

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

RAFAEL BATHÚ PAULUS

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
Desenvolvimento de um concentrador solar Fresnel Linear**

**Ibirubá
2023**

RAFAEL BATHÚ PAULUS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Desenvolvimento de um concentrador solar Fresnel Linear

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Ciências Térmicas

Orientador: Eng. Dr Alexandre Bittencourt de Sá

Ibirubá

2023

Paulus, Rafael B.

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR
FRESNEL LINEAR / Rafael Bathú Paulus; Orientador: Alexandre
Bittencourt de Sá**

Monografia (Graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Rio Grande do Sul, Câmpus Ibirubá, Curso de Engenharia
Mecânica, Ibirubá, 2023.

RESUMO

A demanda energética nacional tem crescido ao longo do tempo. O sistema nacional, que anteriormente era quase que totalmente suprido por usinas hidrelétricas e seus reservatórios, atingiu momentos em que a demanda precisava ser suprida majoritariamente por usinas térmicas. Aumentando o preço da energia e apresentando um risco da matriz de geração não atender a demanda. Em virtude dessa saturação, a busca por novas tecnologias de geração de energia tornou-se uma prioridade, com foco especial em fontes renováveis. Neste contexto, surgem alternativas promissoras para ampliar a capacidade de geração de energia no país, principalmente a energia eólica e a energia solar. O crescente aproveitamento da energia solar intensificou os estudos voltados para o desenvolvimento de novas tecnologias e a redução dos custos para implantação de sistemas solares. O presente trabalho se refere ao desenvolvimento de um concentrador solar Fresnel linear e um sistema eletrônico para compensação do deslocamento solar. Além disso, busca-se avaliar o desempenho desse protótipo, contribuindo assim para o avanço no campo das tecnologias solares e para a eficiência crescente na geração de energia renovável.

Palavras-chave: Energia. Concentrador Solar. Fresnel. Renovável

ABSTRACT

The national energy demand has been growing over time. The national system, which was previously almost entirely supplied by hydroelectric power plants and their reservoirs, reached moments when the demand needed to be predominantly met by thermal power plants. This led to an increase in energy prices and posed a risk of the generation matrix not meeting the demand. Due to this saturation, the search for new energy generation technologies has become a priority, with a special focus on renewable sources. In this context, promising alternatives arise to expand the energy generation capacity in the country, especially wind and solar energy. The increasing utilization of solar energy has intensified studies aimed at the development of new technologies and the reduction of costs for implementing solar systems. This work refers to the development of a linear Fresnel solar concentrator and an electronic system for compensating solar displacement. Furthermore, the aim is to assess the performance of this prototype, thus contributing to the advancement in the field of solar technologies and the increasing efficiency in renewable energy generation.

Palavras-chave: Energy. Solar Concentrator. Fresnel. Renewable.

Desenvolvimento de um Concentrador solar Fresnel Linear

Rafael Bathú Paulus

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 6 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Bittencout de Sá
IFRS campus Ibirubá

Prof. Dr. Cristiano Kulman
IFRS campus Ibirubá

Prof. Dr. Luciano Machado Cirino
IFRS campus Ibirubá

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Leitura de tempo para cada acionamento do atuador.....	50
Tabela 2 - Resultado das medições realizadas.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O sistema em números.....	15
Figura 2 - Total diário da irradiação no plano inclinado na latitude, média anual	17
Figura 3 - Divisão da radiação solar.....	18
Figura 4 - Concentrador do tipo Disco Solar.....	19
Figura 5 - Concentrador do tipo Torre Solar.....	20
Figura 6 - Concentrador do tipo Calha Parabólica.....	20
Figura 7 - Concentrador solar do tipo Fresnel Linear.....	21
Figura 8 - Planta concentrador solar	21
Figura 9 - Ângulos Solares.....	22
Figura 10 - Ângulos complementares.....	23
Figura 11 - Rastreador solar Passivo.....	24
Figura 12 - Rastreador solar Ativo.....	24
Figura 13 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta	25
Figura 14 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.....	25
Figura 15 - Concentrador solar Fresnel Linear.....	28
Figura 16 - Chassi para fixação dos espelhos	29
Figura 17 - Estrutura superior do chassi	30
Figura 18 - Vista Lateral do concentrador solar.....	30
Figura 19 - Desenho técnico das buchas de deslizamento	31
Figura 20 - Montagem das buchas no concentrador.....	31
Figura 21 - Estrutura fixa do absorvedor.....	32
Figura 22 - Estrutura Móvel do absorvedor.....	32
Figura 23 - Conjunto de absorção montado.....	33
Figura 24 - Dados de Placa do atuador Linear.....	34
Figura 25 - Desenho técnico membros do mecanismo de 4 barras.....	35
Figura 26 - Mecanismo de 4 barras montado.....	35
Figura 27 - Fixação do mecanismo de 4 barras nos eixos dos espelhos.....	36
Figura 28 - Circuito de ligação do LDR.....	37

Figura 29 - Circuito eletrônico.....	38
Figura 30 - Código de acionamento.....	39
Figura 31 - Concentrador solar.....	40
Figura 32 - Leituras porta analógica dos sensores LDR.....	41
Figura 33 - Leituras porta analógica dos sensores LDR após a substituição.....	42
Figura 34 - Aperto e Alívio das porcas e contraporcas para regulagem.....	44
Figura 35 - Posição dos espelhos após a regulagem.....	45
Figura 36 - Concentração da radiação solar.....	46
Figura 37 - Leitura de temperatura do Absorvedor.....	47
Figura 38 - Regulagem final da Fonte de Alimentação.....	48
Figura 39 - Regiões de medição de temperatura	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	15
2.2 ENERGIA SOLAR.....	16
2.2.1 ENERGIA HELIOTÉRMICA.....	18
2.3 CONCENTRADORES SOLARES.....	19
2.4 DESLOCAMENTO DO SOL E ÂNGULOS SOLARES.....	22
2.5 RASTREAMENTO SOLAR.....	23
2.6 SISTEMAS DE CONTROLE.....	25
2.6.1 SISTEMA DE CONTROLE EM MALHA ABERTA.....	25
2.6.2 SISTEMA DE CONTROLE EM MALHA FECHADA.....	25
2.7 ELETRÔNICA E ARDUINO.....	26
2.8 METODOLOGIA DE PROJETO.....	26
2.8.1 PROJETO INFORMACIONAL.....	26
2.8.2 PROJETO CONCEITUAL.....	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 ESTRUTURA DO CONCENTRADOR SOLAR.....	28
3.1.1 CHASSI DO CONCENTRADOR.....	28
3.1.2 ESPELHOS.....	31
3.1.3 ABSORVEDOR.....	32
3.1.4 MECANISMO DE COMPENSAÇÃO ANGULAR.....	33
3.1.5 SISTEMA ELETRÔNICO.....	36
3.1.5.1 - Código para leitura dos LDRs e atuação do sistema.....	38
4 RESULTADOS.....	41

4.1 TESTES DO SISTEMA ELETRÔNICO.....	41
4.2 REGULAGEM DOS ESPELHOS.....	43
4.3 VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DOS RAIOS.....	45
4.4 VERIFICAÇÃO DO SISTEMA PARA RASTREAMENTO SOLAR.....	47
4.5 ANÁLISE TÉRMICA.....	49
5 CONCLUSÕES.....	53
6 REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, cresce a preocupação global com a persistente dependência da matriz energética na combustão de combustíveis fósseis, uma prática que contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa e acelera as mudanças climáticas, reforçando a necessidade urgente de uma transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Devido a isso, se identifica um aumento nos incentivos financeiros para desenvolvimento de uma matriz energética mais renovável. A energia solar é uma das fontes de energia com maior potencial de ampliação. Entretanto, ainda existem questões relativas a custos altos que podem inviabilizar a instalação e aproveitamento de algumas dessas tecnologias. Contudo, diversos estudos para desenvolvimento e redução de custos têm sido feitos com utilização de novas tecnologias. A energia solar destaca-se pela sua versatilidade na geração de eletricidade. Por exemplo, pode-se citar a energia heliotérmica, que é baseada na utilização de energia térmica proveniente do sol. Dentre as técnicas de aproveitamento da energia heliotérmica, que se baseiam no aproveitamento do calor proveniente da radiação solar. A energia heliotérmica pode ser aproveitada de diferentes formas, seja em absorvedores de placa plana ou concentradores solares pontuais ou lineares. Os concentradores do tipo disco solar e torre solar são exemplos de concentradores pontuais, enquanto os concentradores do tipo Fresnel Linear e Calha parabólica são exemplos de concentradores lineares. Os concentradores solares do tipo Fresnel linear se destacam por serem multifuncionais. Podendo aquecer algo desejado a partir de seu fluido térmico, e até mesmo entregar vapor para processos industriais de forma direta. O estudo e desenvolvimento destas tecnologias é fundamental para a diversificação da matriz energética, tendo em vista que os recursos não renováveis tendem a se esgotar e significam um aumento no custo da energia consumida. O aumento do custo da energia é decorrente da despesa com o combustível a ser queimado.

1.1 JUSTIFICATIVA

A maior parte do consumo energético mundial é dependente de combustíveis fósseis, como usinas a carvão ou câmaras de combustão à gás. Porém, a utilização exagerada desses combustíveis acarreta grandes impactos ambientais, como o aquecimento global.

Tendo em vista os problemas climáticos decorrentes do aquecimento global, a preocupação com o meio ambiente vem à tona, justificando o estudo e desenvolvimento de meios de obtenção de energia de forma relativamente limpa e sustentável. É neste viés em que as energias renováveis estão sendo cada vez mais visadas, e por consequência estudadas e desenvolvidas tanto no meio acadêmico quanto em aplicações reais.

1.2 OBJETIVOS

Geral:

Desenvolvimento de um concentrador solar Fresnel Linear para uso didático.

Específicos:

- Estudar os diferentes tipos de concentradores solares.
- Desenvolvimento de um sistema de controle e um mecanismo para realizar a compensação angular dos refletores.
- Analisar diferentes formas para desenvolvimento de um sistema para rastreamento solar.
- Fazer uma revisão bibliográfica sobre a energia solar.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos de forma a facilitar a estruturação e o entendimento do conteúdo.

O segundo capítulo é uma revisão bibliográfica que abrange a matriz energética brasileira, energia solar, rastreamento solar, alguns meios para aproveitamento da energia solar e concentradores solares, sistemas de controle, eletrônica e projeto mecânico.

No terceiro capítulo será demonstrada a metodologia utilizada para desenvolver o trabalho, iniciando com o desenvolvimento do projeto do concentrador solar, sistema eletrônico desenvolvido e a instrumentação do sistema.

O quarto capítulo é voltado para os resultados e a discussão, iniciando com os testes do concentrador, regulagem dos espelhos, calibração dos parâmetros para melhora da eficiência do deslocamento do atuador e por fim uma breve análise térmica do sistema.

