Desenvolvimento de Sistema Tracker com Sensores LDR para Placas Fotovoltaicas

Felipe Tenório Medina, Gustavo Alves da Silva, Gustavo Kakehi Silva, Gustavo Martins de Oliveira, Pedro Dantas Sampaio, Roberto Trindade Oliveira - Mauricio Caldora Costa

Departamento de Engenharia Elétrica Universidade Anhembi Morumbi (UAM)

Resumo — **O processo de captação da energia proveniente da radiação solar e posteriormente transformada em energia elétrica – popularmente conhecida como energia solar fotovoltaica – é uma das principais fontes de geração de energia renovável, com uma enorme capacidade de expansão para os próximos anos. Entretanto, por normalmente serem instaladas de maneira fixa, as placas fotovoltaicas não captam a energia solar da maneira mais eficiente.**

Os painéis solares que utilizam o sistema *tracker* alcançam uma maior eficiência na captação de luz solar direta, resultando em uma maior capacidade de geração. De maneira geral, os painéis com o sistema *tracker* instalado tem um ganho na geração de energia em torno de 25% para sistemas com rotação em um eixo único. É importante destacar que esse ganho na eficiência varia, pois existem diversos fatores a serem considerados, como a localização geográfica do próprio sistema, por exemplo.

Com a movimentação da placa solar sendo orientada pela variação dos sensores de luminosidade, o sistema será mais eficiente e terá um melhor aproveitamento da irradiação solar.

Pensando nisso, foi desenvolvido um protótipo com a movimentação com base nos LDR's, controlados por motores ligados a um Raspberry.

***Palavras-Chave* — Energia Solar. Placas Fotovoltaicas. Sistema *Tracker*. Eficiência.**

I. INTRODUÇÃO

Diante da crescente preocupação da sociedade pelo uso finito das fontes fósseis para geração de energia elétrica e dos seus prejuízos à atmosfera, constatou-se a necessidade de investir em soluções renováveis, pois causam menos impacto ao meio ambiente e são fontes energéticas consideradas inesgotáveis (MOREIRA, 2021). [7].

Visando uma geração de energia elétrica limpa, há de se considerar o potencial do Sol, "[..] A potência que a Terra recebe do sol, corresponde a cerca de 40.000 vezes a potência elétrica instalada no mundo [..]" (VIAN, 2021, p.84). [9]. Diante disso, é perceptível um recurso natural abundante, mas que sua captação ainda é baixa em relação ao seu potencial.

Na busca por se tornar referência em energia solar, o Brasil vem tendo incentivos cada vez maiores do governo para a implementação desse tipo de geração: um exemplo disso foi em 2021, no qual o país investiu 1 bilhão de dólares em importação de placas solares (ETENE, escritório de estudos econômicos vinculado ao Banco do Nordeste) (GRAZINI; MOTTER, 2021). [5]. Outro exemplo é um estudo feito pela ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica), o setor de energia solar movimentou mais de 30 bilhões de reais em novos investimentos no Brasil em 2023, segundo a associação, "No segmento de geração própria são mais de R$105 bilhões em aportes, enquanto nas grandes usinas esse valor ultrapassa a marca dos R$46 bilhões em aportes" (HEIN, 2023). [6] desde o início da expansão da fonte.

Além dos incentivos, o país é beneficiado por ter um clima tropical, e, consequentemente, já possui uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, representando 83,3% de toda a matriz energética (MME/EPE, 2019) (MOREIRA, 2021). [7]. Grande parte da geração de energia elétrica é proveniente de usinas hidrelétricas, representando 58% da capacidade do país (MOREIRA, 2021). [7]. Entretanto, o governo calcula que as hidrelétricas percam espaço para as outras usinas como a eólica e a solar, com uma previsão de queda de cerca de 16%, passando a ser responsável por 42% do total de geração de energia elétrica [4].

Diante de um cenário favorável para a geração de energia solar – muito por conta dos exemplos citados acima - o Brasil é o 4º país que mais cresceu no ramo ficando atrás apenas de China, Estados Unidos e Índia, segundo dados divulgados pela Agência Internacional de Energias Renováveis (FILIPPE, 2022). [3].

Considerando que a posição do Sol varia ao longo do ano, existem dois fenômenos: o solstício de inverno que ocorre uma variação com relação ao eixo da Terra de -23,5° e no solstício de verão, que ocorre uma variação de 23,5°. Como em sua maioria, os módulos fotovoltaicos são projetados para uma posição fixa e em certo momento a placa solar tem uma queda no rendimento. Segundo um estudo realizado Li, Liu e Tang (2011, p. 64–68). é comprovado que a aplicação do sistema *tracker* aumenta a geração de energia em até "[...] 28% nas áreas com recursos solares abundantes e aumentou 16% nas áreas com recursos solares pobres [...]" [8]. A ideia do projeto será acoplar um sistema com três servomotores para movimentar a placa por meio da variação dos LDR's (*Light Dependent Resistor*) e desta forma ter um melhor proveito da luz solar.

II. PROBLEMA DE PESQUISA / OBJETIVOS

i. Problemas de Pesquisa

A geração de energia solar por placas fotovoltaicas é comumente utilizada em uma posição fixa – no Brasil voltado para o norte geográfico – não acompanhando o movimento do sol e assim não sendo possível aproveitar o máximo de irradiação solar, diminuindo sua capacidade máxima de geração.

ii. Objetivos Gerais

O objetivo do projeto será acoplar um sistema *tracker* para aproveitar luz solar a fim de evitar zonas de sombreamento e assim, com o auxílio de três motores em um eixo duplo, fazer o movimento sugerido pelos sensores de luminosidade.

