

VINICIUS MARQUES MACHADO RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR
CONTROLADO POR ARDUINO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2023

VINICIUS MARQUES MACHADO RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR
CONTROLADO POR ARDUINO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de graduado em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho

Uberlândia

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R696 Rodrigues, Vinícius Marques Machado, 1998-
2023 DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR CONTROLADO POR
ARDUINO [recurso eletrônico] / Vinícius Marques Machado
Rodrigues. - 2023.

Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Mecatrônica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Mecatrônica. I. Carvalho, Solidônio Rodrigues de,
1978-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecatrônica. III.
Título.

CDU: 621.03

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR CONTROLADO POR ARDUINO

BANCA EXAMINADORA

Prof. Orientador Dr. SOLIDÔNIO RODRIGUES de CARVALHO

Prof. Dr. EDSONEI PEREIRA PARREIRA

Profa. Dra. VERA LÚCIA DONIZETI de SOUSA FRANCO

Uberlândia, 28 de junho de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as bênçãos e oportunidades que ele me concedeu em toda a minha vida.

Agradeço a minha mãe Silene Marques Machado Rodrigues, ao meu pai Genevaldo Rodrigues Ferreira e ao meu irmão Vitor Hugo Machado Rodrigues por todo o apoio e confiança durante toda a minha vida, mas em especial durante esse tempo o qual eu estive na universidade, ainda mais por ser em uma cidade longe de minha terra natal e ter contato com os familiares poucas vezes no ano.

Agradeço a minha namorada Débora Vila dos Santos por todo o apoio e toda a ajuda que me deu nessa caminhada.

Aos meus amigos que eu fiz durante essa jornada, que sempre me ajudaram quando eu tinha dificuldades.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho, pela paciência, compreensão e orientação.

Aos meus professores que contribuíram em muito para o meu crescimento profissional e pessoal.

E, também, um agradecimento à Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica.

RODRIGUES, V. M. M. **DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR CONTROLADO POR ARDUINO**. 2023. 43 folhas. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

RESUMO

Atualmente o mundo se vê em uma grande e crescente necessidade pela busca por meios de produção de energia limpa, tanto pelo motivo de minimizar os efeitos do aquecimento global quanto pelo lado financeiro, pois, hoje em dia, utilizando o Brasil como base, a energia elétrica oferecida pelas concessionárias estão cada vez mais caras e com o preço crescendo a cada ano. Com isso as pessoas vêm buscando alternativas para aliviar os bolsos à longo prazo, e a alternativa mais viável e visada pelo consumidor comum é a energia solar. A energia solar é captada através da instalação de placas fotovoltaicas nas residências ou usinas solares e ligadas através de fiações ao quadro de distribuição elétrica (no caso das residências), ou subestações de energia (no caso das usinas solares). Apesar de ser uma boa alternativa para energia limpa, a energia solar tem algumas limitações, sendo a principal a questão do grande custo inicial para a instalação dela. Por este motivo, o presente trabalho busca uma melhoria do sistema de instalação de energia solar, a fim de maximar a captação de uma placa fotovoltaica durante o seu tempo de atuação (durante o dia), e, para isso, será proposto um sistema de rastreamento solar com o controle feito por um dispositivo de prototipagem eletrônica que permita a automação em pequena escala, o Arduino.

Palavras-chave: Energia Solar, Rastreador Solar, Arduino, Controle, CSP.

RODRIGUES, V. M. M. **DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR CONTROLADO POR ARDUINO**. 2023. 43 folhas. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

ABSTRACT

Currently, the world sees itself in a great and growing need in the search for means of producing clean energy, both for the reason of minimizing the effects of global warming and for the financial side, because, nowadays, using Brazil as a base, energy electric utilities offered by concessionaires are increasingly expensive and the price is growing every year. As a result, people have been looking for alternatives to relieve their pockets in the long term, and a more viable alternative, which is sought after by the common consumer, is solar energy. Solar energy is captured through the installation of photovoltaic panels in homes or solar plants and energy through wiring to the electrical distribution board (in the case of homes), or power substations (in the case of solar plants). Despite being a good alternative for clean energy, solar energy has some limitations, the main one being the high initial cost of installing it. For this reason, the present work seeks an improvement of the solar energy installation system, in order to maximize the capture of a photovoltaic plate during its operation time (during the day), and, for this, it will be a tracking system solar with control made by an electronic prototyping device that allows automation on a small scale, the Arduino.

Keywords: Solar Energy, Solar Tracker, Arduino, Control, CSP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de coletores (CSP). (Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/b98899e8-1d73-4bf6-b078-42bf3c1769d4/CSP_Essentials.pdf)	13
Figura 2.2: Ilustração da concentração de radiação em um concentrador cilíndrico parabólico. (Adaptado de Alternative Energy Tutorials)	14
Figura 2.3 – Estrutura de um Receptor utilizado em um CCP. (Bellos, 2018) ..	17
Figura 2.4: Imagem ilustrativa dos ângulos referentes a incidência dos raios solares em uma superfície. (Duffie, 2013)	19
Figura 3.1: Foto do Arduino Uno R3 utilizado. Fonte: O autor	24
Figura 3.2: Sensor LDR utilizado na ponta. Fonte: O Autor	25
Figura 3.3: Sensor LDR utilizado no meio. Fonte: O Autor	26
Figura 3.4: Servo motor MG995 utilizado para a movimentação do eixo. (Disponível em: https://www.smartkits.com.br/servo-towerpro-mg995-metalico).....	26
Figura 3.5: Imagem da vista das ligações elétricas do projeto. Fonte: O Autor.....	27
Figura 3.6: Vista de cima somente da protoboard. Fonte: O Autor	28
Figura 3.7: Vista lateral do protótipo de rastreador solar. Fonte: O Autor	29
Figura 3.8: Vista superior do protótipo de rastreador solar. Fonte: O Autor.....	30
Figura 3.9: Vista isométrica do protótipo de rastreador solar. Fonte: O Autor.....	30
Figura 3.10: Esquema da ligação eletrônica do sistema feito no software Fritzing. Fonte: O autor.....	31
Figura 4.1: Fotografia do protótipo no início do experimento. Fonte: O autor.....	34
Figura 4.2: Fotografia do protótipo as 10:00h. Fonte: O autor.....	35
Figura 4.3: Fotografia do protótipo as 11:00h. Fonte: O autor.....	35
Figura 4.4: Fotografia do protótipo as 12:00h. Fonte: O autor.....	35
Figura 4.5: Fotografia do protótipo as 13:00h. Fonte: O autor.....	36
Figura 4.6: Fotografia do protótipo as 14:00h. Fonte: O autor.....	36
Figura 4.7: Fotografia do protótipo as 15:30h. Fonte: O autor.....	36
Figura 4.8: Fotografia do protótipo as 17:00h. Fonte: O autor.....	37

LISTA DE SIMBOLOS

C_{max}	Concentração máxima obtida
ϕ_r	Ângulo do aro do coletor
δ	Medida dos limites de erros do ângulo da superfície do refletor
S	Radiação absorvida por unidade de área não sombreada
I_b	Plano de Abertura
ρ	Refletância Especulada do Concentrador
γ	Fator de Interceptação
τ	Transmitância do sistema de cobertura do receptor
α	Absortância do absorvedor para a radiação solar refletida
$K_{\gamma\tau\alpha}$	Ângulo de Incidência para desvios do ângulo normal da incidência da radiação solar no coletor
$d. d. p.$	Diferença de Potencial
ϕ	Latitude
δ	Declinação
β	Inclinação entre o plano da superfície com a horizontal
γ	Ângulo azimuth da superfície
θ	Ângulo de incidência
θ_z	Ângulo Zenith
α_s	Ângulo de altitude solar
γ_s	Ângulo azimuth do Sol
ω	Ângulo horário

Sumário

1 - INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivo Geral	11
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 – Energia Solar.....	12
2.2 – Energia Solar Concentrada (CSP).....	12
2.2.1 – Coletores CSP	13
2.2.2 – Concentrador Cilíndricos-Parabólicos (CCP)	14
2.2.3 – Tubo Receptor	17
2.2.4 – Fluido Térmico	17
2.2.5 – Orientação da incidência da radiação solar sobre um objeto.	18
2.2.6 – Sistema de Rastreamento.....	21
3 - METODOLOGIA.....	22
3.1 – Materiais Utilizados	22
3.1.1 – Arduino Uno R3	22
3.1.2 – Sensores LDR (Resistor Dependente da Luz).....	24
3.1.3 – Servo Motor MG995.....	26
3.1.4 – Protoboard e ligações elétricas	27
3.1.5 – Suporte metálico e tubo PVC	28
3.2 – Método Utilizado.....	31
3.2.1 – Layout do Sistema	31
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5 - CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS	40
ANEXO A – Código Utilizado para o controle do Rastreador Solar.....	42

1 - INTRODUÇÃO

De acordo com a IEA (Agência Internacional de Energia), em 2022, a produção de energia elétrica mundial ficou dividida entre as seguintes fontes energéticas: Gás Natural (28,92%), Carvão (18,76%), Nuclear (15,53%), Hídrica (13,46%), Eólica (10,15%), Solar (5,64%), outras fontes de energia (7,13 %).