No quinto capítulo serão feitas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

No sexto capítulo estão as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

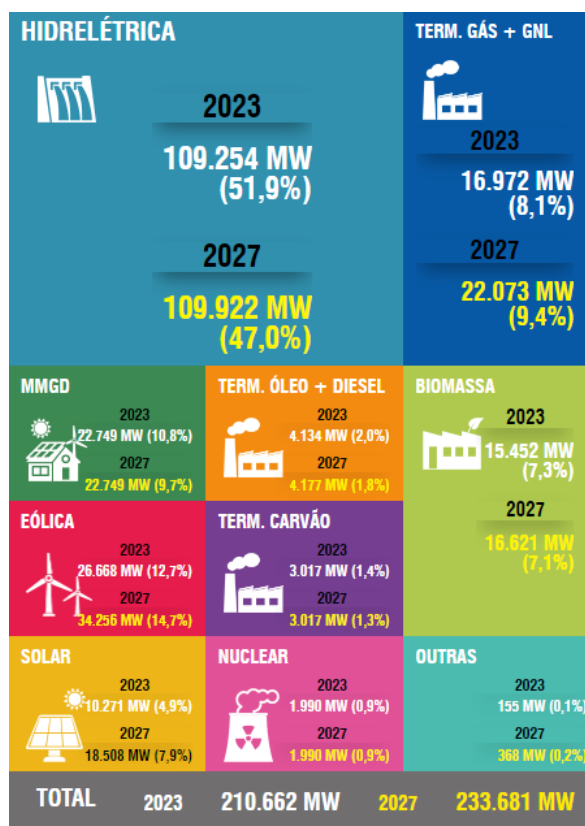
No capítulo abaixo serão abordados os principais temas referente ao trabalho em questão.

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Ao longo do último século o Brasil passou por um grande desenvolvimento econômico, que culminou em uma crescente demanda de energia. Alguns dos fatores que têm grande influência neste processo são a industrialização e a expansão demográfica nacional (TOLMASQUIM, GUEREIRO, & GORINI, 2007).

Atualmente a matriz energética nacional é predominantemente composta por usinas hidrelétricas. As perspectivas para os próximos anos é que ocorra uma diversificação da matriz por meio da expansão da geração de energia eólica e solar. As expectativas do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) para os próximos anos são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - O sistema em números.



Fonte: ONS (2023)

A diversificação da matriz energética é sempre vantajosa, especialmente em períodos de escassez de algum recurso natural, como períodos de seca. Também vale destacar que a matriz energética brasileira se diferencia da matriz energética global por possuir elevada representatividade das fontes renováveis e já emite uma baixa quantidade de Gases de Efeito Estufa.

O consumo de energia elétrica também apresenta crescimento contínuo no Brasil. Apesar da utilização de equipamentos com maior eficiência energética, há uma crescente demanda de utilização de aparelhos elétricos. Existe a necessidade da ampliação da capacidade de geração, transmissão e distribuição de energia, o que geralmente não ocorre na mesma velocidade que o consumo, podendo gerar *déficit* no abastecimento energético que pode resultar em racionamento, elevação de preço e cortes temporários no fornecimento de energia elétrica (BARDELIN, 2004).

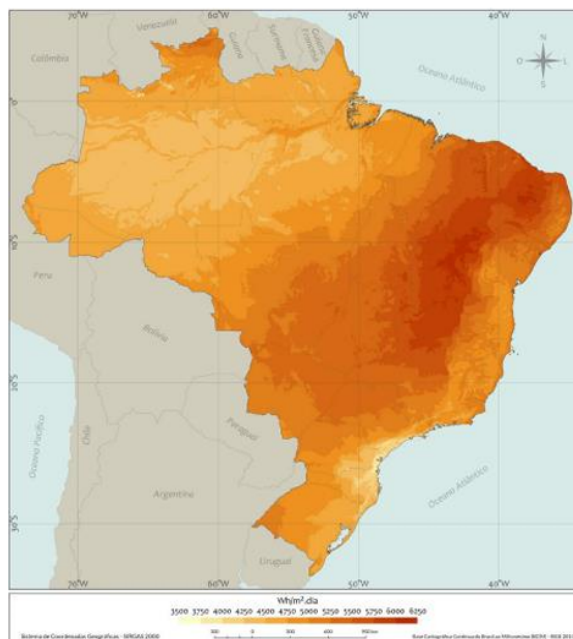
A perspectiva para os próximos anos é que haja um crescimento de outras fontes de energia, e que a hidroeletricidade perca espaço, pois prevê-se a saturação de usinas nas regiões de importância bem como tem-se perspectivas de cenários cada vez mais críticos nos níveis pluviométricos do país (TOLMASQUIM, GUEREIRO, & GORINI, 2007).

2.2 ENERGIA SOLAR

Segundo o Plano Nacional de Energia (PNE, 2020). A luz do sol é capaz de produzir cerca de 1.700 MWh por ano para cada metro quadrado de área. Entretanto, para que possamos aproveitar este potencial energético se fazem necessários estudos a respeito da radiação direta e incidente (irradiação) no local de interesse.

O estudo de maior relevância no país sobre as potencialidades solares é intitulado como Atlas Solar (INPE, 2017), onde são analisadas a intensidade de radiação em todo o território nacional, bem como a variação dela ao longo dos anos. Os resultados mostram que a irradiação solar no Brasil varia entre 3500 Wh/m².dia a 6250 Wh/m².dia. Na Figura 2 pode-se observar a irradiação e sua variação conforme as diferentes regiões do país.

Figura 2 - Total diário da irradiação no plano inclinado na latitude, média anual



Fonte: Atlas solarimétrico do Brasil (2017)

A energia solar se destaca por possuir diversas tecnologias para aproveitamento do seu potencial, podendo-se utilizar desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos até grandes centrais que utilizam energia solar concentrada. Porém, mesmo com diversas possibilidades, a participação da energia solar na matriz energética e elétrica brasileira é pequena.

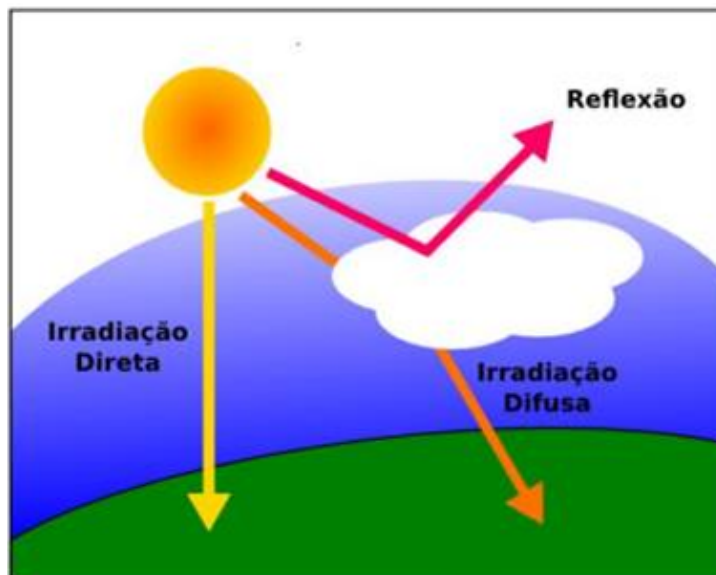
Segundo Çengel (2012), a radiação solar é a forma de energia que é transmitida do Sol para a Terra na forma de radiação eletromagnética. Ele enfatiza que a radiação solar é uma das principais fontes de calor e energia na Terra e desempenha um papel fundamental nos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado, bem como na geração de energia solar.

A radiação solar, ao entrar na atmosfera terrestre passa pelos processos de espalhamento e absorção. Em razão da reflexão, é possível dividir a radiação solar incidente sobre uma superfície em três componentes: irradiação direta, irradiação difusa e a irradiação global, que é a soma das anteriores (VALIATI & RICIERI, 2005).

A Irradiância Direta Normal (DNI) incide diretamente em uma superfície perpendicular ao Sol, e passa diretamente pela atmosfera até o solo, sem nenhum desvio. A Irradiância Difusa Horizontal (DHI) sofre desvios em sua trajetória até a superfície terrestre, somente após os desvios ela encontra a

superfície. A Irradiância Global Horizontal (GHI) é a soma das componentes de radiação solar direta (DNI) e difusa (DHI). A Figura 3 destaca ambas as formas de irradiação.

Figura 3 - Divisão da radiação solar



Fonte: Góis (2020)

Para um concentrador solar Fresnel Linear a componente direta da irradiação solar é o objeto de interesse, pois a mesma pode ser refletida para o absorvedor do concentrador solar. Em sistemas com lentes e espelhos, apenas a parcela direta da radiação pode ser focada, a parcela difusa se perde na lente.

2.2.1 Energia Hélotérmica

A energia heliotérmica, pode ser aproveitada de diferentes maneiras, seja na absorção da irradiação direta e difusa em absorvedores de placa plana, na concentração da irradiação direta em absorvedores ou também em painéis planos. Os concentradores lineares e pontuais são caracterizados pela concentração da irradiação direta em um absorvedor, o qual possui em seu interior um fluido térmico, que pode ser um tipo específico de óleo, ou água que percorrem os tubos absorvedores para o fim ao qual se destinam, seja a produção direta de vapor ou aquecimento de algo (PIGOZZO, 2019).

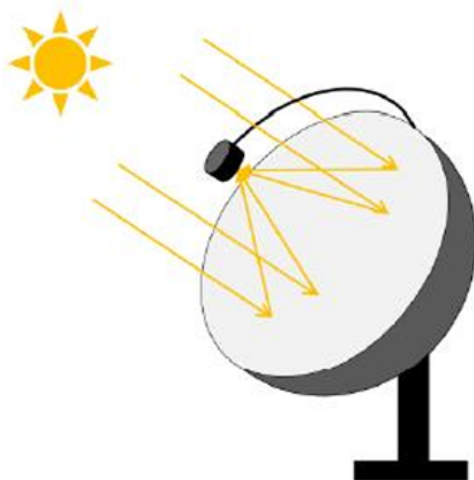
2.3 CONCENTRADORES SOLARES

Os concentradores solares têm a função de multiplicar a radiação incidente sobre um absorvedor. Através de concentradores solares é possível atingir elevadas temperaturas utilizando a radiação solar, possibilitando a geração de vapor apenas com a irradiação incidente. Diferentemente das demais formas para aproveitamento da energia solar.

Existem dois principais tipos de concentradores solares, os pontuais e os lineares, como exemplo de concentradores solares pontuais serão descritos os modelos Disco Solar e Torre solar, já dos concentradores solares lineares serão abordados a Calha Parabólica e o Fresnel Linear, tema do trabalho.