III. PESQUISA TEÓRICA

Os sistemas de geração de energia solar autônomos são caracterizados por não se conectarem à concessionária ou à rede elétrica, distribuindo a energia gerada para consumo próprio. A energia produzida é armazenada em baterias, garantindo o abastecimento em períodos sem sol. Para o estudo e aplicação do projeto, será utilizado um sistema semelhante, mas sem baterias e controlador de carga. O objetivo do projeto é a criação de um sistema *tracker* e a análise das informações de geração da placa.

Conhecido também como placas ou módulos, são nomes referentes ao conjunto de camadas que tem o intuito de proteger e prolongar a vida útil da parte responsável pela captação da incidência solar, a célula fotovoltaica. É utilizado moldura de alumínio, vidro temperado, películas protetoras entre as células, fundo protetor (*backsheet*) e a caixa de junção, onde encontram-se cabos para conexão aos arranjos (painéis conectados entre si) e nas demais ligações, como controladores de carga, inversor solar e baterias. A seguir, um exemplo de uma estrutura do painel solar (Fig.1).

Fig. 1. Estrutura do painel solar.
Fonte: Amrutenergy, 2022.

A maioria das células são fabricadas com silício cristalizado: um semicondutor barato e encontrado em grande quantidade no planeta. Mediante a isso, é necessário realizar a junção PN com outros elementos químicos (impurezas) para transformar o silício em positivo (P) e negativo (N). O mais usual é a dopagem com fósforo e boro.

O semicondutor P possui carência de elétrons e o tipo N contém elétrons em excesso. Quando os raios solares atingem a camada N, os elétrons transitam entre as camadas da zona de depleção (região entre a junção das duas camadas) também chamada de barreira de potencial, onde será rompida e passarão para a camada P, cujo acúmulo desses elétrons resultará na diferença de potencial. Para que a captação e utilização da energia seja suficiente, diversas células são conectadas em série. As linhas metálicas na superfície são os condutores, e através deles, com uma carga conectada nos terminais, a corrente contínua (DC) irá circular. A Fig.2 ilustra o funcionamento.

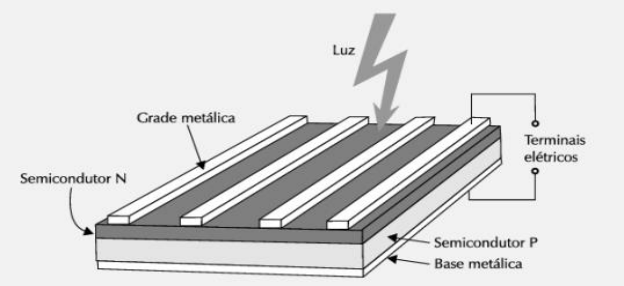

Fig. 2 - Estrutura da célula fotovoltaica com junção PN.
Fonte: Villalva, 2012.

Existem diferentes tipos de células, sendo as mais usuais as de silício policristalina e monocristalina. Ambas possuem o tempo médio de vida útil similares – entre 25 e 30 anos, tendo pequena diferença no desempenho, mas com disparidade no valor final de custo de fabricação e aquisição. A Fig.3 ilustra a diferença entre os tipos de células.

A primeira é fabricada com muitos (poli) cristais de silício em cada célula, o que acaba influenciando no fluxo de elétrons e consequentemente, intervindo na eficácia. A tecnologia tem como característica a cor azulada e constitui numa maior resistência às altas temperaturas (exemplo ilustrado na Fig.4).

A segunda opção, comercializada nas cores em tons escuros como azul e preto, é construída com um único (mono) cristal de silício em cada célula. Deste modo, os elétrons podem mover-se com maior facilidade, resultando um maior aproveitamento da luz captada. Apesar das células monocristalinas serem mais eficientes "[...] alcançam eficiências de 15 a 18% [...]" (VILLALVA; GAZOLI, 2012**,** p. 65-75). [10], o valor da fabricação acaba sendo maior. As células de silício policristalino embora possuam eficiência moderadamente menor "[...] entre 13 e 15% [...]" (VILLALVA; GAZOLI, 2012**,** p. 65-75). [10], ainda assim, detém um melhor custo-benefício.

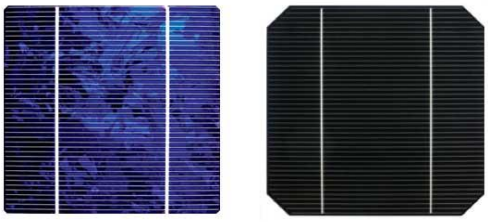

Fig. 3 – Célula solar policristalina e monocristalina, respectivamente.
Fonte: Solarquotes, 2020.

Fig. 4 – Arranjo fotovoltaico com 60 células do tipo policristalino em cada painel.
Fonte: Nettelin, 2022.

Um sistema *tracker* funciona a partir de um dispositivo que fará com que os painéis fotovoltaicos se posicionem sempre na melhor posição para captar o máximo de radiação solar possível. O uso desse sistema em módulos fotovoltaicos é recente, devido à redução de custo na tecnologia usada para captação solar. Anteriormente, eram mais utilizados para a produção de energia Térmica (Cortez, 2013). [2].

O movimento de rotação de um sistema *tracker* se baseia na variação da posição solar de 47° no decorrer do ano, com base na inclinação da Terra em relação ao ponto 0° dos equinócios, conforme indicado na Fig. 5.

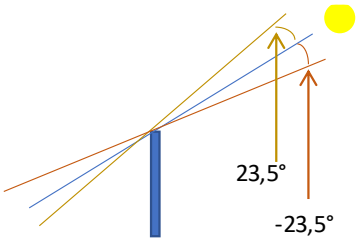

Fig. 5 – Variação anual da angulação da Terra em relação ao Sol.
Fonte: De autoria própria, 2022.

