatório de Análise de Informações Econômico-Financeiras: Plataforma interativa com indicadores econômicos e financeiros do setor elétrico regulado. Portal Relatórios – ANEEL. Brasília, DF, Brasil, 2025. Disponível em: portalrelatorios.aneel.gov.br/Ralie. Acesso em: 01 abr. 2025.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa n. 875, de 10 de março de 2020. Diário Oficial, Brasília, DF, Brasil, 10 de março de 2020, ano 2020. Disponível em: www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020875.pdf. Acesso em: 25 mar. 2025.

ARDUINO AG. Arduino Documentation: Browse through our documentation to learn everything about your Arduino journey. Disponível em: docs. Arduino.cc/. Acesso em: 21 mar. 2024.

BLOG RAISA. Resistor Dependente de Luz LDR: Fotoresistor. 2023. Disponível em: blog.raisa.com.br/resistor-dependente-de-luz-ldr-fotoresistor/. Acesso em: 18 abr. 2024.

BYD ENERGIA. Placa solar: saiba tudo sobre energia solar fotovoltaica. Disponível em: http://bydenergia.com/placa-solar/. Acesso em: 26 mai. 2025.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO ARDUINO UNO. STA Eletrônica. Brasil. Disponível em: docs.arduino.cc/. Acesso em: 29 abr. 2024.

CARVALHO, Carlos Alberto Aragão de; Bignard, Hudson Lucio. A ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL: HISTÓRICO E RESULTADOS. Revista Brasileira de Estudos Estratégicos, Rio de Janeiro - RJ, v. 13, junho 2021. Universidade Federal Fluminense, Instituto de Estudos Estratégicos. Disponível em: rest.uff.br/index.php/rest/issue/archive. Acesso em: 28 mar. 2025.

CASTAÑEDA, Cesar Eduardo Figueroa. Desenvolvimento de um rastreador solar passivo por transferência de massa. Prodetec-Programa de Pós-Graduação de Desenvolvimento Tecnológico, 2011. Acesso em: 28 jul 2023.

CCEE Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Painel de Dados de Geração de Energia Elétrica: Informações atualizadas sobre o Sistema Interligado Nacional (SIN). CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Brasília, DF, Brasil, 2025. Disponível em: ccee.org.br/dados-e-analises/dados-geracao. Acesso em: 18 mar. 2025.

COSTA NETO, Armelindo. Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar com dois eixos de baixo custo para painéis fotovoltaicos. Trabalho de Conclusão de curso. Curso de Engenharia de Produção. Universidade Federal de Alagoas – UFAL Campus Sertão. Dezembro 2018. Acesso em: 15 ago 2023.

DGTEC. Controlador de Carga Solar 10A PWM KP-AD10A 12V/24V Knup. [S.l.]: DGTEC, [s.d.]. Disponível em: dgtec.com.br/energia-solar/controlador-de-carga/controlador-de-carga-solar-10a-pwm-kp-ad10a-12v24v-knup. Acesso em: 04 out. 2024.

ELERA. Elera conclui a expansão de Janaúba, maior complexo solar do Hemisfério Sul e das Américas. Elera Renováveis. São Paulo, SP., 2025. Disponível em: https://elera.com/index.php/2025/05/29/elera-conclui-a-expansao-de-janauba-maior-complexo-solar-do-hemisferio-sul-e-das-americas/. Acesso em: 2 jul. 2025.

ELETRONUCLEAR. Energia Nuclear. Eletronuclear. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/Energia-Nuclear.aspx. Acesso em: 28 mar. 2025.

ELETRONUCLEAR. Relatório Anual 2023. Eletronuclear. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2023. 95 p. Disponível em: eletronuclear.gov.br/Quem-Somos/Governanca/Documents/Relatorios-Anuais/Relatorio-Anual-2023.pdf. Acesso em: 28 mar. 2025.

ENERGIA TOTAL, Como funciona o painel solar fotovoltaico e o que é feito?Disponível em: < energiatotal.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico-e-do-que-sao-feitos>. Acesso em: 20 jul 2023.