O concentrador solar Disco solar concentra toda a radiação incidente em seu espelho parabólico à um receptor montado no seu foco. Estes sistemas de alta concentração podem alcançar temperaturas de cerca de 1500 °C no absorvedor. O concentrador é composto por um disco parabólico que segue o sol em dois eixos. Um Disco Solar pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Concentrador do tipo Disco Solar

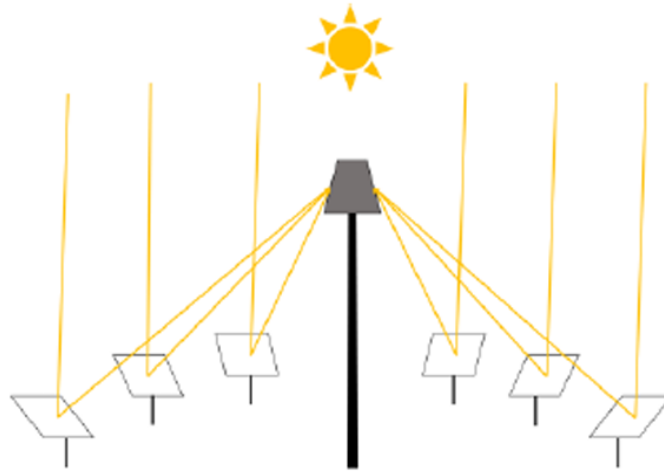


Fonte: Sá (2018)

O concentrador Torre solar é composto por uma torre central com o receptor montado no seu topo. A torre está localizada no centro de um campo solar, composto por heliostatos. Os heliostatos são espelhos planos que seguem o sol em dois eixos, distribuídos no entorno da torre solar e possuem o papel de direcionar a irradiação para o receptor. As torres solares também possuem altas

taxas de concentração solar, permitindo-lhe atingir temperaturas superiores a 800 °C em seu absorvedor. Uma Torre Solar pode ser observada na Figura 5.

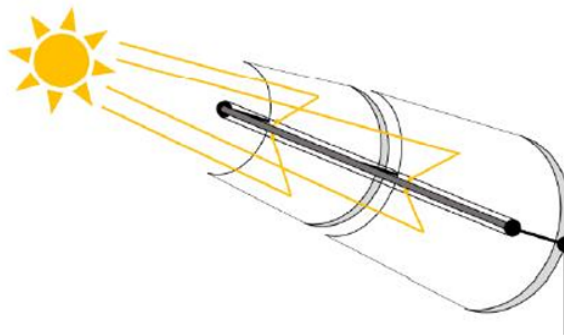
Figura 5 - Concentrador do tipo Torre Solar



Fonte: Sá (2018)

O concentrador do tipo Calha parabólica possui um espelho parabólico que concentra a radiação num receptor, localizado no foco da parábola. A calha parabólica possui um mecanismo de seguimento de um eixo que normalmente segue o movimento do sol, com os concentradores orientados no eixo norte-sul. Um concentrador solar do tipo calha parabólica pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Concentrador do tipo Calha Parabólica



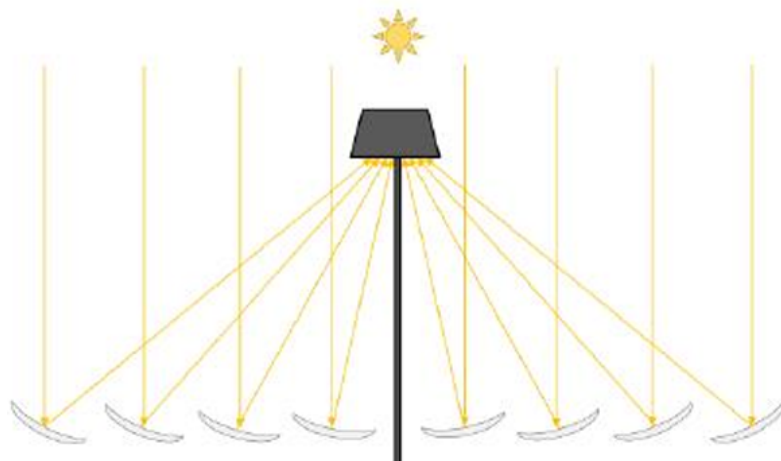
Fonte: Sá (2018)

O concentrador solar Fresnel Linear funciona como uma Calha Parabólica que teve o seu espelho parabólico dividido em várias linhas de espelhos planos ou ligeiramente curvos (PIGOZZO, 2019).

Neste tipo de concentradores, várias linhas de espelhos são dispostas próximas ao solo e direcionam a irradiação solar direta para um conjunto absorvedor localizado acima dos espelhos. Esse conjunto absorvedor pode ser

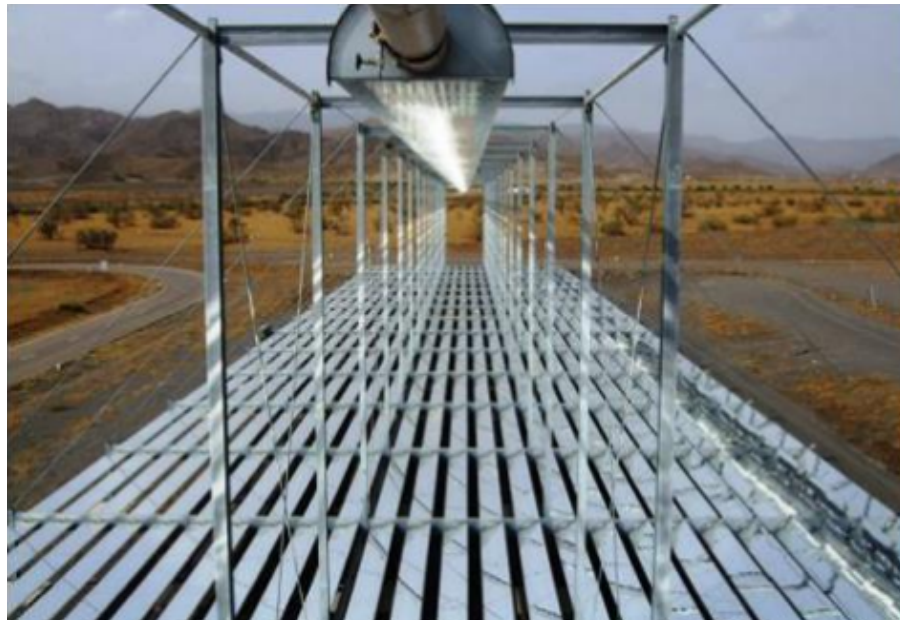
um tubo ou um conjunto de tubos dentro dos quais passa um fluido térmico, por exemplo: água, que tem a função de armazenar energia térmica. Variando as propriedades e parâmetros do concentrador podem ser obtidos diferentes resultados, como a geração direta de vapor ao elevar a temperatura do fluido até a saturação, ou o aquecimento do fluido sem mudança de fase. A Figura 7 apresenta um esquema de um concentrador solar do tipo Fresnel Linear e a Figura 8 apresenta uma planta real de um concentrador solar Fresnel.

Figura 7 - Concentrador solar do tipo Fresnel Linear



Fonte: Sá (2018)

Figura 8 - Planta concentrador solar



Fonte: MORIN (2012)

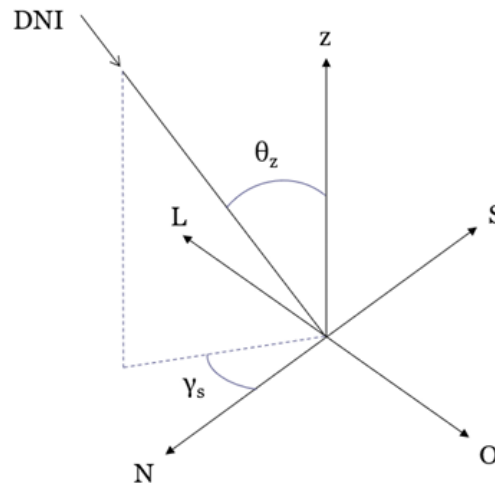
Estes sistemas apresentam uma geometria de espelhos mais simples, e geralmente são mais fáceis e baratos de fabricar, se comparado aos concentradores citados anteriormente.

2.4 DESLOCAMENTO DO SOL E ÂNGULOS SOLARES

O rastreamento solar aplicado aos concentradores solares tem por objetivo proporcionar a maior eficiência possível na concentração da energia solar. De modo que as superfícies absorvedoras dos concentradores de placa plana e os espelhos que direcionam a radiação direta para os absorvedores, se mantenham perpendiculares ao sol. O conhecimento da posição do sol é de suma importância para o desenvolvimento do sistema de rastreamento solar.

A posição do sol é definida pelos ângulos de azimute solar (γ_s) e zênite solar (θ_z), a irradiância solar direta é apresentada pela expressão (DNI). As componentes podem ser observados na Figura 9.

Figura 9 - Ângulos Solares



Fonte: Pigozzo (2019)

O zênite solar (θ_z) é o ângulo em que o sol está disposto em relação a um eixo vertical, variando entre 0° e 90° .

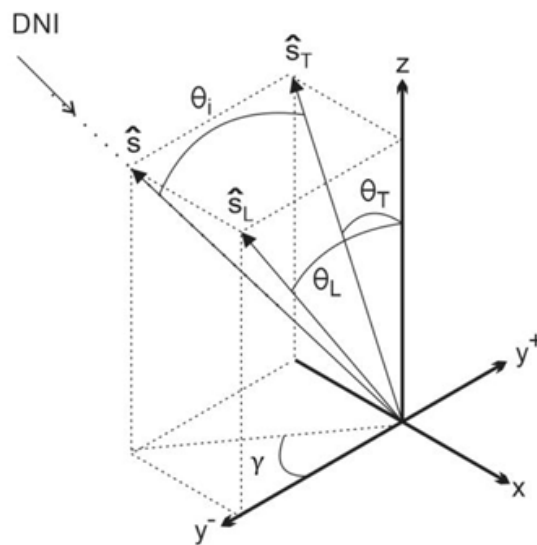
O azimute solar (γ_s) é definido como o ângulo entre o eixo horizontal disposto para a direção norte e a projeção no plano horizontal da linha que liga ao sol. Os deslocamentos para o leste são negativos, variando entre 0° e -180° , enquanto deslocamentos para o oeste são positivos, variando entre 0° e 180° .

Contudo, existem mais dois ângulos de interesse para este estudo:

- θ_T é o ângulo de interesse para a movimentação dos espelhos que promove a correta reflexão da radiação solar direta para o absorvedor.
- θ_L que serve para determinar as perdas de final de linha e o posicionamento longitudinal do absorvedor para minimizá-las.

Ambos os ângulos podem ser observados na Figura 10.

Figura 10 - Ângulos complementares

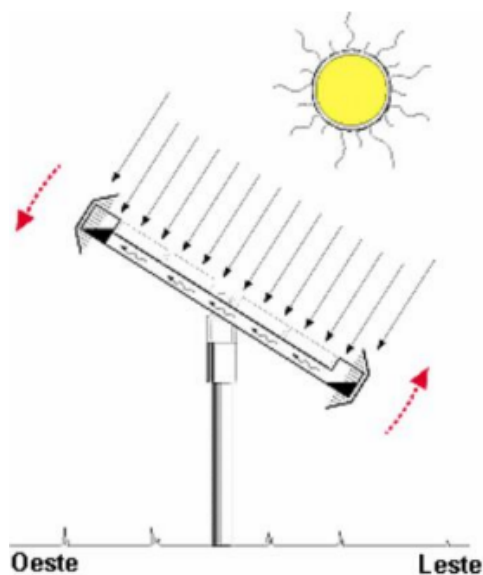


Fonte: Pigozzo (2019)

2.5 RASTREAMENTO SOLAR

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 por conta da radiação solar que incide sobre o mecanismo que possui em cada extremidade da placa, um vaso cilíndrico abastecido com um fluido mantido a uma determinada 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 através do desequilíbrio de massa provocado no sistema. Um Rastreador solar do tipo passivo é apresentado na Figura 11.