O sistema *tracker* possui dois tipos de movimentação: eixo de movimentação único ou duplo. Além dos dois tipos de movimentação para as placas solares, existem três conceitos principais para o sistema de acionamento, podendo ser ativo (utilizado no projeto), manual ou cronológico:

- **Ativo:** Os motores elétricos são acionados utilizando um conjunto de sensores – óptico-elétricos, fotorresistores e/ou piranômetros – que geram informações em tempo real para um microcontrolador.
- **Manual:** Uso de engrenagens manuais para ajustes de orientação e/ou ângulo de inclinação das placas fotovoltaicas.
- **Cronológico:** Baseado em algoritmos formados por dados (cronológicos e solares), pré-programados em microcontroladores, que comandam os motores para movimentação dos eixos da placa solar.

Um estudo realizado por Li, Liu e Tang em 2011 (2011, p. 64–68), mostrou que a performance de painéis solares com seguidor solar em um eixo pode ser melhorada em até 28% em áreas com abundância de recursos solares e em até 16% nas áreas com pouca incidência solar [8].

O pesquisador Al-Mohamad em 2004, desenvolveu um sistema *tracker* utilizando um controlador lógico programável (CLP), no qual foram utilizados dois sensores de luminosidade separados por uma barreira, e ao atingir um ângulo considerável de incidência solar causaria uma sombra em um dos sensores e assim fazendo com que o CLP ordenasse o motor a reposicionar o painel solar. Esse estudo feito por Mohamad ao ser comparado com um sistema fixo, apresentou um aumento de cerca de 40% na energia durante a manhã e ao [...] longo do dia foi de 20% (AL-MOHAMAD, 2004, p. 345–354). [1].

Para a lógica de movimentação do sistema *tracker*, existem dois tipos de eixo, que basicamente se diferenciam pela quantidade de motores que farão a movimentação:

- Eixo único: utiliza um motor que é pré-programado para que em determinado intervalo seja direcionado para uma maior incidência do Sol – esse rastreamento pode ser realizado por meio de três tipos: podendo ser um rastreador de eixo inclinado, vertical ou horizontal, alinhado ao Norte ou ao Sul (dependendo da latitude do local).
- Eixo duplo: funciona de forma mais eficiente, porém, também sendo o mais complexo e de maior custo: consiste em dois eixos perpendiculares entre si, o que permite que a placa tenha incidência máxima, estando sempre perpendicular ao Sol.

Para o eixo duplo, existem dois tipos de movimentação:

Azimutal - Possuindo eixo azimutal, realizando a rotação por elevação;

Tilt Roll - Um dos eixos controla a rotação da placa e o outro a angulação (utilizado neste projeto).

Como dito anteriormente, um sistema de geração de energia solar fotovoltaica com um sistema *tracker* instalado é mais eficiente se comparado com o sistema instalado de forma fixa. Os ganhos na geração podem ser considerados significativos em alguns períodos do dia – ilustrado na Fig. 9 - principalmente pela manhã e em horários próximos ao pôr do Sol.

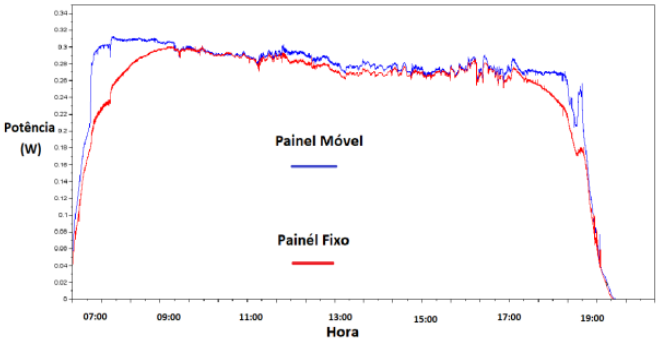

Fig. 6 – Potência gerada pelos painéis durante o dia.
Fonte: Blaszczak, 2022.

IV. METODOLOGIA

Para a montagem do projeto com seguidor solar instalado, foi utilizada uma Placa Solar de capacidade 10W em uma estrutura de MDF 3mm (Fig. 9, 10, 11, 12, 13 e 14), um sensor INA 219 que faz a leitura de tensão e corrente vinda da placa solar, 4 sensores LDR que realizam a captação de maior luminosidade, 4 capacitores 1uF conectados ao LDR´s para leitura da luminosidade e comparação dos valores e 3 servomotores ligados a um RaspBerry Pi 4, utilizando linguagem de programação Python para a realização da movimentação *Tilt Roll*, seguindo a variação da resistência dos sensores de luminosidade.

Para a elaboração do projeto, as seguintes disciplinas foram abordadas:

- Algoritmos e Programação
- Desenho Técnico e Computacional
- Engenharia e Inovação
- Dispositivos Microcontrolados
- Eletrônica Analógica
- Circuitos Elétricos I e II
- Sistemas Automatizados
- Eletrotécnica e IoT

A seguir (Fig.7) é apresentado o fluxograma de funcionamento do protótipo:

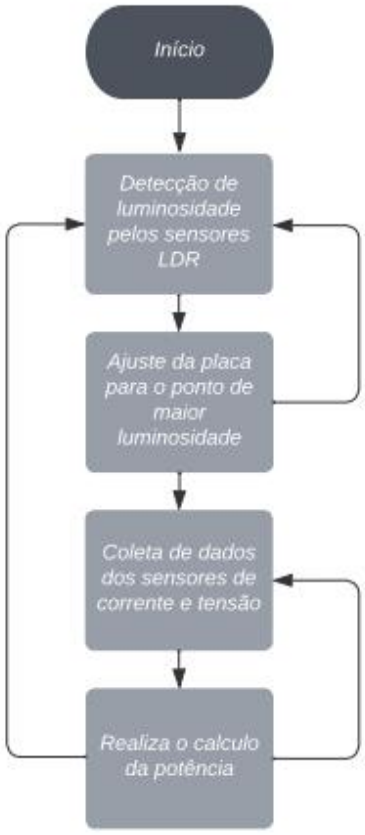

Fig. 7 - Fluxograma do projeto.
Fonte: De autoria própria, 2023.

V. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

A seguir, figuras 8, 9, 10, 11, 12 e 13 dos componentes do desenho técnico criados para a base do seguidor solar:

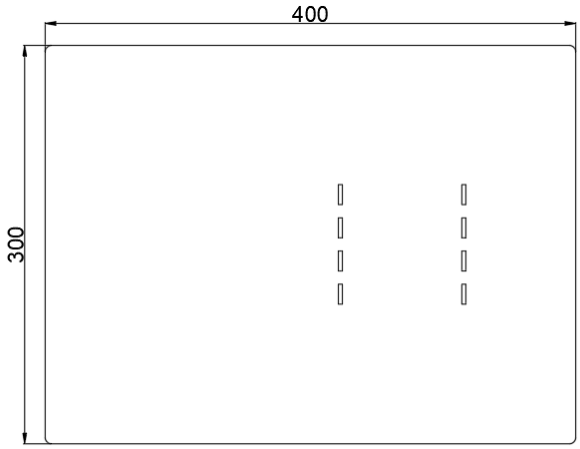

Fig. 8 – Peça em MDF – Base do suporte I.
Fonte: Autoria própria, 2023.

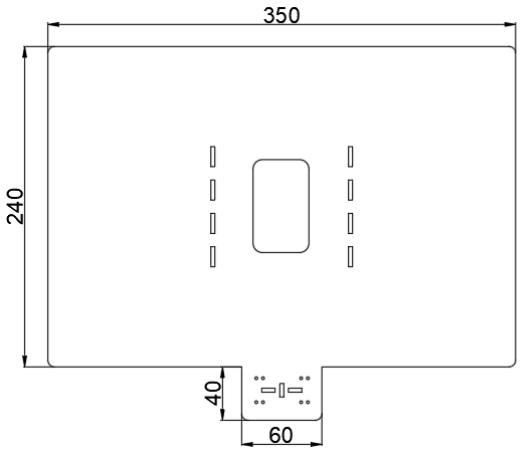

Fig. 9 – Peça em MDF – Suporte da placa e LDR.
Fonte: Autoria própria, 2023.

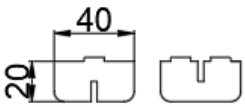

Fig. 10 – Peças em MDF – Divisor do LDR.
Fonte: Autoria própria, 2023

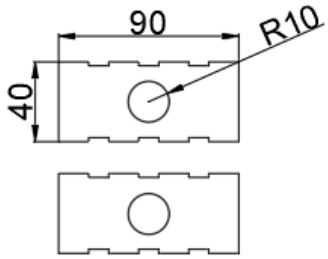

Fig. 11 – Peças em MDF – Encaixes da base e rotação.
Fonte: Autoria própria, 2023

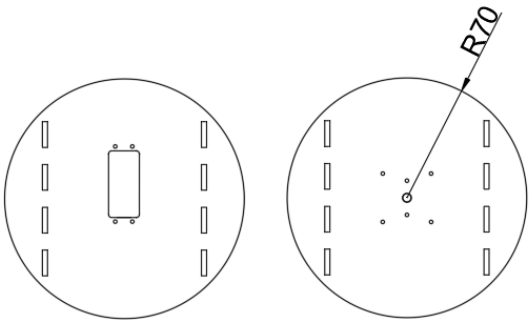

Fig. 12 – Peças em MDF – Encaixes do motor para rotação.
Fonte: Autoria própria, 2023

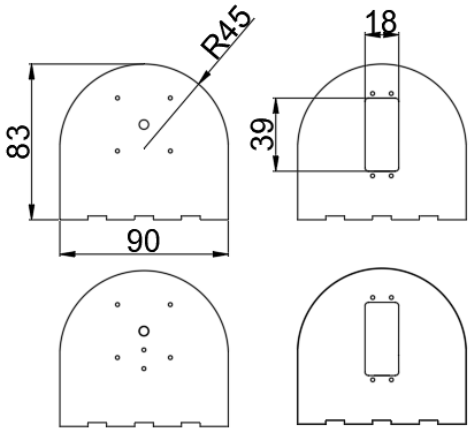

Fig. 13 – Peças em MDF – Encaixes do motor para angulação.
Fonte: Autoria própria, 2023

A estrutura finalizada está ilustrada abaixo, nas figuras 17 e 18. O módulo foi construído com uma estrutura em MDF 3mm, e é constituído por quatro sensores LDR, posicionados em pontos diferentes e interligados a quatro capacitores de 1µF, ligados a um Raspberry, o qual comanda diretamente os três servomotores para a movimentação da placa.

Fig. 14 – Estrutura MDF – Suporte *Tracker* – Vista frontal.
Fonte: Autoria própria, 2023

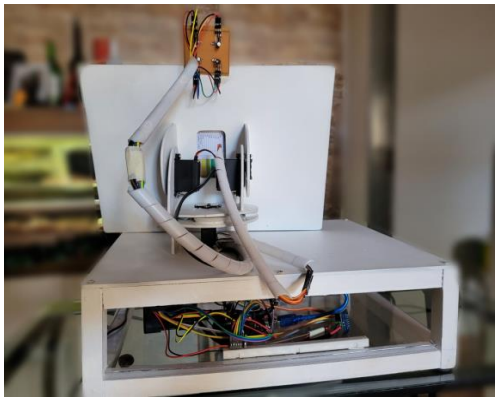

Fig. 15 – Estrutura MDF – Suporte *Tracker* – Vista traseira.
Fonte: Autoria própria, 2023

