



ALISON JOSÉ PEREIRA NERI
BRENO HENRIQUE DA SILVA
PAULO HENRIQUE NASCIMENTO FILHO
SAMUEL LINS GOMES
RAFAEL GARBO DA SILVA
YURI MARTINS

**ANÁLISE TEÓRICA DE UM COLETOR SOLAR CONCENTRADOR CILÍNDRICO-
PARABÓLICO POR TUBO EVACUADO COM RASTREAMENTO SOLAR E
INTERFACE WEB**

CATANDUVA
2021



ALISON JOSÉ PEREIRA NERI
BRENO HENRIQUE DA SILVA
PAULO HENRIQUE NASCIMENTO FILHO
SAMUEL LINS GOMES
RAFAEL GARBO DA SILVA
YURI MARTINS

**ANÁLISE TEÓRICA DE UM COLETOR SOLAR CONCENTRADOR CILÍNDRICO-
PARABÓLICO POR TUBO EVACUADO COM RASTREAMENTO SOLAR E
INTERFACE WEB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de São Paulo, Câmpus Catanduva, como requisito
parcial para conclusão do curso Técnico em
Mecatrônica Integrado ao Ensino Médio.
Orientador: Prof. Dr. Elson Avallone
Coorientador: Prof. Me. Pablo Sampaio Gomes
Natividade



ALISON JOSÉ PEREIRA NERI
BRENO HENRIQUE DA SILVA
PAULO HENRIQUE NASCIMENTO FILHO
SAMUEL LINS GOMES
RAFAEL GARBO DA SILVA
YURI MARTINS

ANÁLISE TEÓRICA DE UM COLETOR SOLAR CONCENTRADOR CILÍNDRICO-PARABÓLICO POR TUBO EVACUADO COM RASTREAMENTO SOLAR E INTERFACE WEB

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Câmpus Catanduva, como requisito parcial para conclusão do curso Técnico em Mecatrônica Integrado ao Ensino Médio.

Orientador: Prof. Dr. Elson Avallone

Coorientador: Prof. Me. Pablo Sampaio Gomes Natividade

ELSON AVALNONE
Instituto Federal de São Paulo – Câmpus Catanduva

PABLO SAMPAIO GOMES NATIVIDADE
Instituto Federal de São Paulo – Câmpus Catanduva

ALDO YOSHIDA RIGATTI
Instituto Federal de São Paulo – Câmpus Catanduva

CRISTIANO DONIZETI FERRARI
Instituto Federal de São Paulo – Câmpus Catanduva

DANIEL CORRÊA LOBATO
Instituto Federal de São Paulo – Câmpus Catanduva

Catanduva - SP, ____ de _____ de 20__.

Dedicamos este trabalho à Deus que nos ajudou
em todos os momentos desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, que nos concedeu energia e ânimo para concluir este trabalho e a oportunidade de estudar no IFSP Câmpus Catanduva, alcançando nossas metas.

A todos os professores do curso Técnico integrado em Mecatrônica, que por meio dos seus ensinamentos, esforços e paciência possibilitaram nossa evolução dia a dia.

Aos professores orientadores, Elson Avallone e Pablo Sampaio Gomes Natividade, por nos acompanharem durante a trajetória de pesquisa e elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso, dando-nos todo o apoio e incentivo necessários.

Às nossas famílias e entes queridos, que foram muito importantes para a pesquisa, fornecendo materiais, tempo, incentivo e apoio emocional durante o curso e o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Mikael Guilherme Zana pela ajuda na elaboração do logotipo das páginas web produzidas e ao jardineiro do Câmpus, Sr. Nelson, pelo apoio prestado antes do período pandêmico, quando havia a necessidade de limpeza da estrutura física do trabalho.

Agradecemos, especialmente, ao professor e mestre em Engenharia Mecânica Aldo Marcel Yoshida Rigatti, ao professor especialista Cristiano Donizeti Ferrari, à professora e doutora em Letras Márcia Corrêa de Oliveira Mariano e ao professor e doutor em Ciência e Engenharia de Materiais Felipe Amélia de Lucena, por suas colaborações no processo de revisão do trabalho e pelos esclarecimentos de diversos conceitos pesquisados.

“Pensar é o trabalho mais difícil que existe. Talvez por isso tão poucos se dediquem a ele. A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.” - Albert Einstein

“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho.” - Abraham Lincoln

RESUMO

A energia solar é utilizada desde tempos remotos para diversos fins nas mais variadas sociedades humanas. Contudo, nas últimas décadas, com o agravamento do aquecimento global, surgiu uma grande demanda por novas tecnologias para gerar energia renovável sem subprodutos tóxicos ao meio ambiente e à dinâmica climática do planeta Terra. Nesse contexto, os coletores solares concentradores são peças-chave, visto que podem captar a energia solar e convertê-la em energia térmica, mecânica ou elétrica, sem deixar resíduos no processo. Neste trabalho, foi projetado um coletor concentrador solar de geometria cilíndrico-parabólica, utilizando-se um tubo coletor composto de dois tubos de vidro concêntricos com vácuo no espaço anular, utilizando a água como fluido absorvedor. Para melhorar o aproveitamento térmico, foi inserida uma sonda de cobre no interior do tubo, separando os fluxos de água fria e quente. Ademais, foi projetado um sistema de rastreamento solar automático utilizando-se o motor de passo NEMA23 e um sistema de sensoriamento e envio de dados do coletor para a internet, ambos gerenciados pelo microcontrolador ESP32. Foi criada, também, uma aplicação monolítica para armazenar os dados coletados e visualizá-los em uma interface na internet, objetivando diminuir a intervenção humana no sistema. A fim de estudar o comportamento do projeto desenvolvido, foi realizada a análise óptica do coletor concentrador, utilizando-se métodos analíticos para estimar seu rendimento óptico e uma simulação computacional para observar a incidência de raios solares na parábola concentradora. Ademais, foi realizada também a análise térmica do concentrador nos dias 6/11/2020 e 7/11/2020 na cidade de Ariranha, São Paulo, utilizando-se métodos analíticos e numéricos aplicados a dados meteorológicos da cidade analisada para a obtenção de uma estimativa da eficiência térmica do coletor. A partir da metodologia desenvolvida, concluiu-se que o projeto possui uma eficiência térmica média estimada de aproximadamente 50%, que as análises teóricas são recursos importantes para compreender o funcionamento do sistema e que os sistemas eletrônicos programados implementados reduzem a intervenção humana no processo de obtenção de energia solar e facilitam a visualização de dados sobre o coletor concentrador.

Palavras-chave: Coletor solar concentrador. Geometria cilíndrico-parabólica. Rastreamento solar automático. Sensoriamento remoto. Internet das Coisas.

ABSTRACT

The solar energy has been used since ancient times for various purposes in many human societies. However, in the last decades, coupled with the increase in global warming, there has been a great demand for new technologies for generating renewable energy without by-products which are toxic to the environment and the climate dynamics of Earth. Therefore, concentrating solar collectors are a key piece in this context, as they can capture solar energy and convert it into thermal, mechanical or electrical energy, without leaving residues in the process. In this essay, a parabolic trough solar collector was designed, using a collector tube composed of two concentric glass tubes with vacuum in the annular space and using water as the absorbing fluid. To improve thermal efficiency, a copper probe was inserted inside the tube, separating the flows of cold and hot water. Furthermore, it was developed an automatic solar tracking system using the NEMA23 stepper motor and a system for getting and sending data from the collector to the internet, both managed by the ESP32 microcontroller. A monolithic application was also developed for storing the collected data and visualize them in a web interface, aiming to reduce human intervention in the project. In order to study the behavior of the developed project, an optical analysis of the concentrating collector was conducted, using analytical methods to estimate its optical performance and a computer simulation to observe the incidence of solar rays in the concentrating parabola. Moreover, it was also conducted a thermal analysis of the concentrator on days 11/06/2020 and 11/7/2020 in the city of Ariranha, São Paulo, Brazil, using analytical and numerical methods applied to meteorological data of the analyzed city to obtain an estimate thermal efficiency of the collector. As a result of the developed methodology, it was concluded that the project has an estimated average thermal efficiency of approximately 50%, that theoretical analyzes are important resources to understand the behavior of the system and that the programmed electronic systems developed reduce human intervention in the process of solar energy obtaining and subserve the visualization of data about the solar concentrator.

Keywords: Solar concentrator. Parabolic trough collector. Automatic solar tracking. Remote data acquisition. Internet of Things.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concentrador solar de calha parabólica	19
Figura 2 - Irradiação global horizontal no mundo	24
Figura 3 - Irradiação direta normal no mundo.....	25
Figura 4 - Estrutura do sistema e diagrama da direção dos raios solares	26
Figura 5 - Secção reta do tubo coletor	27
Figura 6 - Secção reta de um coletor cilíndrico parabólico por tubo absorvedor.....	29
Figura 7. Secção transversal de um PTC com coletor cilíndrico.....	31
Figura 8 - Comparação da energia incidente entre um destilador solar fixo e com rastreamento solar	33
Figura 9 - Trajetória diária do sol e ângulos astronômicos e solares	35
Figura 10 - Ângulos solares e ângulo de incidência em uma superfície	38
Figura 11 - Fixação do suporte na estrutura do concentrador de Gama et al. (2013).....	39
Figura 12 - Diferentes posições do sol em relação ao suporte do LDR	40
Figura 13 - Esquema simplificado da obtenção, envio e visualização de dados	45
Figura 14 - Montagem total da estrutura do concentrador	48
Figura 15 - Desenho técnico mecânico da parábola	49
Figura 16 - Tubo coletor utilizado na pesquisa	50
Figura 17 - Instalação do tubo central de cobre.....	51
Figura 18 - Esquema da distribuição de massa para o cálculo do torque	52
Figura 19 - Desenho técnico mecânico do redutor planetário acoplado ao motor de passo.....	53
Figura 20 - Desenho técnico mecânico da montagem da corrente e engrenagens	54
Figura 21 - Ligação do motor ao driver e microcontrolador	55
Figura 22 - Desenho técnico mecânico do suporte para os LDR	56
Figura 23 - Fluxograma da sequência de inicialização do sistema do ESP.....	58
Figura 24 - Fluxograma do sistema de temporização programado no ESP32	59
Figura 25 - Fluxograma do algoritmo de rastreamento solar	60
Figura 26 - Diagrama elétrico do sistema de controle do rastreador solar	61
Figura 27 - Ponto de acesso criado pelo ESP32 visualizado no Windows 10.....	62
Figura 28 - Dashboard servido pelo ESP32	62
Figura 29 - Interface de configuração de rede do ESP32	63
Figura 30 - Diagrama elétrico completo do sistema eletrônico	63
Figura 31 - Fluxograma do sistema de consulta de dados da API.....	65
Figura 32 - Painel de visualização dos dados hospedado na <i>Vercel</i>	66
Figura 33 - Fluxograma do esquema geral de requisição a API.....	67
Figura 34 - Projeto do suporte e curvatura do concentrador	68
Figura 35 - Secção reta da parábola e diagrama geométrico de ΔABC , rr , hp e φr	69
Figura 36 - Rendimento óptico em função do ângulo de incidência em graus	72
Figura 37 - Montagem do sistema parábola-tubo, com o tubo destacado em vermelho	73
Figura 38 - Raios incidindo na parábola e sendo redirecionados ao tubo absorvedor	73
Figura 39 - Temperatura fria estimada para Ariranha no dia 6/11/2020 e temperatura ambiente do INMET, ambas em função do tempo	77
Figura 40 - Temperatura quente estimada para Ariranha no dia 6/11/2020 e temperatura ambiente do INMET, ambas em função do tempo	77
Figura 41 - Temperatura fria estimada para Ariranha no dia 7/11/2020 e temperatura ambiente do INMET, ambas em função do tempo	78
Figura 42 - Temperatura quente estimada para Ariranha no dia 7/11/2020 e temperatura ambiente do INMET, ambas em função do tempo	78
Figura 43 - Comparação entre temperaturas estimadas para Ariranha no dia 6/11/2020 e as temperaturas medidas por Avallone, em função do tempo	79

Figura 44 - Comparação entre temperaturas estimadas para Ariranha no dia 7/11/2020 e as temperaturas medidas por Avallone, em função do tempo	79
Figura 45 - Energia incidente e absorvida estimadas para Ariranha nos dias 6/11/2020 e 7/11/2020, sem a constante de correção	81
Figura 46 - Energia incidente e absorvida medidas por Avallone.....	81
Figura 47 - Energia incidente e absorvida estimadas para Ariranha nos dias 6/11/2020 e 7/11/2020, com a constante de correção.....	82
Figura 48 - Calor incidente estimado para Ariranha em 6/11/2020 e 7/11/2020 em comparação ao calor incidente medido por Avallone, todos em função do tempo	83
Figura 49 - Calor incidente estimado para Ariranha em 6/11/2020 em comparação ao calor incidente medido por Avallone, ambos em função do tempo	83
Figura 50 - Calor incidente estimado para Ariranha em 7/11/2020 em comparação ao calor incidente medido por Avallone, ambos em função do tempo	83
Figura 51 - Valores de ηi obtidos para o dia 6/11/2020 em Ariranha, em função do tempo ...	85
Figura 52 - Valores de ηi tidos para o dia 7/11/2020 em Ariranha, em função do tempo	85
Figura 53 - Valores de $\eta M\Delta hn$ obtidos para o dia 6/11/2020 em Ariranha, em função do tempo	85
Figura 54 - Valores de $\eta M\Delta hn$ obtidos para o dia 7/11/2020 em Ariranha, em função do tempo	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de emissividade de cada material metálico em função do acabamento superficial	26
Tabela 2 - Especificações do tubo coletor	28
Tabela 3 - Fator de atenuação em função da posição do coletor	32
Tabela 4 - Valores de n por mês.....	36
Tabela 5 - Principais características da parábola.....	49
Tabela 6 - Dimensões do tubo interno de cobre	51
Tabela 7 - Dimensões da parábola.....	69
Tabela 8 - Eficiência térmica média para cada dia analisado em Ariranha.....	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral.....	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	DESENVOLVIMENTOS	18
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1.1	A utilidade dos coletores solares concentradores na contemporaneidade.....	18
3.1.2	Os fenômenos físicos envolvidos no funcionamento do concentrador solar.....	20
3.1.3	A geometria cilíndrico-parabólica e o rastreamento solar.....	28
3.1.4	Métodos analíticos e numéricos para estimar dados experimentais	41
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	44
3.2.1	Objeto de estudo	44
3.2.2	Delineamento.....	45
3.2.3	Procedimentos específicos.....	47
3.2.3.1	Projeto mecânico do concentrador cilíndrico-parabólico com rastreamento solar automático.....	47
3.2.3.2	Sistemas eletrônicos programados: reporte de dados para a internet, interface web, esquema elétrico e implementação do rastreamento solar	57
3.2.3.3	Análise óptica: estimativa do rendimento óptico e simulação de incidência de raios solares na parábola	68
3.2.3.4	Análise térmica: estimativa de dados meteorológicos e temperaturas e cálculo da eficiência térmica	74
4	CONCLUSÃO.....	86
5	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE A – DIAGRAMA ELÉTRICO COMPLETO	91
	APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DAS PEÇAS DA ESTRUTURA PROJETADA	92

1 INTRODUÇÃO

A energia solar é a fonte de energia mais antiga da humanidade. Por muitas civilizações passadas o sol foi idolatrado como uma divindade sagrada. A secagem de alimentos para conservá-los foi a primeira aplicabilidade prática descoberta (KALOGIROU, 2004). Segundo o autor, em sua obra de 2014, o uso da energia solar é datado do Cerco a Siracusa (213 a 212 a.C.), em que Arquimedes (282 a 212 a.C.) usou os raios solares para incendiar navios romanos.

Durante o século XIX, foram feitas as primeiras tentativas de gerar vapor (à baixa pressão) a partir da radiação solar. O engenheiro Augusto Mouchot foi o pioneiro nesse campo, construindo e operando vários motores a vapor movidos à energia solar, entre os anos de 1864 a 1878, na Europa e norte da África (RAGHEB, 2014). Em conformidade com Jordan e Ibele (1956), os esforços foram continuados nos Estados Unidos, onde o engenheiro, Capitão John Ericsson, desenvolveu o primeiro motor a vapor movido diretamente à energia solar. Foram construídos oito sistemas cilíndricos-parabólicos usando água ou ar como fluido de trabalho.

Assim, com a progressão no desenvolvimento de técnicas para a conversão de energia solar em outras formas de energia úteis na sociedade moderna do século XX até a atualidade, surgiram os coletores solares. No que tange a esses equipamentos, “Coletores solares são trocadores de calor¹ que utilizam a radiação solar para aquecer um fluido. O coletor capta a radiação solar e a direciona a um fluido (ar, água ou óleo, em geral), de modo a gerar calor”. (KALOGIROU, 2014).

Ademais, de acordo com o professor da Universidade de Tecnologia do Chipre Soteris Kalogirou (2014) existem dois tipos de coletores solares: os não-concentradores, que são de placa plana e os concentradores. Os coletores não-concentradores são recomendados a sistemas que necessitem de baixa temperatura. Em sistemas que demandam temperaturas mais elevadas ou mais estáveis, são mais recomendados os coletores solares concentradores, dotados de uma superfície refletora que direciona a irradiação solar a um ponto focal receptor de radiação. Os coletores solares ainda podem ser classificados em estacionários ou rastreadores.

O rastreamento solar tem por objetivo aumentar a incidência de luz solar sobre a superfície cilíndrica parabólica, atingindo, assim, maior eficiência na transferência de calor durante todo o dia. O mecanismo de rastreamento deve ser confiável e capaz de determinar a

¹ Trocadores de calor são sistemas utilizados para transferir calor entre meios distintos. Eles são utilizados em processos de aquecimento e resfriamento, podendo separar os meios fisicamente ou estabelecer contato direto entre eles.

posição do sol com relativa precisão, além de controlar os motores acoplados ao coletor para atingir tal objetivo (KALOGIROU, 2014).

Dentre os coletores rastreadores, esses podem mover-se em um eixo ou em dois eixos. Neste trabalho, adotou-se um coletor solar concentrador de geometria cilíndrico-parabólica com sistema de rastreamento em um eixo (mono-axial). No foco da parábola, é posicionado um coletor solar de vidro comercial com vácuo parcial no espaço anular, funcionando como isolamento térmico. No interior do tubo, utiliza-se a água como fluido que será aquecido pela energia solar concentrada.

Nesse sentido, o uso de microcontroladores como o ESP32 ou ATmega2560 no processo de rastreamento solar oferece diversas vantagens na execução de um projeto de coletor solar, tanto no quesito eficiência quanto no quesito praticidade e facilidade de programação. Por meio da utilização da plataforma Arduino MEGA 2560 e 4 sensores luminosos do tipo LDR, o protótipo de rastreador solar construído em um trabalho desenvolvido pelos pesquisadores Rocha Queiroz et al. (2020) foi capaz de rastrear a posição do sol com tolerância de 1 grau, obtendo 39,5% de ganho de energia em um período de 13 dias de verão, contribuindo para um aumento significativo na eficiência da coleta de energia térmica do sol.

Portanto, dada a recente evolução da área da Internet das Coisas e sua respectiva popularidade alcançada na última década, há a possibilidade do controle do aparato de concentração solar e seus sensores por uma interface acessível pela Internet. Contudo, é necessário avaliar a viabilidade da implementação deste tipo de tecnologia. Caso seja viável, é necessário avaliar também os benefícios da tecnologia quando aplicada ao projeto de coletor solar apresentado em comparação aos projetos já consolidados no meio científico.