Como se pode perceber pelos dados providos pela IEA, a maior parte da produção de energia elétrica no mundo é composta por fontes não renováveis, e isso gera uma grande preocupação, pois, além de serem matérias primas finitas, elas também geram um grande impacto no aquecimento global, pois os gases gerados na queima agravam o efeito estufa. Por causa disso, a cada dia que passa a sociedade em geral procuram formas de obtenção de energias limpas e renováveis, realizando investimentos exorbitantes para instalar e aprimorar as mesmas, e a melhor fonte de obtenção de energia elétrica de um ponto de vista sustentável é a energia solar uma vez que ela emite 98% a menos de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera.

Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), em 2022, a capacidade de produção de energia elétrica no Brasil, ultrapassou os 180 GW de potência, dentre essa potência, destaca-se que 82,73% são geradas por fontes renováveis, onde a maior parte (60%) é compreendida pela geração das hidrelétricas. A energia solar no Brasil está em crescimento constante, a qual já ultrapassou os 5 GW de potência instaladas pelas usinas solares e outros 10,74 GW referentes a micro e minigeração de energia, oriundas de pequenas usinas e residências.

A energia solar, apesar dos seus grandes benefícios para a sociedade em geral, também tem as suas desvantagens, as quais as mais óbvias e problemáticas, são o alto custo de instalação e o tempo disponível da sua matéria prima, a luz solar. De acordo com NERES, 2019 os custos de sistema de geração de energia solar residencial de 1,5 Kwp, custa aproximadamente R\$ 12.000,00 e gera, mensalmente, aproximadamente 170 KWh. Portanto, utilizando o preço do KWh de R\$ 1,07 (Energisa – 07/05/2023), precisando de cerca de 5 anos e meio para recuperar o dinheiro investido.

Tendo em vista esses altos custos para a instalação e alto tempo para a recuperação do dinheiro investido, cada vez mais a sociedade buscam formas

de otimizar a fabricação dos Concentradores de Energia Solar (CSP), tais como os Coletores Cilíndricos-Parabólicos, para reduzir os seus custos, assim como meios de maximizar a forma de captação dos coletores, aumentando os lucros obtidos.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste presente trabalho visa realizar um projeto de um protótipo de rastreador solar controlado por um Arduino, a fim de, maximizar o tempo em que um Coletor Cilíndrico-Parabólico está em sua capacidade plena, isso acontece quando ele consegue acompanhar a trajetória do Sol para maximizar a obtenção da luz solar no seu ponto de foco.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse tópico será abordado toda a fundamentação teórica que serão utilizadas para a elaboração desse presente relatório.

2.1 – Energia Solar

A energia solar é uma forma de energia renovável obtida a partir da radiação solar, sendo amplamente reconhecida como uma fonte limpa e sustentável, pois não gera poluentes ou emissões de gases de efeito estufa. A tecnologia fotovoltaica é a principal maneira de aproveitar essa energia, convertendo a luz solar diretamente em eletricidade. Além disso, existe também a tecnologia de energia solar concentrada (CSP), que utiliza a energia térmica do sol para transformar em energia elétrica direta ou para gerar calor para aquecer água, podendo ser usada em diversas aplicações, como banhos e aquecimento de ambientes.

A energia solar apresenta várias vantagens. Ela é inesgotável, já que o sol é uma fonte renovável disponível em todo o planeta. Além disso, contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ajudando a combater as mudanças climáticas, e diminui a dependência de combustíveis fósseis como carvão e petróleo. A indústria solar também gera empregos.

No entanto, a energia solar enfrenta desafios. A quantidade de energia disponível varia ao longo do dia e das estações, o que pode tornar a geração de eletricidade intermitente. Além disso, a instalação de sistemas solares pode exigir um investimento inicial considerável, apesar de os custos terem diminuído ao longo do tempo.

Em suma, a energia solar é uma forma sustentável de converter a luz solar em eletricidade ou calor, desempenhando um papel fundamental na transição para uma matriz energética mais sustentável e na redução do impacto ambiental causado pela geração de energia.

2.2 – Energia Solar Concentrada (CSP)

A energia solar concentrada, também conhecida como solar termoelétrica, é uma tecnologia que utiliza espelhos ou lentes para concentrar a luz solar em um ponto focal. O objetivo é aumentar a intensidade da radiação

solar em um ponto específico para gerar calor ou eletricidade.

A energia solar concentrada tem como principal vantagem a capacidade de gerar eletricidade em larga escala. Ao concentrar a luz solar, é possível alcançar altas temperaturas e produzir vapor em grandes quantidades, impulsionando turbinas de grande porte e gerando eletricidade de forma eficiente. Além disso, essa forma de energia é limpa e renovável, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

No entanto, a energia solar concentrada enfrenta desafios, como o alto custo inicial de implantação e a necessidade de áreas extensas para instalação dos equipamentos. Pesquisas e desenvolvimentos contínuos visam melhorar a eficiência e reduzir os custos dessa tecnologia, tornando-a mais acessível e competitiva em comparação a outras fontes de energia.

2.2.1 – Coletores CSP

Os coletores de CSP (Concentrated Solar Power) são dispositivos utilizados em usinas de energia solar concentrada para capturar a energia solar e convertê-la em energia térmica. Existem diferentes tipos de coletores usados em CSP, mas vou me concentrar em explicar o funcionamento básico dos coletores cilíndricos parabólicos, que são amplamente utilizados nessa tecnologia.

Existem essencialmente dois tipos de coletores solares: coletores não concentradores e concentradores. Os coletores não concentradores têm uma área de abertura constante, usada para interceptar e absorver a radiação solar, sendo adequados para sistemas que requerem temperaturas mais baixas. Para aplicações que exigem temperaturas mais altas, os coletores solares concentradores são mais adequados. Esses coletores geralmente possuem uma superfície refletora (em alguns modelos, lentes são utilizadas) que direciona a radiação solar direta para um ponto focal. Nesse ponto focal, há um receptor onde o fluido absorvedor de calor circula. (Kalogirou, 2009)

Os coletores solares podem ser categorizados em coletores estacionários ou rastreadores. Dentro da categoria de rastreadores, os coletores podem ter um eixo de rastreamento ou dois eixos de rastreamento. Na Fig. 2.1 a seguir tem-se alguns exemplos dos tipos de coletores (CSP) que estão disponíveis no mercado.