O circuito elétrico desenvolvido para o projeto (Fig.16) utilizou os seguintes componentes:

- Placa Solar 10W: Utilizado para captar a luz solar. A potência máxima possível para captação é de 10 W (Watts).
- 4 LDR’s de 5mm: São componentes eletrônicos fotorresistores - a resistência varia em resposta à intensidade de incidência de luz sobre o LDR.
- 4 Capacitores eletrolíticos de 1uF: O capacitor é utilizado para obter as informações vindas dos LDR’s, e após o armazenamento completo, é feita a descarga de energia na entrada digital do Raspberry.
- 3 Servomotores MG995: Dispositivo eletromecânico utilizado para as movimentações dos eixos de inclinação e rotação em um ângulo máximo de 180°. O modelo em questão foi utilizado para suportar o peso total da estrutura - 13 kg.cm (4,8V) e 15 kg.cm (6,0V).
- Sensor INA219: Utilizado para coletar informações como tensão e corrente referente ao tempo de exposição aos raios de luz. Na junção com a programação, é possível criar uma interface para demonstrar os valores e fazer o cálculo para determinar a potência em W (P = V x I).
- Raspberry Pi 4: Minicomputador utilizado para receber os valores do sistema e assim, executar
- uma programação para realizar controle dos três servomotores.
- Protoboard: Placa de ensaio para facilitar os testes do protótipo sem a necessidade de soldar os condutores aos componentes.
- Fonte externa de 5V e 1,5 A: Para alimentação dos motores de inclinação.

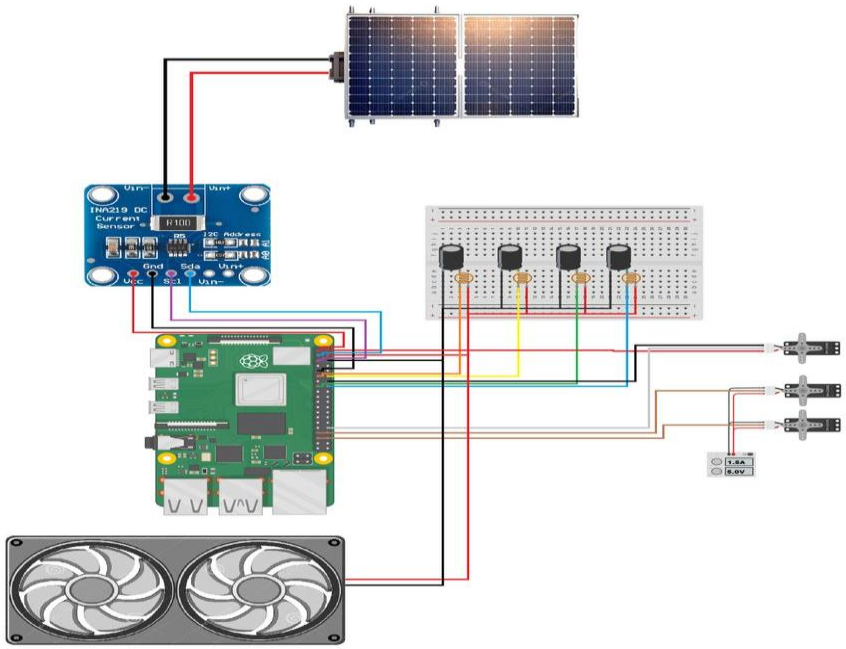

Fig. 16 – Circuito Elétrico do Projeto.
Fonte: Autoria própria, 2023

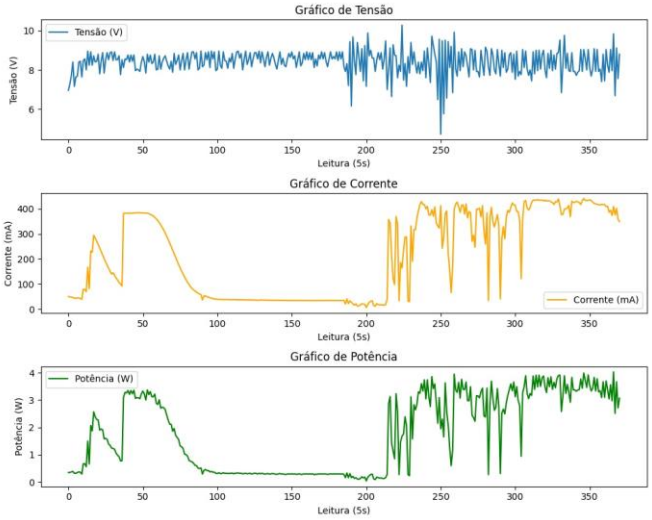

Fig. 17 – Gráficos gerados.
Fonte: Autoria própria, 2023

Conforme ilustrado na Fig. 17, é apresentado uma medição do painel solar funcionando durante 30 minutos ao final do dia 2 de dezembro de 2023, às 17:00 horas - horário de Brasília - com temperatura de 30° C (os gráficos foram gerados por meio do sensor INA 219). O primeiro gráfico está a tensão gerada em V; o segundo a corrente em mA e o terceiro a potência em W.