Assim, o uso da plataforma ESP32 traz benefícios ainda maiores que a utilização do Arduino MEGA 2560. Ao adotar essa plataforma no presente trabalho, foi possível, além de controlar o aparato de rastreamento, hospedar um servidor web no microcontrolador, com a finalidade de exibir os dados coletados de temperatura, irradiação e eficiência em tempo real ao usuário.

A partir dessa interface web, torna-se possível a aplicação de modelos mais complexos quando os dados são transmitidos a um computador local, abrindo novas possibilidades de uso para o coletor como, por exemplo, gerar dados meteorológicos e validar modelos matemáticos no meio acadêmico da meteorologia. Ademais, a implementação dessa interface torna menos árdua a tarefa de identificação de problemas no aparato, facilitando a manutenção e conservação dele e, ainda, auxiliando na análise dos dados extraídos dos sensores acoplados.

Tratando-se, agora, do processo de concentração solar, segundo o pesquisador Elson Avallone (2017), coletores solares por placa plana possuem eficiência térmica inicial maior quando comparados aos resultados obtidos com o tubo evacuado, porém possuem menor constância dessa eficiência. Por outro lado, os coletores de tubo evacuado, apesar de possuírem menor eficiência quando utilizados a baixas temperaturas, são os mais vantajosos, devido à sua alta e constante eficiência térmica em regimes de altas temperaturas geradas pela concentração de energia solar.

Por conseguinte, no desenvolvimento deste trabalho, em primeiro plano adotou-se a seguinte metodologia: no que tange aos componentes mecânicos, foi executada sua construção no *software* de modelagem 3D *Autodesk Inventor*. Já o sistema elétrico e seus componentes, foram projetados e abordados por meio de simulações em um *software* de simulação eletrônica. A fim de analisar a eficiência térmica da máquina e obter dados estimados sobre o seu funcionamento em campo, utilizou-se uma combinação de métodos analíticos e numéricos implementados em *Python* e, também, simulações realizadas em softwares de código aberto.

Os dados experimentais obtidos pelo doutor Elson Avallone (2017) e os dados meteorológicos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram utilizados para estimar a eficiência térmica do coletor desenvolvido nesta pesquisa, por meio de um algoritmo de tratamento de dados, discretização de dados e soma de Riemann implementado em linguagem *Python*, que será abordado posteriormente na seção “Material e Métodos”.

Optou-se pelo uso da linguagem *Python* em função de sua facilidade de programação e vasta gama de bibliotecas voltadas ao tratamento de dados. Além disso, conforme expõem Silva e Viegas (2020), as simulações computacionais e algoritmos escritos em *Python* são ferramentas didáticas muito úteis, pois pelos gráficos e dados gerados por um programa em ambiente virtual, torna-se possível explorar e obter maior compreensão sobre fenômenos antes demasiadamente complexos.

Desse modo, a fim de viabilizar a execução deste trabalho, adotou-se uma abordagem quantitativa de natureza aplicada, visando explorar e delinear todos os objetivos definidos de maneira cuidadosa. Paralelamente, no que tange à metodologia adotada e praticada, foram desenvolvidas tanto uma pesquisa bibliográfica, quanto uma pesquisa experimental.

Em relação à estrutura do texto deste Trabalho de Conclusão de Curso, ele foi dividido em diversas seções e subseções para facilitar a organização didática. Na seção 2, são discorridos os objetivos gerais e específicos do trabalho. Em seguida, na seção 3, são tratados os desenvolvimentos da pesquisa.

A seção 3 é composta de duas subseções: 3.1, na qual é realizada a revisão bibliográfica que dará suporte à metodologia adotada, e 3.2, onde é apresentada, detalhadamente, a metodologia utilizada nesta pesquisa e seus respectivos resultados. Os procedimentos específicos, abordados na subseção 3.2, também foram particionados em subseções, a fim de facilitar a organização do trabalho. Por fim, na seção 4 são apresentadas as conclusões obtidas a partir da pesquisa desenvolvida e, na seção 5, as referências bibliográficas.

Ao final do trabalho, conclui-se que por mais que não tenham sido realizados experimentos em campo e a construção completa da estrutura física do concentrador desenvolvido, os dados estimados, o projeto mecânico e as análises computacionais realizadas promovem uma grande compreensão sobre o funcionamento do concentrador solar cilíndrico-parabólico e os fenômenos envolvidos nele.

Além disso, conclui-se também que, a partir dos dados meteorológicos estimados para Ariranha, obteve-se uma eficiência térmica considerável, de aproximadamente 50%. A implementação do rastreamento solar, do sistema de sensoriamento e do painel de visualização na internet reduz a necessidade de intervenção humana no projeto e torna a consulta dos dados obtidos pelos sensores mais fácil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a eficiência térmica do coletor concentrador solar de geometria cilíndrico-parabólica por tubo coletor com vácuo parcial no espaço anular, avaliar seu funcionamento em campo por meio de recursos computacionais e automatizar o projeto.

2.2 Objetivos específicos

Implementar um sistema automático de rastreamento solar no concentrador utilizando o motor Nema23, controlado pelo microcontrolador ESP32;

Criar uma aplicação web monolítica que permita a visualização de dados de sensoriamento enviados pelo ESP32, por meio de uma API com seu respectivo banco de dados.

Avaliar o rendimento óptico do concentrador solar e a eficiência térmica do projeto operando na cidade de Ariranha, São Paulo.

3 DESENVOLVIMENTOS

Nesta seção, será apresentada a bibliografia que suportou a realização da presente pesquisa e, posteriormente, serão apresentados, detalhadamente, o material e métodos utilizados na execução dela. Em função da grande variedade de assuntos, a seção “Revisão Bibliográfica” foi particionada em quatro subseções, cada uma tratando de um assunto essencial para a compreensão do projeto. Por fim, como os métodos utilizados para projetar e avaliar o concentrador são extensos, a seção “Material e Métodos” também foi particionada em subseções, para facilitar a leitura e compreensão do texto.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.1 A utilidade dos coletores solares concentradores na contemporaneidade

A energia proveniente do Sol é utilizada desde tempos remotos para diversos fins, seja para preparar alimentos ou para experiências mais complexas. Com o decorrer dos anos, inúmeras tecnologias foram desenvolvidas para permitir melhor aproveitamento dessa energia. Nos últimos anos, o debate sobre a emissão de poluentes fez surgir uma demanda por novos métodos de obtenção de energia renováveis que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente do que as não-renováveis.

Segundo os estudiosos Tian e Zhao (2013), o aquecimento global induzido pela emissão de dióxido de carbono se tornou um assunto preocupante e precisa ser abordado. A utilização eficiente de fontes de energia renováveis, sobretudo a energia solar, tem sido considerada uma solução promissora para o aquecimento global e um meio de alcançar o desenvolvimento sustentável para seres humanos.

Assim, no tocante a substituição de fontes de energia não-renováveis por outras renováveis, a energia solar é uma das fontes que mais se destaca, garantindo inúmeros benefícios, visto que pode ser convertida diretamente em energia elétrica por intermédio de materiais fotovoltaicos, além de ter utilidade como fonte de energia térmica para aquecimento de fluidos e geração de trabalho mecânico.

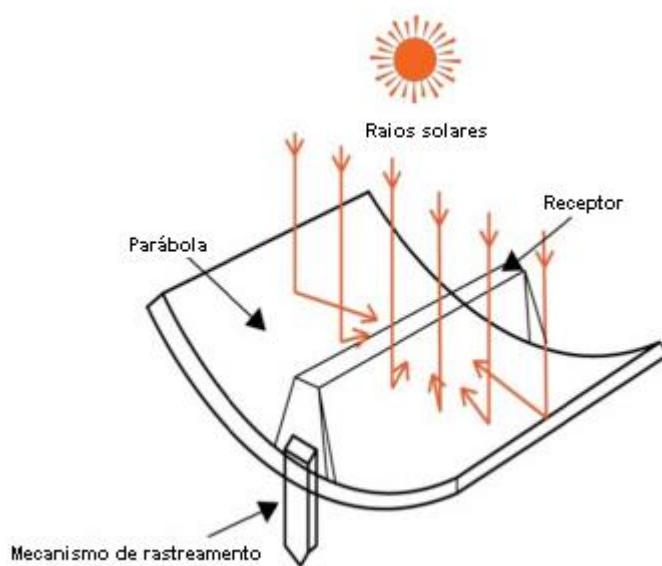
Em vista disso, os concentradores solares destinam-se a aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a produção de vapor. Nesse último caso, pode-se gerar energia mecânica com o auxílio de uma turbina a vapor e, posteriormente, eletricidade, por meio de um gerador (MATRAI, 2008).

Em conformidade ao presente trabalho, o estudo realizado por Augusto (2010) visa a utilização de um concentrador solar cilíndrico-parabólico, também chamado de coletor de calha parabólica (PTC), para geração de vapor de baixa ou média pressão, concluindo que, do ponto de vista econômico e de geração de energia elétrica, os concentradores solares são a forma mais eficiente de conversão.

De acordo com os autores do livro *Solar Engineering of Thermal Processes*, Duffie e Beckman (2013), para algumas situações é desejável fornecer energia em temperaturas mais elevadas, em comparação às obtidas com outros tipos de coletores. Isso é feito inserindo um dispositivo óptico entre a fonte de radiação e a superfície de absorção de energia. Como o coletor utilizado neste trabalho de conclusão de curso (TCC) é do tipo cilíndrico-parabólico, dar-se-á mais atenção a essa geometria.

Conforme já exposto, os concentradores solares PTC são um tipo muito utilizado para geração de energia. Para isso, são necessárias elevadas temperaturas e altas taxas de concentração. O coletor consiste em uma superfície refletora com geometria cilíndrico parabólica, montada sobre um sistema de rastreamento solar, a fim de captar a radiação solar e concentrá-la em dispositivo receptor posicionado ao longo da linha focal. Quando se aponta a parábola para o Sol, os raios que incidem paralelamente em sua superfície são refletidos no tubo receptor. A radiação térmica ali concentrada aquece o fluido, de modo a transformar a energia oriunda do Sol em energia útil, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Concentrador solar de calha parabólica



Fonte: AZAD; SHARMA e RASUL (2016) (Adaptado)

Assim, dada a urgente necessidade de substituir as fontes de energia não-renováveis por fontes renováveis e, tendo em vista a utilidade dos coletores solares concentradores de geometria cilíndrico-parabólica nesse processo, cabe então, compreender o funcionamento deles detalhadamente. Por isso, na seção a seguir, serão abordados, detalhadamente, os fenômenos físicos envolvidos na obtenção de energia do sol e no funcionamento dos concentradores PTC.

3.1.2 Os fenômenos físicos envolvidos no funcionamento do concentrador solar

Na natureza, toda a matéria, em suas diversas fases, sólida, líquida e gasosa, é formada por átomos que estão em constante agitação devido às forças nucleares e interações moleculares e intermoleculares, como expõem Feynman, Leighton e Sands (1989). Assim, a sensação de “quente” é, na verdade, um efeito gerado pela energia cinética média dessas partículas, de modo que, quanto mais alta essa energia, mais “quente” é um corpo. Por outro lado, a sensação de “frio” é ocasionada pela transferência de energia térmica do corpo humano para as partículas com menor energia cinética de um material.

Além disso, o grau de agitação médio dessas partículas é chamado de temperatura. Ainda de acordo com Feynman, Leighton e Sands (1989), quanto maior a temperatura de um material, mais as partículas que o constituem se movimentam e, consequentemente, mais quente ele é. Diversas escalas de temperatura foram introduzidas durante a história, porém até 1848 as temperaturas eram medidas em relação a outros fenômenos físicos, como a ebulação da água. Em 1848, foi criada uma escala absoluta de temperatura, a escala Kelvin, que integra o Sistema Internacional de Unidades (SI).

“A energia transferida de uma coisa para outra por causa de uma diferença de temperatura entre elas é chamada de calor”(HEWITT, 2015, p. 287). Desse modo, quando há interação entre dois corpos com temperaturas distintas, observa-se a transferência de calor, denotado por Q com seus subscritos apropriados. A energia térmica é sempre transferida do corpo com maior temperatura para aquele com menor temperatura, até que haja um equilíbrio térmico, ou seja, que a temperatura entre os dois ou mais corpos do sistema seja a mesma. Vale notar que o calor não é uma propriedade da matéria, mas sim a energia em trânsito entre corpos.

No que tange às formas de medição de temperatura, segundo Hewitt (2015), o primeiro “medidor térmico”, denominado termômetro, foi inventado por Galileu Galilei, em 1602. O termômetro comum, composto de mercúrio dentro de um tubo de vidro, começou a ser utilizado

apenas nos últimos 70 anos. Contudo, o uso do mercúrio agrega grandes perigos de contaminação. Por isso, foram criados termômetros mais seguros e eficientes que realizam a medição de temperatura digitalmente, como os sensores de temperatura Dallas DS18B20, compatíveis com microcontroladores.

Nesse sentido, para a medição de temperaturas em fluidos como a água, o Dallas DS18B20 pode ser muito útil, tendo em vista que pode ser adquirido com um encapsulamento de metal que permite sua inserção em meio aquoso sem prejudicar seu funcionamento. Além disso, a tecnologia 1-Wire presente nesse sensor reduz a complexidade do sistema, pois requer apenas um fio para transmitir os dados, como aponta o trabalho desenvolvido por Jingzhuo e Chenglong (2007).

Assim, o uso desse sensor é bastante útil em concentradores solares por tubo evacuado, já que no interior do tubo é utilizada a água ou outros fluidos que precisam ter sua temperatura aferida constantemente. Contudo, a fim de entender a medição da temperatura e os modelos matemáticos propostos a partir dessas medições, faz-se necessário compreender o comportamento físico da transferência de calor em líquidos e seus fenômenos particulares.

No que tange à termodinâmica do sistema do concentrador, é importante definir dois conceitos que imperam sobre esse sistema. Segundo Walker, Resnick e Halliday (2014), o primeiro conceito é a capacidade térmica de um corpo (C), que é a constante de proporcionalidade entre o calor recebido ou cedido pelo objeto (Q) e a variação de temperatura sofrida por ele (ΔT), como exibido na Equação 1. Contudo, vale notar que a capacidade térmica não implica em um limite para a absorção de calor. Os corpos podem transferir uma quantidade ilimitada de calor, contanto que haja diferença de temperatura, podendo ocorrer, nesse processo, uma mudança de estado físico.

$$Q = C\Delta T \quad (1)$$

Ainda, como aponta o mesmo autor, o segundo conceito é o calor específico, que é a capacidade térmica por unidade de massa (m). Quando se trata de um sistema de corpos de mesmo material, convém definir o calor transferido em termos da massa unitária do material do qual são feitos os corpos. Assim, o calor transferido, nesse caso, é proporcional ao produto do calor específico (c) pela massa e pela variação de temperatura sofrida pelo corpo, expresso na Equação 2.

$$Q = mc\Delta T \quad (2)$$

Entretanto, antes de estudar o funcionamento do sistema de concentração, é necessário discorrer sobre a dinâmica do sol e sua energia. Nesse sentido, como aponta o professor Soteris Kalogirou (2014), o sol é uma esfera de gases extremamente quente, com um diâmetro de $1,39 \times 10^9 m$, estando a uma distância de $1,5 \times 10^8 km$ da Terra e possuindo uma temperatura de corpo negro de 5760 K. Segundo o autor, a estrela é um reator de fusão nuclear contínua, onde o Hidrogênio é transformado em Hélio, emitindo enormes quantidades de energia em forma de radiação eletromagnética.

De acordo com o livro supracitado, o total de energia que o sol emana é de $3,8 \times 10^{20} MW$, porém, o planeta Terra recebe apenas uma fração da radiação emitida, totalizando $1,7 \times 10^{14} kW$. Embora a fração seja pequena, o montante de energia do sol que chega na terra em 84 minutos é suficiente para suprir a demanda global de energia por um ano. Desse modo, é possível, então, entender como a energia do sol é absorvida pelos materiais terrestres e convertidas em outras formas de energia.

Ainda segundo o autor, o sol emite constantemente, através de seu processo de fusão, radiação térmica que chega na Terra. A radiação térmica é uma força de energia e de transmissão de energia que depende exclusivamente das características térmicas da superfície emissora, não havendo a necessidade de um meio de propagação, como observado em outras formas de transferência de energia, como a condução e convecção. Ao observar a natureza da radiação térmica, pode-se concluir que ela é, na verdade, uma onda eletromagnética que viaja à velocidade da luz no vácuo, denotada por c , que é aproximadamente $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ e, que a velocidade de propagação está relacionada ao comprimento de onda (λ) e frequência (ν) da radiação emitida pela Equação 3.

$$c = \lambda\nu \quad (3)$$

Assim, em consonância ao professor, quando um raio de radiação térmica incide na superfície de um corpo, parte é refletida para fora da superfície, parte é absorvida pelo corpo e parte é transmitida através do corpo. Associa-se a esses fenômenos as respectivas propriedades: refletividade (ρ), que é a fração de radiação refletida; absorvividade (α), que é a fração de radiação absorvida; transmissividade (τ), que é a fração de energia transmitida, de modo que essas propriedades dependem não só da superfície onde a radiação solar incide, mas também da direção e comprimento de onda da radiação incidente e são relacionadas por meio da

Equação 4.

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (4)$$

Ademais, segundo Riedl (2001), em 1860, Gustav Robert Kirchhoff estabeleceu que “no equilíbrio térmico, a potência emitida por qualquer objeto deve ser igual à potência absorvida”, ou seja, se um corpo absorve 100% da radiação incidente sobre ele, logo o objeto também deve emitir 100% da energia recebida, sendo a taxa de emissão denominada como coeficiente de emissividade (ε). Portanto, conclui-se que, para um mesmo comprimento de onda λ , o coeficiente de absorvidade e emissividade são iguais, como mostra a Equação 4.1.

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda \quad (4.1)$$

Por isso, faz-se necessário definir as grandezas e conceitos importantes no que tange à radiação solar que chega na superfície terrestre. De acordo com Kalogirou (2014), a taxa de energia radiante incidente por unidade de área em uma superfície é chamada de irradiância, medida em $\frac{W}{m^2}$ no SI e denotada por G , com os subscritos apropriados para radiação difusa, direta, espectral ou global.

Ademais, ao integrar a irradiância em um determinado intervalo de tempo, obtém-se a irradiação, que é a energia incidente por unidade de área, medida em $\frac{J}{m^2}$ no SI. Todavia, é usual medir a irradiação em unidades de watt-hora por metro quadrado, $\frac{Wh}{m^2}$. Para a irradiação em uma hora ou outro intervalo de tempo, segundo Duffie e Beckman (2013), utiliza-se o símbolo I com os subscritos apropriados para radiação difusa, direta, espectral ou global. Já para a irradiação em um dia, utiliza-se o símbolo H , com os mesmos subscritos apropriados. Em sequência, serão apresentados os diferentes tipos de irradiâncias e irradiações.