ENERGY INSTITUTE. Statistical Review of World Energy. 73 ed. El Statistical Review of World Energy 61 New Cavendish Street London W1G 7AR, 2024. 72 p. Disponível em: energy-transition-institute.com/article/-/insights/statistical-review-of-world-energy-2023. Acesso em: 18 mar. 2025.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024. Boletim Estatístico da EPE, Rio de Janeiro, Brasil. 20 p, 2024. Dados atualizados sobre geração, consumo e capacidade instalada de energia elétrica no Brasil, com base em 2023. Disponível em: epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet-2024.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.

EUROPEAN COMMISSION – Joint Research Centre. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Disponível em: re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#api_5.3. Acesso em: 30 mai. 2025.

EVOSOLAR. Quanto tempo dura uma placa solar? São Paulo, SP, 13 nov. 2020. Rafael Lutterback. Disponível em: evosolar.com.br/post/quanto-tempo-dura-uma-placa-solar/. Acesso em: 30 mai. 2025.

GEORGIA TECH RESEARCH INSTITUTE. High Temperature Solar Energy. Georgia Tech Research Institute (GTRI). Atlanta, GA, EUA. 12 p. Disponível em: web.archive.org/web/20161003072910/http:// gtri.gatech.edu/history/files/media/other-publications/High_Temp_Solar_Energy_Pamphlet.pdf. Acesso em: 01 abr. 2025.

GUSE, Rosana. O que é servo motor? Funcionamento, tipos e como testar. MakerHero. SP, 2024. Disponível em: makerhero.com/blog/o-que-e-servo-motor/?srsltid=AfmBOoozq2k3BN_v238BcqnmjMXAbOARvIeSOXksko0l2Tx4RFoGyw6K. Acesso em: 18 abr. 2024.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Brasília, DF: INMET, [s.d. — continuamente atualizado]. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 29 mai. 2025

IRENA. Renewable Capacity Highlights. Elera Renováveis. Abu Dhabi, 2025. Disponível em: static.poder360.com.br/2025/04/capacidade-energia-renovavel-mar2025-irena.pdf. Acesso em: 2 jul. 2025.

JOHANN, Danielle. Os aquecedores solares no planejamento energético brasileiro..ABRASOL - Associação Brasileira de Energia Solar Térmica. Brasil. Disponível em: conteudo.abrasol.org.br/index.php/2024/09/02/os-aquecedores-solares-no-planejamento-energetico-brasileiro/. Acesso em: 01 abr. 2025.

LAURINDO, Lucas. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA COM RASTREAMENTO SOLAR. Rosana - SP, 2023. 46 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia) - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO, Rosana - SP, 2023. Disponível em: repositorio.unesp.br/entities/publication/61a5f1af-1b5f-4333-a1de-fdef50bac0bd. Acesso em: 27 abr. 2024.

LIMA, Dimas Teixeira. Usina hidrelétrica UHE no Brasil: geração de energia e impactos ambientais. Redenção, CE, Brasil, 2022. 71 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energias) - Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Redenção, CE, Brasil, 2022. Disponível em: repositorio.unilab.edu.br/jspui/handle/123456789/4997. Acesso em: 18 mar. 2025.

LÓPES, Marcos et al. OTIMIZANDO A GERAÇÃO DE ENERGIA DE PAINEIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO UM RASTREADOR SOLAR DE EIXO ÚNICO E UM MICROCONTROLADOR ESP8266. Revista de Tecnologia da Informação da Faculdade Lourenço Filho Fortaleza – CE, Fortaleza – CE, v. 5. 23 p, junho 2022. Disponível em: multiversa.edu.br/docs/revista-cientifica/ARTIGO%204%20-%20Paineis%20Fotovoltaico_Marcos_Lazaro_FRED.pdf. Acesso em: 13 abr. 2024.

MEIER, Roger. Freeware by Roger Meier. [S.l.]: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: freeware.the-meiers.org/. Acesso em: 10 abr. 2025

MFG ROBOTS. Conexão série, paralela e série-paralela de painéis solares. Disponível em: pt.mfgrobots.com/mfg/it/1004023641.html. Acesso em: 30 mai. 2025.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. BRASIL – Secretaria de Articulação Institucional e Cidadania Ambiental (SAIC). Termo de Referência. Estudo avaliativo da implementação da Agenda 21 Brasileira no período entre a Rio-92 e a Rio+20, com foco na sustentabilidade e no desenvolvimento sustentável. publicação online: Disponibilizado no site do Ministério do

Meio Ambiente. Disponível em: antigo.mma.gov.br/estruturas/saic/_ECAP/127_ecap20032012102620.pdf. Acesso em: 12 mar. 2025.