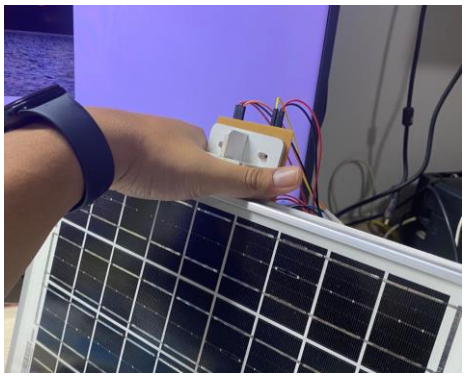

Fig. 18 – Leitura LDR's – Dois LDR's de cima.
Fonte: Autoria própria, 2023

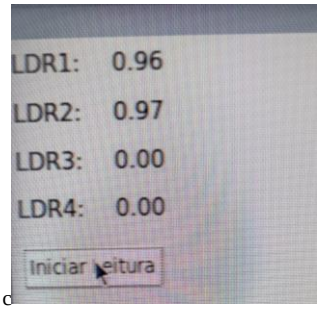

Fig. 19 – Leitura LDR's – Dois LDR's de cima.
Fonte: Autoria própria, 2023

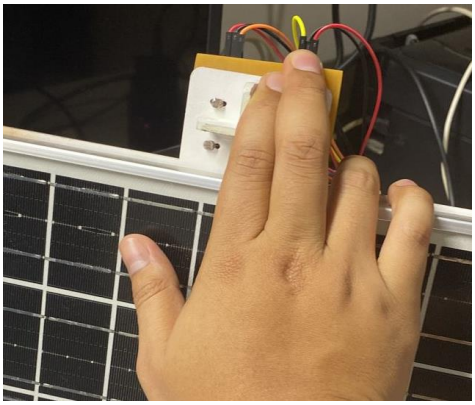

Fig. 20 – Leitura LDR's – Dois LDR's da esquerda.
Fonte: Autoria própria, 2023

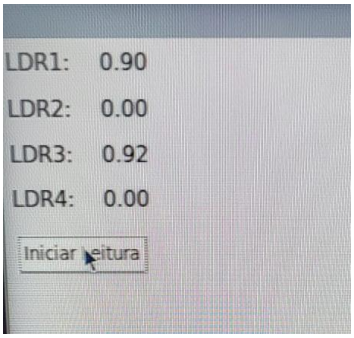

Fig. 21 – Leitura LDR's – Dois LDR's da esquerda.
Fonte: Autoria própria, 2023

Como ilustrado nas figuras 18, 19, 20 e 21, foram realizados os testes dos sensores sombreando determinados LDR's e desta forma, gerando uma variação da capacidade de descarga dos capacitores de 1µF. A partir disso, os motores realizam a movimentação para os pontos de maior luminosidade.

Os sensores de luminosidade estão posicionados em pontos diferentes, no qual captam a luz e resultam em uma variação na incidência de luz, gerando diferentes cargas para os capacitores e esses quando carregados, liberam as cargas. A leitura é efetuada através das portas analógicas do circuito integrado conectado ao Raspberry Pi, onde um código em Python realiza a comparação entre os valores dos LDR's, e aciona os servomotores até identificar o ponto que apresenta os valores mais aproximados entre os sensores.

A interpretação dos quatro LDR's, posicionados em quadrantes, e dos três servomotores ocorre da seguinte maneira: LDR1 - localizado no canto superior esquerdo; LDR2 - posicionado no canto superior direito; LDR3 - situado no canto inferior esquerdo e LDR4 - no canto inferior direito. Quanto aos servomotores, temos Servo1, responsável pela rotação angular vertical; Servo2, que realiza uma rotação angular vertical espelhada; e Servo3, encarregado da rotação angular horizontal.

No cerne do código de cada componente, a programação se vale de uma estrutura de decisões encadeadas (cascata de Ifs e Elifs) tendo a seguinte lógica: quando os LDRs são expostos à luminosidade, cuja intensidade varia de 0.00 (exposição nula)

a 1.00 (exposição máxima), a primeira camada de condicionais é acionada. Esta etapa verifica a intensidade de cada LDR para determinar qual deles está mais exposto à luz, ativando os comandos de movimentação dos servomotores para rotação angular em sentido vertical (cima ou baixo) ou horizontal (esquerda ou direita).

Essas possibilidades de movimentação são representadas por combinações de rotação angular vertical, sendo, +0.1 (cima) – considerando que 0.5 equivale a 90° na programação, 0.1 seria equivalente a 18° – associada a rotação angular horizontal -0.1 (esquerda). Em um caso hipotético em que o LDR1 possui maior intensidade luminosa do que os outros LDR's (expresso por LDR1 – LDR2 > 0.40 e LDR1 – LDR3 > 0.40 e LDR1 – LDR4 > 0.40), a programação realiza as seguintes ações: Servo1 += 0.1, Servo2 -= 0.1 e Servo3 -= 0.1. Essa lógica é implementada para cada LDR, encadeando-se dentro de uma estrutura condicional.

Posteriormente à análise dos pontos de luminosidade de cada LDR, caso seja identificado que todos apresentam intensidades aproximadas, conforme indicado por (LDR1 - LDR3) < 0.25 e (LDR2 - LDR3) < 0.25 e (LDR3 - LDR4) < 0.25, todos os servomotores permanecem na mesma posição.

Caso não seja identificado ponto de luminosidade, nenhum movimento é executado, resultando no desligamento dos servomotores.

Durante o desenvolvimento do projeto, foram enfrentadas algumas dificuldades que levaram a modificações em relação ao projeto inicial:

- Estrutura MDF: Durante um curto período de exposição ao Sol, foram notados alguns problemas com a base do protótipo. O MDF apresentou uma leve envergadura por conta da temperatura elevada, dificultando a estabilização da plataforma. Foi desenvolvido na parte inferior da base uma estrutura com duas barras de madeira Pinus de 1m de comprimento e 1 x 2 cm e duas barras de madeira MDT de 1m de comprimento e 2 x 2 cm e alinhadas com a superfície de 40x30 cm e espaçamentos para encaixar um acrílico de 1 mm para alocar os componentes de maneira organizada e gerar melhor refrigeração. Além disso, com o desenvolvimento da caixa de apoio na parte inferior, o contratempo foi resolvido, (exposto na Fig.25) eliminando os riscos de entortar como anteriormente.