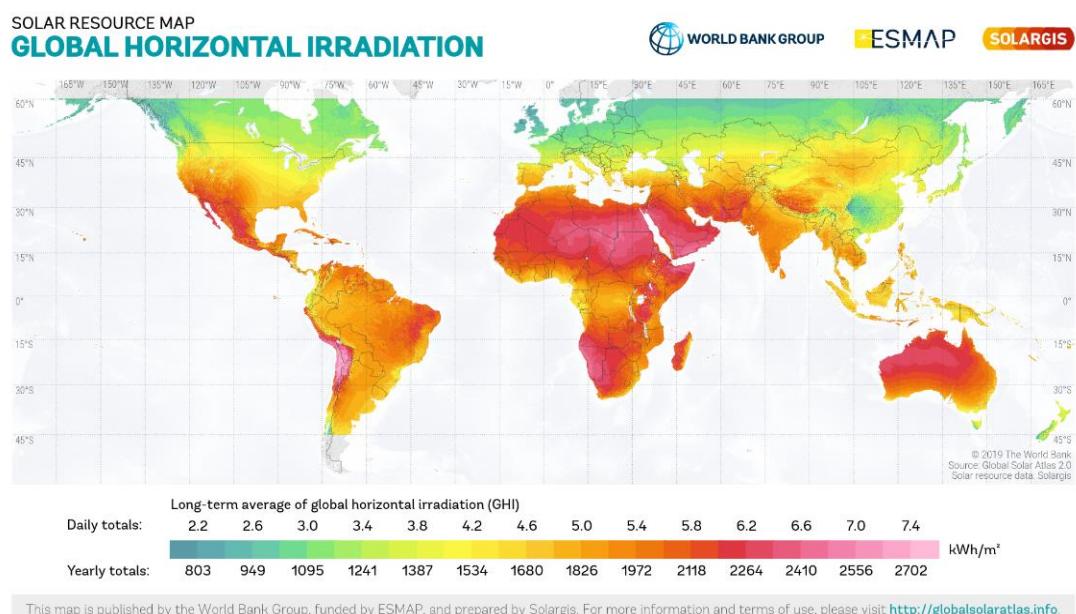
Conforme expõe Soteris Kalogirou (2014), fora da atmosfera terrestre, a energia recebida do sol por unidade de tempo à uma distância média entre a terra e o sol por unidade de área perpendicular à direção de propagação dos raios incidentes é chamada de constante solar. Essa constante é um tipo de irradiância denotada por G_{sc} e expressa em $\frac{W}{m^2}$, no SI. De acordo com Mousavi Maleki, Hizam e Gomes (2017), o valor da constante solar G_{sc} é $1367 \frac{W}{m^2}$.

Além disso, como apontam Mousavi Maleki, Hizam e Gomes (2017), a radiação extraterrestre é definida como a incidência de radiação solar fora da atmosfera terrestre. Por sua

vez, segundo os pesquisadores Duffie e Beckman (2013), a radiação solar direta é a radiação recebida do sol que não foi refratada pela atmosfera, ao passo que a radiação solar difusa é a radiação recebida do sol que teve sua direção alterada devido à refração da atmosfera. A soma das radiações solares difusa e direta resultam na radiação solar total, também chamada de radiação global, geralmente medida em uma superfície horizontal.

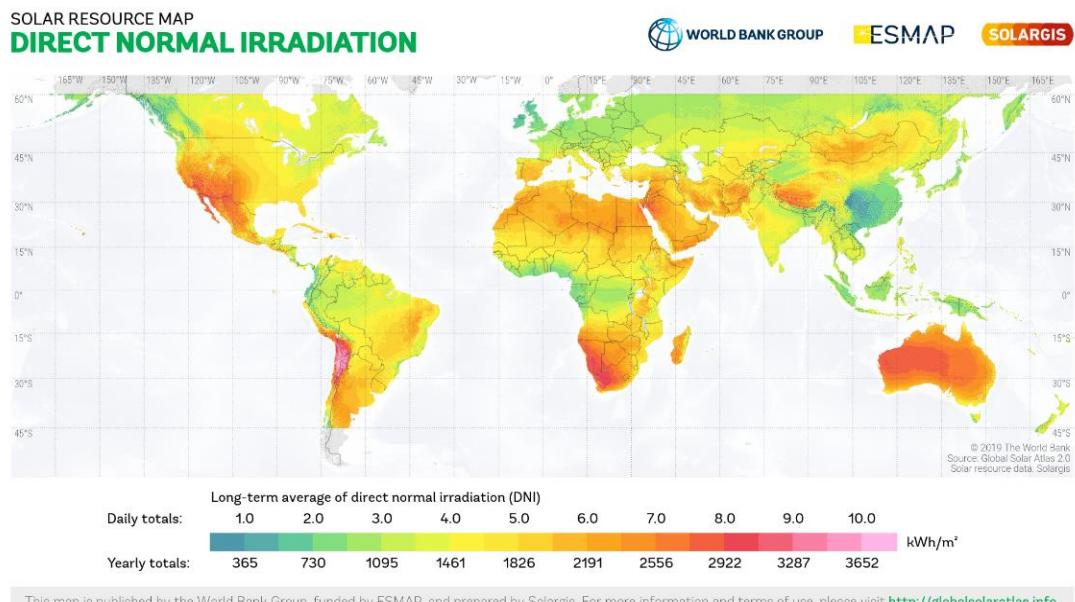
Devido à influência da atmosfera na propagação dos raios, bem como à absorção da energia solar pelos gases que compõem a atmosfera terrestre, apenas uma pequena fração da radiação solar pode ser utilizada ou coletada em meio terrestre. As Figuras 2 e 3, presentes no Global Solar Atlas (2019), exibem respectivamente a irradiação global horizontal e irradiação direta normal em cada área do mundo. Como aponta Global Solar Atlas (2019), grandes razões de $\frac{H_{difusa}}{H_{global}}$ sugerem alta ocorrência de nuvens, alta poluição atmosférica ou muito vapor de água.

Figura 2 - Irradiação global horizontal no mundo



Fonte: Global Solar Atlas (2019)

Figura 3 - Irradiação direta normal no mundo



Fonte: Global Solar Atlas (2019)

Nota-se, a partir das figuras, que as regiões da porção centro-oeste a extremo leste do Brasil, sobretudo nordestinas, possuem alto potencial de exploração da energia solar, em função da alta incidência de radiação. Evidencia-se, ainda, que por mais que a radiação solar seja dissipada por fatores atmosféricos, ainda há um grande fluxo de irradiação por área, que no território brasileiro, mencionado anteriormente, chega à cerca de $2 \frac{MWh}{m^2}$ anualmente.

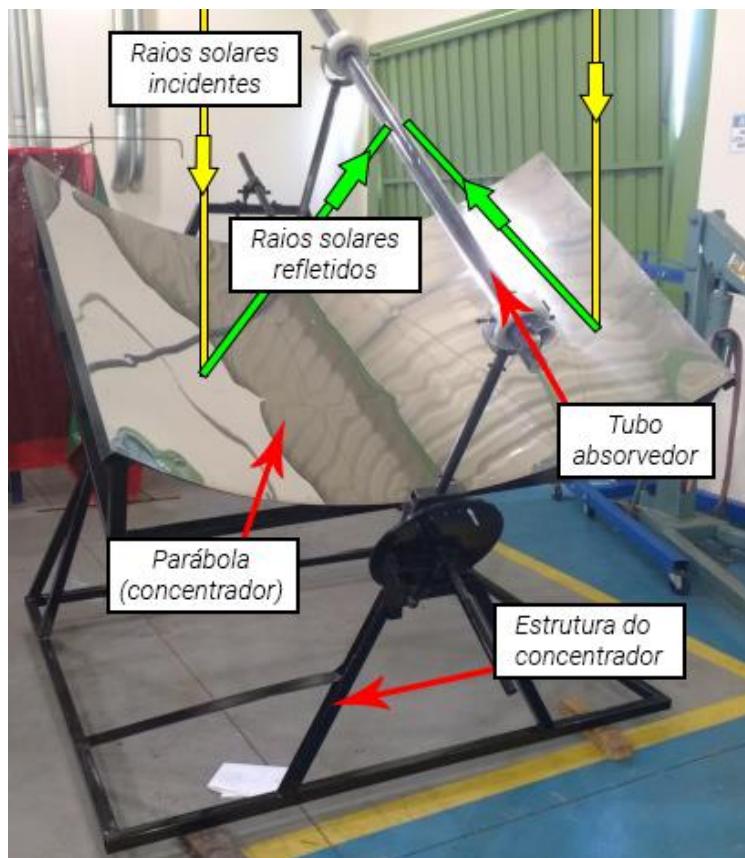
Para um sistema de coleta da energia solar, são utilizados fluidos e materiais com alta condutividade térmica e absorvividade na construção do coletor, sendo a água e o cobre bons exemplos, respectivamente. Já em sistemas de redirecionamento da energia solar, como no caso dos concentradores, são necessários materiais com alta refletividade e baixa transmitância, como espelhos e chapas de alumínio polidas, que permitem focalizar os feixes de radiação térmica em um ponto onde ela será absorvida, ou seja, no coletor.

Com base nos conceitos expostos anteriormente, pode-se, então, realizar uma descrição suficientemente razoável do funcionamento do coletor solar, do concentrador solar e os fenômenos físicos neles envolvidos. Inicialmente, os raios solares incidem sobre o planeta Terra e, então, uma parcela desses raios será refletida pela atmosfera, enquanto uma outra parcela será refratada, tendo seu ângulo de incidência alterado e uma parte de sua energia dissipada pelas colisões com o ar, até que chegue à superfície terrestre.

Assume-se que, no presente trabalho, a estrutura do concentrador solar está fixada ao chão, e que a parábola está apontada para o sol, de modo que os raios solares incidam

perpendicularmente sobre ela. Diante desse cenário, os raios que chegam à superfície terrestre irão atingir a fina superfície da parábola, que é constituída de uma chapa de aço inox 430 polido de espessura 0.5 mm, possuindo alto coeficiente de emissividade e refletividade. Uma pequena parte dos raios que atingem a parábola serão transformados em calor por conta da condutividade térmica, porém a maior parte dos raios será refletida na direção do tubo absorvedor, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura do sistema e diagrama da direção dos raios solares



Fonte: Pablo Natividade (2017) (Adaptado)

Na dissertação de Marcos Cavalcanti (2011), a fim de analisar a influência de materiais isolantes térmicos reflexivos na redução da transferência de calor em sistemas onde deseja-se a conservação de energia, foi montado um sistema de paredes múltiplas de três superfícies de aço inoxidável 430 espelhado, que agem como barreira radiante. Segundo Cavalcanti (2011), o coeficiente de emissividade de uma superfície de aço inoxidável 430 polido possui valor de 0,17. A emissividade de diferentes superfícies metálicas pode ser encontrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficiente de emissividade de cada material metálico em função do acabamento

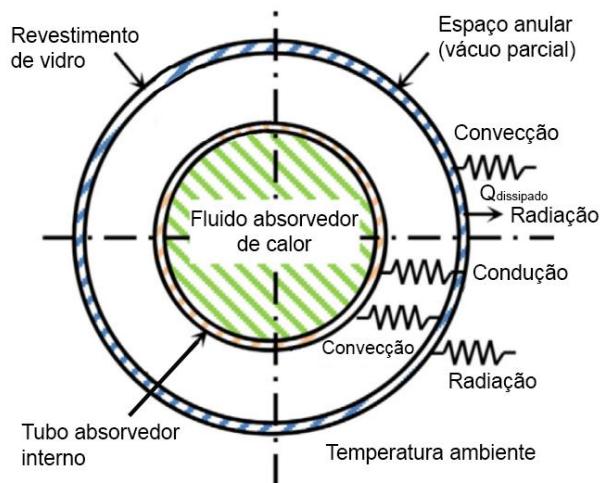
superficial

Metal	Polido	Rugoso	Oxidado
Alumínio	0,04	0,055	0,11 a 0,019
Aço inox 304	0,17	0,57	0,85
Aço inox 430	0,17	0,57	0,85
Cobre	0,018 a 0,02	-	0,57
Prata	0,02 a 0,035	-	-
Estanho	0,04 a 0,065	-	-
Zinco	0,045 a 0,053	-	0,11

Fonte: Cavalcanti (2011)

Em seguida, é necessário analisar o comportamento dos raios que atingem o tubo coletor. Como ilustrado na Figura 5, o tubo é revestido externamente por uma fina camada de vidro. Em seu interior, possui um espaço anular onde há vácuo e um fino cano de cobre, no qual corre o fluido absorvedor. Nesse cenário, uma grande parte dos raios refletidos pela parábola concentradora passará pela camada de vidro, enquanto uma pequena parte desses raios será refletida ao ambiente, constituindo a energia dissipada ($Q_{dissipado}$) pelo sistema.

Figura 5 - Secção reta do tubo coletor



Fonte: Abdulhamed et al. (2018) (Adaptado)

No trabalho do pesquisador Natividade (2017), foi desenvolvido um coletor de calha parabólica com tubo coletor evacuado, cuja estrutura foi doada aos autores do presente trabalho. Segundo o pesquisador, o coeficiente de absorção do tubo absorvedor utilizado (α_{abs}) possui valor de 0,94. As demais especificações do coletor estão evidenciadas na Tabela 2. Ademais, ao analisar a performance térmica de um coletor concentrador cilíndrico parabólico do tipo LS-2, Okonkwo, Abid e Ratlamwala (2019) propõem que o coeficiente de transmissividade (τ_{vidro})

do vidro que reveste o tubo absorvedor possui valor de 0,95.

Tabela 2 - Especificações do tubo coletor

Parâmetros	Características
Comprimento total	1800 mm
Material do vidro	Borosilicato 3,3
Tipo de revestimento	Cu/Al/Aço inoxidável
Diâmetro do tubo externo	58 mm
Espessura do tubo externo	1,8 mm
Diâmetro do tubo interno	47 mm
Espessura do tubo interno	1,6 mm
Coeficiente de Absorção (θ)	0,92
Coeficiente de transmitância	0,9
Perda média de calor	$0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
Temperatura de estagnação	250 °C

Fonte: Natividade (2017)

Nesse sentido, por fim, torna-se necessária a análise das trocas de energia no interior do tubo. A radiação solar que chega ao interior do tubo é então, absorvida por condução e convecção pelo absorvedor de cobre após o espaço anular, que transfere a energia recebida para o fluido de trabalho, a água, por meio da condução térmica. A partir desse momento, a água adquire calor e, consequentemente, sua temperatura se eleva, variando da temperatura ambiente, de aproximadamente 30 °C até, no máximo, 100 °C, que é sua temperatura de ebulição.

Além disso, segundo Elson Avallone (2013), uma modificação no tubo coletor pode gerar uma eficiência maior. No trabalho do pesquisador, foi inserido um tubo de cobre no interior do coletor, a fim de separar o fluxo de água quente do fluxo de água fria. Devido à formação de uma estratificação térmica, observou-se que a eficiência do sistema modificado é maior que a do sistema convencional, sem o tubo de cobre.

Desse modo, por meio das descrições das grandezas, observáveis e fenômenos físicos interessantes ao presente trabalho, torna-se facilitada ao leitor a compreensão do desenvolvimento das equações, conceitos e aparatos específicos que serão mencionados ao decorrer do trabalho e organizados nas seções posteriores.

3.1.3 A geometria cilíndrico-parabólica e o rastreamento solar

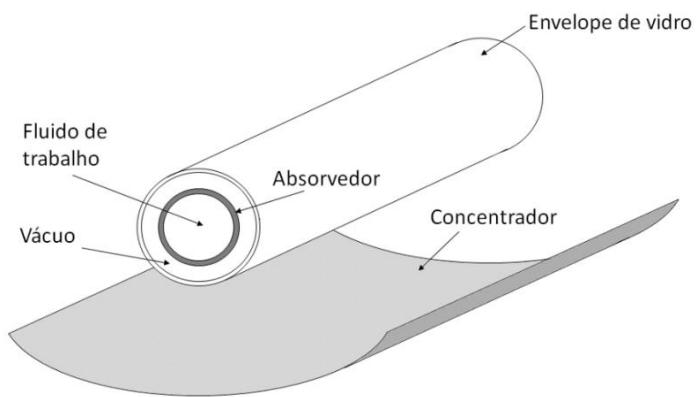
Ao que tange à construção dos coletores solares, esses podem possuir distintas

geometrias, sendo cada uma delas dotada de características intrínsecas que podem beneficiar ou não a execução de um determinado projeto. Durante a história, foram desenvolvidos coletores como o de placa plana, de geometria cilíndrica, coletores Fresnel de lentes e Coletores Parabólicos Compostos (CPC), de modo que o estudo da eficiência, dificuldades de construção e facilidade de manutenção desses sistemas contribuem para que seja possível encontrar melhores formas de captação da energia renovável solar para sustentar o modo de vida contemporâneo.

De acordo com Sridhar et al. (2018), coletores solares de placa plana são extremamente úteis quando se trata do aquecimento de líquidos a temperaturas inferiores a 100 °C. Contudo, quando há necessidade de obter temperaturas superiores a 100 °C nos líquidos absorvedores, seu uso não é indicado devido à perda de calor em função da grande superfície absorvedora. Desse modo, o uso de coletores concentradores é mais apropriado, pois a radiação solar incidente é concentrada em um único ponto, permitindo uma redução considerável da área de foco e, assim, diminuindo a perda de energia e aumentando a eficiência.

Por princípios geométricos, em concentradores de calha parabólica, pode-se afirmar que os raios solares que incidem paralelamente à parábola serão redirecionados ao ponto focal, onde reside o aparato absorvedor. Esse aparato é composto de um tubo de material condutor térmico revestido ou não, dotado de um líquido fluente interno, que irá absorver a radiação solar convertendo-a em energia térmica, como é demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Secção reta de um coletor cilíndrico parabólico por tubo absorvedor



Fonte: De Carvalho (2018)

Desse modo, com o uso da geometria cilíndrico-parabólica, é possível aumentar consideravelmente a taxa de concentração de energia no absorvedor, permitindo, assim, a geração de energia térmica de altas temperaturas. Entretanto, para alcançar uma alta

concentração, é necessário que a parábola siga o sol durante todo o dia por meio de um sistema de rastreamento que forneça precisão de uma fração de grau.

Tratando-se mais tecnicamente da geometria parabólica, devem ser definidos alguns conceitos antes de analisá-la. Nesse sentido, de acordo com o pesquisador Soteris Kalogirou (2014), a Equação 5 descreve a parábola em termos do plano cartesiano, onde f é o ponto focal da parábola. O ponto focal pode ser observado na Figura 7, onde é denotado por f .

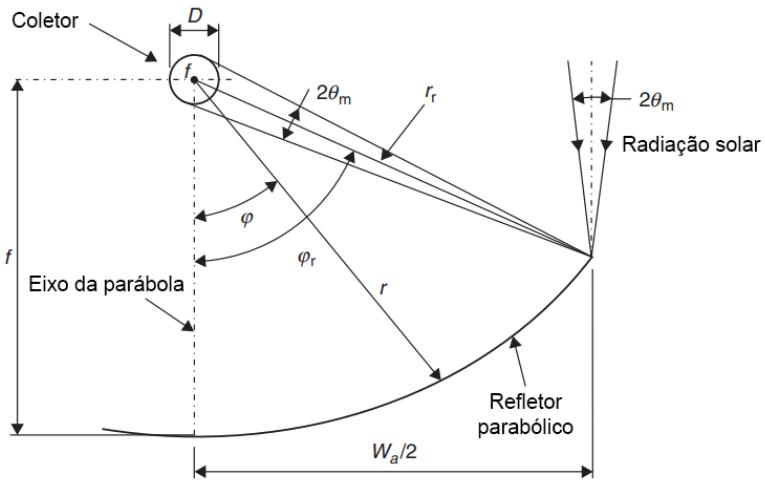
$$y^2 = 4 \cdot f \cdot x \quad (5)$$

Ainda segundo Kalogirou (2014), a radiação incidente na borda mais externa da parábola refletora, onde seu raio é máximo (r_r), forma um ângulo φ_r com o eixo da parábola, que é uma linha perpendicular que passa pelo centro dela (metade da distância entre suas duas bordas, ou seja, $\frac{1}{2}W_a$). Esse ângulo recebe o nome de ângulo de borda (φ_r) e pode ser visualizado na Figura 7. Como expõe o pesquisador, o comprimento horizontal da parábola W_a pode ser encontrado por meio da Equação 6.

$$W_a = 2r_r \operatorname{sen}(\varphi_r) \quad (6)$$

Nesse sentido, como aponta o autor, além do ângulo de borda, existem dois outros ângulos importantes que imperam sobre essa geometria. O primeiro é o ângulo φ formado entre o eixo da parábola e um raio refletido no foco da parábola. Já o segundo, é o ângulo de meia aceitação θ_m , que denota a cobertura de metade da zona angular na qual a radiação é aceita pelo coletor do concentrador. Ambos os ângulos também podem ser evidenciados na Figura 7.