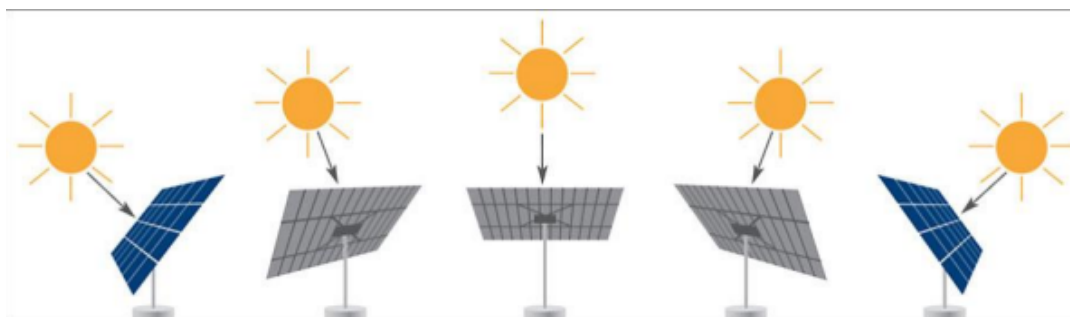
Figura 11 - Rastreador solar Passivo



Fonte: Oliveira (2007)

Os rastreadores ativos possuem um sistema eletrônico que controla a posição da placa solar em função da leitura de sensores, como os de luminosidade. O movimento pode ser feito através de atuadores ou motores de passo, por exemplo (LIRA, 2014). Oliveira (2007) ainda cita que o seguidor solar ativo pode trabalhar em um ou dois eixos. O primeiro tem seu eixo na direção Norte-Sul, com seu arranjo girando de Leste a Oeste para se alinhar com o Sol ao longo do dia, como pode ser visto na Figura 12. O seguidor de dois eixos possui um segundo eixo, que permite o ajuste da inclinação do sistema, podendo se adaptar às inclinações do Sol ao longo do ano.

Figura 12 - Rastreador solar Ativo



Fonte: Portal Solar (2017)

2.6 SISTEMAS DE CONTROLE

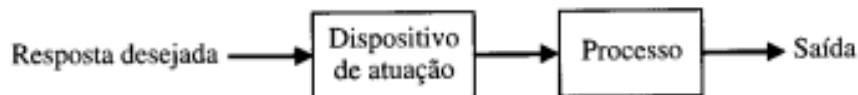
Em concentradores solares é necessário realizar o controle da angulação dos espelhos do sistema de reflexão a fim de refletir a radiação de maneira eficiente para o absorvedor.

Um sistema de Controle é uma interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá uma resposta desejada do sistema (DORF, 2013). Os sistemas de controle podem ser divididos basicamente em dois tipos. Sistema de controle em malha aberta e sistema de controle em malha fechada.

2.6.1 Sistema de controle em malha aberta

Um sistema de controle em malha aberta utiliza um controlador ou um atuador para obter a resposta desejada sem a utilização de um sinal de retroação (DORF, 2013). A Figura 13 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta.

Figura 13 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta

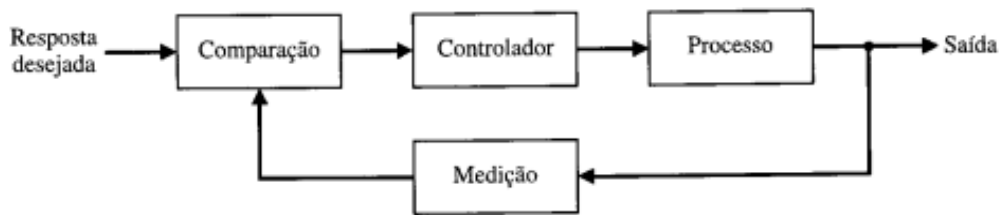


Fonte: DORF (2013)

2.6.2 Sistema de controle em malha fechada

O sistema de controle em malha fechada se baseia no sinal de retroação. Ou seja, utiliza uma medida adicional da saída real para comparar a saída real com a resposta desejada. Essa medida da saída é chamada de sinal de retroação (DORF, 2013). A Figura 14 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.

Figura 14 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada



Fonte: DORF (2013)

2.7 ELETRÔNICA E ARDUINO

De acordo com Fuentes (2013), a eletrônica é o campo da ciência e da engenharia que estuda a forma de controlar a energia elétrica por meio de dispositivos e meios condutores ou semicondutores.

O Arduino é conhecido como uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source* que se baseia em *hardware* e *software* flexíveis e fáceis de usar.

Por intermédio da plataforma se identifica a possibilidade de desenvolvimento de protótipos de sistemas eletrônicos com custo baixo.

A utilização de sistemas eletrônicos possibilita a leitura da incidência da radiação sobre o absorvedor e permite realizar uma compensação angular do sistema de reflexão sobre o resultado da leitura. Podendo-se aplicar diferentes sistemas tanto em malha aberta quanto em malha fechada.

2.8 METODOLOGIA DE PROJETO

Ogliari (1999), propõe um processo de Desenvolvimento de produto consensual, constituído de quatro etapas:

- Projeto Informacional;
- Projeto Conceitual;
- Projeto Preliminar (Concepção do produto);
- Projeto detalhado (Documentação do produto);

2.8.1 Projeto informacional

Esta etapa mostra o ponto de partida do problema do projeto, constata uma necessidade de mercado, faz uma avaliação das necessidades dos clientes e apresenta uma especificação de produto (BACK E FORCELLINI,2003). Utilizando as informações, os processos e os meios de projeto são executados e aplicados. Os meios são o embasamento teórico e prático disponibilizados para os desenvolvedores a fim de facilitar o processo de desenvolvimento. São, portanto, o que o projetista deve fazer para conceber o produto.

2.8.2 Projeto conceitual

No projeto conceitual são realizados vários processos para encontrar as melhores soluções para concretizar os desejos finais do projeto. Ao final desta fase são documentadas as soluções conceituais desenvolvidas e avaliadas (Ogliari, 1999). O conceito de um produto é uma breve descrição da tecnologia dos princípios de funcionamento, e da forma do produto, descreve como o produto irá satisfazer as necessidades (SLACK,2002). Ao final desta fase obtém-se a concepção do produto, que é uma proposta de solução fundamental que satisfaz a função do produto.

O projeto inteiro foi desenvolvido levando-se em consideração metodologias para desenvolvimento de projeto mecânico. Iniciando-se pelo desenvolvimento de um projeto informacional, posteriormente para o projeto conceitual e após levantar uma série de ideias e possibilidades, que se prosseguiu para o desenvolvimento e desenho mecânico do concentrador solar.

Posteriormente prosseguimos com o desenvolvimento do protótipo que caracteriza o Projeto Preliminar. O protótipo foi criado utilizando os princípios de solução dos problemas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No capítulo abaixo será explanado o processo de fabricação e a estrutura desenvolvida para realizar o experimento.

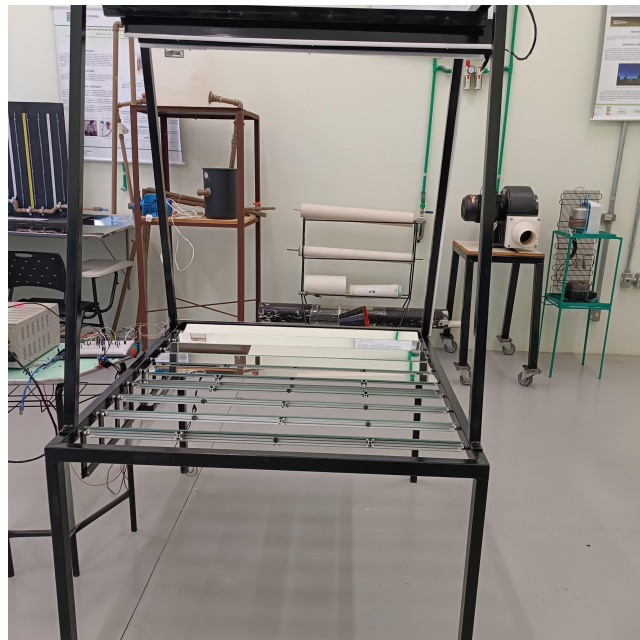
3.1 ESTRUTURA DO CONCENTRADOR SOLAR

O desenvolvimento da estrutura do concentrador solar se deu no componente curricular de Projeto Mecânico, juntamente com os colegas Volmei Borghardt, Gustavo Titello Orlandi e Igor Tatsch. Na instituição de ensino: IFRS - Campus Ibirubá.

O concentrador solar Fresnel Linear foi desenvolvido em diferentes partes: o sistema de reflexão, sistema de absorção, mecanismo de deslocamento e sistema eletrônico. O tamanho do dispositivo foi definido pelos espelhos disponíveis na instituição para o desenvolvimento do mesmo.

A área total de reflexão do concentrador solar é de $0,9 \text{ m}^2$ e é composta por 9 espelhos com 100 mm de largura e 1000 mm de comprimento. A Figura 15 abaixo apresenta o concentrador solar após a conclusão da montagem.

Figura 15 - Concentrador solar Fresnel Linear



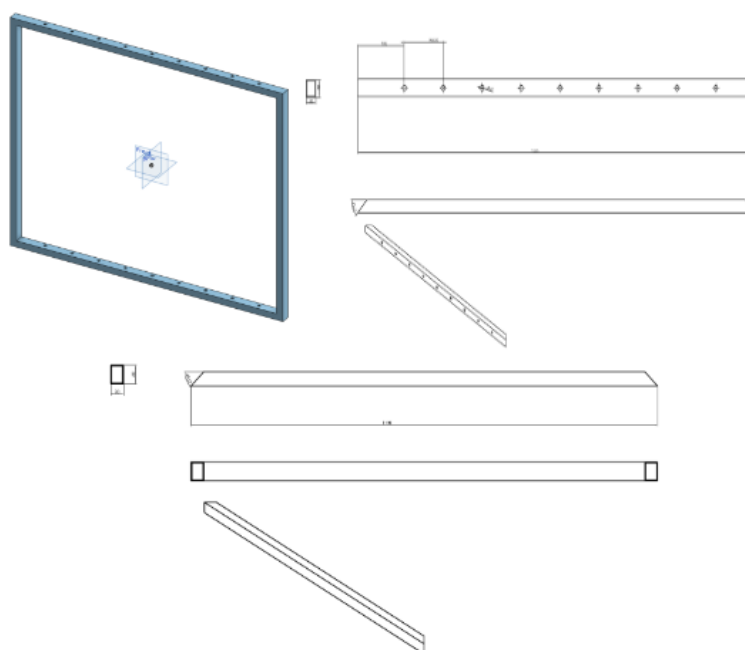
Fonte: Autor (2023)

3.1.1 Chassi do concentrador

O Chassi do concentrador solar é dividido em duas partes: uma para fixação e montagem dos espelhos e outra para posicionamento do absorvedor.

A estrutura inferior do chassi do concentrador foi desenhada em um programa de modelagem 3D e posteriormente foi realizada a fabricação da estrutura nos laboratórios do IFRS Câmpus Ibirubá. O material utilizado foi tubo de aço com seção de 30 mm x 40 mm e espessura de parede de 2 mm. O quadro possui dimensões de 1100 mm de largura x 1275 mm de comprimento e 740 mm de altura. A estrutura é apresentada na Figura 16.