Fig. 22 – Estrutura finalizada com a nova base.
Fonte: Autoria própria, 2023

- Movimentação/Estabilização da Placa: Inicialmente o projeto contava com apenas dois servomotores (conforme ilustrado na Fig.26), S0009 de 6V e torque de 1.5 Kg.cm, usado para rotação e o HX5010 de 4.8V e torque 6.9 Kg.cm, usado para a inclinação. Foi identificado que ao adicionar o peso da placa solar na estrutura, a sustentação no momento da inclinação em um determinado ângulo era afetada - por conta do efeito alavanca e da inércia. Em um ângulo excedente, o movimento de retorno era interrompido, onde o único motor não tinha torque suficiente para o eixo realizar a elevação contrária e retornar até a posição inicial. Como solução, foi instalado um terceiro motor para realizar o movimento de inclinação (conforme ilustrado na Fig.27).

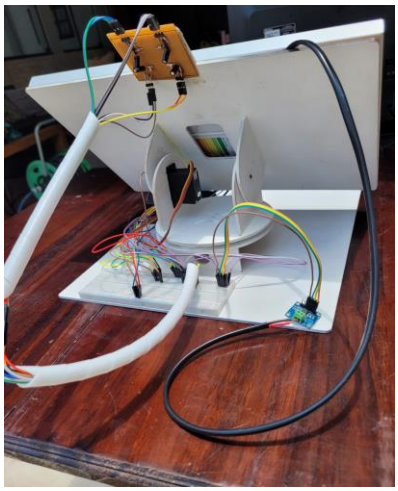

Fig. 23 – Foto inicial do projeto com dois motores.
Fonte: Autoria própria, 2023

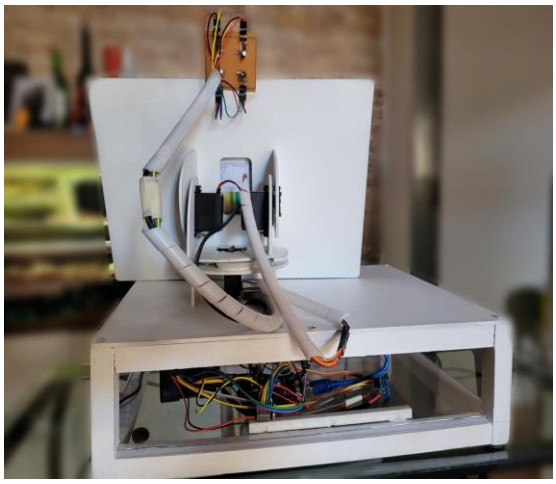

Fig. 24 – Foto final do projeto com três motores.
Fonte: Autoria própria, 2023

Foi feita uma tentativa de utilizar um Arduino UNO para controlar a movimentação dos motores e como uma alimentação externa para dois servomotores de inclinação, porém diversas dificuldades foram encontradas para a comunicação do Raspberry com o Arduino. Portanto, a ideia inicial foi mantida.

Com base na dinâmica do movimento solar, que varia em média 15 graus por hora, o motor projetado realizará cinco ajustes ao longo desse período. Cada ajuste consistirá em uma movimentação de 3 graus a cada 12 minutos, com um minuto dedicado a cada etapa de movimentação, ajuste e estabilização.

A precisão do motor, movendo-se com uma cadência de um movimento por minuto, garantirá um funcionamento contínuo ao longo de 60 minutos. Esse design estratégico assegura não apenas a eficiência na captura da energia solar, mas também a estabilidade operacional ao longo do ciclo diário.

O sistema *tracker* proposto, que visa otimizar a captação de energia solar, apresenta um significativo diferencial no custo-benefício quando comparado a um sistema fixo convencional. Ao considerar uma placa solar de 10Wp com 360 horas de sol por mês (12h ao dia) captadas pelo sistema *tracker* em oposição às 288 horas de sol captadas no sistema fixo (conforme explicitado na Equação 1), é possível realizar uma análise econômica que destaca a vantagem do sistema proposto.

kWh Sistema Fixo: $0{,}01\ kWp \cdot 280h = 2{,}88\ kWh$ (1)

kWh Sistema *Tracker*: $0{,}01\ kWp \cdot 360h = 3{,}60\ kWh$ (1)

Equação 1: Wh: Wp x horas de sol por mês

O fator de capacidade das placas solares, estabelecido em 23% para o cálculo do projeto (de acordo com o exposto na Equação 2), é crucial para compreender a eficiência global do sistema em converter a irradiação solar em eletricidade.

kWh Sistema Fixo: $2{,}88\ kWh \cdot 23\% = \frac{0{,}66\ kWh}{mês}$ (2)

kWh Sistema *Tracker*: $3{,}60\ kWh \cdot 23\% = \frac{0{,}83\ kWh}{mês}$ (2)

Equação 2: Wh com inclusão do FC: Wh x FC, fixa e *tracker*

Levando em consideração o consumo energético dos três servomotores (conforme descrito na Equação 3), que são ligados por uma hora diária (totalizando 30 horas por mês), o ganho líquido em eficiência proporciona uma economia de 11% em relação ao sistema fixo (tal como indicado nas Equações 4 e 5). Essa economia é resultado direto da maior eficiência na captação de energia solar, compensando o consumo adicional dos servomotores.

$$\frac{(\text{tensão do motor} \cdot \text{corrente nominal}) \cdot \text{horas mês} \cdot \text{nº motores}}{1000\ (\text{converter para kWh})}$$

$$\frac{(6\ V \cdot 0{,}170\ A) \cdot 30h \cdot 3}{1000} = 0{,}09\ kWh/mês \quad (3)$$

Equação 3: Consumo dos Motores (kWh/mês)

$$(0{,}83\ kWh - 0{,}09\ kWh) - 0{,}66\ kWh = \frac{0{,}074\ kWh}{mês} \quad (4)$$

Equação 4: Economia Mensal (kWh/mês)

$$\frac{\text{Economia Mensal (kWh/mês)}}{\text{Geração do Sistema Fixo}} \quad (5)$$

$$\frac{0{,}074\ kWh}{0{,}66\ \text{kWh}} = 11\% \ (5)$$

Equação 5: Economia Mensal (%)

Além disso, é importante salientar que a economia gerada pelo sistema *tracker* não se limita apenas à produção mensal, mas é acumulativa ao longo do tempo, o que reforça ainda mais o seu impacto positivo em termos de retorno sobre o investimento.