Figura 7. Secção transversal de um PTC com coletor cilíndrico



Fonte: Kalogirou (2014) (Adaptado)

A partir dessas noções iniciais é possível, então, analisar a eficiência óptica desse tipo de coletor concentrador. Segundo Kalogirou (2014), a eficiência óptica é a razão entre a energia recebida pelo coletor e a radiação incidente na parábola concentradora, possuindo dependência nas propriedades ópticas dos materiais que compõem a estrutura, a geometria do coletor e as imperfeições provenientes da construção do aparato.

A eficiência óptica é dada pela Equação 7, onde ρ_{esp} é a refletividade da parábola espelhada, τ_{vidro} a transmitância do revestimento de vidro do tubo coletor, α_{abs} a absorbância do tubo coletor de cobre, γ o fator de atenuação, A_f o fator geométrico e θ o ângulo de incidência do raio solar.

$$\eta_0 = \rho_{esp} \tau_{vidro} \alpha_{abs} \gamma [(1 - A_f \tan \theta) \cos \theta] \quad (7)$$

Ainda, como expõe o autor, o parâmetro mais complexo envolvido no cálculo da eficiência óptica do concentrador cilíndrico-parabólico é o fator de atenuação, também chamado de fator de interceptação. Esse coeficiente é definido como a razão entre a energia que é interceptada pelo coletor e a energia refletida pela parábola, de modo que seu valor depende do tamanho do coletor, dos erros angulares da superfície parabólica refletora e a distribuição dos raios solares.

Segundo García-Cortés, Bello-García e Ordóñez (2012), o fator de atenuação está diretamente relacionado à fidelidade da geometria de calha parabólica real quando comparada ao seu projeto teórico. No trabalho desenvolvido pelos autores, foi utilizada a tecnologia de

fotogrametria convergente usando equipamentos disponíveis comercialmente para obter uma nuvem de pontos tridimensional que está simultaneamente orientada no espaço e ajustada para um cilindro parabólico, a fim de calcular os desvios do formato ideal do concentrador. Os vetores normais em cada ponto na superfície ajustada foram calculados e usados para determinar o fator de atenuação. Os resultados obtidos no trabalho podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Fator de atenuação em função da posição do coletor

Posição do coletor	Vertical	Horizontal
Fator de atenuação (γ)	0,907	0,9202

Fonte: García-Cortés, Bello-García e Ordóñez (2012)

No que tange ao fator geométrico A_f , este possui menor complexidade. Segundo Kalogirou (2014), esse fator é uma medida da redução efetiva de área de abertura do concentrador por conta de efeitos de incidência anormais, como bloqueios, sombras e a perda da radiação refletida pelo espelho na ponta do coletor. Assim, segundo o autor, o fator geométrico é dado pela Equação 8, onde A_l é a perda na área de abertura e A_a a área de abertura total da parábola refletora.

$$A_f = \frac{A_l}{A_a} \quad (8)$$

Ainda segundo Kalogirou (2014), a perda na área de abertura (A_l) é dada pela Equação 9, onde W_a é o comprimento horizontal da parábola e h_p a sua altura.

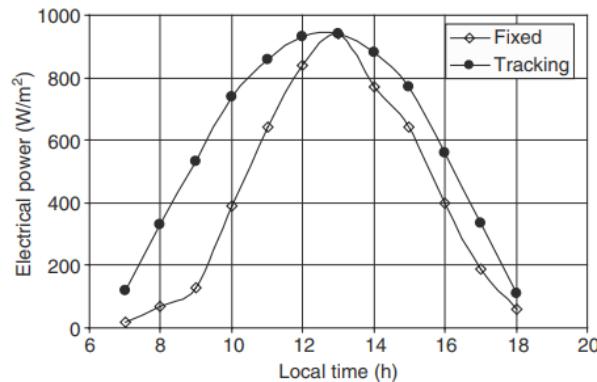
$$A_l = \frac{2}{3} W_a h_p + f W_a \left[1 + \frac{W_a^2}{48f^2} \right] \quad (9)$$

Terminada a explanação sobre a geometria cilíndrico-parabólica, em relação ao rastreamento do sol, “a correção da posição do coletor por meio de um sistema de rastreamento é muito importante, uma vez que sem essa correção, não haverá a formação de um foco linear, ou, se formar, será em um local diferente do foco geométrico do coletor impedindo, assim, que a radiação solar chegue até o tubo absorvedor”. (SILVA, 2015).

No trabalho de Abdallah e Badran (2008), foi desenvolvido um sistema de rastreamento

solar computadorizado para rotacionar um destilador solar com o fim de separar a água pura de contaminantes como sais e partículas. Ao comparar um destilador fixo com um destilador dotado de rastreamento solar, observou-se que o uso do rastreamento traz um aumento de aproximadamente 22% na energia solar incidente da manhã até o meio-dia. Assim, a partir da Figura 8, pode-se observar a importância do rastreamento solar para melhorar a produtividade de um sistema que utiliza energia solar.

Figura 8 - Comparação da energia incidente entre um destilador solar fixo e com rastreamento solar



Fonte: Abdallah e Badran (2007)

Portanto, por mais que as especulações teóricas sobre o rastreamento solar indiquem que seu uso é essencial para promover maior eficiência energética, faz-se necessário o estudo detalhado de sua influência na operação do coletor solar, de modo a obter dados experimentais que comprovem essa hipótese e, por conseguinte, estudar as características dos distintos sistemas de rastreamento.

Em consonância ao exposto, no trabalho de Sridhar et al. (2018) foi projetado um coletor solar concentrador cilíndrico-parabólico, dotado de um sistema de rastreamento solar de um eixo, orientado horizontalmente de Norte a Sul, tendo como fluido absorvedor a água. O projeto visou obter um baixo custo de produção aliado à alta acessibilidade. Por meio da implementação do sistema de rastreamento solar objetivou-se, também, a operação ininterrupta do sistema de concentração, eliminando a necessidade de intervenção humana no processo.

Na implementação do rastreamento solar, os autores utilizaram um motor DC, um sensor de luz LDR e um sistema de polias. Assim, para que a luz incida perpendicularmente ao sensor, o sistema de rastreamento fixa a posição do sol. A energia absorvida pelo coletor dotado de rastreamento automático foi comparada à energia absorvida pelo mesmo coletor, porém, com rastreamento manual. Observou-se um ganho de calor de 26 W quando utilizado o rastreamento

manual e um ganho de calor de 41,8 W quando utilizado o rastreamento automático. Utilizando o rastreamento automático, obteve-se uma eficiência geral 0,49% maior que a obtida utilizando o rastreamento manual.

Desse modo, tendo em vista o trabalho supracitado, é possível notar a importância do rastreamento solar na obtenção de maior eficiência energética durante a operação do coletor, sobretudo quando o rastreamento é realizado de maneira automática, excluindo a necessidade de intervenção humana e aumentando a estabilidade do sistema.

Vale ressaltar, entretanto, que a correção automática de posição por meio do rastreamento solar em um eixo necessita de um motor que possa movimentar a estrutura do coletor e, para isso, faz-se necessário, também, um sistema de controle. Por conta da facilidade de programação, utiliza-se geralmente os microcontroladores Arduino Mega 2560 ou ESP32, que são capazes de controlar o sistema adequadamente, porém necessitam de uma tensão DC ininterrupta, fornecida por baterias ou por conexão com a rede elétrica.

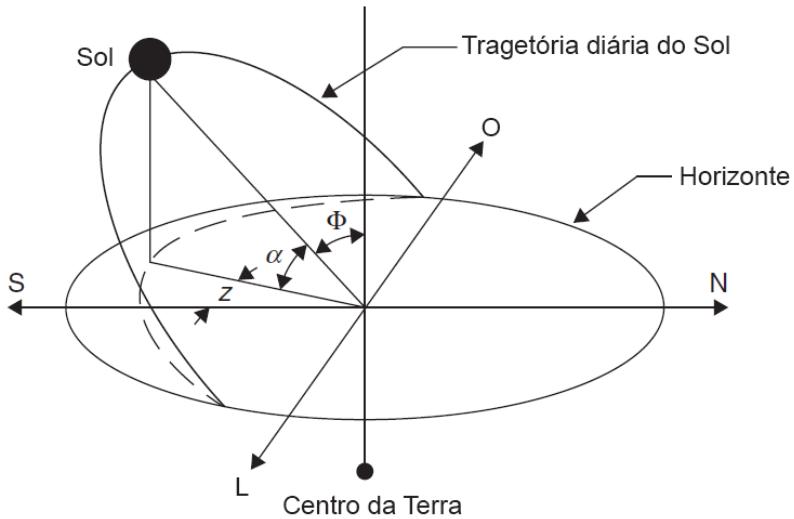
Segundo a fabricante Espressif Systems (2021), para a obtenção do funcionamento ideal do microcontrolador ESP32, é necessário que seja fornecida uma corrente elétrica de 500 mA e tensão de 3,3 V. O dispositivo foi projetado para operar com baixo consumo, havendo a possibilidade de desligá-lo quando não há demanda de funcionamento. Utilizando uma bateria de baixo custo de 6000 mAh, o microcontrolador poderá operar por mais de 8 horas. Assim, por mais que o dispositivo tenha uma demanda energética, seu consumo é muito baixo, de modo que sua utilização traz mais benefícios do que perdas.

No tocante à posição do Sol no céu, ela varia ao longo do dia e da estação, devido ao giro da Terra em torno de seu eixo e à sua órbita em torno do Sol. Segundo Sayigh (1977), “conhecimentos de trigonometria esférica e plana, bem como algumas noções elementares de astronomia são necessários para compreender, e não apenas aplicar, as fórmulas para cálculo de tempo e direções da radiação direta de entrada em qualquer localidade do planeta”.

Nesse sentido, os concentradores que apresentam rastreamento solar em apenas um eixo podem ser orientados para rotacionar no sentido Leste-Oeste, Norte-Sul ou paralelos ao eixo da Terra. De acordo com Duffie e Beckman (2013), para que seja determinada a localização exata do sol em qualquer momento do dia, é necessário definir alguns ângulos astronômicos e solares.

Os ângulos astronômicos e solares, imprescindíveis para este trabalho, que serão introduzidos a seguir, são ilustrados na Figura 9.

Figura 9 - Trajetória diária do sol e ângulos astronômicos e solares



Fonte: Kalogirou (2014) (Adaptado)

Ângulo de altitude solar (α): formado entre os raios do sol e o plano horizontal, sendo complementar ao ângulo zenital (Φ), formado entre a vertical e os raios solares e dado pela Equação 10.

$$\Phi + \alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad (10)$$

Além disso, de acordo com Kalogirou (2014), o ângulo de altitude solar (α) pode ser obtido por meio da Equação 11:

$$\operatorname{sen}(\alpha) = \cos(\Phi) = \operatorname{sen}(L)\operatorname{sen}(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h) \quad (11)$$

Na equação acima, L é a latitude local, definida como o ângulo entre a linha imaginária, que parte do centro terrestre até o local de interesse, e o plano equatorial. Para latitudes ao norte da Linha do Equador, L é positivo, e para latitudes ao sul, L é negativo.

Ângulo azimutal (z): projeção ortogonal dos raios solares no plano horizontal, medido a partir do Norte ou Sul geográfico, dado pela Equação 12.

$$\operatorname{sen}(z) = \frac{\cos(\delta)\operatorname{sen}(h)}{\cos(\alpha)} \quad (12)$$

Declinação solar (δ): distância angular do sol ao meio-dia solar em relação ao plano do Equador, sendo a declinação ao norte considerada positiva. A declinação (δ), em graus, pode ser calculada aproximadamente pela Equação 13.

$$\delta = 23,45 \cdot \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (13)$$

A Tabela 4 apresenta o valor n , que indica o dia exato do ano.

Tabela 4 - Valores de n por mês

Mês	Dia do mês	Data	n	δ
Janeiro	i	17	17	-20.9
Fevereiro	$31 + i$	16	47	-13.0
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	-23.0

Fonte: Duffie e Beckman (2013) (Adaptado)

Ângulo horário (h): deslocamento angular do sol, no sentido Leste–Oeste, em relação à rotação da Terra em torno de seu eixo. O ângulo é igual a 0° ao meio-dia solar, e a Terra rotaciona quinze graus por hora ao longo dia. Esse ângulo pode ser obtido a partir da Equação 14.

$$h = 15 \cdot (AST - 12) \quad (14)$$

Na equação 14, o Tempo Solar Aparente (AST) é baseado no movimento angular aparente do sol no céu. O AST é utilizado em todas as relações de ângulo solar, não coincidindo com o tempo de relógio local, pois o sol leva em torno de quatro minutos para avançar um grau, além da perturbação causada pela rotação terrestre. Portanto, é necessário converter o tempo padrão (LST) para o Tempo Solar Aparente (AST), como mostrado pela Equação 14.1:

$$AST - LST = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (14.1)$$

Na Equação 14.1, L_{st} representa a longitude padrão de acordo com o fuso horário, e L_{loc} é a longitude do local de interesse. De acordo com Kalogirou (2014), E é a equação do tempo, dada em minutos pela Equação 14.2:

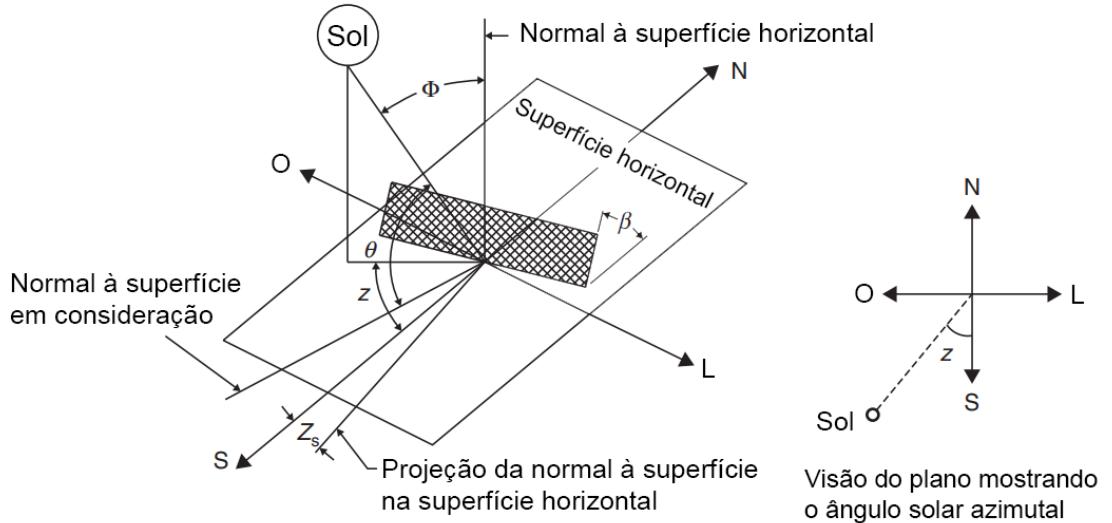
$$E = 9,87\text{sen}(2B) - 7,53\text{sen}(B) - 1,5\text{sen}(B) \quad (14.2)$$

Na Equação 14.2, B é dado pela Equação 14.3, na qual n é o dia do ano.

$$B = (n - 1)\frac{360}{365} \quad (14.3)$$

Ademais, segundo Kalogirou (2014), o ângulo de incidência solar θ é formado entre os raios solares e o segmento normal de uma superfície, de modo que, em um plano horizontal, $\theta = \phi$. O ângulo de incidência está relacionado com os ângulos astronômicos e solares básicos apresentados anteriormente e pode ser observado na Figura 10, onde β é o ângulo de inclinação da superfície com a horizontal, e Z_s é o ângulo entre o segmento normal da superfície e o eixo sul, chamado de azimute da superfície. N, S, L, O são, respectivamente, os eixos Norte, Sul, Leste e Oeste.

Figura 10 - Ângulos solares e ângulo de incidência em uma superfície



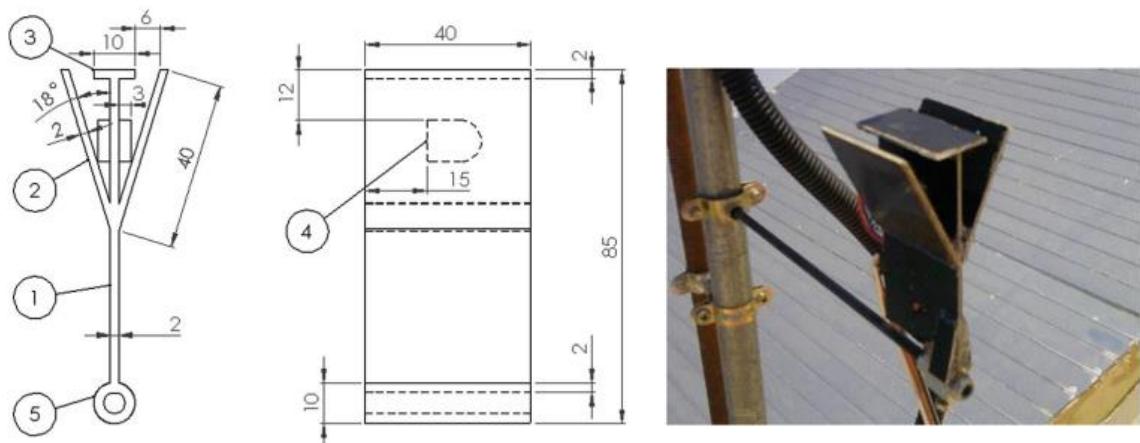
Fonte: Kalogirou (2014) (Adaptado)

Como aponta Kalogirou (2014), para uma superfície orientada horizontalmente, na direção Norte-Sul, com rastreamento solar ao longo do eixo Leste-Oeste, evidenciado na Figura 10, o cosseno do ângulo de incidência θ pode ser obtido relacionando as definições apresentadas anteriormente, por meio da Equação 15.

$$\cos(\theta) = \sqrt{\sin^2(\alpha) + \cos^2(\delta)\sin^2(h)} \quad (15)$$

O desenvolvimento do sistema de controle do mecanismo de rastreamento do presente trabalho teve como base o projeto realizado pelos pesquisadores Gama et al. (2013). O dispositivo de rastreamento consiste em um suporte para dois sensores *Light Dependent Resistor* (LDR) na extremidade inferior do tubo coletor, conforme disposto na Figura 11.