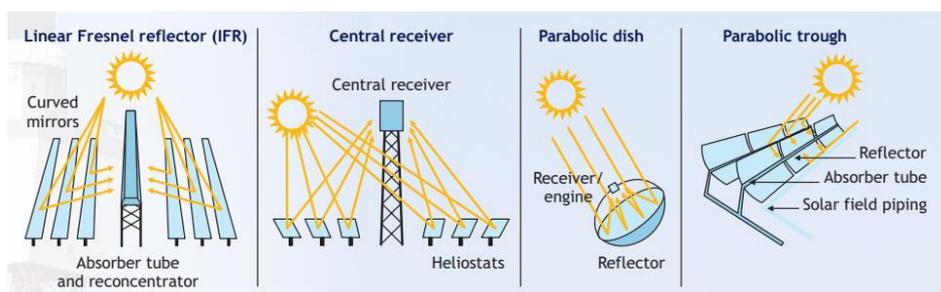


Figura 2.1: Tipos de coletores (CSP). (Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/b98899e8-1d73-4bf6-b078-42bf3c1769d4/CSP_Essentials.pdf)

- **Refletor Linear de Fresnel (Linear Fresnel Reflector – IFR) – Estacionário:** Consiste em múltiplas placas planas espelhadas dispostas ao redor de um tubo que funciona como uma linha focal para os raios solares. Ao contrário da configuração em torre, as placas são levemente inclinadas à medida que se afastam do tubo focal, garantindo assim o direcionamento dos raios solares.
- **Torres de concentração (Central Receiver) - Estacionário:** A ideia central é utilizar uma disposição de placas planas espelhadas, conhecidas como heliostatos, posicionadas em torno de uma torre central que contém o fluido a ser aquecido.
- **Discos parabólicos (Parabolic Dish) – Rastreamento de dois eixos:** São essencialmente espelhos dispostos em forma de paraboloide. Devido às propriedades geométricas dessa superfície curva, todos os feixes de radiação são focalizados ou concentrados em um único ponto.
- **Concentradores Cilíndricos-Parabólicos (Parabolic Trough) – Rastreamento de eixo único:** São estruturas em forma de calha com seção transversal parabólica, o que significa que possuem um ponto focal linear que coincide com um tubo que contém o fluido absorvedor. (Garcia, 2018)

2.2.2 – Concentrador Cilíndricos-Parabólicos (CCP)

Os coletores cilíndricos parabólicos são revestidos com um material refletor que segue a forma de uma parábola. Ao longo da linha focal do refletor parabólico, é colocado um tubo metálico preto conhecido como receptor. Esse receptor é protegido por um tubo de vidro para evitar perdas de calor.

Quando a parábola aponta para o sol, os raios diretos do sol são refletidos

pela superfície e concentrados no receptor, conforme a Fig. 2.2. A radiação concentrada aquece o fluido que circula internamente no tubo

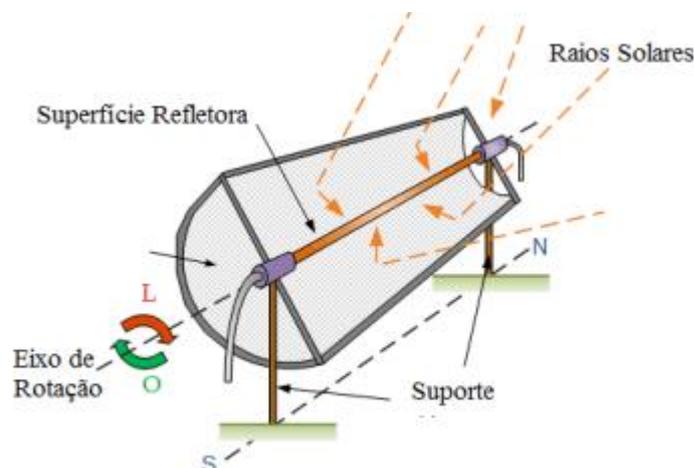


Figura 2.2: Ilustração da concentração de radiação em um concentrador cilíndrico parabólico. (Adaptado de Alternative Energy Tutorials)

É frequente a utilização de sistemas de rastreamento de um único eixo em sua construção. Eles podem ser orientados no sentido Leste-Oeste, com o rastreamento do sol ocorrendo de norte a sul, ou no sentido norte-sul, com o rastreamento do sol ocorrendo de leste a oeste.

- No sentido Leste-Oeste, uma vantagem é que o coletor solar se movimenta pouco ao longo do dia e permanece sempre direcionado para o sol ao meio-dia. No entanto, apresenta um desempenho reduzido no início da manhã e no final da tarde devido aos ângulos maiores de incidência dos raios solares na superfície coletora.
- No sentido norte-sul, ocorrem os maiores ângulos de incidência solar durante o meio-dia, resultando em maiores perdas de calor nesse momento. Por outro lado, o coletor aponta mais diretamente para o sol no início da manhã e no final da tarde.

Ao longo de um ano, um coletor direcionado no sentido norte-sul absorve um pouco mais de energia do que um orientado Leste-Oeste. No entanto, o coletor norte-sul coleta mais calor durante o verão e menos durante o inverno, em comparação com um coletor Leste-Oeste, que tem uma produção de energia mais uniforme ao longo do ano. Portanto, a escolha da orientação depende da aplicação e das necessidades de energia, considerando se a demanda varia significativamente com as estações do ano (inverno ou verão) ou ao longo do dia. (Kalogirou, 2009)

Segundo Duffie (2013), é possível realizar um cálculo aproximado do máximo de radiação que é absorvida pelo CCP, para isso é utilizado os aspectos óticos desses coletores. Utilizando o ângulo do aro do coletor (ϕ_r) e o ângulo dos espelhos (revestimentos) é possível chegar na seguinte equação.

$$C_{max} = \frac{\sin^2 \phi_r \cos^2(\phi_r + 0,267 + \frac{\delta}{2})}{4 \sin^2(0,267 + \frac{\delta}{2})} - 1 \quad (2.2.1)$$

O valor máximo obtido, C_{max} , é definido como a máxima interceptação da radiação especularmente refletida que está dentro do cone de largura angular $(0,534 + \delta)$. (Duffie, 2013)

Os receptores de cavidade podem ser utilizados em conjunto com concentradores cilíndricos parabólicos para aumentar a absorção e reduzir as perdas convectivas da superfície absorvente. As equações para as propriedades óticas de sistemas com receptores planos também se aplicam aos receptores de cavidade, desde que as absorptâncias das cavidades sejam adequadamente consideradas.

A quantidade de energia absorvida por um CCP depende das mesmas propriedades que os coletores parabólicos lineares. No entanto, devido às altas taxas de concentração alcançadas por esses coletores, qualquer absorção de radiação solar pelo material de cobertura resultaria no aquecimento dessa cobertura, sendo assim, geralmente não são utilizadas. Na ausência da cobertura, a energia absorvida para a área de abertura não sombreada do coletor é então,

$$S = I_b \rho(\gamma\tau\alpha)_n K_{\gamma\tau\alpha} \quad (2.2.2)$$

O modificador do ângulo de incidência pode ser circularmente simétrico; se o sistema óptico não for simétrico, biaxial ou outros modificadores podem ter que ser usados. O modificador é responsável por apontar erros no alinhamento do coletor.

O cálculo das perdas térmicas é muito mais uma função da geometria do receptor e pode ser complicado pela existência de gradientes de temperatura na superfície de um receptor. Para obter exemplos dessas estimativas, consulte os relatórios da Boeing, Martin Marietta e McDonnell-Douglas (1977) sobre os

subsistemas receptores do receptor térmico solar central sistemas de energia.

2.2.3 – Tubo Receptor

O receptor é posicionado na linha focal dos concentradores, o estado do receptor é de extrema importância para o desempenho do sistema CCP, uma vez que afeta o desempenho térmico do sistema como um todo. A fim de aprimorar a performance do receptor, diversos materiais são incorporados durante sua fabricação com o objetivo de minimizar as perdas térmicas. e sua superfície é revestida por uma cobertura que possui alta capacidade de absorver a radiação solar e baixa capacidade de emitir radiação térmica (infravermelho).