MRK Solar. Passo a passo da fabricação do painel solar. São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: mrksolar.com.br/blog/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar/. Acesso em: 14 abr. 2025.

MUNDO DA ELÉTRICA, Placa Solares o que são e como funcionam. Disponível em: < mundodaeletrica.com.br/placas-solares-o-que-sao-e-como-funcionam/>. Acesso em: 22 jul. 2023.

MUNDO DA ELÉTRICA. O que é controlador de carga?. YouTube, 13 jan. 2020. Disponível em: youtube.com/watch?v=Uc2qVuNybPo. Acesso em: 14 mar. 2025.

NADIEL COMPONENTES. Bateria Selada Energypower 12V 7A 1EP018 Segurança. [S.l.]: Nadiel Componentes, [s.d.]. Disponível em: http:// nadiel.com.br/produto/10738/bateria-selada-energypower-12v-7a-1ep018-seguranca. Acesso em: 22 mar. 2025.

NEOENERGIA. Você sabe como funciona um aerogerador?. Neoenergia. São Paulo, SP, Brasil, 2021. Disponível em: neoenergia.com/w/voce-sabe-como-funciona-um-aerogerador-. Acesso em: 28 mar. 2025.

OLIVEIRA, Carlos Antonio Alves de. Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. Disponível em: < repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10013>. Acesso em 22 de outubro de 2017.

OLIVEIRA, Daniel Leite. Estudo e desenvolvimento de um sistema de monitoramento de painéis solares fotovoltaicos utilizando Arduino. 2022. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022. Disponível em: repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/26715. Acesso em: 22 mar. 2025

ONU. Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): Os 17 Objetivos para transformar nosso mundo. Nações Unidas – Desenvolvimento Sustentável. Nova Iorque, EUA, 2015. Disponível em: sdgs.un.org/goals. Acesso em: 12 mar. 2025.

OZERDEM, Ozgur Cemal; SHAHIN, Adnan. A PV Solar Tracking System Controlled By Arduino/Matlab/Simulink. International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). Published by the International Organization of IOTPE. ISSN 2077-3528 Issue 21, Vol. 6, N. 4, p. 5-10, December 2014.

PEREIRA, E. B.; et al. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p. ISBN 978-85-17-00090-4. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>. Acesso em: 30 mai. 2025.

PERGHER, Juliano Elbri Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de dois eixos e avaliação do desempenho em comparação com um sistema de eixo fixo. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica- Universidade do Vale do Taquari-UNIVATES, Lajeado/RS, Acesso em 10 jun. 2023.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. GTES. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Edição Revisada e Atualizada, 2014. 530 p. Acesso em: 29 fev. 2024.

PORTAL SOLAR, Como funciona o Painel Solar Fotovoltaico-2017. Disponível em:< portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html/>. Acesso em 10 set. 2023.

PUCRS. Engenharia de Energias Renováveis: conheça a profissão que une ciências exatas e sustentabilidade. Portal PUCRS Notícias. Porto Alegre / RS, 2025. Disponível em: portal.pucrs.br/noticias/ensino/engenharia-de-energias-renovaveis-conheca-a-profissao-que-une-ciencias-exatas-e-sustentabilidade/. Acesso em: 13 mar. 2025.

RESUN SOLAR. Datasheet: RSM010P Polycrystalline Solar Module. Resun Solar Energy Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, China. Disponível em: resunsolar.com/?s=RSM010P. Acesso em: 29 fev. 2024.

RIBEIRO, Luiza Bastos. Um estudo sobre energia eólica no Brasil. João Monlevade, MG, Brazil, 2017. 68 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), João Monlevade, MG, Brasil, 2017. Disponível em: monografias.ufop.br/handle/35400000/356. Acesso em: 28 mar. 2025.