Figura 11 - Fixação do suporte na estrutura do concentrador de Gama et al. (2013)

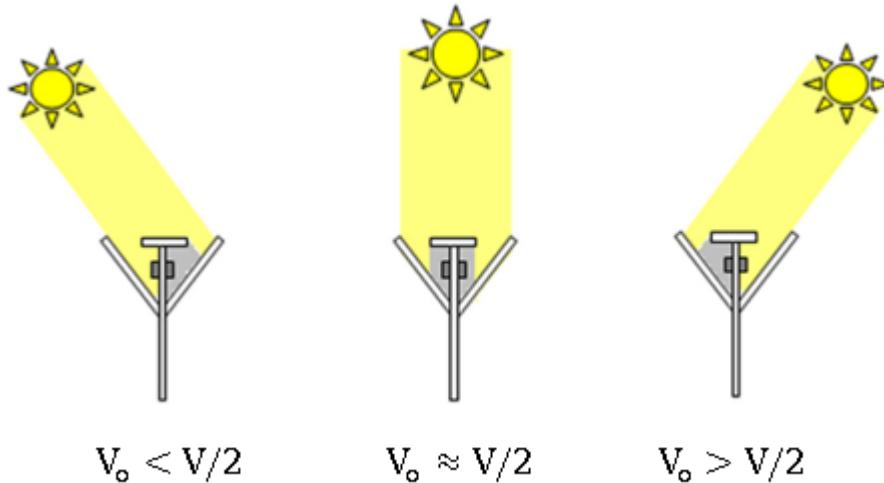


Fonte: Gama et al. (2013)

A partir do momento em que os fótons de luz incidem sobre a superfície do sensor, os elétrons são excitados, gerando uma corrente elétrica. Desse modo, em estado normal, ou seja, sem incidência direta de luz, a resistência do LDR é alta. Contudo, ao aumentar a incidência luminosa sobre o sensor, a resistência elétrica diminui. Nesse sentido, quando utilizado em um mecanismo de controle do rastreador solar, o LDR assegura que os raios solares estejam incidindo diretamente na parábola do concentrador.

Segundo o trabalho supracitado, caso os raios solares incidam corretamente na parábola, haverá sombra sobre os dois sensores e, consequentemente, a diferença de potencial (ddp) será dividida igualmente entre eles. Entretanto, caso os raios não incidam corretamente, haverá sombra em um dos LDR, de modo que as resistências dos sensores serão diferentes. Assim, a ddp entre os dois sensores (V_o) será maior ou menor que $\frac{V}{2}$, como pode ser observado na Figura 12. Por conseguinte, com base na ddp medida, será possível mover a estrutura com o motor, a fim de melhorar o aproveitamento da energia solar incidente.

Figura 12 - Diferentes posições do sol em relação ao suporte do LDR



Fonte: Gama et al. (2013)

Em relação ao motor a ser utilizado, para defini-lo, primeiramente é preciso calcular o torque necessário para mover a estrutura. Segundo Walker, Resnick e Halliday (2014), para calcular o torque exercido por um motor ao longo de um eixo, utiliza-se a Equação 16, na qual r_{giro} é o raio de giro e F a carga a ser movida. Em unidades do SI, o torque é dado em $N \cdot m$, a carga em Newtons (N) e o r_{giro} em metros.

$$T = F \cdot r_{giro} \quad (16)$$

Ademais, como aponta Guido Ramalho (2018), em um sistema de redução de um motor, o torque que está sendo efetivamente transmitido para o eixo de rotação da estrutura é dado pela Equação 17, onde i é a relação de transmissão (adimensional) e T_e é o torque do motor, em $N \cdot m$.

$$T_s = T_e \cdot i \cdot \eta_R \quad (17)$$

Desse modo, a partir da definição dos conceitos geométricos necessários para entender o rastreamento solar e, também, do mecanismo utilizado para efetuar o rastreamento, é possível, então, obter maior compreensão sobre o funcionamento do rastreamento solar nos coletores concentradores cilíndricos parabólicos. Na seção a seguir, serão discutidos os métodos numéricos e a base teórica necessária para compreender os procedimentos específicos

desenvolvidos na seção “Material e Métodos”.

3.1.4 Métodos analíticos e numéricos para estimar dados experimentais

Quando não há possibilidade de execução de experimentos para obter dados empíricos sobre um sistema, seja por falta de recursos financeiros, seja por dificuldades externas, são utilizadas as simulações computacionais, um recurso extremamente importante quando se trata de prever sistemas não caóticos. Aliadas aos métodos numéricos para solução de equações diferenciais, as simulações computacionais se fazem presentes na execução de grandes projetos, tais como no lançamento de foguetes, nas análises aerodinâmicas, e nas simulações de colisões de partículas.

Conforme observado, na natureza, diversas grandezas físicas estão em constante alteração, variando em função do tempo. Contudo, a compreensão dessas variações em relação ao tempo deu-se apenas a partir da publicação de *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*, onde foi concebido, por Newton (1999), o conceito das fluxões, hoje entendido como derivadas. Vale notar que, ao mesmo tempo em que Newton desenvolveu os conceitos de derivadas e integrais, Leibniz também os desenvolveu, em 1684, no seu artigo *Nova Methodus pro Maximis et Minimis*. As equações diferenciais descrevem igualdades entre derivadas e são extremamente úteis para determinar a evolução de sistemas complexos, lineares ou não-lineares.

Nesse sentido, foi realizado, por Gomes e Guedes (2010), o desenvolvimento de um concentrador solar cilíndrico-parabólico por tubo de cobre enegrecido sem invólucro para aquecimento de fluidos, utilizando uma abordagem analítica e simulações computacionais, confrontando, posteriormente, as estimativas com os dados experimentais. A partir do modelo analítico, calculou-se a mancha focal e, após, utilizando-se de métodos numéricos para resolução de equações diferenciais, calculou-se a variação da temperatura em função do tempo e a eficiência térmica do aparato.

Ademais, calculou-se, também, o balanço energético e comparou-se a perda de energia por irradiação e convecção. A partir da comparação entre dados numéricos e experimentais, concluiu-se que o modelo numérico fornece temperaturas 1,3 vezes maiores que as obtidas experimentalmente, sendo a convecção a principal forma de dissipação de calor no sistema, responsável por mais de 80% das perdas. Além disso, segundo os autores, a geometria cilíndrico-parabólica é muito eficaz na concentração de radiação solar.

Observou-se que envolver o tubo absorvedor com material transparente pode aumentar

a eficiência térmica, já que, assim, o contato direto do tubo com o ambiente externo seria evitado, minimizando os efeitos da dissipação de calor por convecção. Por fim, constatou-se que a inserção de outras variáveis nas equações diferenciais, como a variação do espectro devido à passagem de nuvens e gases e velocidade do vento, pode contribuir para o aumento na precisão dos resultados numéricos.

Analogamente, no trabalho de Ghodbane e Boumeddane (2016), sucedeu-se o estudo óptico e térmico de um concentrador cilíndrico parabólico no sudeste da Argélia, tendo a água como fluido absorvedor. A avaliação óptica foi realizada por meio do software de código aberto *SolTrace* e a avaliação térmica feita utilizando o método numérico das diferenças finitas implícitas para resolver um sistema de equações não-lineares que descrevem o sistema como um Problema de Valor de Contorno (PVC).

Por meio do software *SolTrace*, foi possível obter o valor da eficiência óptica da parábola concentradora. Para isso, foi levada em conta a radiação solar em cada momento, o ângulo de incidência da luz solar na parábola, as propriedades geométricas e ópticas da parábola e as do tubo absorvedor. Com relação ao estudo térmico, foi possível estimar a variação da temperatura de saída do fluido absorvedor, por meio de dados da irradiação direta normal (DNI) no local.

Todavia, a execução e compreensão dos algoritmos e equações que integram o método das diferenças finitas ou outros métodos numéricos exige um conhecimento avançado de Cálculo Integral e Diferencial, fugindo do escopo de cursos de Ensino Médio e ciclos básicos de cursos de graduação. Em função disso, é imprescindível encontrar formas para estimar a eficiência térmica do coletor sem fazer uso de ferramentas matemáticas extremamente complexas.

Dessa forma, uma alternativa viável para conhecer a eficiência térmica do coletor a ser analisado é utilizar dados experimentais colhidos por outros trabalhos acadêmicos semelhantes, a fim de obter um valor aproximado para a eficiência térmica. Assim, utilizou-se, nessa pesquisa, os dados meteorológicos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e os dados experimentais colhidos por Elson Avallone (2017) em sua tese de doutorado, intitulada “Estudo de um coletor solar, tipo tubo evacuado modificado, utilizando um concentrador cilíndrico parabólico (CPC)”.

A fim de obter as estimativas necessárias, alguns conceitos imperam sobre a análise dos dados fornecidos pelo INMET e por Avallone. O primeiro deles é a aproximação numérica para uma integral contínua no tempo, utilizando a soma de Riemann. Segundo o doutor em Matemática Aplicada, Hamilton Luiz Guidorizzi (2015) as integrais possuem diversas

aplicações, tanto na geometria, para calcular áreas e comprimentos de arco, quanto na física, para calcular o trabalho e outras grandezas.

Como aponta Guidorizzi (2015), a soma de Riemann consiste, geometricamente, em somar todas as áreas dos retângulos R definidos por um intervalo de abscissas Δx_i e uma ordenada $f(c_i)$ pertencentes, respectivamente, ao domínio da função f e à imagem da função f . Quanto menor forem os intervalos Δx_i , mais próximo o somatório será da integral de fato. A fim de compreender melhor esse método, a seguir será realizada sua dedução.

Primeiramente, segundo o autor, para compreender a soma supracitada, é necessário definir o que é uma partição de um intervalo. Seja P uma partição qualquer de um intervalo $[a, b]$, define-se essa partição como um conjunto finito, de modo que $P = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_n\}$. A partição $P = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_n\}$ de $[a, b]$ pode, então, ser denotada pela Equação 18.

$$P: a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b \quad (18)$$

Por consequência da definição, a partição P divide o intervalo $[a, b]$ em n intervalos $[x_{i-1}, x_i]$, onde $i = 1, 2, \dots, n$. A distância entre x_i e x_{i-1} , chamada de amplitude do intervalo $[x_{i-1}, x_i]$, é denotada por Δx_i , sendo $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$. Assim, com o conceito de partição e amplitude do intervalo definidos é possível, então, compreender a soma de Riemann.

Seja f uma função com domínio e imagem reais, definida em $[a, b]$ e seja $P: a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b$ uma partição qualquer em $[a, b]$. Ademais, para cada índice i pertencente aos naturais não-nulos, seja c_i um número arbitrário pertencente ao intervalo $[x_{i-1}, x_i]$. A partir dessas definições, pode-se escrever a soma de Riemann como o somatório apresentado na Equação 19.

$$\sum_{i=1}^n f(c_i) \Delta x_i \quad (19)$$

Vale notar que, se $f(c_i) > 0$, o produto $f(c_i)\Delta x_i$ pode ser interpretado geometricamente como a área de um retângulo R_i . Ademais, se $f(c_i) < 0$, então a área do retângulo R_i será negativa. Assim, uma interpretação geométrica cabível a esse somatório é que, numericamente, ele é igual à soma das áreas em módulo dos retângulos R_i acima do eixo Ox menos a soma das áreas em módulo dos retângulos R_i abaixo do eixo Ox , onde O é a origem.

Analogamente, a discretização do domínio de uma função é, também, um conceito

extremamente útil para resolver problemas que envolvem equações diferenciais. Isso se dá, pois, como apontam Asano e Colli (2009), o fundamento para solucionar as equações do tipo $\frac{dx}{dt} = f(x, t)$ é a discretização da variável t .

Ainda segundo os autores, seja $[a, b]$ um intervalo da função onde se queira encontrar a solução $x(t)$ para a equação apresentada acima, para discretizá-lo em relação a t , basta dividir o intervalo em uma partição P_2 , conforme feito anteriormente. Contudo, diferentemente das partições utilizadas para deduzir a soma de Riemman, para discretizar um intervalo, é preciso que as diferenças entre os pontos sucessivos da partição sejam iguais a um passo h pertencente aos reais, como exibido nas Equações 20 e 21.

$$P_2: a = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n = b \quad (20)$$

$$\Delta t_i = (x_i - x_{i-1}) = h \quad (21)$$

Desse modo, dada a definição de todos os conceitos e a exposição das bases bibliográficas, essenciais para compreender o desenvolvimento dos procedimentos específicos deste TCC e seus respectivos resultados, é possível, então, prosseguir para a seção “Material e Métodos”.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

No desenvolvimento deste trabalho, foi projetado e avaliado um coletor solar concentrador cilíndrico parabólico dotado de rastreamento solar automático. Foi desenvolvido, também, um sistema de sensoriamento para o microcontrolador ESP32 e uma aplicação web para a visualização e armazenamento dos dados sensoriais.

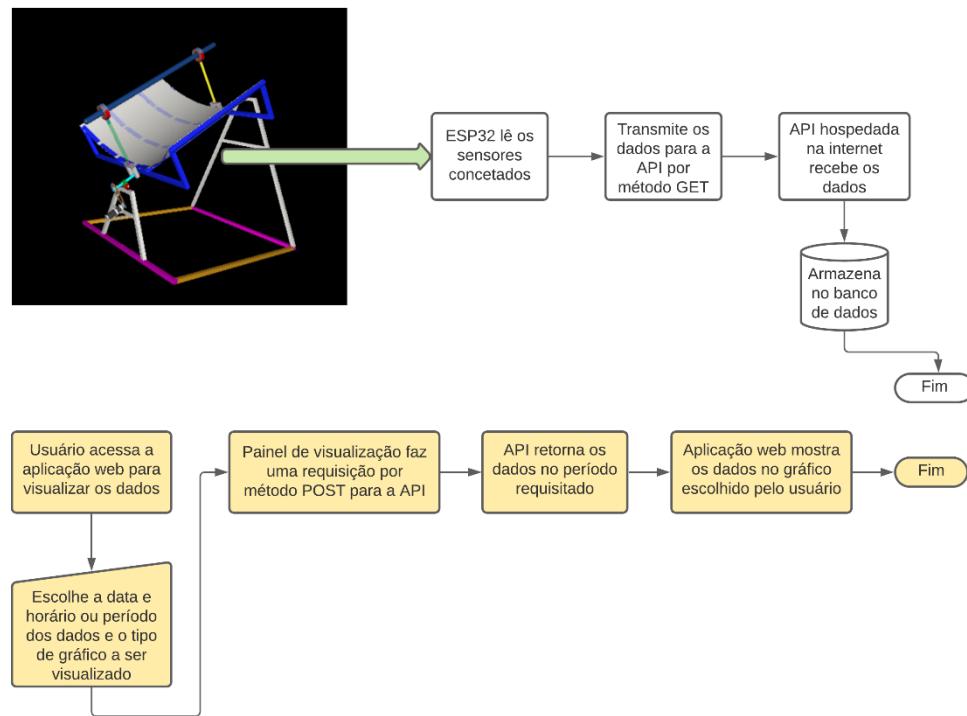
Nesta seção, serão abordados, detalhadamente, o objeto de estudo do trabalho, os materiais e métodos utilizados para projetar o concentrador e os sistemas eletrônicos, além dos materiais e métodos utilizados para a avaliar o funcionamento do concentrador. A partir da apresentação da metodologia adotada, serão introduzidos os resultados obtidos com ela e, posteriormente, será realizada a interpretação desses resultados.

3.2.1 Objeto de estudo

Neste trabalho, projetou-se um coletor solar concentrador de geometria cilíndrico parabólica por tubo evacuado, sendo utilizada a água como fluido absorvedor. Seu funcionamento foi analisado por meio de métodos computacionais para estudar e discutir a eficiência do sistema. Ademais, implementou-se um sistema de rastreamento solar monoaxial no concentrador projetado, a fim de melhorar sua eficiência energética.

Utilizando-se o microcontrolador ESP32 acoplado ao concentrador, foi projetado e implementado, também, o código de controle do motor e do rastreamento solar e um sistema de leitura de sensores e envio de dados para uma API hospedada na internet. Além disso, foi desenvolvido um painel de visualização hospedado na internet, que consulta os valores enviados pela API e os exibe em um gráfico, permitindo uma análise periódica dos dados de temperatura, irradiação, vazão ou outras grandezas, como é exibido no diagrama da Figura 13.

Figura 13 - Esquema simplificado da obtenção, envio e visualização de dados



Fonte: Autoria própria

3.2.2 Delineamento

Neste trabalho, desenvolveu-se uma pesquisa quantitativa, de natureza aplicada, com objetivos exploratórios e descritivos, utilizando-se procedimentos bibliográficos que corroboraram para a evidência dos dados obtidos durante o estudo. Durante a condução desta

pesquisa, foram utilizados os dados meteorológicos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e os dados experimentais obtidos na tese de Avallone (2017).

Ademais, os dados fornecidos pelo INMET foram obtidos das 12h00 às 18h00 no Coordinated Universal Time (UTC), ou seja, das 9h00 às 15h00, no horário de Brasília, nos dias 6 e 7 de novembro de 2020, com resolução de hora a hora, contendo informações sobre a temperatura ambiente, radiação global e velocidade do vento na estação meteorológica automática de Ariranha, município com dados consistentes mais próximo de Catanduva.

A transferência virtual da estrutura do trabalho para Ariranha se deve ao fato de o município de Catanduva não possuir estações meteorológicas automáticas do INMET, isto é, os dados são coletados manualmente e sem a precisão e a resolução adequadas para a posterior análise neste trabalho. Em função disso, optou-se pelos dados do município de Ariranha, geograficamente próximo de Catanduva, possuindo condições climáticas semelhantes e, sobretudo, dados consistentes e coletados com a resolução suficiente, obtidos por uma estação meteorológica automática do INMET no município.

Os dados de radiação global, em $\frac{kJ}{m^2}$, fornecidos pelo INMET para a cidade de Ariranha consistem em uma integral no período de uma hora dos dados de irradiação lidos de minuto a minuto pela estação automática, como estabelecido na nota técnica nº 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET (2011). Contudo, os limites de integração não são definidos na nota, havendo a necessidade de consultar as autoridades cabíveis para obter a informação.

A partir de uma consulta de Acesso à Informação, realizada na plataforma Fala.BR, o Serviço de Informação ao Cidadão – SIC/Ouvidoria/MAPA esclareceu que, para cada registro horário em uma determinada hora x dos dados meteorológicos do INMET, o limite de integração inferior é o primeiro minuto da hora anterior a x e o de integração superior é exatamente a hora x . Assim, a radiação global fornecida para as 12:00 UTC de um dia é dada pela expressão abaixo, em que $I(t)$ é a irradiação em função do tempo em minutos.

$$\int_{11:01}^{12:00} I(t)dt$$

No que tange aos dados fornecidos pelo trabalho de Avallone (2017), eles foram obtidos das 07:35 às 20:16 do dia 21 de fevereiro de 2017, com resolução de minuto a minuto, contendo informações sobre a temperatura ambiente, irradiação, temperatura de entrada e saída da água

fria e quente no tubo coletor e velocidade do vento nas coordenadas 22°21'29.2"S e 49°04'26.2"O, na cidade de Bauru.

Ademais, as temperaturas medidas no trabalho supracitado foram obtidas utilizando sensores Dallas DS18B20 acoplados ao tubo absorvedor, enquanto a velocidade do vento foi determinada por meio de um anemômetro de conchas, baseado no trabalho de Palota et al. (2019). A irradiação, por sua vez, foi medida utilizando-se um radiômetro construído por Avallone (2017).