Geralmente, uma cobertura de vidro é utilizada ao redor do receptor para reduzir as perdas de calor por convecção para o ar ambiente, o que diminui o coeficiente de perda de calor. Uma limitação é que a luz refletida pelo coletor precisa atravessar o vidro, o que resulta em uma transmitância adicional (geralmente em torno de 0,9 quando o vidro está limpo). Para reduzir as perdas de calor por convecção, outra medida comum é manter um vácuo no espaço entre o vidro e o tubo receptor. (Kalogirou, 2009)

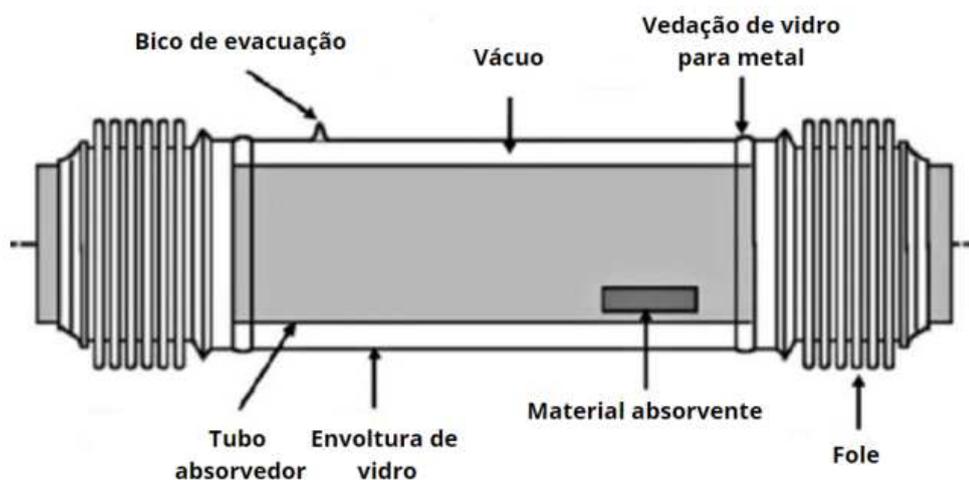


Figura 2.3 – Estrutura de um Receptor utilizado em um CCP. (Bellos, 2018)

2.2.4 – Fluido Térmico

Os coletores solares parabólicos utilizam um fluido térmico ou fluido de transferência de calor (HTF) que circula pelo receptor para coletar e transportar energia térmica solar. A escolha do HTF tem um impacto direto no desempenho, viabilidade econômica e expansibilidade da tecnologia solar térmica. De acordo com Krishna et al. (2020), o HTF deve ser classificado e caracterizado com base

nas propriedades termo físicas nas condições de operação do PTC.

As propriedades termo físicas importantes necessários para o HTF em PTCs incluem capacidade térmica específica, entalpia de mudança de fase, condutividade térmica, viscosidade e ponto de fusão. Além disso, propriedades como densidade, temperatura de degradação, coeficiente de expansão térmica e estabilidade térmica também são consideradas ao selecionar o HTF e projetar as condições de operação do PTC e do sistema de armazenamento de energia térmica.

A água é o HTF mais comumente usados em operações de baixa temperatura em PTCs devido à sua capacidade térmica de $4,185 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. No entanto, ela é limitada a aplicações de aquecimento doméstico e industrial que variam de 70° C a 250° C . Por outro lado, óleos sintéticos e sais fundidos são amplamente utilizados e têm mostrado excelente estabilidade em processos que requerem temperaturas na faixa de 250° C a 400° C .

Recentemente, os nanofluidos com propriedades térmicas modificadas têm recebido muita atenção. Esses HTFs oferecem taxas de transferência de calor mais elevadas e, conseqüentemente, uma menor temperatura de absorção, o que reduz as perdas térmicas. No entanto, os nanofluidos também podem aumentar a queda de pressão, exigindo maior trabalho de bombeamento. (Krishna, 2020).

2.2.5 – Orientação da incidência da radiação solar sobre um objeto.

Segundo Duffie (2013), para projetar corretamente qualquer sistema que utilize energia solar, é necessário ter informações sobre a direção em que os raios solares incidem em uma superfície, seja ela plana ou inclinada, porém, também pode ser utilizado como base para um coletor cilíndrico-parabólico. Para determinar essa orientação, é preciso considerar uma combinação de vários ângulos entre a posição do sol em relação a objeto em análise.

Esses ângulos são convencionados conforme a Fig. 2.2 abaixo:

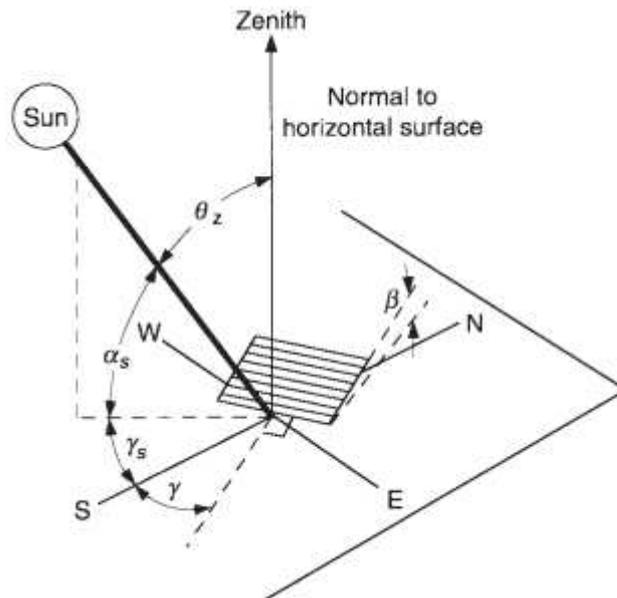


Figura 2.4: Imagem ilustrativa dos ângulos referentes a incidência dos raios solares em uma superfície. (Duffie, 2013).

Onde,

ϕ = **Latitude**, localização angular do Norte e Sul, tendo como referência a linha do equador: $-90^{\circ}S \leq \phi \leq 90^{\circ}N$;

δ = **Declinação**, a posição angular do Sol ao meio-dia, tendo como referência o plano do Equador: $-23,45^{\circ}S \leq \delta \leq 23,45^{\circ}N$;

β = **Declive**, inclinação entre o plano da superfície analisada com a horizontal: $0^{\circ} \leq \beta \leq 180^{\circ}$. Se $\beta > 90^{\circ}$ significa que a superfície virada para baixo;

γ = **Ângulo azimuth da superfície**, ângulo entre a projeção da normal à superfície e o plano meridiano local, sendo o zero no Sul, leste negativo, e oeste positivo: $-180^{\circ}E \leq \gamma \leq 180^{\circ}W$;

θ = **Ângulo de incidência**, ângulo entre a incidência direta do raio solar e a normal da superfície analisada;

θ_z = **Ângulo Zenith**, ângulo entre a vertical e a incidência do raio solar na superfície;

α_s = **Ângulo de altitude solar**, ângulo entre a horizontal e a linha da incidência do raio solar na superfície;

γ_s = **Ângulo azimuth do Sol**, o deslocamento angular da incidência do raio solar com o Sul, vindo a partir de uma vista no plano horizontal. O deslocamento é negativo Sudeste e positivo no Sudoeste.

ω = **Ângulo horário**, deslocamento angular do Sol em relação ao Leste ou

Oeste do meridiano local. Considera-se o período da manhã negativo e o período da tarde positivo, cada hora que passa corresponde a um deslocamento de 15°.

Para o cálculo da declinação δ , existem duas equações que são mais utilizadas, a primeira equação (2.2.3), a equação de Cooper, é uma aproximação mais simplificada para realizar este cálculo.

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (2.2.3)$$

O valor de n se encontra na tabela 2.a abaixo:

Tabela 2.a – Tabela para encontrar os valores de n para cada dia do ano e recomendações de dias para cada mês. (Klein, 1977)

Recomendação de dia para cada mês e valores de n por mês				
Mês	n para cada dia no ano	Sugestão valores por Mês		
		Data (i)	n	δ
Janeiro	i	17	17	-20,9
Fevereiro	$31 + i$	16	47	-13
Março	$59 + i$	16	75	-2,4
Abril	$90 + i$	15	105	9,4
Maio	$120 + i$	15	135	18,8
Junho	$151 + i$	11	162	23,1
Julho	$181 + i$	17	198	21,2
Agosto	$212 + i$	16	228	13,5
Setembro	$243 + i$	15	258	2,2
Outubro	$273 + i$	15	288	-9,6
Novembro	$304 + i$	14	318	-18,9
Dezembro	$334 + i$	10	344	-23

Tendo a o valor da declinação em mãos, através da Equação 2.2.3 ou da Equação 2.2.4, é possível calcular o valor aproximado do ângulo de incidência dos raios solares em uma superfície para cada dia do ano, conforme a Equação 2.2.5 a seguir. (Duffie, 2013)

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (2.2.4)$$

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.2.5)$$

Existe algumas observações para o uso dessa Equação 2.2.5, se o ângulo encontrado for $\theta > 90^\circ$ significa que os raios solares estão atrás da face da superfície em análise, e, também, é necessário ter certeza que a incidência dos raios não esteja sendo bloqueados por meios externos ou horário do dia.