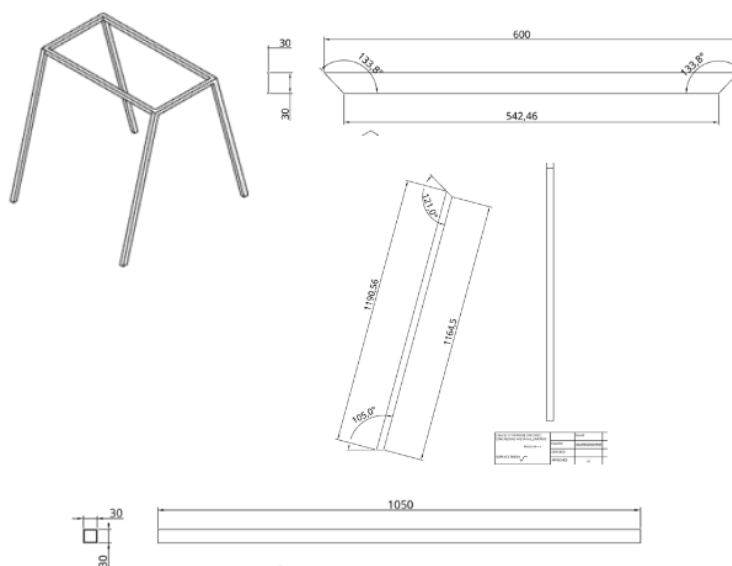
Figura 16 - Chassi para fixação dos espelhos



Fonte: Autor (2023)

A parte superior do chassi foi desenhada para posicionar o absorvedor do concentrador solar. O material utilizado para sua fabricação foi o tubo quadrado de aço de 30 x 30 mm e espessura de parede de 2 mm. O componente foi desenhado em um *software* de desenho 3D e posteriormente fabricado na instituição. O componente é apresentado na Figura 17.

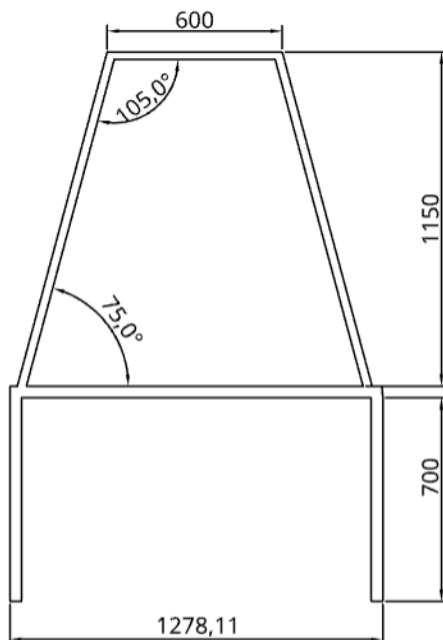
Figura 17 - Estrutura superior do chassi



Fonte: Autor (2023)

O chassi foi montado em duas partes para facilitar o transporte do concentrador caso haja necessidade, a vinculação das duas partes ocorre com a utilização de 4 parafusos. A Figura 18 apresenta a vista lateral do chassi do concentrador solar.

Figura 18 - Vista Lateral do concentrador solar

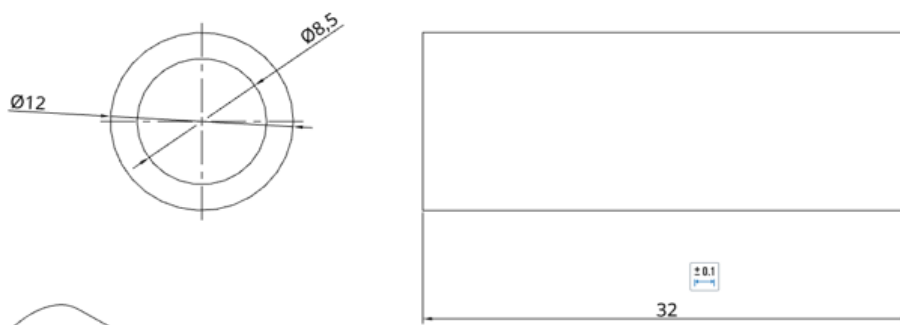


Fonte: Autor (2023)

3.1.2 Espelhos

A estrutura de fixação dos espelhos foi aproveitada de um outro trabalho desenvolvido anteriormente na instituição. Os espelhos são colados em barras de alumínio de 15 mm x 15 mm de seção lateral utilizando uma fita dupla face. Nas extremidades das barras foram fixados parafusos para permitir a montagem dos espelhos na parte inferior do chassi. Para permitir a movimentação angular dos espelhos foram utilizadas buchas poliméricas. Pois a utilização de rolamentos e mancais iria resultar em um aumento significativo do custo do projeto. E como a solicitação mecânica é quase nula, pode-se dispensar a utilização de rolamentos. As buchas utilizadas são apresentadas nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Desenho técnico das buchas de deslizamento



Fonte: Autor (2023)

Figura 20 - Montagem das buchas no concentrador

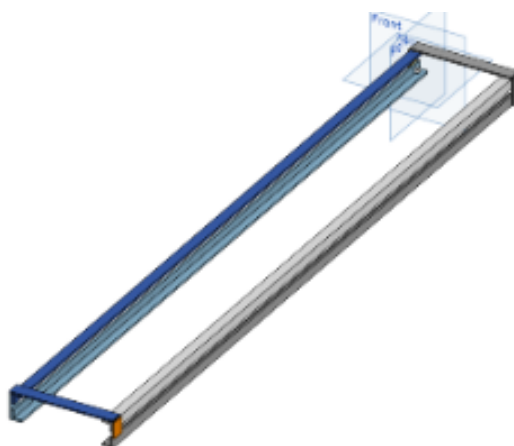


Fonte: Autor (2023)

3.1.3 Absorvedor

O Absorvedor de um concentrador solar Fresnel Linear é o componente no qual a radiação direta será direcionada de forma a aumentar a incidência de radiação e calor em uma pequena área. O concentrador solar foi desenvolvido pensando na possibilidade de movimentação longitudinal do absorvedor para compensar a movimentação do sol em dois graus de liberdade. Assim conseguindo aumentar um pouco a eficiência do concentrador. A estrutura de deslocamento foi dividida em uma parte fixa e uma parte móvel. O absorvedor foi fixado no componente móvel da estrutura. As Figuras 21, 22 e 23 apresentam os componentes citados acima.

Figura 21 - Estrutura fixa do absorvedor



Fonte: Autor (2023)

Figura 22 - Estrutura Móvel do absorvedor



Fonte: Autor (2023)



Figura 23 - Conjunto de absorção montado. (Fonte: Autor, 2023)

Foram utilizados rolamentos 6204ZZ para montar a estrutura móvel do absorvedor na estrutura fixa. Os componentes estavam disponíveis na instituição e foram reaproveitados para esse projeto. A viga U da estrutura fixa do concentrador foi obtida após soldar duas cantoneiras com 25 mm de largura. Todos os materiais utilizados estavam disponíveis na instituição de ensino.

3.1.4 Mecanismo de compensação angular

Para realizar a compensação angular dos espelhos se pensou em duas possibilidades. A primeira possibilidade seria o desenvolvimento de um sistema de coroa e corrente de rolos acionado por um motor elétrico convencional. Já a segunda possibilidade seria de desenvolver um mecanismo de quatro barras acionado por um atuador linear. Pela maior facilidade de desenvolvimento e menores custos envolvidos se optou pela utilização de um mecanismo de quatro barras. O atuador linear utilizado estava disponível na instituição de ensino e havia sido obtido através de uma doação. O atuador linear é fabricado pela empresa LINAK e o modelo utilizado foi o LA35 com 250 mm de deslocamento máximo e 4000 N de carregamento máximo. O atuador é acionado por uma fonte de 12V CC e corrente máxima de 8,4 A. Os dados de placa do atuador são apresentados na Figura 24.

Figura 24 - Dados de Placa do atuador Linear



Fonte: Autor (2023)

O mecanismo para compensação foi desenvolvido sobre o deslocamento máximo do atuador. O deslocamento angular máximo do concentrador solar no decorrer do dia está em torno de 120° . Sabendo desse deslocamento e do limite de 250 mm do atuador foram desenvolvidos o tamanho das barras. Logo:

L = Deslocamento Máximo atuador

r = Tamanho dos componentes do mecanismo de quatro barras

θ = Ângulo deslocamento

Sabendo que, o deslocamento máximo do atuador será igual à distância do percurso que membro (r) do mecanismo percorre para apresentar uma variação angular de 120° . Logo, ao aplicar a fórmula do perímetro do círculo sobre a variação angular e igualar à distância total percorrida pelo atuador, podemos obter o raio do mecanismo para permitir esse deslocamento. Dessa forma:

$$\text{Perímetro} = 2 \cdot \pi \cdot r \quad \text{---} \quad 360^\circ \quad \text{Equação (1)}$$

Considerando um ângulo de 120° a distância percorrida por um raio é igual à:

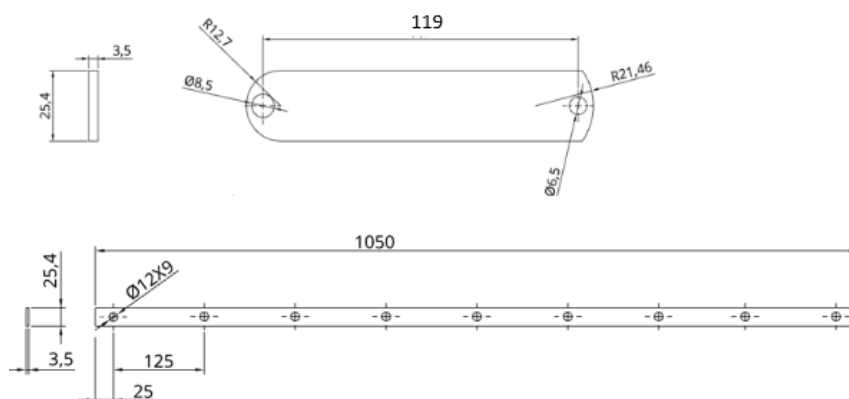
$$\text{Perímetro} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r \quad \text{---} \quad 120^\circ$$

Igualando o perímetro ao deslocamento do braço podemos obter o raio necessário para permitir a variação total de 120° . Assim

$$250 \text{ mm} = \frac{2}{3} \pi \cdot r, \text{ Então: } r = 119,37 \text{ mm.}$$

Por intermédio desse cálculo, foi definida a cota de 119 mm entre furos para os membros menores do mecanismo de quatro barras. A Figura 25 apresenta o desenho desses componentes e a Figura 26 apresenta a montagem final do mecanismo.

Figura 25 - Desenho técnico membros do mecanismo de 4 barras



Fonte: Autor (2023)

Figura 26 - Mecanismo de 4 barras montado



Fonte: Autor (2023)

A fixação entre o mecanismo de 4 barras e o eixo dos espelhos foi realizada mediante ao travamento com porcas e arruelas de pressão. Dessa forma, permitindo a regulagem dos espelhos de maneira bastante eficaz. A Figura 27 apresenta a forma em que foi realizada essa fixação.