SANTOS, Caio; Schwabe, Gabriel; Rubinec, Samuel. Controle de Sistema de Energia Solar Fotovoltaica. São Caetano do Sul, 2023. 70 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) - CENTRO UNIVERSITÁRIO DO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2023. Disponível em: repositorio.maua.br/handle/MAUA/504. Acesso em: 19 abr. 2024

SANTOS, Israel Joaquim dos. Estudos de caso de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Curso de Engenharia Elétrica. Centro Universitário Unifacvest, Lages SC. 2018. p.122. Acesso em 08 out. 2023.

SIRIUS. Tipos de painéis solares: conheça os 8 principais. Sirius. Cabo de Santo Agostinho - PE, 2021. Disponível em: energiasirius.com/tipos-de-paineis-solares/. Acesso em: 25 abr. 2025.

STROUSTRUP, Bjarne. The Design of C++. The C++ Programming Language. 4th ed. Addison-Wesley Professional, 2013. 1368 p. cap.1. Disponível em: amazon.com.br/C-Programming-Language-Bjarne-Stroustrup/dp/0321563840. Acesso em: 12 abr. 2024.

Th.S. Dhahi et al. Advances in nano sensors for monitoring and optimal performance enhancement in photovoltaic cells. iScience, v. 27, n. 4, 15 05 2024. DOI: 10.1016/j.isci.2024.109347. Disponível em: cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(24)00568-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2589004224005686%3Fshowall%3Dtrue. Acesso em: 14 abr. 2025.

USINAINFO. Servo Motor MG995 Tower Pro 180° 11 kgf·cm de posição com engrenagens metálicas. UsinaInfo. Disponível em: usinainfo.com.br/servo-motores/servo-motor-mg995-tower-pro-180-11kgfcm-de-posicao-com-engrenagens-metalicas-2740.html. Acesso em: 19 abr. 2024.

USINAINFO. LDR Sensor de Luminosidade 5mm. UsinaInfo. Brusque – SC. Disponível em: usinainfo.com.br/ldr/ldr-sensor-de-luminosidade-5mm-2982.html. Acesso em: 18 abr. 2024.

USINAINFO. Módulo Bluetooth HC-05 para Arduino Master/Slave. UsinaInfo. Brusque, SC, Brazil. Disponível em: usinainfo.com.br/modulo-bluetooth-arduino/modulo-bluetooth-hc-05-para-arduino-masterslave-3514.html. Acesso em: 16 aug. 2024.

USINAINFO. Sensor de Tensão e Corrente INA219 De Alta Precisão. UsinaInfo. Brusque – SC, Brazil. Disponível em: usinainfo.com.br/sensor-de-tensao-arduino/sensor-de-tensao-e-corrente-ina219-de-alta-precisao-4856.html. Acesso em: 24 mai. 2024.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. Energia solar fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica, 2012. 288 p. (Fotovoltaico). Acesso em: 29 fev. 2024

Wiring the I2C INA219 Zero Drift, Bidirectional Current/Power Monitor with MCU. 14core. Disponível em: 14core.com/wiring-the-i2c-ina219-zero-drift-bidirectional-currentpower-monitor-with-mcu/. Acesso em: 30 mai. 2024.

APÊNDICE A

Tabelas de tensões para os testes com resistores e os LDRs usando o Arduino UNO.

Para definir o resistor colocado em série com o LDR duas resistências foram usadas LDRs, 1KΩ e 10KΩ variando os níveis de intensidade luminosa, resultando na Tabela 4.

Tabela 4 – Teste dos LDRs

Teste de circuito divisor de tensão com LDR 1													
LUMINOSIDADE	Tensão de saída com resistor de 1KΩ [V]					Média [V]	Tensão de saída com resistor de 10KΩ [V]					Média [V]	Multímetro [Ω
Intensa	4,90	4,90	4,90	4,90	4,90	4,90	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	22
Moderada	2,55	2,62	2,73	2,73	2,61	2,65	4,55	4,56	4,61	4,61	4,57	4,58	630
Ambiente	2,44	2,56	2,30	2,45	2,53	2,46	4,50	4,55	4,59	4,57	4,52	4,55	955
Baixa	1,32	1,35	1,43	1,39	1,25	1,35	3,94	3,96	4,02	3,91	3,83	3,93	2700
Escuridão	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,04	0,07	0,05	0,05	0,05	∞