Diferentemente do material do INMET, os dados de Avallone (2017) são instantâneos e, portanto, a fim de compará-los com os dados do INMET para utilizar os métodos que serão dispostos a seguir, a irradiação foi integralizada numericamente, por meio da soma de Riemman exposta na Equação 19, nos mesmos períodos de uma hora compreendidos pelos dados do INMET. Desse modo, os dados de irradiação de minuto a minuto das 11:01 às 11:59 foram integralizados para compor a radiação referente às 12:00.

A fim de obter-se uma estimativa da eficiência térmica do coletor concentrador, foi realizada uma comparação entre os dados fornecidos pelo INMET e Avallone (2017). Além disso, o cálculo do rendimento óptico foi feito utilizando-se o método analítico proposto por Kalogirou (2014). Por fim, foi realizada, também, uma simulação óptica da reflexão dos raios no coletor, utilizando-se o *software* de código aberto *Tonatiuh*. A análise dos dados e os métodos aplicados sobre eles e demais procedimentos realizados serão detalhados posteriormente na seção “Procedimentos Específicos”.

3.2.3 Procedimentos específicos

Nesta seção, serão abordados e detalhados todos os processos realizados para projetar a estrutura mecânica do concentrador, programar e simular seus componentes elétricos e programáveis, estimar sua eficiência térmica, calcular seu rendimento óptico e obter uma intuição geométrica sobre a reflexão dos raios no tubo coletor. Devido ao grande número de assuntos a serem abordados e a complexidade agregada a eles, os procedimentos específicos foram partionados em 4 subseções, cada uma tratando de um assunto específico.

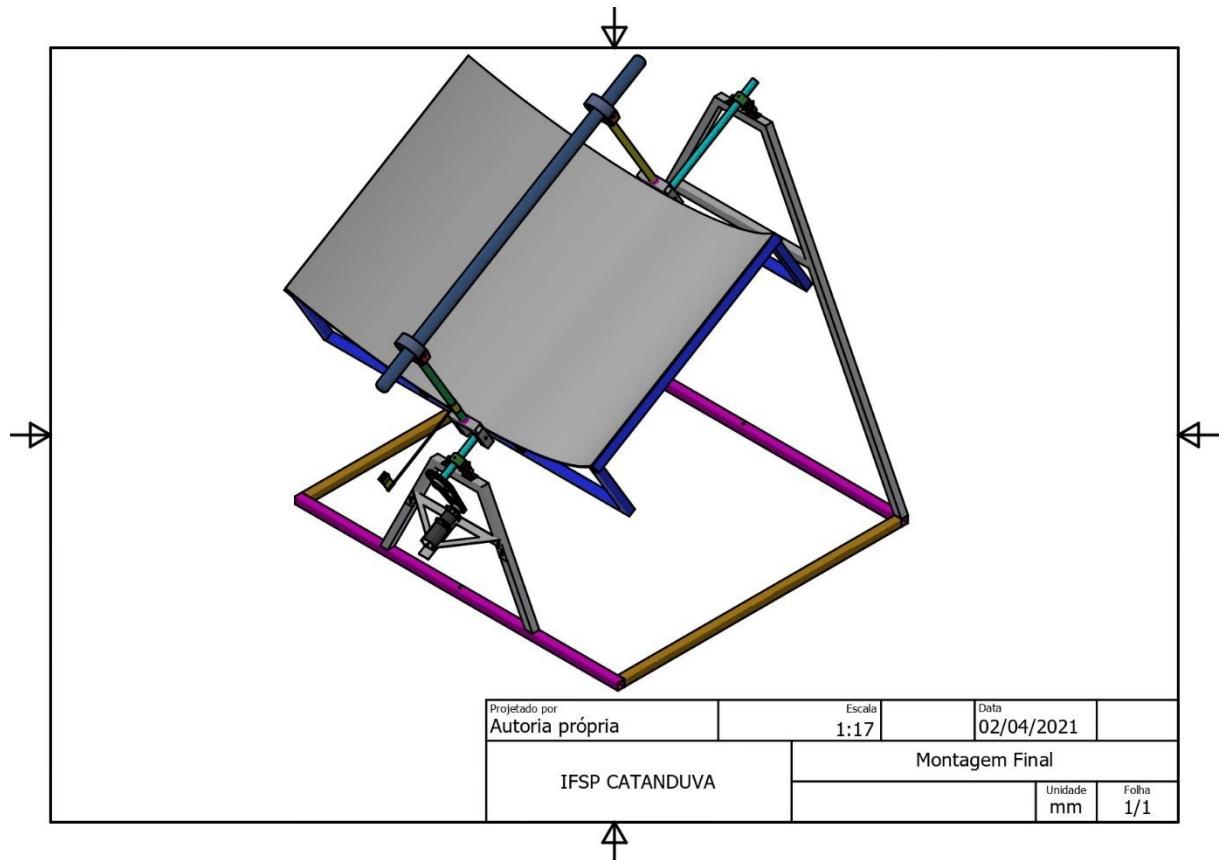
3.2.3.1 Projeto mecânico do concentrador cilíndrico-parabólico com rastreamento solar automático

Para projetar a estrutura mecânica, foi utilizado o *software Autodesk Inventor*, tendo em

vista que, no programa, é possível projetar modelos tridimensionais de peças, confeccionar seus respectivos desenhos técnicos e, depois, uni-las em uma única montagem. Assim, logo após a definição do software, foi realizada a modelagem individual de cada peça e a confecção de seus respectivos desenhos técnicos. Ao final, foi feita a montagem da estrutura em seu todo. A montagem total da estrutura e seus componentes, ilustrada na Figura 14, foi criada utilizando-se as várias peças projetadas previamente, que estão expostas no Apêndice desta pesquisa.

As peças construídas, assim como os códigos desenvolvidos ao longo da pesquisa foram hospedados pelos autores deste trabalho em um repositório² reservado a este Trabalho de Conclusão de Curso na plataforma GitHub, sob licença de código aberto.

Figura 14 - Montagem total da estrutura do concentrador

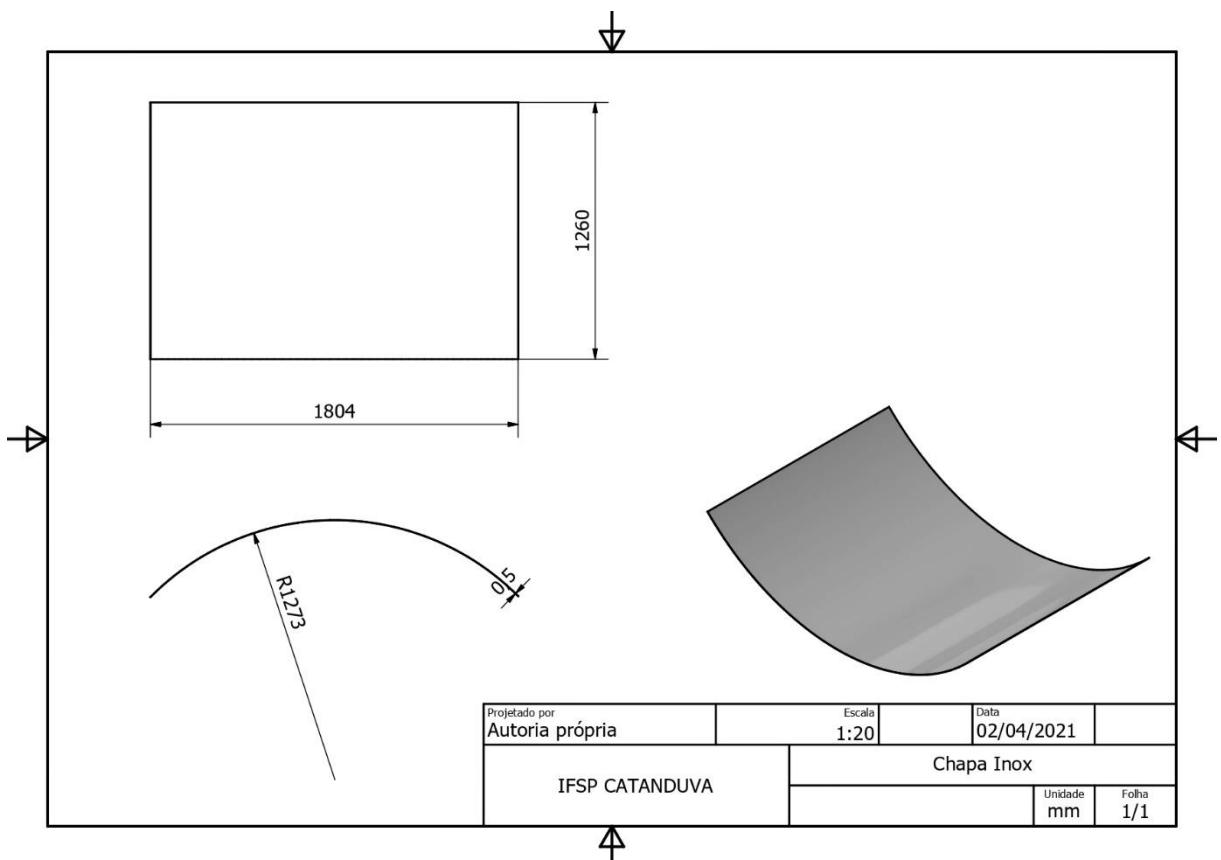


Fonte: Autoria própria

A parábola concentradora acoplada na estrutura utilizada neste trabalho, feita de uma chapa de aço inox 430, podendo ser visualizada na Figura 15. As especificações técnicas, como área de abertura, espessura e distância focal, podem ser observadas na Tabela 5.

² O link do repositório está disponível nas referências bibliográficas para eventual consulta.

Figura 15 - Desenho técnico mecânico da parábola



Fonte: Autoria própria

Tabela 5 - Principais características da parábola

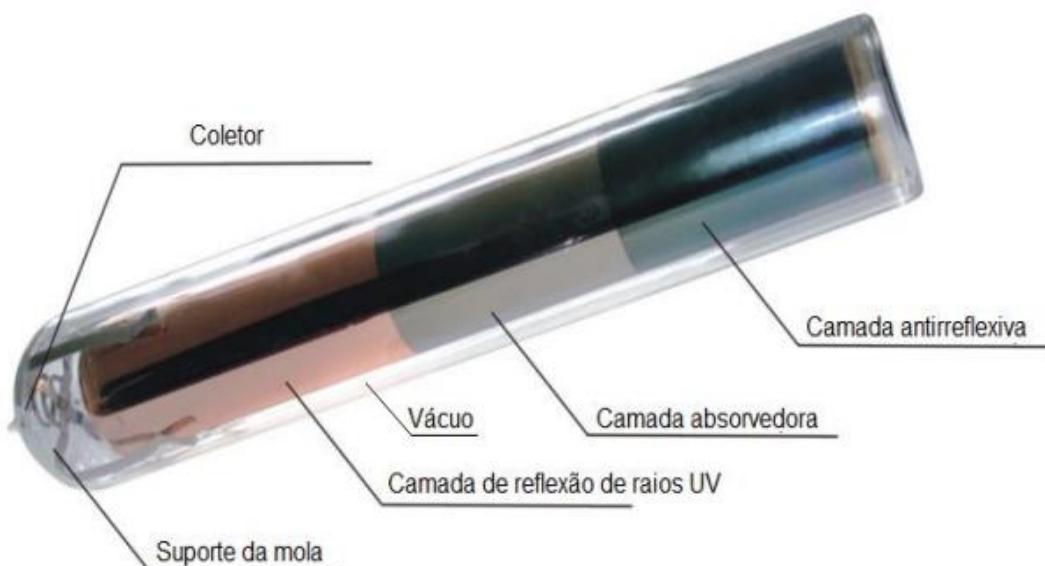
Parâmetros	Dimensões
Material do espelho	Chapa aço inox 430
Espessura da chapa	0,5 mm
Largura da abertura	1200 mm
Comprimento da abertura	1804 mm
Área de abertura	2,165 m ²
Distância focal	636,5 mm
Comprimento focal	1200 mm

Fonte: Natividade (2017)

O coletor utilizado no foco da parábola, que será responsável por absorver a energia solar, é composto de dois tubos concêntricos altamente rígidos de borosilicato 3,3 vedados a vácuo. O tubo interno possui, em sua parte interior, três elementos que melhoram o aproveitamento da energia incidente. Do elemento mais externo ao mais interno, são eles: uma camada tratada com material escuro e antirreflexivo, uma absorvedora de calor e, por fim, uma

terceira camada com a finalidade de refletir raios ultravioletas. As camadas citadas e outros elementos do coletor podem ser visualizados na Figura 16.

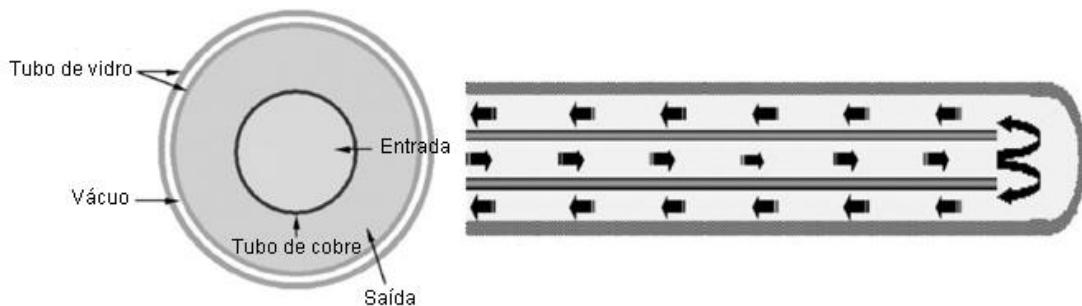
Figura 16 - Tubo coletor utilizado na pesquisa



Fonte: Natividade (2017)

A fim de separar os fluxos de água que entram e saem do coletor, foi realizada uma modificação em sua estrutura. Assim como no trabalho de Avallone (2013), foi inserida uma sonda de cobre (tubo). A partir dessa modificação, os fluxos de água fria, na entrada, e de água quente, na saída, foram separados, inibindo a sua mistura e, consequentemente, melhorando o aproveitamento energético do trocador de calor. A instalação do tubo e o diagrama de fluxos podem ser vistos na Figura 17 e as suas especificações técnicas na Tabela 6.

Figura 17 - Instalação do tubo central de cobre



Fonte: Avallone (2013)

Tabela 6 - Dimensões do tubo interno de cobre

Parâmetros	Dimensões
Diâmetro externo	15 mm
Espessura da parede	0,5 mm
Comprimento	2000 mm

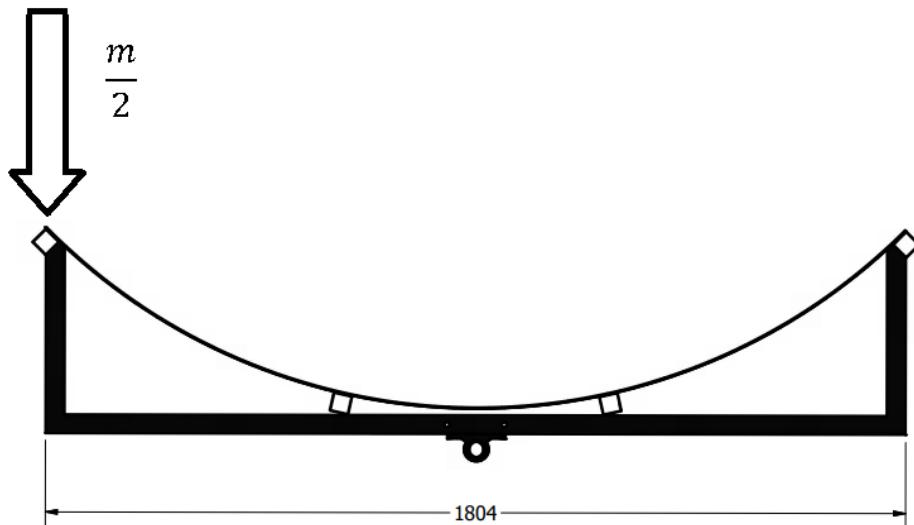
Fonte: Natividade (2017)

Para selecionar o modelo do motor a ser utilizado no rastreamento solar, foi realizado o cálculo superdimensionado do torque, necessário para mover o eixo da parábola, utilizando-se a Equação 16, inserida na seção 3.1.3, de Walker, Resnick e Halliday (2014), com unidade de força em quilograma-força e raio em centímetros. A Equação 16.1 é uma adaptação da Equação 16, considerando-se o superdimensionamento do torque.

Como o dimensionamento de sistemas com distribuição de massa irregular requer ferramentas matemáticas avançadas, fugindo do conteúdo programático do Ensino Médio, assumiu-se que, na máxima extremidade da estrutura, ou seja, em seu raio máximo (r_{giro}), há a metade da massa total (m), como ilustra a Figura 18. Desse modo, o dimensionamento do motor torna-se possível utilizando os conceitos de Física do Ensino Médio.

Vale notar que a massa total da estrutura a ser movimentada foi estimada utilizando-se uma funcionalidade própria do software *Autodesk Inventor* e, portanto, está sujeita a uma pequena margem de erro quando comparada à realidade. Contudo, levando-se em conta que o torque foi superdimensionado, o erro na massa da estrutura móvel pode ser desprezado. Na Equação 16.1, o símbolo W_a representa o comprimento horizontal do perfil da parábola, isto é, a distância horizontal entre suas duas extremidades.

Figura 18 - Esquema da distribuição de massa para o cálculo do torque



Fonte: Autoria própria

$$T = \frac{m}{2} \cdot \frac{W_a}{2} \quad (16.1)$$

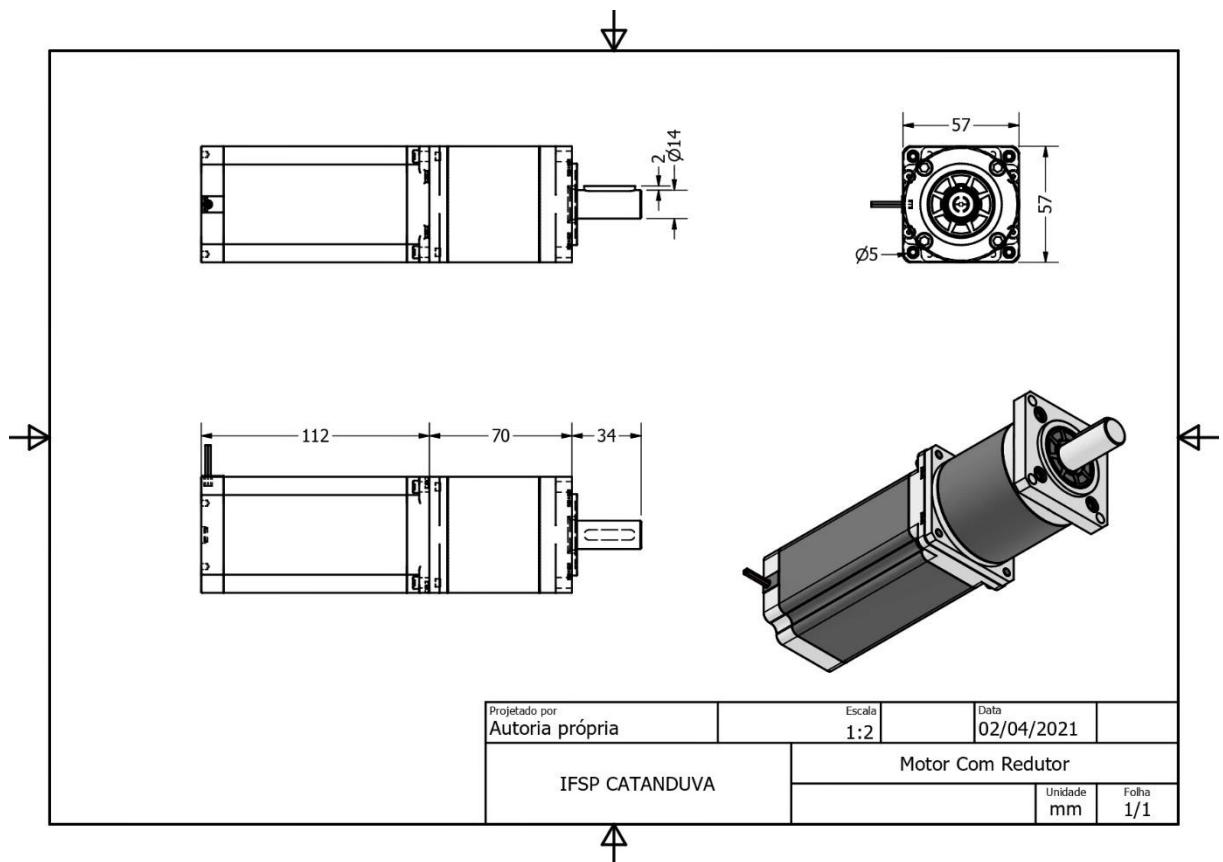
$$T = \frac{58,61}{2} \cdot \frac{180,4}{2}$$

$$T = 2643,311 \text{ kgf.cm}$$

Dessa forma, após a realização do cálculo superdimensionado do torque, optou-se pelo motor de passo NEMA 23, que possui torque de 30 kgf.cm e um passo de 1.8° . O motor foi escolhido por conta de seu baixo custo e sua facilidade de controle.