Figura 27 - Fixação do mecanismo de 4 barras nos eixos dos espelhos



Fonte: Autor (2023)

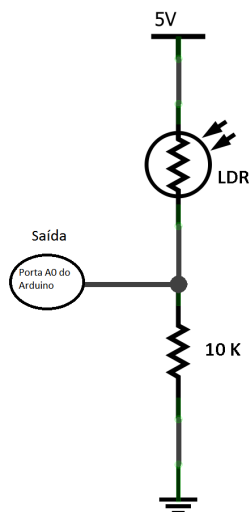
3.1.5 Sistema eletrônico

A função do sistema eletrônico é realizar a leitura da angulação solar, e sobre essa leitura realizar a compensação angular dos espelhos do concentrador. Geralmente se utiliza um sistema de rastreamento solar para realizar a compensação angular, porém, para o presente trabalho se optou pela aplicação de um sistema de controle em malha fechada. O sistema desenvolvido consiste na medição de incidência luminosa nas duas extremidades do absorvedor, ou seja, o sistema irá corrigir a angulação dos espelhos por meio da comparação entre a luminosidade de um lado em relação ao outro. Quando a radiação incidente não estiver sendo refletida para o centro do absorvedor, a leitura de luminosidade em um dos lados será maior, logo, o atuador será acionado para corrigir a angulação dos espelhos.

A leitura de luminosidade é realizada por meio de fotoresistores (LDR - *Light Dependent Resistor* na sigla em inglês). Esses componentes apresentam uma variação na resistência à corrente elétrica quando são submetidos a

luminosidade. Foram instalados três LDRs de 10 k Ω em cada extremidade do absorvedor. Uma das extremidades de cada LDR é vinculado a um resistor de 10 k Ω que tem a função de reduzir o ruído do sinal. Os resistores são ligados ao microcontrolador da forma como é demonstrado na Figura 28.

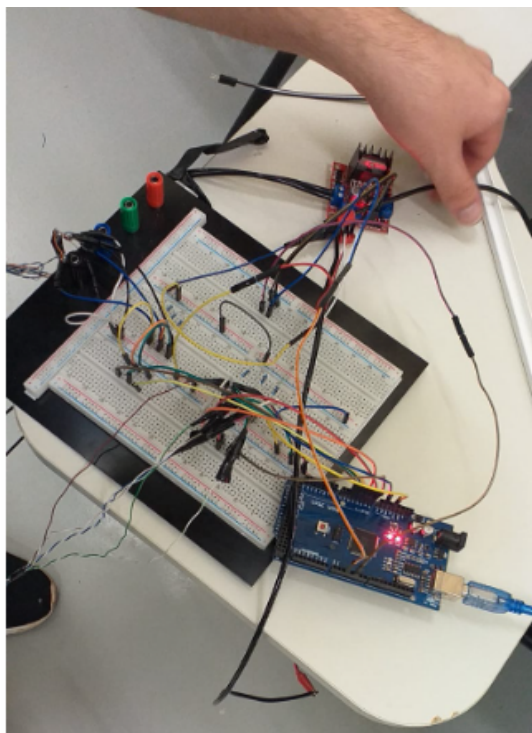
Figura 28 - Circuito de ligação do LDR



Fonte: Autor (2023)

Após a leitura das quedas de tensão de todos os LDRs, o Arduino realizará a comparação das leituras apresentadas pelos sensores posicionados em cada um dos lados. Caso a diferença esteja acima da tolerância, o mesmo irá repassar um sinal digital de baixa corrente para uma ponte H que realizará o acionamento do atuador para o lado desejado. Uma Ponte H se trata de um circuito de eletrônica de potência que permite a inversão do sentido da corrente em um determinado ponto. A Ponte H é fundamental para manter o circuito de controle separado do circuito de potência, ou seja, o componente realiza a liberação de carga para correntes altas após receber um sinal com corrente reduzida. O circuito montado é apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Circuito eletrônico



Fonte: Autor (2023)

3.1.5.1 - Código para leitura dos LDRs e atuação do sistema

O código para realização da leitura dos LDRs e compensação angular dos espelhos foi desenvolvido pela plataforma Arduino IDE. A vantagem de utilização dessa plataforma é a quantidade de conhecimento difundido sobre a mesma bem como a sua ampla utilização internacionalmente. O que torna muito mais simples e barato o desenvolvimento de sistemas eletrônicos. Se optou pela utilização de um arduino do modelo Mega para o sistema, pois o mesmo possui a quantidade de entradas analógicas necessárias para realização de leitura dos 6 LDRs instalados bem como utiliza um microcontrolador de maior desempenho. O Arduino realiza a leitura analógica de todos os LDRs a cada segundo. Caso se identifique uma diferença na leitura dos LDRs de cada uma das extremidades, o microcontrolador encaminha um sinal para o acionamento do atuador. O código desenvolvido inicialmente é apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Código de acionamento

```

int LDRDIR1 = A0;
int LDRDIR2 = A1;
int LDRDIR3 = A2;
int LDRESQ1 = A3;
int LDRESQ2 = A4;
int LDRESQ3 = A5;
const int outA = 3;
const int outB = 5;

void setup() {

  pinMode(outA, OUTPUT);
  pinMode(outB, OUTPUT);

  Serial.begin(9600);

  delay(50);
}

void loop() {
  int LD1 = analogRead(LDRDIR1);
  int LD2 = analogRead(LDRDIR2);
  int LD3 = analogRead(LDRDIR3);
  int LE1 = analogRead(LDRESQ1);
  int LE2 = analogRead(LDRESQ2);
  int LE3 = analogRead(LDRESQ3);

  int tol = 50;

  int ValorDIR = (LD3);
  int ValorESQ = (LE3);

  int Dif = ValorDIR - ValorESQ;

  Serial.print("LD1: ");
  Serial.print(LD1);
  Serial.print(" ");
  Serial.print("LD2: ");
  Serial.print(LD2);
  Serial.print(" ");
  Serial.print("LD3: ");
  Serial.print(LD3);
  Serial.print(" ");
  Serial.print("LE1: ");
  Serial.print(LE1);
  Serial.print(" ");
  Serial.print("LE2: ");
  Serial.print(LE2);
  Serial.print(" ");
  Serial.print("LE3: ");
  Serial.print(LE3);
  Serial.println(" ");

  if (-1 * tol > Dif || Dif > tol) {
    if (ValorDIR > ValorESQ) {
      digitalWrite(outA, HIGH);
      digitalWrite(outB, LOW);
    }
    else if (ValorDIR < ValorESQ) {
      digitalWrite(outA, LOW);
      digitalWrite(outB, HIGH);
    }
  }
  else {
    digitalWrite(outA, LOW);
    digitalWrite(outB, LOW);
  }

  delay(1000);
}

```

Fonte: Autor (2023)

Após o desenvolvimento de todos os subconjuntos foi realizada a montagem final do concentrador solar. O componente completo após a sua montagem é apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Concentrador solar



Fonte: Autor (2023)

A estrutura foi desenvolvida toda em aço a fim de obter uma boa rigidez estrutural para permitir que o equipamento apresente precisão na compensação angular. O que resulta em um aumento da eficiência do dispositivo. Como foi utilizado um atuador linear com força de deslocamento bastante elevada para essa aplicação, necessita-se de rigidez para que possíveis deformações da estrutura sejam mitigadas de forma a evitar a redução da eficiência pela falta de rigidez estrutural.

O circuito de potência é alimentado por uma fonte regulável disponibilizada pela instituição de ensino.

4 RESULTADOS

O tópico abaixo aborda os testes e regulagens realizados na bancada de testes a fim de verificar a eficiência do projeto.

4.1 TESTES DO SISTEMA ELETRÔNICO

Após o desenvolvimento da bancada o primeiro teste realizado foi o acionamento da mesma e verificação do funcionamento do sistema eletrônico. Percebeu-se de imediato que o sistema estava atuando mesmo com o concentrador solar dentro do laboratório sem a diferença de luminosidade entre os LDRs. Após analisar a leitura das portas analógicas do Arduino se identificou que dois LDRs estavam apresentando uma queda de tensão maior que os demais. O que não deveria ocorrer pois a incidência luminosa em cada LDR dentro de uma sala não é tão elevada para apresentar esse tipo de resultado. A Figura 32 apresenta os valores apresentados na leitura dos sensores.

Figura 32 - Leituras porta analógica dos sensores LDR

LE1: 675	LE2: 872	LE3: 673	LD1: 856	LD2: 845	LD3: 835
LE1: 667	LE2: 876	LE3: 668	LD1: 863	LD2: 858	LD3: 840
LE1: 667	LE2: 877	LE3: 658	LD1: 867	LD2: 850	LD3: 848
LE1: 665	LE2: 874	LE3: 654	LD1: 864	LD2: 851	LD3: 844
LE1: 664	LE2: 875	LE3: 657	LD1: 863	LD2: 848	LD3: 847

Fonte: Autor (2023)

Legenda:

LE1: Leitura analógica do 1º sensor LDR do lado esquerdo

LE2: Leitura analógica do 2º sensor LDR do lado esquerdo

LE3: Leitura analógica do 3º sensor LDR do lado esquerdo

LD1: Leitura analógica do 1º sensor LDR do lado direito

LD2: Leitura analógica do 2º sensor LDR do lado direito

LD3: Leitura analógica do 3º sensor LDR do lado direito

A medição apresentada na tabela acima é proveniente do resultado da leitura da entrada analógica do Arduino. Ou seja, é uma leitura de tensão, na qual

zero significa 0 V e 1024 significa 5V. Os valores não foram convertidos para Tensão pois os valores teriam uma discretização maior dentro de horizonte de análise mais amplo. Por isso, seria uma vantagem para a leitura e comparação dos dados.

Mediante a verificação da diferença elevada nos dados de leitura dos sensores se levantou uma série de possibilidades. A primeira possibilidade seria a queda de tensão acima do esperado nos cabos ou nas conexões na *proto-board*. O circuito foi desmontado por completo e montado novamente e problema mesmo assim persistia, logo essa possibilidade foi descartada. A segunda possibilidade seria a diferença de resistência dos resistores posicionados entre uma das extremidades do LDR e o terra. Então, foi realizada a leitura da resistência e se identificou que não havia diferenças significativas e que o resultado estava conforme a tolerância dos componentes utilizados. Após verificar que os resistores não eram os responsáveis pela inconsistência entre as quedas de tensão, foi realizado a leitura da resistência dos LDRs com o circuito desligado. Se identificou que a resistência apresentada por dois LDRs era maior que a das demais. Essa diferença foi a responsável pela variação. Pois a porta analógica do Arduino lê um sinal de tensão entre 0V e 5V. Também sabe-se que a resistência aumenta a queda de tensão no circuito, logo, quanto maior a resistência, maior será a queda de tensão e menor será o valor lido pela porta analógica do arduino.

Os LDRs utilizados possuíam a mesma especificação técnica porém haviam sido fabricados em diferentes fábricas. Após a troca dos LDRs foi realizado um novo teste e se identificou que o sistema estava atuando da maneira desejada. A Figura 33 apresenta a leitura das portas analógicas do arduino após a substituição dos LDRs.