2.2.6 – Sistema de Rastreamento

O rastreamento de um coletor solar cilíndrico parabólico refere-se ao movimento controlado dos espelhos parabólicos para acompanhar o movimento do sol ao longo do dia, maximizando assim a captura de energia solar. O objetivo é manter os espelhos sempre alinhados com a posição do sol, direcionando a luz solar de forma eficiente para o ponto focal.

Existem diferentes tipos de sistemas de rastreamento usados em coletores cilíndricos parabólicos. Um dos sistemas mais comuns é o rastreamento de um eixo, também conhecido como rastreamento azimutal (γ_s). Nesse sistema, os espelhos são montados em uma estrutura que pode girar horizontalmente em torno de um único eixo, seguindo o movimento diário do sol de leste a oeste.

Para determinar a posição correta do sol, os sistemas de rastreamento geralmente utilizam sensores solares ou controladores baseados em algoritmos. Esses sensores captam a luz solar incidente e enviam informações para o controlador, que calcula a posição exata do sol e comanda os motores responsáveis pelo movimento dos espelhos.

À medida que o sol se move ao longo do dia, o sistema de rastreamento orienta os espelhos para que eles permaneçam alinhados com a posição do sol, direcionando a luz solar para o ponto focal do coletor. Dessa forma, a intensidade da radiação solar concentrada no ponto focal é maximizada, aumentando a eficiência do coletor.

Além do rastreamento de um eixo, existem também sistemas de rastreamento de dois eixos. Nesses sistemas, os espelhos podem se movimentar tanto horizontalmente quanto verticalmente, permitindo acompanhar tanto o movimento diário do sol quanto a variação sazonal da posição solar (Ângulo Zenith).

3 - METODOLOGIA

Nesse tópico será abordado toda a metodologia que foi utilizada para a elaboração desse projeto sobre rastreador solar, desde os materiais que foram utilizados para a confecção, desde os métodos utilizados para o controle do mesmo.

3.1 – Materiais Utilizados

Os materiais que foram utilizados para a confecção deste projeto foram os seguintes:

- Uma placa eletrônica com microcontrolador Arduino Uno R3;
- Dois sensores LDR;
- Duas resistências $10\text{ k}\Omega$
- Um servo motor MG995
- Uma fonte de alimentação tensão contínua 9 V;
- Uma protoboard e vários jumpers para as ligações elétricas;
- Um cano PVC de 6”;
- Um Suporte metálico confeccionado sob medida;

3.1.1 – Arduino Uno R3

O Arduino Uno é uma placa de desenvolvimento eletrônico amplamente utilizada para criar projetos interativos. Ele é baseado em um microcontrolador Atmel AVR de 8 bits, mais comumente o ATmega328P, que é o cérebro do Arduino Uno.

A placa Arduino Uno possui várias características que a tornam popular entre entusiastas, estudantes e profissionais que desejam criar projetos eletrônicos. Aqui estão alguns aspectos importantes do Arduino Uno:

- Microcontrolador: O Arduino Uno é equipado com um microcontrolador ATmega328P, que é um chip poderoso o suficiente para controlar várias

entradas e saídas digitais e analógicas. Ele possui uma velocidade de clock de 16 MHz e uma capacidade de memória de 32 KB (dos quais 2 KB são alocados para o bootloader). (Site Oficial do Arduino)

- **Pinos de E/S:** O Arduino Uno possui 14 pinos digitais de entrada/saída (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM - Modulação por Largura de Pulso), 6 pinos analógicos de entrada e uma série de outros pinos para fins especiais, como alimentação, comunicação serial e interrupções.
- **Interfaces de Comunicação:** O Arduino Uno possui várias interfaces de comunicação, incluindo uma porta USB, que pode ser usada para programar a placa e transmitir dados entre o computador e o Arduino. Além disso, possui uma interface de comunicação serial UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) e uma interface de comunicação I2C (Inter-Integrated Circuit).
- **Ambiente de Desenvolvimento:** O Arduino Uno é programado usando a linguagem de programação Arduino, que é uma variante simplificada da linguagem C. A plataforma Arduino fornece um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) fácil de usar, com um editor de código, compilador e ferramentas de depuração. O código é carregado na placa por meio da porta USB. (Banzi, 2014)
- **Open Source:** Outra característica importante do Arduino é que ele adota uma abordagem de código aberto tanto em seu hardware quanto em seu software. Essa filosofia de compartilhamento de recursos promove uma comunidade que generosamente compartilha seu conhecimento. Isso é especialmente benéfico para iniciantes, pois eles têm acesso a ajuda disponível tanto localmente quanto online, vinda de pessoas com diferentes níveis de habilidade e abrangendo uma ampla variedade de tópicos. Além disso, os projetos não são apenas apresentados por meio de fotos do produto, mas também incluem instruções detalhadas para que você possa construir o seu próprio projeto ou utilizá-lo como ponto de partida para desenvolver projetos relacionados. (Banzi, 2014)



Figura 3.1: Foto do Arduino Uno R3 utilizado. Fonte: O autor.

O uso para o Arduino nesse projeto foi para realizar o controle da trajetória do rastreador solar, através da análise dos dados fornecidos em tempo real pelos sensores LDR, e, a partir disso, ele controla o servo motor para acompanhar o movimento do Sol ao passar do dia.

3.1.2 – Sensores LDR (Resistor Dependente da Luz)

O LDR, também conhecido como célula fotocondutiva ou foto resistência, é um dispositivo semiconductor de dois terminais que possui uma resistência variável proporcional à intensidade de luz incidente.

Conforme mencionado anteriormente, quando o LDR é iluminado, sua resistência diminui. Isso ocorre porque a energia luminosa desloca elétrons da camada de valência para a camada de condução, que está mais distante do núcleo do átomo. Esse deslocamento aumenta o número de elétrons na camada

de condução e, conseqüentemente, reduz a resistência do LDR.

À medida que a intensidade de luz incidente no LDR aumenta, um maior número de elétrons na estrutura adquire um nível de energia mais elevado devido à energia entregue pelos fótons. Isso resulta em um aumento tanto de elétrons livres quanto de elétrons fracamente ligados ao núcleo do átomo.

No projeto foram utilizados dois sensores LDR, um sensor localizado na ponta do tubo PVC, Fig. 3.2, para alertar que está recebendo a incidência de raios solares, durante todo o período diurno, se não houver alguma interrupção como o céu nublado esse sensor deverá sempre estar recebendo incidência solar.

O outro sensor é localizado no meio do tubo PVC, Fig. 3.3, esse sensor é responsável por deixar a o plano do tubo PVC perpendicular a incidência dos raios solares, para isso foi colocado uma objeto fino posicionado no meio do PVC, para fazer sombra nesse sensor, então enquanto houver sombra nesse sensor significa que a superfície esta perpendicular, e quanto o sensor estiver recebendo incidência, o servo motor será acionado para corrigir a posição do eixo do tubo PVC até que tenha sombra novamente.



Figura 3.2: Sensor LDR utilizado na ponta. Fonte: Autor.

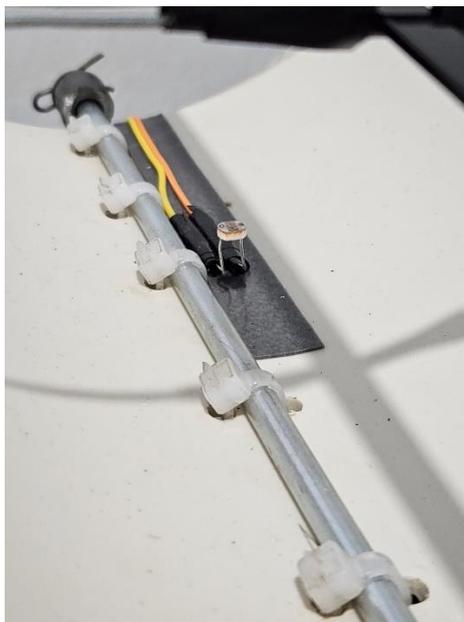


Figura 3.3: Sensor LDR utilizado no meio. Fonte: Autor.