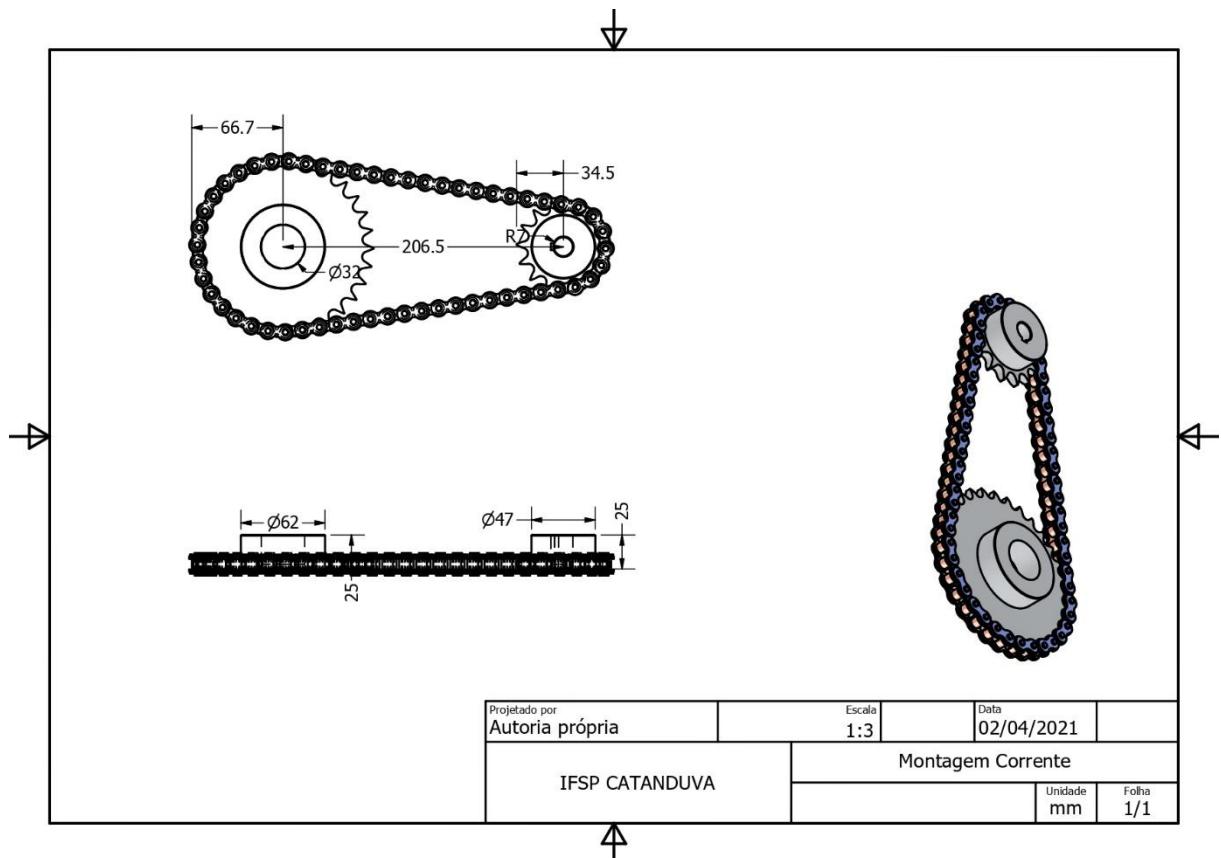
A fim de suprir o torque necessário para mover a estrutura, implementou-se um redutor planetário com redução de 1:50 no eixo do motor, exposto na Figura 19. A transmissão de torque foi feita por meio de duas engrenagens e uma corrente. A engrenagem utilizada no eixo do motor possui 15 dentes com diâmetro de 69 mm e a utilizada no eixo da estrutura possui 31 dentes com diâmetro de $133,4 \text{ mm}$, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 19 - Desenho técnico mecânico do redutor planetário acoplado ao motor de passo



Fonte: Autoria própria

Figura 20 - Desenho técnico mecânico da montagem da corrente e engrenagens



Fonte: Autoria própria

Para calcular o torque na saída do motor, é necessário levar em conta a eficiência do conjunto redutor (η_R), ou seja, redutor planetário e corrente. A eficiência do redutor planetário (η_{rp}) é de 90%, possuindo 5 estágios de redução. Para os cálculos, assumiu-se que a eficiência da corrente (η_c) possui o maior valor possível, de 98%. Assim, multiplicando-se as duas eficiências, obtém-se a eficiência do conjunto redutor, como demonstra a Equação 22.

$$\eta_R = \eta_{rp} \cdot \eta_c \quad (22)$$

$$\eta_R = 0,90 \cdot 0,98 = 0,882$$

Após determinar a eficiência do conjunto redutor, é possível, então, calcular o torque na saída da transmissão (T_s), em $N \cdot m$. Para isso, foi utilizada a Equação 17, de Guido Ramalho (2018), em que i é a relação de transmissão (adimensional), T_e o torque do motor, em $N \cdot m$, como evidenciado pela Equação 22.

$$T_s = T_e \cdot i \cdot \eta_R \quad (17)$$

$$T_s = 2,942 \cdot 103,333 \cdot 0,882 \quad (17.1)$$

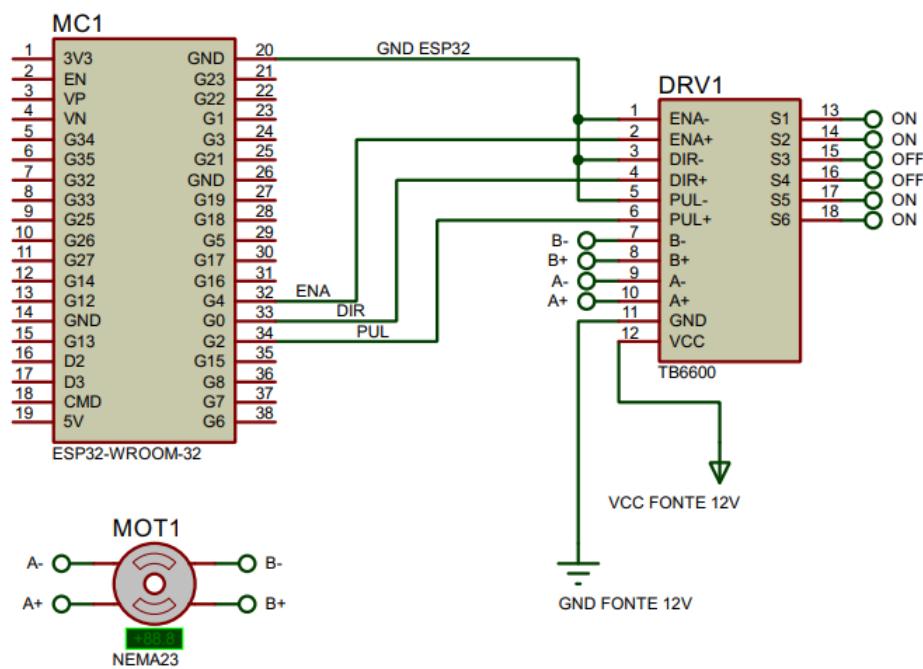
$$T_s = 268,133 \text{ Nm}$$

$$T_s = 2734,196 \text{ kgf.cm}$$

Para controlar o motor NEMA 23 por meio de impulsos elétricos enviados pelo microcontrolador ESP32, foi utilizado o driver WD-TB6600, com corrente máxima de 4 A. A seleção de micropassos do driver foi configurada como 1, ou seja, para cada impulso enviado pelo ESP32, será dado 1 passo completo no eixo do motor. Ademais, a saída de corrente do motor foi configurada para 2,5 A, já que o motor possui corrente máxima de 3 A. O driver foi alimentado por uma fonte de corrente contínua genérica de 12 Volts.

Para cada passo dado, a parábola realizará um movimento angular de 1,8º, representando uma precisão considerável para o rastreamento solar. A configuração do driver e sua ligação ao motor e ao ESP32 podem ser visualizadas no diagrama elétrico da Figura 21. Nela, a sigla “MC” significa “microcontrolador”, “DRV” significa “driver” e “MOT” significa “motor”.

Figura 21 - Ligação do motor ao driver e microcontrolador

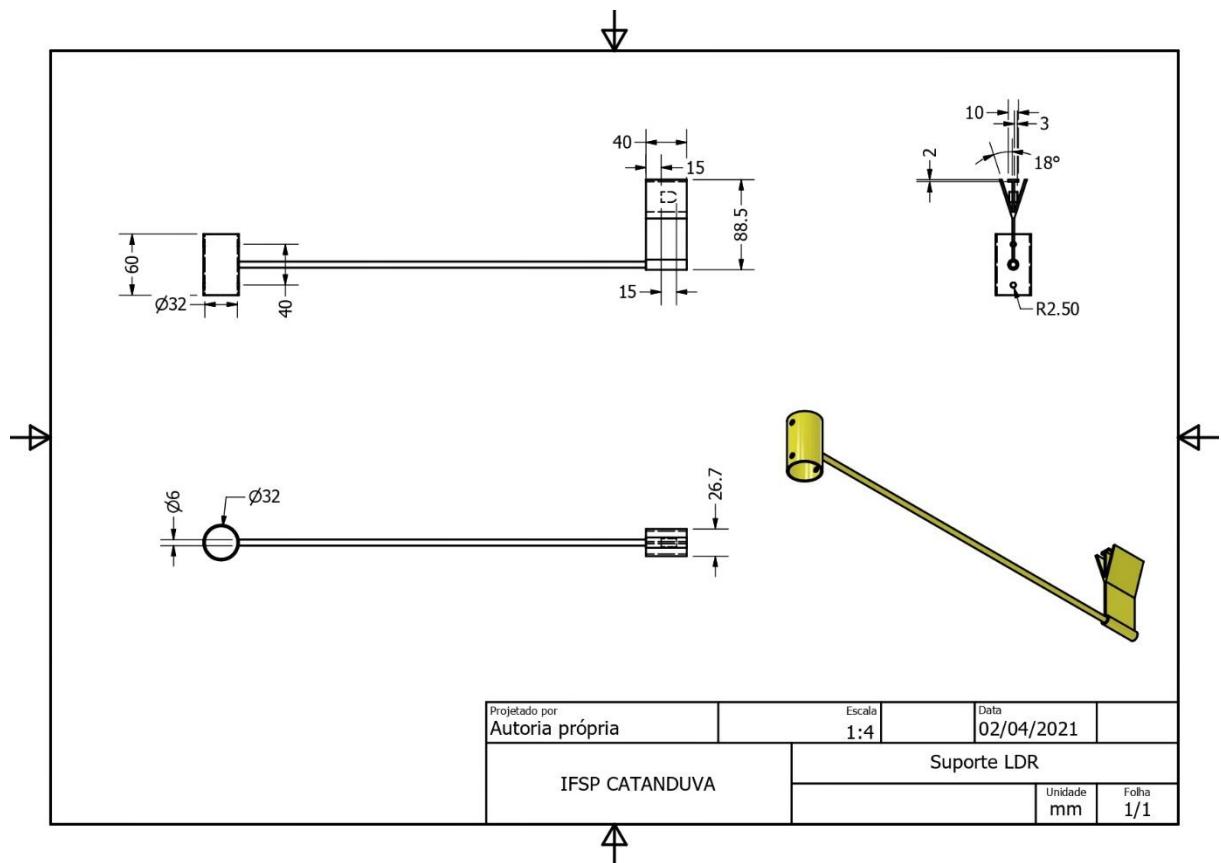


Fonte: Autoria própria

Para tornar o rastreamento solar possível, foi construído um suporte para dois sensores de luminosidade *Light Dependent Resistor* (LDR) que irão medir a incidência de luz solar, em conformidade ao trabalho de Gama et al. (2013). Quando a luz chega no LDR, sua resistência é alterada, provocando uma alteração no potencial de seus terminais.

O suporte foi construído de acordo com o projeto de Gama et al. (2013), a fim de detectar a posição do sol com base na diferença de potencial entre os dois sensores LDR. Algumas alterações foram realizadas no suporte de Gama et al. (2013) para fixá-lo na estrutura do concentrador projetado nesta pesquisa, como pode ser observado no desenho técnico da Figura 22.

Figura 22 - Desenho técnico mecânico do suporte para os LDR



Fonte: Autoria própria

O funcionamento do suporte e dos dois sensores acoplados nele, bem como o algoritmo utilizado para o rastreamento solar e controle do motor serão abordados na próxima subseção, juntamente ao funcionamento de todos os sistemas eletrônicos programados projetados para automatizar o concentrador.

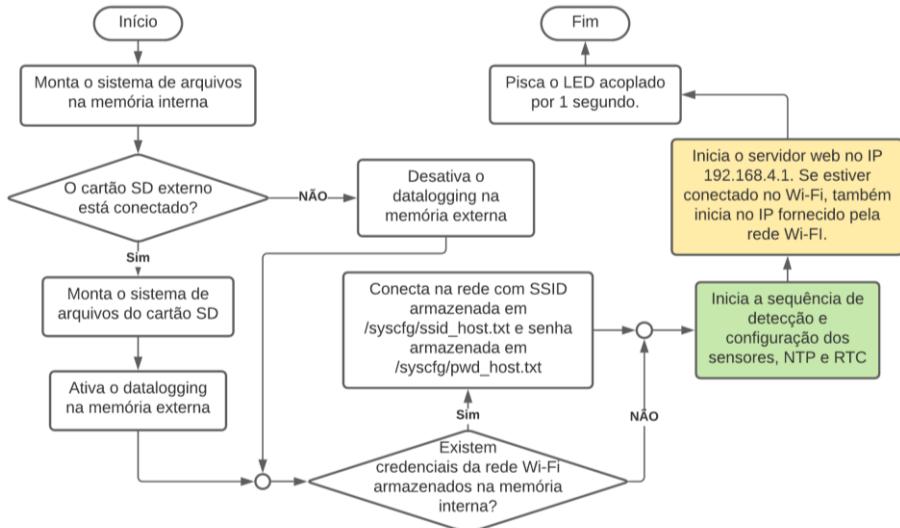
3.2.3.2 Sistemas eletrônicos programados: reporte de dados para a internet, interface web, esquema elétrico e implementação do rastreamento solar

O modelo do microcontrolador utilizado para servir o painel web de configuração, controlar o motor e sensores do concentrador e enviar os dados para a *Application Programming Interface* (API) no servidor remoto foi o ESP32 WROOM-32, com 2 núcleos de processamento. Foi escrito um código em *Wiring*, a linguagem Arduino, utilizando-se bibliotecas de código aberto para o controle dos periféricos e, também, aplicando-se o projeto de sistema operacional em tempo real *FreeRTOS*. O código desenvolvido para o microcontrolador está hospedado, sob licença de código aberto, no diretório “/esp32” do repositório no GitHub, plataforma de hospedagem de código-fonte e arquivos.

O microcontrolador começa sua sequência de inicialização do sistema e configuração quando submetido à energia elétrica. Conforme exposto no fluxograma da Figura 23, inicialmente é montado o sistema de arquivos na memória interna do microcontrolador e, posteriormente, é verificado se existe um cartão de memória externo conectado a ele. Se o cartão estiver conectado, além de enviar os dados coletados dos sensores para o servidor remoto na internet, o sistema também fará uma cópia desses dados na memória externa, ou seja, no cartão de memória.

Em seguida, o ESP32 verifica se existem credenciais de rede Wi-Fi armazenadas na memória interna, buscando a SSID da rede no arquivo “/syscfg/ssid_host.txt” e a senha da rede em “/syscfg/ssid_pwd.txt”. Caso as credenciais estejam salvas nos arquivos citados, o sistema tentará efetuar a conexão à rede Wi-Fi. Independentemente do sucesso da conexão, o sistema inicia a detecção e configuração dos sensores acoplados e, em seguida, inicia o servidor web assíncrono no endereço de Protocolo de Internet (IP) 192.168.4.1 da rede interna do ESP32. Caso haja conexão com a rede Wireless local, o sistema inicia também o servidor web no IP fornecido pela rede.

Figura 23 - Fluxograma da sequência de inicialização do sistema do ESP



Fonte: Autoria própria

Vale ressaltar que, tanto o servidor web assíncrono, quanto os procedimentos de detecção e configuração dos sensores acoplados são considerados tarefas de execução paralela, ou seja, não dependem de uma sequência de execução do código e, portanto, operam de maneira independente do restante do código. Por conta disso, essas tarefas recebem uma coloração na Figura 23 para diferenciá-las de tarefas ordinárias que seguem uma sequência de execução. Nos diagramas posteriores, a coloração também denotará tarefas executadas em paralelo.

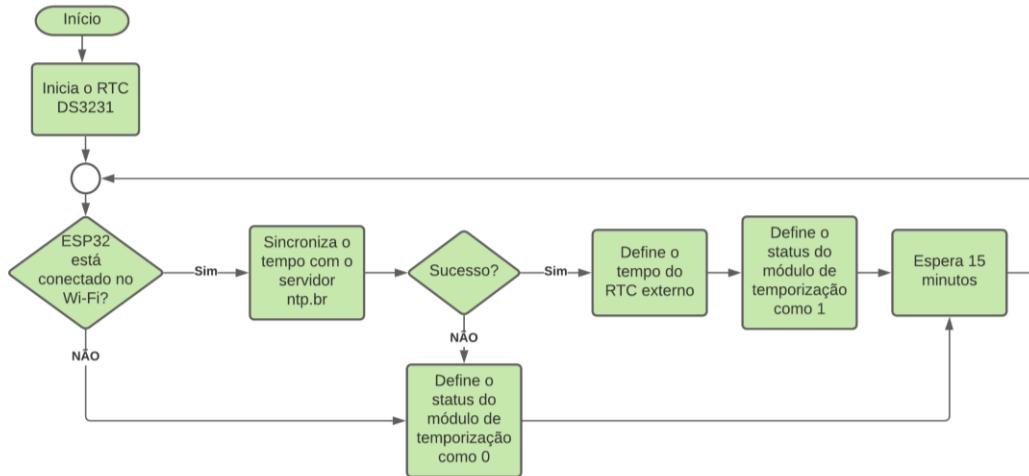
Após realizada a sequência de inicialização, o ESP32 procura, utilizando o protocolo de comunicação *I-Wire*, a existência de sensores de temperatura Dallas DS18B20 conectados e, em seguida, realiza a configuração de suas resoluções. Após a detecção dos sensores Dallas DS18B20, o sistema define as variáveis e inicia os algoritmos de medição do sensor de vazão YF-S401, do anemômetro e do piranômetro, além do sistema de controle do motor NEMA 23, por intermédio do *driver* TB6600.