Figura 33 - Leituras porta analógica dos sensores LDR após a substituição

LE1: 874	LE2: 872	LE3: 838	LD1: 854	LD2: 848	LD3: 841
LE1: 868	LE2: 875	LE3: 840	LD1: 860	LD2: 853	LD3: 842
LE1: 870	LE2: 871	LE3: 841	LD1: 867	LD2: 850	LD3: 848
LE1: 873	LE2: 875	LE3: 843	LD1: 863	LD2: 854	LD3: 845
LE1: 862	LE2: 867	LE3: 842	LD1: 868	LD2: 841	LD3: 849

Fonte: Autor, (2023)

Com a realização da troca dos sensores diferentes pode-se identificar que os valores lidos em cada uma das portas são bem mais consistentes e que a leitura de todos os sensores está dentro de uma faixa de 50 (correspondente a uma diferença de tensão máxima abaixo de 0,244 V).

Após a verificação das quedas de tensão se iniciou os testes para verificar o funcionamento do atuador. O teste foi realizado mediante da obstrução da face superior de cada um dos LDRs, dessa forma, impedindo a incidência luminosa sobre os mesmos. Quando se obstrui o contato de um LDR com a luz, a resistência do mesmo diminui de maneira muito significativa. Assim, a leitura da porta analógica do sensor irá apresentar um valor próximo a zero, isso resultará em uma diferença entre a média das leituras de cada um dos lados maior do que a tolerância especificada em código. Com a diferença fora do tolerância, o Arduino irá encaminhar um sinal para a Ponte H que resultará na atuação angular do sistema de reflexão. Os testes foram realizados em todos os sensores e se identificou que o sistema estava atuando de maneira adequada. Inclusive, também foi verificado se o sentido de atuação estava correto, logo, quando a incidência luminosa for maior no lado direito os espelhos devem se deslocar no sentido anti-horário e vice-versa.

4.2 REGULAGEM DOS ESPELHOS

Conforme apresentado nas referências bibliográficas, a reflexão da radiação solar só é possível quando há incidência da componente direta, ou seja, o sistema não funcionará adequadamente em dias nublados. A regulagem dos espelhos deve-se realizar preferencialmente na parte externa com a própria radiação solar. A reflexão também funciona com iluminação artificial, mas o ângulo de incidência e a diferença da distância das luzes em relação ao sol geram dificuldades para se regular dessa forma. Por isso, foi optado por realizar a regulagem com reflexão de radiação em um dia ensolarado e com poucas nuvens.

Para realizar a regulagem dos espelhos foram utilizadas toalhas para cobrir os demais espelhos e refletir a radiação solar apenas com o espelho a ser regulado e um espelho que serve de referência para todos os demais. Se coloca um espelho de referência pois o sol se desloca durante o processo de regulagem

e consegue-se compensar a angulação dos mesmos com o decorrer do tempo. A regulagem dos espelhos durou cerca de 15 minutos. O processo foi realizado conforme o processo descrito abaixo:

- 1 - Alívio do aperto das porcas montadas no eixo dos espelhos com função de transmitir o movimento angular aos eixos;
- 2 - Cobertura dos espelhos com tecidos, deixando apenas um espelho descoberto;
- 3 - Regulagem do espelho de referência;
- 4 - Descobrir os próximos espelhos de um em um, mantendo a reflexão da radiação apenas para o espelho de referência e o espelho a ser regulado;
- 5 - Regular de maneira visual a reflexão da radiação em direção ao absorvedor;
- 6 - Reapertar a porca e a contraporca que tensionam o eixo na barra do mecanismo, tomando cuidado para não desregular o espelho.

A Figura 34 apresenta a maneira com a qual se alivia ou tensiona o eixo dos espelhos na barra do mecanismo:

Figura 34 - Aperto e Alívio das porcas e contraporcas para regulagem



Fonte: Autor (2023)

A avaliação da regulagem dos espelhos é realizada de maneira qualitativa, por meio da inspeção visual do resultado. Verificando a reflexão da radiação de cada espelho individualmente. Pois é bastante caro e difícil realizar a leitura da angulação de reflexão de radiação solar. A Figura 35 apresenta a posição dos espelhos após a regulagem.

Figura 35 - Posição dos espelhos após a regulagem



Fonte: Autor (2023)

4.3 VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DOS RAIOS SOLARES

Conforme mencionado anteriormente, a verificação da reflexão solar é realizada de maneira qualitativa, no presente trabalho esse resultado é realizado através de registros fotográficos. A Figura 36 apresenta o resultado final da concentração da radiação solar no absorvedor.

Figura 36 - Concentração da radiação solar



Fonte: Autor (2023)

Pode-se verificar, na Figura 36 de maneira visual, que a radiação refletida pelos espelhos está sendo direcionada para o absorvedor. Através da concentração dos raios solares se gera calor no absorvedor. Foi realizada a leitura de temperatura do concentrador após o sistema atingir o regime permanente com um termômetro digital infravermelho. A figura 37 apresenta o ponto no qual foi realizado a primeira leitura.

Figura 37 - Leitura de temperatura do Absorvedor



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 37, pode-se verificar que o absorvedor atingiu uma temperatura superior a 150°C , esse resultado indica que há uma concentração térmica no absorvedor, referente a reflexão dos raios solares.

4.4 VERIFICAÇÃO DO SISTEMA PARA RASTREAMENTO SOLAR

Logo após o término da regulagem dos espelhos foi acionado o sistema eletrônico do concentrador solar. De imediato, o sistema não estava funcionando adequadamente, inclusive não foi possível acionar os espelhos mesmo cobrindo os LDRs. Então foi decidido por reduzir a tolerância entre a diferença da leitura de cada um dos lados. A tolerância inicial do código foi de 50, que corresponde a uma diferença de $0,244\text{ V}$ na queda de tensão. Para a primeira adequação a tolerância foi reduzida para 30 (correspondente a $0,146\text{ V}$ de queda de tensão). Após a troca do parâmetro no código do Microcontrolador identificou-se que o sistema estava se deslocando conforme o previsto. Porém a compensação angular era mais acelerada do que o necessário, ou seja, o sistema estava

apresentando um deslocamento angular acima do desejado. Para corrigir esse deslocamento angular excessivo, primeiramente foi reduzido o *delay* da leitura dos LDRs, dessa forma o atuador seria acionado por um tempo menor a cada vez que se identificasse uma diferença na luminosidade. Na primeira alteração, o *delay* foi reduzido de 1000 milissegundos para 500 milissegundos. Após a alteração do parâmetro, foi verificada a atuação do sistema e decidiu-se por reduzir ainda mais o *delay*, dessa vez para 300 milissegundos. Ou seja, a cada 300 milissegundos o microcontrolador realiza uma leitura dos LDRs e passa um novo comando para a ponte H (Acionar ou não acionar o motor do atuador). Esse parâmetro também indica o tempo que o atuador fica acionado após cada comando, pois uma nova leitura ocorre após 300 milissegundos e já desliga o atuador. Mesmo após a alteração do *delay* o sistema ainda estava atuando um pouco mais rápido que o necessário. Então decidiu-se por realizar a alteração da corrente liberada pela fonte regulável para o atuador. Dessa forma, pode-se reduzir a velocidade de acionamento do atuador. A corrente foi reduzida de 1,5 A para 0,9 A. A Figura 38 apresenta a regulação final da fonte.

Figura 38 - Regulagem final da Fonte de Alimentação



Fonte: Autor (2023)

Após a redução da corrente de acionamento do atuador se identificou que o sistema eletrônico estava atuando da maneira correta. Realizando uma correção angular a cada 36 segundos e mantendo o atuador acionado por 0,3

segundos a cada atuação. A Tabela 1 apresenta a leitura do tempo entre cada acionamento do atuador.

Tabela 1 - Leitura de tempo para cada acionamento do atuador

Tempo para acionamento do atuador			
n° Leitura	Tempo (s)	n° Leitura	Tempo (s)
1	37,54	19	33,58
2	34,17	20	34,88
3	33,09	21	32,54
4	36,42	22	39,27
5	36,01	23	30,06
6	37,04	24	38,37
7	35,95	25	23,83
8	36,54	26	52,1
9	38,83	27	39,06
10	33,44	28	36,87
11	42,5	29	40,05
12	33,06	30	41,57
13	36,87	31	42,84
14	39,26	32	25,17
15	36,72	33	38,11
16	35,19	34	41,54
17	34,47	35	36,72
18	42,5	36	41,15
Média	36,86972222	Desv. Pad.	4,994046448

Fonte: Autor (2023)

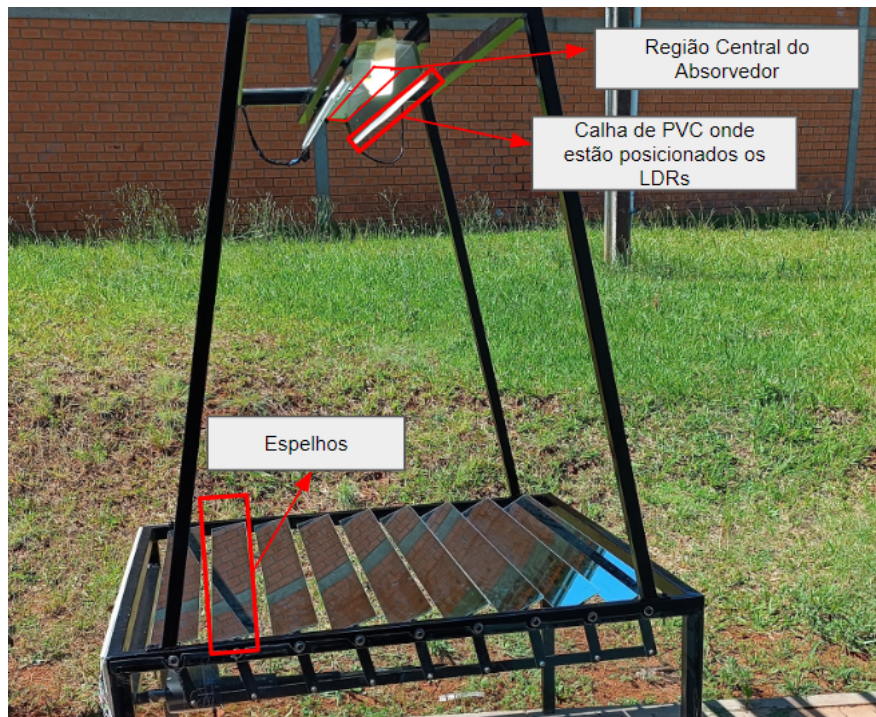
A leitura foi realizada através do acompanhamento do sistema e a medição de tempo foi realizada com um cronômetro. A cada sinal de acionamento do atuador se realizava a marcação do tempo em relação à última compensação realizada.

Com as alterações realizadas o sistema apresentou um rastreamento solar satisfatório. Realizando as correções de maneira suave e em pequenos intervalos de tempo.

4.5 ANÁLISE TÉRMICA

Para realizar a avaliação térmica do sistema foram realizadas leituras de temperatura em diferentes partes do absorvedor de 10 em 10 min, por um período de 2 horas. A figura 39 apresenta os pontos nos quais foram realizados as leituras de temperatura.