3.1.3 – Servo Motor MG995

Para realizar o controle da rotação do eixo do tubo PVC foi utilizado um servo motor MG995 da Tower Pro, Fig. 3.4, com uma capacidade de torque de $11 \text{ kgf} * \text{m}$



Figura 3.4: Servo motor MG995 utilizado para a movimentação do eixo. (Disponível em: <https://www.smartkits.com.br/servo-towerpro-mg995-metalico>)

3.1.4 – Protoboard e ligações elétricas

Toda a ligação elétrica entre o Arduino, sensores LDR e servo motor foram feitas através de uma protoboard e vários jumpers, como é possível observar nas figuras a seguir.

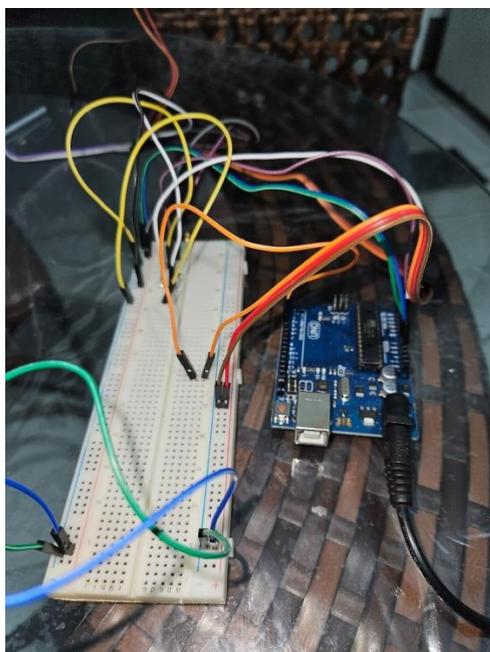


Figura 3.5: Imagem da vista das ligações eletricas do projeto. Fonte: O Autor.

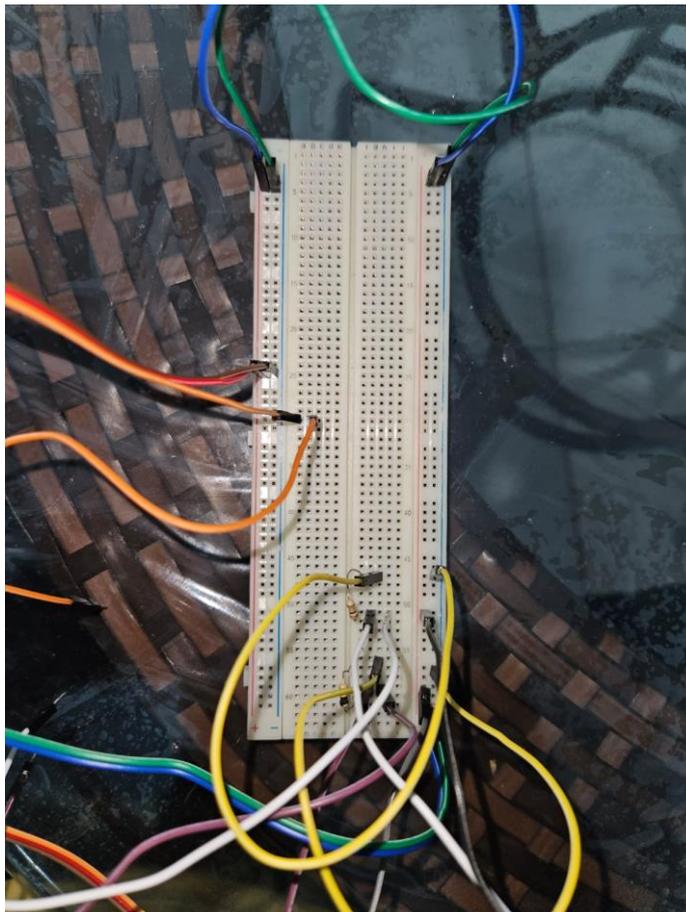


Figura 3.6: Vista de cima somente da protoboard. Fonte: O Autor.

Utilizando a Fig. 3.6 como base, na parte inferior da protoboard é possível notar as duas resistências de 10 k Ω , elas estão sendo utilizadas cada uma para um sensor LDR, sendo a inferior referente ao LDR da ponta e a superior ao LDR do meio. Já na parte do meio da protoboard está as ligações necessárias para o funcionamento do servo motor.

3.1.5 – Suporte metálico e tubo PVC

Para a montagem da estrutura física do protótipo de rastreador solar foram utilizados 6 parafusos para telha de 250 mm sem a cabeça, 4 desses parafusos foram soldados em forma de T invertido para fazer os 2 pés do suporte, na ponta desse “T” foi colocado 2 tubos guias para ser colocado o eixo, o parafuso que os liga foi cortado e ajustado para 220 mm e soldado entre eles para terminar a fixação da base do suporte, quanto ao último parafuso, esse foi utilizado como eixo para o tubo de PVC, em uma ponta do eixo foi feita uma

adaptação para colocar um anel travante, não permitindo assim o eixo escapar por esse lado, e no outro foi colocado 2 porcas, impedindo assim que o eixo não escape dos tubos guias, em uma dessas porcas foi feita uma adaptação para encaixar o eixo do servo motor e girar o eixo corretamente.

O tubo PVC de 6" foi cortado na metade para simular um coletor do tipo cilíndrico-parabólico e realizar a elaboração do sistema de rastreamento por 2 LDR, permitindo assim que o LDR da ponta sempre esteja recebendo incidência dos raios solares, já o LDR do meio, por sua vez, não receberá luz quando a incidência dos raios esteja perpendicular ao plano do corte do tubo, pois suspenso, no meio do tubo, foi utilizado uma superfície simulando o tubo receptor que está fazendo sombra no meio do tudo.



Figura 3.7: Vista lateral do protótipo de rastreador solar. Fonte: O Autor.



Figura 3.8: Vista superior do protótipo de rastreador solar. Fonte: O Autor.



Figura 3.9: Vista isométrica do protótipo de rastreador solar. Fonte: O Autor.

3.2 – Método Utilizado

Para desenvolver o protótipo de rastreador solar controlado por Arduino foi utilizado o modelo de rastreador ativo, confeccionado da forma de eixo único (Horizontal Leste-Oeste) utilizando a primeira categoria descrita no tópico 2.1.4 para realizar o controle do rastreador.

Utilizando o Arduino Uno, foi possível utilizar um código (código em anexo) que permitiu o controle do servo motor para que o plano do tubo PVC ficasse perpendicular com a incidência dos raios solares todo o tempo em que o sistema ficou ativo.

3.2.1 – Layout do Sistema

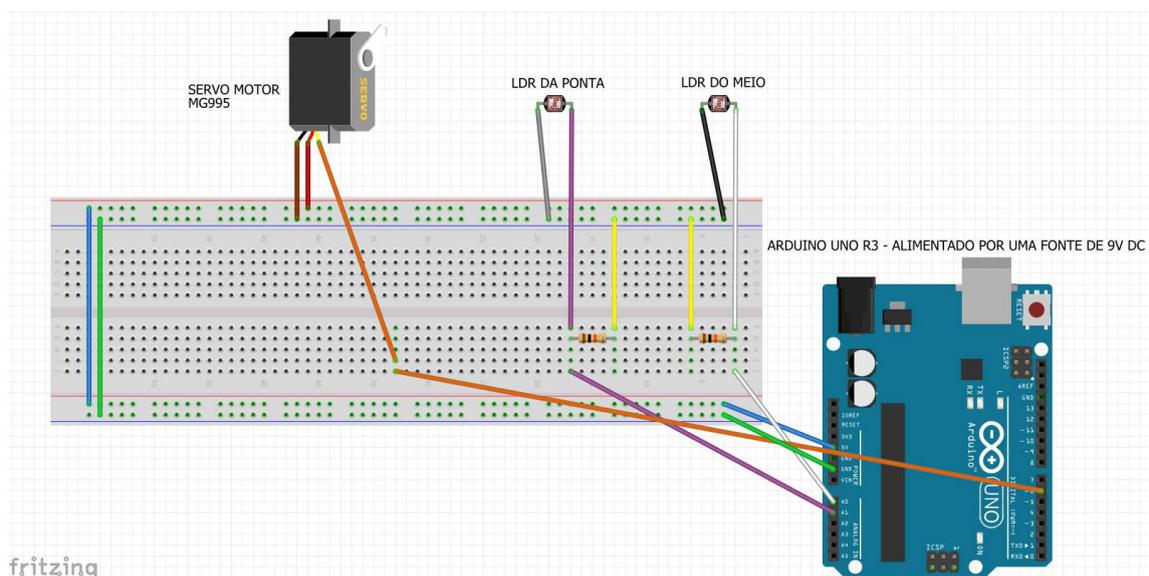


Figura 3.10: Esquema da ligação eletrônica do sistema feito no software Fritzing. Fonte: O autor.