Teste de circuito divisor de tensão com LDR 2													
LUMINOSIDADE	Tensão de saída com resistor de 1KΩ [V]					Média [V]	Tensão de saída com resistor de 10KΩ [V]					Média [V]	Multímetro [Ω
Intensa	4,92	4,91	4,91	4,92	4,92	4,92	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	20
Moderada	2,66	2,53	2,74	2,62	2,57	2,62	4,54	4,60	4,62	4,57	4,57	4,58	550
Ambiente	2,53	2,24	2,52	2,26	2,44	2,40	4,58	4,46	4,57	4,57	4,47	4,53	940
Baixa	1,47	1,33	1,50	1,36	1,44	1,42	3,97	4,03	3,85	3,98	3,92	3,95	3900
Escuridão	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,05	0,06	0,02	0,04	0,08	0,05	∞

Fonte: Própria do autor

Tabela 5 – Tabelas de valores das resistências dos LDR para R= 1 KΩ e 10 KΩ.

R_{LDR} [Ω]	
R = 1KΩ	R = 10KΩ
20,41	0,00
888,22	917,03
1035,83	998,68
2709,20	2716,17
1249000,00	915925,93

R_{LDR} [Ω]	
R = 1KΩ	R = 10KΩ
17,09	0,00
905,49	917,03
1085,07	1037,53
2521,13	2658,23
1249000,00	990000,00

Fonte: Própria do autor

APÊNDICE B

Programa do sistema de controle de posição em linguagem C.

```
#include <Servo.h>

Servo Servo_SUL;   //

Servo Servo_NORTE;  //

int PosicaoVertical = 90; //

int LDR_LESTE = A4; //

int LDR_OESTE = A5; //

void setup() {

Servo_SUL.attach(3);//

Servo_NORTE.attach(5);  //

Servo_SUL.write(PosicaoVertical); //

Servo_NORTE.write(180 - PosicaoVertical); //

delay(2000); //

}

void loop() {

int leituraLeste = analogRead(LDR_LESTE);  //

int leituraOeste = analogRead(LDR_OESTE);  //

int tolerancia = 20; //

int diferenca = leituraLeste - leituraOeste; //

if (abs(diferenca) > tolerancia) { //

if (leituraLeste > leituraOeste) { //

PosicaoVertical++; //

} else { //

PosicaoVertical--; //

 }

 Servo_SUL.write(PosicaoVertical); //

Servo_NORTE.write(180 - PosicaoVertical); //
```

```
}

delay(5000); // Loop se repete a cada 5 segundos

}
```

APÊNDICE C

Programa do sistema de Aquisição remora de dados em linguagem C.

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_INA219.h>

#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial BTserial(10, 11); // RX, TX para HC-05

Adafruit_INA219 ina1(0x40); // Sensor 1

Adafruit_INA219 ina2(0x41); // Sensor 2

void setup() {

BTserial.begin(9600);

Wire.begin();

if (!ina1.begin()) {

BTserial.println("Erro ao iniciar INA219 #1");

return;

}

if (!ina2.begin()) {

BTserial.println("Erro ao iniciar INA219 #2");

return;

}

ina1.setCalibration_32V_2A();

ina2.setCalibration_32V_2A();

}

void loop() {

float v1 = ina1.getBusVoltage_V();

float i1 = ina1.getCurrent_mA();

float p1 = (v1 * i1) / 1000.0;

float v2 = ina2.getBusVoltage_V();

float i2 = ina2.getCurrent_mA();
```

```
float p2 = (v2 * i2) / 1000.0;
BTserial.print("PLACA1 ");
BTserial.print(v1, 2); BTserial.print("V ");
BTserial.print(i1, 2); BTserial.print("mA ");
BTserial.print(p1, 2); BTserial.print("W | ");
BTserial.print("PLACA2 ");
BTserial.print(v2, 2); BTserial.print("V ");
BTserial.print(i2, 2); BTserial.print("mA ");
BTserial.print(p2, 2); BTserial.println("W");
delay(2000); // Enviar a cada 2 segundos
}
```