Considerando a crescente importância da sustentabilidade e eficiência energética, o sistema *tracker* não apenas proporciona uma economia financeira tangível, mas também contribui para a redução da pegada de carbono ao otimizar a geração de energia a partir de uma fonte renovável. Essa abordagem, além de se alinhar com as demandas atuais por soluções energeticamente eficientes, destaca-se como uma opção viável e economicamente atrativa para projetos de captação de energia solar fotovoltaica.

VI. CONCLUSÕES

O estudo apresenta um projeto prático para maximizar a captação da incidência solar, implementando um sistema *tracker* com três servomotores acionados por sensores de luminosidade. A abordagem proposta visa superar a limitação das instalações fixas, permitindo que os painéis fotovoltaicos se movam seguindo a trajetória solar ideal, resultando em ganhos de eficiência.

Embora as placas fotovoltaicas fixas sejam amplamente utilizadas, sua eficiência é de certa forma limitada. O sistema *tracker*, com sua capacidade de ajuste em tempo real, pode proporcionar um ganho significativo na eficiência de geração de energia, dessa forma é válido o desenvolvimento de novos estudos que visem analisar a implementação desse sistema de uma forma prática e em maior escala com o intuito de verificar sua eficiência de forma mais objetiva.

Os resultados obtidos revelaram a eficácia do sistema *tracker* proposto, que com a utilização dos sensores LDR´s foi constatada sua capacidade da captação dos pontos de maior luminosidade.

Este estudo não apenas destaca a importância estratégica da energia solar no contexto energético no mundo, mas também apresenta uma solução prática e simples para otimizar a captura de energia solar, contribuindo para o avanço contínuo na utilização de fontes renováveis e sustentáveis.

Mediante a isso, a utilização de um sistema *tracker* representa um avanço promissor para a eficiência da energia solar fotovoltaica. Fatores como localização geográfica e

investimentos, são relevantes na transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Com o desenvolvimento contínuo do seguidor, será possível otimizar ainda mais o aproveitamento do potencial solar, destacando o país e o consolidando como protagonista em energia limpa.

Ao considerar os próximos passos para o protótipo, a inclusão de uma bateria estacionária é necessária visando torná-lo autônomo ao armazenar a energia gerada. Além disso, a revisão da estrutura do projeto, modificando a base para reduzir o efeito alavanca, uma dificuldade enfrentada durante o desenvolvimento, o que resultaria em uma menor dependência dos motores. E para futuras melhorias realizar estudos mais aprofundados na movimentação dos motores, explorando lógicas alternativas e a possível integração de dispositivos como amplificadores operacionais ou controladores PID. Adicionalmente, a troca da placa fotovoltaica por uma de 30 Wp, pesando 2,5 Kg, é sugerida para aumentar ainda mais a eficiência do projeto. Essas alterações têm o potencial de otimizar significativamente o desempenho global do protótipo.

VII. REFERÊNCIAS

[1] AL-MOHAMAD, A. **Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system**. Applied Energy, v. 79, n. 3, p. 345–354, 2004. Acesso em 5 de mar. de 2022.

[2] CORTEZ, Ramiro José Monteiro. **Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica**. Porto, 2013. Acesso em: 10 de mar. de 2022.

[3] Exame. **Energia solar fotovoltaica: Brasil e o 4º país que mais cresceu em 2021**. 2021. Disponível em: https://exame.com/esg/energia-solar-fotovoltaica-brasil-e-o-4o-pais-que-mais-cresceu-em-2021/. Acesso em: 10 de mar. de 2022.

[4] Exame**. Hidrelétricas Perderão Espaço na Geração de Energia para Solar e Eólica. 2021**. Disponível em: https://exame.com/economia/hidreletricas-perderao-espaco-na-geracao-de-energia-para-solar-e-eolica/>. Acesso em 5 de mar. de 2022.

[5] GRAZINI, Mariana; MOTTER, Andressa. **Brasil investe US$ 1 bilhão em importação de placas solares por ano, diz estudo.** Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/colunas/painelsa/2021/09/brasil-investe-us-1-bilhao-em-importacao-de-placas-solares-por-ano-diz-estudo.shtml>. Folha de São Paulo, 2021. Acesso em 5 de mar. de 2022.

[6] HEIN, Henrique. **Investimentos em energia solar ultrapassam R$ 30 bi em 2023**. Disponível em: https://canalsolar.com.br/investimentos-em-energia-solar-ultrapassam-r-30-bi-em-2023/. Acesso em: 15 de out. de 2023.

[7] MOREIRA, José Roberto Simões. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 2° Edição. LTC, Cap. 1, p.1-2; p. 10-12, 2021.

[8] LI, Z.; LIU, X.; TANG, R. **Optical performance of vertical single-axis tracked solar panels. Renewable Energy**, v. 36, n. 1, p. 64–68, 2011. Acesso em: 14 de mar de 2022.

[9] VIAN, Â. **Energia Solar Fundamentos Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2021. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555500592/. Acesso em: 3 de mar de 2022

[10] VILLALVA, Marcelo Gradella, GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica**: **Conceitos e Aplicações.** 1 ed., São Paulo, Acesso em: 21 de out. de 2022.