O sistema utiliza uma instalação eletrônica de fácil entendimento e montagem. Como os sensores LDR's e o servo motor estão acoplados no protótipo, foi utilizado jumpers para realizar uma extensão entre eles e a protoboard. Para facilitar a explicação do layout será utilizado as cores dos jumpers e das etiquetas nos equipamentos.

Explicando os jumpers que estão saindo do Arduino.

- Jumper Azul: Alimentação 5V DC
- Jumper Verde: Aterramento (GND)

- Jumper Branco: Entrada analógica (A0)
- Jumper Lilás: Entrada analógica (A1)
- Jumper Laranja: Entrada digital (6)

A alimentação de 5V DC é utilizada para alimentar a linha do protoboard (sinalizado por uma linha vermelha no próprio protoboard), essa alimentação foi utilizada para alimentar o servo motor.

O aterramento (GND) é utilizado para aterrar o protoboard (sinalizado por uma linha azul no próprio protoboard), o aterramento foi utilizado para aterrar tanto o servo motor quanto os dois sensores LDR.

As entradas analógicas (A0 e A1) foram ligadas tanto no resistor de 10 k Ω (para fazer a proteção dos sensores) quanto nos próprios sensores LDR's. As portas analógicas do Arduino servem como alimentação.

A entrada digital (6) foi ligada no servo motor, é essa entrada que realiza o envio de informações para ele, deixando assim possível o seu controle.

Explicando os jumpers que estão saindo dos LDR's e dos resistores.

- Jumper Branco: Sai de uma “perna” do LDR do meio e vai para protoboard onde passa pelo resistor para proteção e vai para a porta analógica A0, a qual faz a alimentação do LDR.
- Jumper Preto: Sai de uma “perna” do LDR do meio e vai para o protoboard, ligado na linha azul do protoboard que é referente ao aterramento do protoboard com o Arduino.
- Jumper Lilás: Sai de uma “perna” do LDR da ponta e vai para protoboard onde passa pelo resistor para proteção e vai para a porta analógica A1, a qual faz a alimentação do LDR.
- Jumper Cinza: Sai de uma “perna” do LDR do meio e vai para o protoboard, ligado na linha azul do protoboard que é referente ao aterramento do protoboard com o Arduino.
- Jumper Amarelo: Sai da outra ponta do resistor de 10 k Ω e vai para o aterramento do protoboard.

Explicando os jumpers que estão saindo da protoboard para o servo motor MG995

- Jumper Marrom: Sai do aterramento da protoboard (GND) para o fio correspondente ao aterramento do servo motor.

- Jumper Vermelho: Sai da alimentação de 5V DC da protoboard e vai para o fio correspondente a alimentação do servo motor.
- Jumper Laranja: Sai do jumper que está ligado a porta digital do Arduino referente a troca de informações e vai para o fio correspondente para a troca de informações do servo motor.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico será abordado todos os testes e resultados obtidos a fim de comprovar a eficiência deste projeto sobre rastreador solar.

O experimento foi conduzido no dia 11 de junho de 2023 durante o período das 10:00, que foi possível iniciar o experimento, até as 17:00, onde houve o término do mesmo, na cidade de Chapadão do Sul/MS. No início do experimento o céu estava sem nuvens e permaneceu assim durante toda a duração do experimento. Nas próximas figuras é possível ver o comportamento do protótipo ao longo de vários horários durante o período de análise.

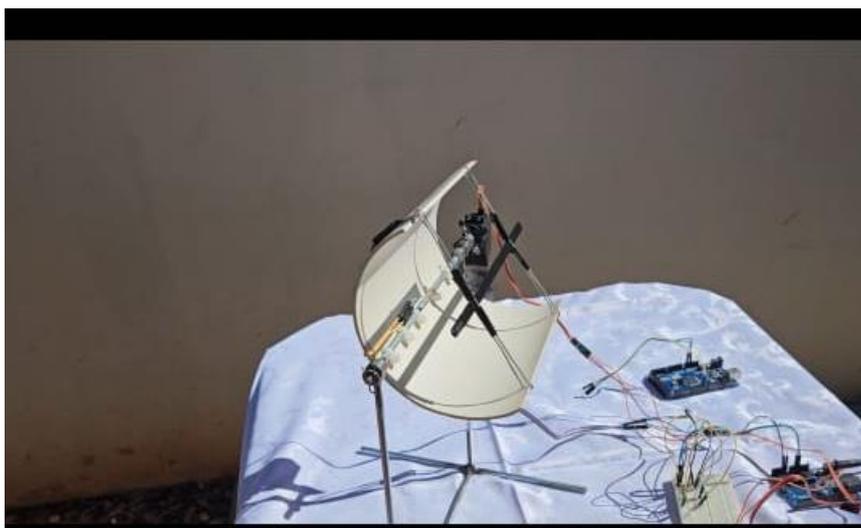


Figura 4.1: Fotografia do protótipo no início do experimento. Fonte: O autor.

Como é possível notar na Fig. 4.1, quando o sistema faz a inicialização da sua lógica, ou seja, quando é ligado o Arduino com a fonte de alimentação, ele vai para uma posição inicial que foi determinada no código como o limite mínimo de trabalho do servo motor, esse ângulo foi determinado como 20° . Após essa etapa, o sistema de controle entra em ação e faz o servo motor controlar o eixo do tubo PVC, deixando sempre perpendicular a incidência dos raios solares, conforme mostra as figuras a seguir.

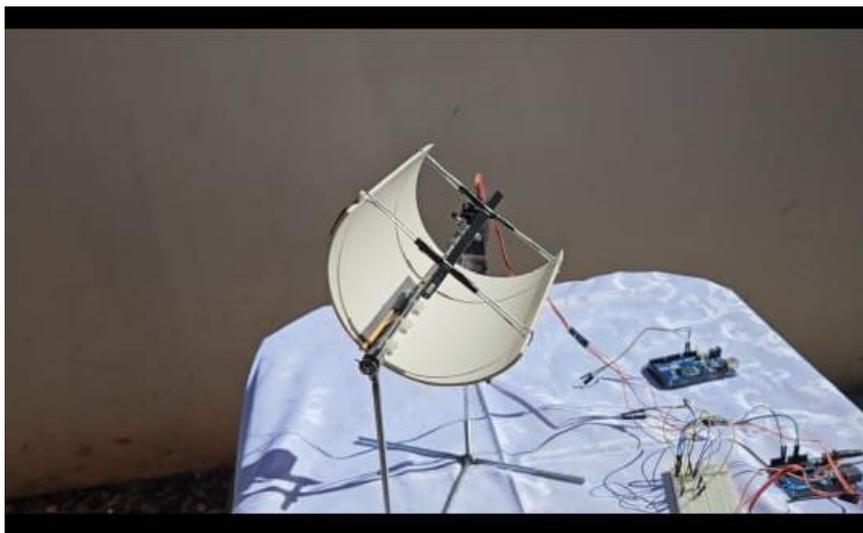


Figura 4.2: Fotografia do protótipo as 10:00h. Fonte: O autor.



Figura 4.3: Fotografia do protótipo as 11:00h. Fonte: O autor.



Figura 4.4: Fotografia do protótipo as 12:00h. Fonte: O autor.