Figura 39 - Regiões de medição de temperatura



Fonte: Autor (2023)

Decidiu-se por realizar as medições nessas estruturas pois o absorvedor é a região na qual se incide mais radiação e em consequência é a região que acumula mais calor. A medição de temperatura nas calhas de PVC se deu para verificar se o material não iria chegar a temperaturas muito elevadas que pudessem trazer algum problema futuro ao concentrador. E a medição de temperatura nos espelhos se deu para verificar a comparação da temperatura dos mesmos em relação ao absorvedor.

Todas as medições foram realizadas utilizando um termômetro digital infravermelho. A tabela abaixo apresenta os resultados das medições realizadas.

Tabela 2 - Resultado das medições realizadas

Medições de temperatura do sistema											
Dia	Hora	Temp. Absorvedor (°C)	Radiação (KJ/m ²)	Velocidade do vento (m/s)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Espelhos (°C)	Temp Calhas (°C)				
6/11	14:00	157	3544,6	1,2	31,1	31	43				
	14:10	158,5				33	45				
	14:20	154				30,5	43				
	14:30	155				32	46				
	14:40	154				31	44				
	14:50	155				31	45				
	15:00	153	3154,9	3	30,9	30	43				
	15:10	157				31	47				
	15:20	154				31	47,5				
	15:30	156				32	46				
	15:40	159				31,5	45				
	15:50	158				31	44,5				
	Média					155,875	3349,75	2,1	31	31,250	44,917

(Fonte: Autor, 2023)

Os dados de Radiação incidente, Velocidade do vento e Temperatura ambiente foram obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023). No site, são disponibilizados os dados de medição da estação meteorológica localizada no IFRS Câmpus Ibirubá. Os dados da estação estão disponíveis para consulta nas referências bibliográficas.

A temperatura do absorvedor se manteve acima de 153°C durante todo o período analisado, indicando que o sistema já estava em regime permanente desde o início dos testes. Outro ponto destacável é que as calhas de PVC se mantiveram em temperaturas abaixo de 50°C. Eliminando as chances de danos ao item por causa do excesso de temperatura. Isso ocorre pois as calhas são da cor branca e refletem a radiação incidente sobre as mesmas, e também porque a radiação refletida está direcionada para a parte central do absorvedor, ou seja, a incidência sobre as calhas não é tão elevada. Verificou-se também que os espelhos mantiveram a temperatura próxima a temperatura ambiente por todo o período analisado, o que indica que o calor absorvido pelos mesmos é quase nulo.

A Equação 2 apresenta a potência que chega à bancada, considerando para isto a área de espelhos do concentrador (A_m) e a radiação solar medida pela estação meteorológica.

$$Q = DNI \cdot A_m \quad \text{Equação (2)}$$

$$A_m = \text{Área dos espelhos (m}^2\text{)}$$

$$DNI = \text{Radiação Medida (KJ/m}^2\text{)}$$

Utilizando os dados medidos se verifica que em 2 horas de experimento se concentrou 6.029,55 kJ de energia desconsiderando as perdas. Realizando a divisão desse total pelo tempo de teste, se obtém o resultado da potência:

$$P = \frac{Q}{t} \quad \text{Equação(3)}$$

$P = \text{Potência (W)}$

$t = \text{Tempo (s)}$

Colocando os valores na equação se obtém o resultado de 837,44 W de potência. O resultado apresentado desconsidera as perdas referente eficiência óptica, perdas térmicas e perdas de rendimento que a inclinação dos raios solares incidentes nos espelhos do concentrador solar acarretam. De acordo com Sá (2018), espera-se uma perda óptica e térmica na faixa de 40% a 50%, em um caso de operação normal com fluido térmico e isolamento adequado.

5 CONCLUSÕES

O aproveitamento da energia heliotérmica está em crescimento em âmbito nacional, e para fomentar ainda mais este crescimento, estudos como este são de suma importância, no que tange o fortalecimento e o incentivo à tecnologia.

O sistema eletrônico desenvolvido apresentou um bom desempenho, se adequando com os objetivos do projeto, de realizar pequenas compensações em curtos períodos de tempo para manter a radiação concentrada no centro do absorvedor. A utilização de uma fonte regulável também foi uma vantagem, pois permitiu a alteração da velocidade de acionamento do atuador. Dessa forma, foi possível realizar a regulação de parâmetros de maneira mais eficaz.

A opção por utilizar um sistema de controle em malha fechada se mostrou uma excelente alternativa. Mesmo que não seja muito difundida nos demais trabalhos analisados. O sistema tem a grande vantagem de atuar sobre o resultado da reflexão solar, dessa forma, apresentou grande sensibilidade, mesmo para pequenos deslocamentos solares, tanto que o sistema realizava a compensação angular em intervalos médios de tempo de 36 s.

Termicamente o sistema também apresentou resultados conforme o esperado, atingindo temperaturas acima de 150°C e mantendo o absorvedor nessa faixa durante todo o período analisado.

Para trabalhos futuros, seguem algumas sugestões:

- Adicionar ao absorvedor do concentrador desenvolvido um sistema para aquecimento de um fluido térmico;
- Montar o circuito eletrônico em um pequeno case localizado na lateral do mesmo, para facilitar a ligação do concentrador e eliminar a necessidade de transportar o circuito eletrônico separado do concentrador;
- Adicionar um atuador elétrico no absorvedor para realizar a compensação dos dois ângulos solares;
- Desenvolver um sistema para rastreamento solar no momento da ligação do concentrador. Atualmente se regula o mesmo realizando a obstrução das faces dos LDRs;

- Realizar a instrumentação no absorvedor a fim de obter as leituras de temperatura do mesmo em tempo real através de um display, e também já realizar a leitura da temperatura do fluido térmico;

- Avaliar de maneira mais profunda as perdas térmicas no absorvedor proveniente da condução térmica para as paredes do absorvedor e avaliar a influência do vento nesse processo;

- Estudar de maneira mais aprofundada as perdas térmicas do absorvedor e as perdas de rendimento que a inclinação dos raios solares incidentes nos espelhos ocasionam;

- Adquirir uma pequena fonte para a alimentação do circuito de potência, eliminando a necessidade de transportar separadamente uma fonte regulável. Ainda mais porque já se obteve por meio de experimentação a corrente e tensão necessários para o acionamento.

6 REFERÊNCIAS

TOLMASQUIM, M. T., GUERREIRO, A., & GORINI, R. (2007). Matriz Energetica Brasileira - Novos Estudos, pp. 1-23.

BARDELIN, Cesar Endrigo Alves. Os efeitos do Racionamento de Energia Elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no Consumo de Energia Elétrica. 2004. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde23062005-084739/publico/DissertRacionamento.pdf>. Acesso em: 17 set. 2023.

ONS, O sistema em números. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em 15 ago. 2023.

SÁ, Alexandre Bittencourt de. OPTICAL AND THERMO-HYDRAULIC CHARACTERIZATION OF LINEAR FRESNEL SOLAR CONCENTRATORS OPERATING WITH DIRECT STEAM GENERATION. 2018. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

PIGOZZO FILHO, Victor César. DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAR PARA GERAÇÃO DIRETA DE VAPOR. 2019. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

GÓIS, Pedro Igor de Souza. INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO E AZIMUTE DE SUPERFÍCIE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA CIDADE DE MOSSORÓ/RN. 2022. 9 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2022.

VALIATI, Melania I., RICIERI, Reinaldo P., “Estimativa da Irradiação solar Global com Partição Mensal e Sazonal para a Região de Cascavel – PR”, Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.1, p.76-85, jan. /abr. 2005

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 10 ago. de 2023.

CASTAÑEDA, Cesar Eduardo Figueroa. Desenvolvimento de um rastreador solar passivo por transferência de massa. Prodetec-Programa de Pós-Graduação de Desenvolvimento Tecnológico, 2011.

LIRA, José Rômulo Vieira. Desenvolvimento de um rastreador solar do tipo polar com ajuste do ângulo de inclinação. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

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.

PORTAL SOLAR. Seguidor Solar - Tracker: Vantagens e Desvantagens - Parte 1.

Disponível em:

<https://www.portalsolar.com.br/seguidor-solar-tracker-vantagens-e-desvantagens>

Acesso em 03 de agosto de 2023.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. Sistemas de Controle Modernos. 12 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. ISBN 9788521619956

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática, 4ª Edição. Porto Alegre, RS: Editora McGrawHill, 2012

MORIN, Gabriel et al. Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants. Solar Energy, [s.l.], v. 86, n. 1, p.1-12, jan. 2012. Elsevier BV.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.020>.

OGLIARI, A. Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plástico injetados, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UFSC, Florianópolis, 1999

BACK, N.; FORCELLINI, F.A. Projeto de Produtos. Apostila (Disciplina de Projeto Conceitual e Projeto para Manufatura do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). UFSC, Florianópolis, 2003.

SLACK, N. et al. Administração da Produção. 2 ed., São Paulo: Atlas, 2002.

FUENTES, R. C.; NASCIMENTO, C. R. Eletrônica. 4 ed. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, Tabela Estações, Ibirubá, RS (A883). Disponível em:

<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A883>

Acesso em: 08 de nov. de 2023

APÊNDICES

- Código para acionamento após os ajustes:

```
int LDRDIR1 = A0;
int LDRDIR2 = A1;
int LDRDIR3 = A2;
int LDRESQ1 = A3;
int LDRESQ2 = A4;
int LDRESQ3 = A5;
const int outA = 3;
const int outB = 5;

void setup() {

  pinMode(outA, OUTPUT);
  pinMode(outB, OUTPUT);

  Serial.begin(9600);

  delay(50);

}

void loop() {
  int LD1 = analogRead(LDRDIR1);
  int LD2 = analogRead(LDRDIR2);
  int LD3 = analogRead(LDRDIR3);
  int LE1 = analogRead(LDRESQ1);
  int LE2 = analogRead(LDRESQ2);
  int LE3 = analogRead(LDRESQ3);

  int tol = 10;
```

```
int ValorDIR = (LD1+LD2+LD3)/3;
int ValorESQ = (LE1+LE2+LE3)/3;
```

```
int Dif = ValorDIR - ValorESQ;
```

```
Serial.print("LD1: ");
```

```
Serial.print(LD1);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print("LD2: ");
```

```
Serial.print(LD2);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print("LD3: ");
```

```
Serial.print(LD3);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print("LE1: ");
```

```
Serial.print(LE1);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print("LE2: ");
```

```
Serial.print(LE2);
```

```
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print("LE3: ");
```

```
Serial.print(LE3);
```

```
Serial.println(" ");
```

```
if (-1 * tol > Dif || Dif > tol) {
```

```
  if (ValorDIR > ValorESQ) {
```

```
    digitalWrite(outA, HIGH);
```

```
    digitalWrite(outB, LOW);
```

```
  }
```

```
  else if (ValorDIR < ValorESQ) {
```

```
    digitalWrite(outA, LOW);
```

```
    digitalWrite(outB, HIGH);
```

```
    }  
  }  
  else {  
    digitalWrite(outA, LOW);  
    digitalWrite(outB, LOW);  
  }  
  delay(300);  
}
```