Figura 4.5: Fotografia do protótipo as 13:00h. Fonte: O autor.



Figura 4.6: Fotografia do protótipo as 14:00h. Fonte: O autor.



Figura 4.7: Fotografia do protótipo as 15:30h. Fonte: O autor.



Figura 4.8: Fotografia do protótipo as 17:00h. Fonte: O autor.

Como observado entre a figura 4.2 até a figura 4.8, foi fotografado o comportamento do protótipo em 7 horários diferentes, e é possível ver que nesses horários o controle do sistema foi eficaz em deixar o plano do tubo PVC perpendicular a incidência dos raios solares.

Outra observação que pode ser feita através dessas figuras acima é que a posição da mesa onde está o protótipo foi alterado conforme passou o experimento, isso foi devido as condições do ambiente, pois a área de teste estava com obstáculos acabavam fazendo sombra com o passar do tempo no protótipo, então conforme passava o dia a mesa foi transladada de lugar para continuar com o experimento, porém, o ângulo entre o Sol e o protótipo permaneceu o mesmo.

Vale ressaltar que pôr o modelo escolhido para o protótipo ser um rastreador de eixo único do tipo Leste-Oeste, o único ângulo a ficar perpendicular foi o ângulo do Azimuth do Sol (γ_s), para que o ângulo de incidência (θ) seja totalmente perpendicular com o plano do tubo, o protótipo deverá ser com dois eixos para que o ângulo Zenith (θ_z) também fique perpendicular, atendendo assim as condições da Equação 2.2.5. Porém esse tipo de rastreamento é mais recomendado para um coletor do tipo disco parabólico, cujo receptor é um único

ponto, diferentemente do coletor do tipo cilíndrico-parabólico que é feito com o receptor no formato de tubo.

5 - CONCLUSÃO

A proposta inicial desse projeto era realizar o desenvolvimento de um protótipo, que através de um sistema físico e um código de programação realizado em uma placa de microcontrolador Arduino Uno fosse possível implementar um rastreador solar controlado.

Com o experimento realizado e analisado, foi possível comprovar que o protótipo foi funcional e atendeu as necessidades de fazer o ângulo Azimuth do Sol ficar perpendicular com o plano do tubo PVC, provando assim que o controle feito entre o servo motor, os sensores LDR e o Arduino funcionou corretamente.

Para estudos futuros, essa metodologia utilizada poderia ser aprimorada para a implementação em um protótipo de rastreador solar com dois eixos, permitindo assim o aprimoramento ainda melhor do rastreamento fazendo que não somente o ângulo Azimuth fique perpendicular, mas também o ângulo Zenith, permitindo assim a utilização desse sistema de rastreamento em um coletor do tipo parabólico de um único ponto de focalização.

REFERÊNCIAS

Monthly Electricity Statistics Net electricity production by the world (OECD Total) between January/2022 to January/2023 (IEA – International Energy Agency) – Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/monthly-electricity-statistics>> Acesso em: 02/06/2023.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Capacidade de geração de energia no Brasil supera os 180 GW – Disponível em <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/capacidade-de-geracao-de-energia-no-brasil-supera-os-180-gw>> Acesso em: 02/06/2023.

NERES, Aureo Rodrigo Ribeiro. A energia solar fotovoltaica: as vantagens e desvantagens. 2019. 34f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade Pitágoras, São Luís, 2019.

Duffie, J.A., Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, 4th ed. Wiley, 2013

Klein, S. A., Solar Energy, 19, 325 (1977). “Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces.”

Site Oficial do Arduino – Arduino Uno R3 - Disponível em: <docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3> Acesso em: 10/06/2023.

Banzi, M., Shiloh, M. Getting Started with Arduino, 2014. Published by Maker Media Inc., 3th ed.

Kalogirou, S. A., 2009. Solar energy engineering: processes and systems. 1ª edição, Academic Press, Elsevier, EUA.

KRISHNA, Y.; FAIZAL, M.; SAIDUR, R.; NG, K.; ASLFATTAHI, N. State-of-the-art heat transfer fluids for parabolic trough collector. International Journal of Heat and Mass Transfer, Elsevier, v. 152, p. 119541, 2020.

Bellos, E.; SAID, Z.; TZIVANIDIS, C. The use of nanofluids in solar concentrating technologies: a comprehensive review. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 196, p. 84–99, 2018.

Boeing Engineering and Construction Co. (Contract No. EY-76-C-03-1111), Martin Marietta Corp. (Contract EY-77-C-03-1110), and McDonnell Douglas Astronautics Co. (Contract EY-76-C03-1108) to the U.S. Department of Energy (1977) on “Central Receiver Solar Thermal Power System.”

ANEXO A – Código Utilizado para o controle do Rastreador Solar

```

#include <Servo.h> //Incluindo a biblioteca para o servo
motor
#include <Arduino.h>

#define LDR_MEIO A0 //Definindo a porta analogica para o
sensor LDR do meio
#define LDR_PONTA A1 //Definindo a porta analogica para
o sensor LDR da ponta

Servo Motor; //Comando para acionar um servo motor
int ServoMotor = 20; //Posição inicial do servo motor
int LimiteServoMotorMax = 160; //Limite Maximo de movimento
(em graus)
int LimiteServoMotorMin = 20; //Limite Minimo de movimento (em
graus)

int contador = 0; //Inicialização de um contador para
possiveis erros de calibração
int contador_fim_do_dia = 0; //Inicialização de um contador para
determinar o fim do dia e resetar a posição do servo motor

void setup() {
  Motor.attach(6); //Porta a qual está conectada o servo
motor
  Motor.write(20); //Posição a qual o servo motor ira
começar toda vez que se iniciar o arduino
  Serial.begin(9600); //Inicialização do monitor serial
  delay(2000); //Delay inicial para começar o loop
principal do programa
}

void loop() {
  int leitura_ponta = analogRead(LDR_PONTA); //Realiza a leitura do
sensor LDR_PONTA
  int leitura_meio = analogRead(LDR_MEIO); //Realiza a leitura do sensor
LDR_MEIO
  Serial.println(leitura_meio); //Mostra o valor da leitura no monitor
serial
  if (leitura_ponta > 850) {
    contador_fim_do_dia = 0; //Reseta o contador quando recebe
incidencia de raio solar
    if (leitura_meio > 800) {
      ServoMotor = ++ServoMotor; //Aumenta a posição do servo
motor caso a leitura seja maior que a da condição proposta no if
      delay(100);
      if (ServoMotor > LimiteServoMotorMax) { //Checa se a posição do servo
motor será maior que o limite proposto
        ServoMotor = LimiteServoMotorMax; //Como o servo motor não

```

pode passar do limite maximo, coloca-se o mesmo com o valor do limite maximo

```

    if (ServoMotor = LimiteServoMotorMax) {
        ServoMotor = LimiteServoMotorMin;    //Se o servo motor chegar no
limite maximo, será resetada a posição do servo, ficando assim igual ao limite
minimo
        Motor.write(ServoMotor);            //Comando usado para fazer o servo
motor ir para a posição desejada
        contador = ++contador;              //Contador para cada vez que o servo
motor chegar em sua posição maxima
        delay (1000);
    }
    if (contador > 3) {                      //Uma condição que é acionada caso o
dispositivo não esteja funcionando corretamente
        contador = 0;
        delay (100000);                     //Delay para pausar por um tempo o
processo e depois recomeçar tudo de novo
    }
}
Motor.write(ServoMotor);                    //Comando usado para fazer o servo
motor ir para a posição desejada
delay(1000);
}
else {
    contador_fim_do_dia = ++contador_fim_do_dia; //Contador Incrementa
toda vez que os LDR nao recebem incidencia solar
    delay(1000);                             //Delay de 1 segundo depois de
incrementar contador
    if (contador_fim_do_dia > 14400) {        //Caso contador passe de 4 horas
o servo motor volta para sua posição inicial
        ServoMotor = LimiteServoMotorMin;    //Comando para deixar o servo
motor em sua posição inicial
        Motor.write(ServoMotor);            //Comando usado para fazer o servo
motor ir para a posição desejada
        contador_fim_do_dia = 0;
    }
}
} //Fim do loop principal

```