Ao mesmo tempo em que os periféricos são configurados e inicializados, é iniciado, também, o módulo de temporização do código, que irá tentar estabelecer conexão ao servidor ntp.br, por meio do Protocolo de Tempo para Redes (NTP), para receber a data e horário atual, no formato *Epoch* (ou *timestamp* UNIX), ou seja, segundos desde 1 de janeiro de 1970.

Ademais, o módulo de temporização também é responsável por inicializar e configurar o Relógio de Tempo Real (RTC) DS3231 acoplado ao ESP32, pela interface *I²C*. O RTC DS3231 é um contador de tempo preciso e confiável, com a funcionalidade de armazenar o tempo obtido do servidor ntp.br e manter a contagem, mesmo quando não há alimentação externa de energia elétrica, já que ele possui uma bateria interna.

Contudo, caso o RTC não seja inicializado por falha técnica, o sistema irá sincronizar o horário com o servidor ntp.br a cada 15 minutos e mantê-lo na memória enquanto houver energia elétrica sendo fornecida. Ao ser desligado, o ESP32 perde as informações de horário, mas assim que for ligado novamente, ele efetuará a sincronização mais uma vez, contanto que haja conexão com a rede Wi-Fi. O sistema de temporização é exposto no fluxograma da Figura 24.

Figura 24 - Fluxograma do sistema de temporização programado no ESP32



Fonte: Autoria própria

Caso o ESP32 não esteja conectado na rede Wi-Fi, as funções que envolvem a sincronização de horário com o servidor ntp.br e o envio de dados ao servidor remoto são desabilitadas até que seja estabelecida a conexão novamente.

A coleta dos dados é feita periodicamente, de minuto a minuto, e os valores lidos de temperatura, vazão, velocidade do vento e luminosidade são armazenados na memória temporária do microcontrolador. Paralelamente, a cada minuto, o sistema verifica se há conexão com a internet, se a sincronização de tempo está funcionando e se o servidor da API está disponível. A partir disso, se as condições anteriores forem atendidas, o ESP32 faz uma requisição por método GET, enviando, nos parâmetros, os dados lidos e uma chave mestra para a autenticação.

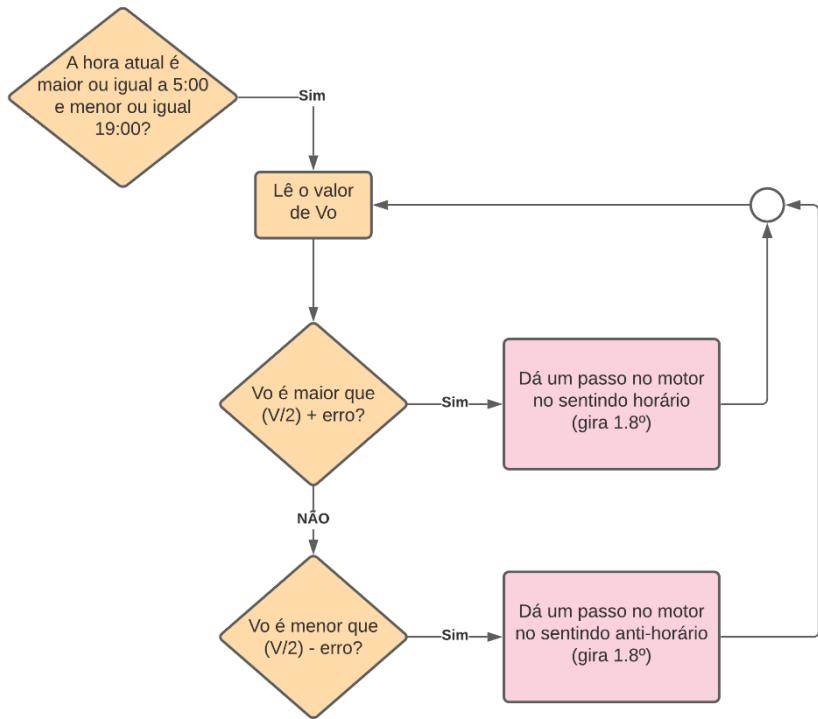
Todavia, se alguma das condições apresentadas não for atendida, os dados lidos são armazenados temporariamente em um arquivo na memória não-volátil interna do microcontrolador, no diretório “/stack”, sendo o nome do arquivo o *timestamp* UNIX do momento em que os dados foram lidos. Quando o erro for solucionado e as condições anteriores

passarem a ser atendidas, o sistema enviará para a API, automaticamente, todos os dados que foram mantidos temporariamente.

Ademais, todos os dados lidos, independentemente das condições, serão armazenados no cartão de memória externo, caso ele esteja conectado. Os arquivos são salvos no diretório “/data” dentro do cartão, que deve estar formatado no sistema de arquivos FAT32. Assim como os arquivos citados anteriormente, o nome de cada arquivo salvo na memória externa é o respectivo *timestamp* UNIX em que os dados passaram pelo processo de envio. Dentro de cada arquivo, os valores dos sensores são inseridos na forma de parâmetros a serem enviados à API.

O rastreamento solar é executado por uma tarefa assíncrona, iniciada junto ao sistema, operando enquanto o horário estiver sincronizado. Como exibido no fluxograma da Figura 25, o sistema verifica se a hora atual, no horário de Brasília, é maior ou igual a 5h00 e menor ou igual a 19h00, com a finalidade de poupar o trabalho do motor enquanto não há luminosidade solar.

Figura 25 - Fluxograma do algoritmo de rastreamento solar

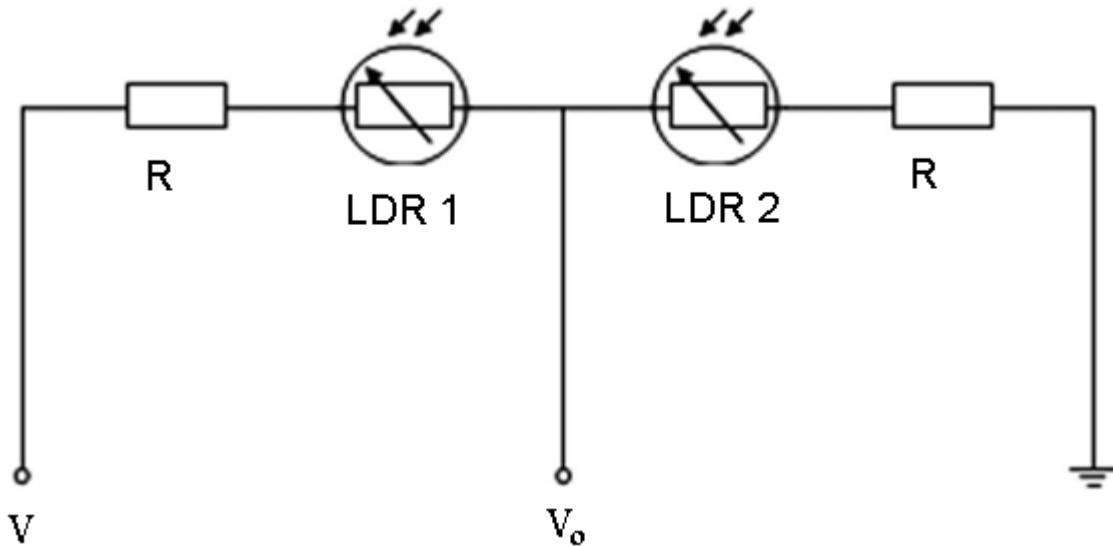


Fonte: Autoria própria

Caso o horário esteja sincronizado e a condição para a hora atual for atendida, o sistema irá ler a diferença de potencial V_o no sistema de LDR, como mostra a Figura 26. Como a

medição pode conter erros, assumiu-se um erro fixo na medição, chamado de $erro = 0.03$. A partir disso, se o valor lido para V_o for maior que $3.3 V + erro$, será dado um passo no motor em sentido horário. Se o valor for menor que $3.3 V - erro$, então será dado um passo em sentido anti-horário. Após realizado o passo, o programa reinicia novamente, lendo V_o .

Figura 26 - Diagrama elétrico do sistema de controle do rastreador solar

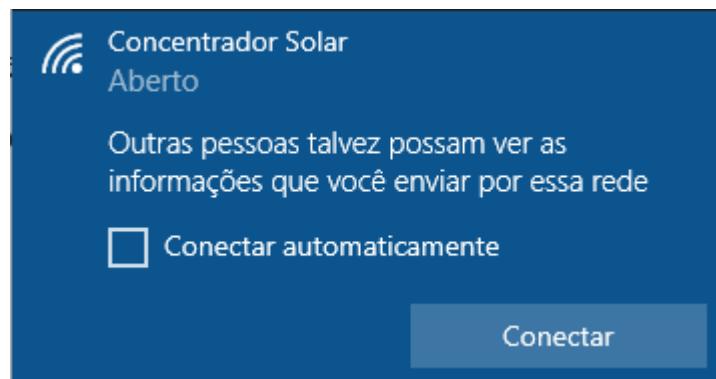


Fonte: Gama et al. (2013)

Além disso, o sistema programado para o ESP32 possui uma página de configuração servida localmente, na qual o usuário pode visualizar o status dos sensores e definir alguns ajustes do sistema, tais como a rede Wi-Fi em que ele irá conectar, o servidor NTP que será usado para sincronizar a hora, e o intervalo de sincronização da hora. O usuário pode acessar a página no endereço IP 192.168.4.1 por meio de um ponto de acesso Wi-Fi, criado quando o ESP32 é ligado ou, caso o sistema já tenha sido configurado, pelo endereço IP fornecido pela rede ao ESP32.

Para realizar qualquer alteração nos ajustes do sistema, o usuário deve inserir uma chave mestra, definida no código. Se a chave estiver correta, as alterações serão feitas. Na Figura 27, é exibido o ponto de acesso criado pelo ESP32, visualizado na interface do Windows 10. Na Figura 28, é ilustrado o painel de configuração servido pelo microcontrolador e, na Figura 29, pode-se observar a interface para definir a rede Wi-Fi em que o sistema irá se conectar.

Figura 27 - Ponto de acesso criado pelo ESP32 visualizado no Windows 10



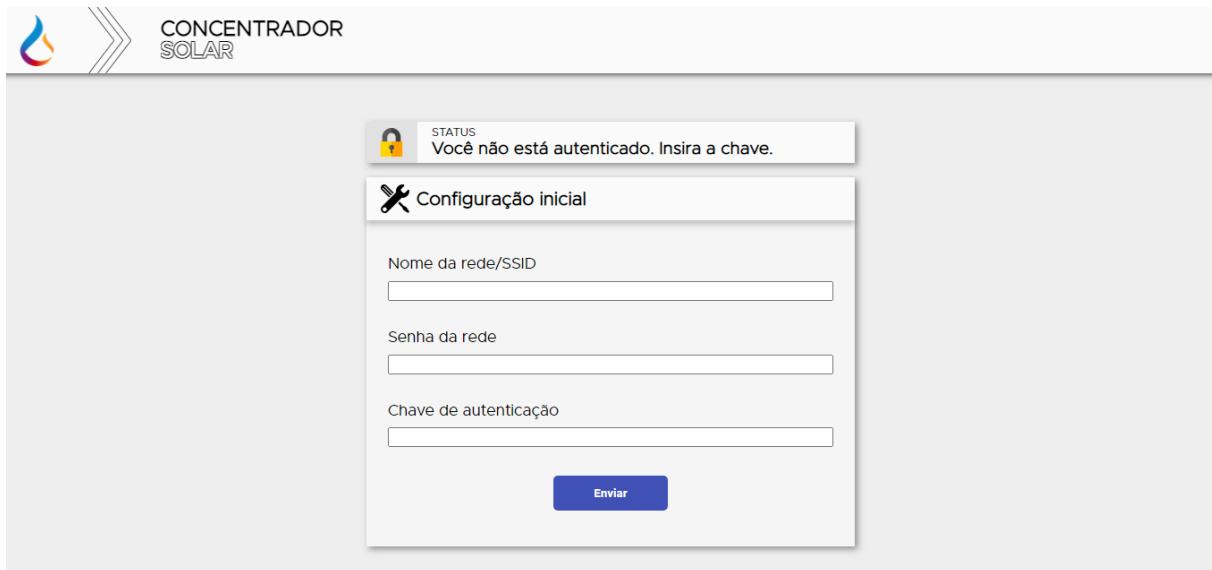
Fonte: Autoria própria

Figura 28 - Dashboard servido pelo ESP32

Rede local e sistemas Remotos		Configurações	
Rede Wireless Conectado	IPV4 da rede local 192.168.1.113	Configurações de rede Escolher a rede Wireless e o servidor NTP	
Servidor NTP Online	Database remoto Offline	Configurações geográficas Latitude, longitude e fuso horário do concentrador	
 		Configurações do sistema Tempo atualização do NTP, variáveis internas	
Sensores acoplados			
Temperatura 0 operantes	Piranômetro Sem leitura		
Vazão Sem leitura	Anemômetro Sem leitura		
Dispositivos externos			
Cartão SD externo Inoperante	LED indicador		
Motor da parábola	Alimentação externa		

Fonte: Autoria própria

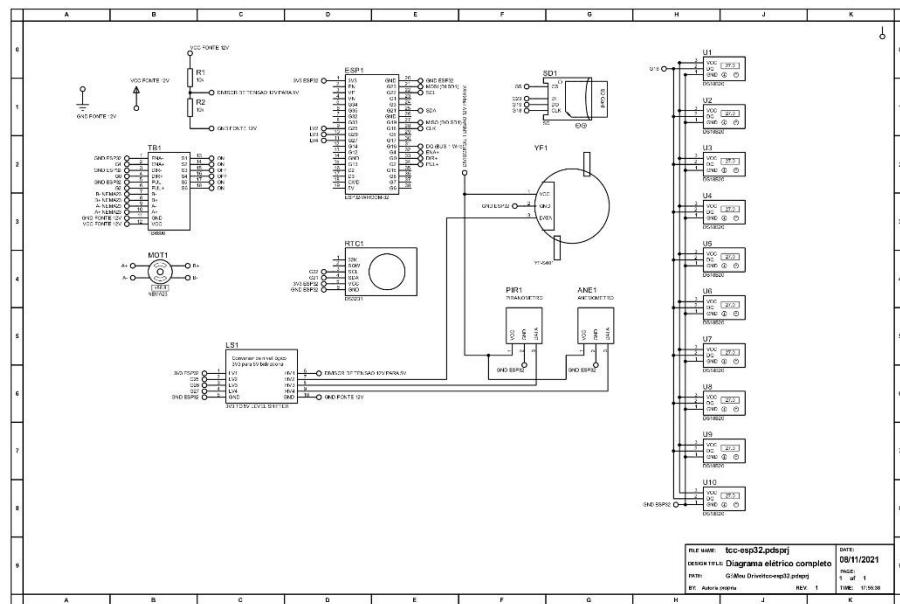
Figura 29 - Interface de configuração de rede do ESP32



Fonte: Autoria própria

O diagrama elétrico completo do sistema eletrônico acoplado ao concentrador solar pode ser visualizado na Figura 30 e com maior resolução no Apêndice A, com alguns componentes adicionais que podem ser acoplados ao sistema, como um piranômetro e um anemômetro.

Figura 30 - Diagrama elétrico completo do sistema eletrônico



Fonte: Autoria própria

O painel *web* do servidor remoto, hospedado pelos autores deste trabalho na plataforma

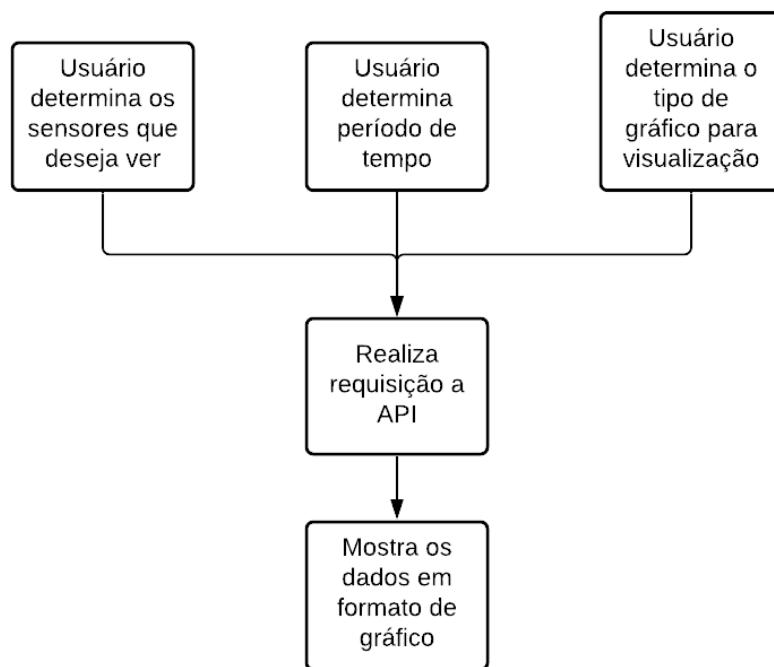
de integração com banco de dados, *Vercel*, foi construído utilizando-se as tecnologias HTML5, CSS3, *JavaScript*, a biblioteca *Jquery* (Biblioteca *JavaScript*), a coleção de ícones e fontes da *Font Awesome*, e a biblioteca *Three.js* (Biblioteca *JavaScript*), que facilita a manipulação e construção de gráficos 3D no navegador de internet. De modo geral, o painel é composto por 2 segmentos, detalhados a seguir. O código desenvolvido para a internet está hospedado, sob licença de código aberto, no diretório “/web” do repositório no GitHub.

O primeiro segmento contém a apresentação do trabalho e a dos autores, podendo ser encontrado na rota raiz, “/” e na rota “/sobre”. O segundo segmento, localizado em “/dados”, possui a maior relevância sobre o trabalho, pois permite ao usuário a visualização dos dados coletados pelos sensores do concentrador.

Esses dados são obtidos por meio de requisições a um outro servidor, responsável por hospedar o banco de dados MySQL e acessá-lo. A partir da requisição efetuada, o servidor do banco de dados retorna os dados armazenados para um determinado período requisitado. Nesse processo, o ESP32 comunica-se diretamente com o servidor do banco de dados, por meio de uma API, enviando a leitura dos sensores acoplados, a cada minuto.

No que se refere às requisições ao banco de dados, o painel de visualização da web, ao ser acessado, requisita os últimos dados medidos e os dispõe em forma de *widgets* na parte superior da página, como exibido na captura de tela da Figura 32. Além disso, o usuário também pode requisitar dados de qualquer sensor em um período determinado, podendo visualizá-los por meio de um gráfico na parte central da página. O diagrama de requisições é exposto na Figura 31.

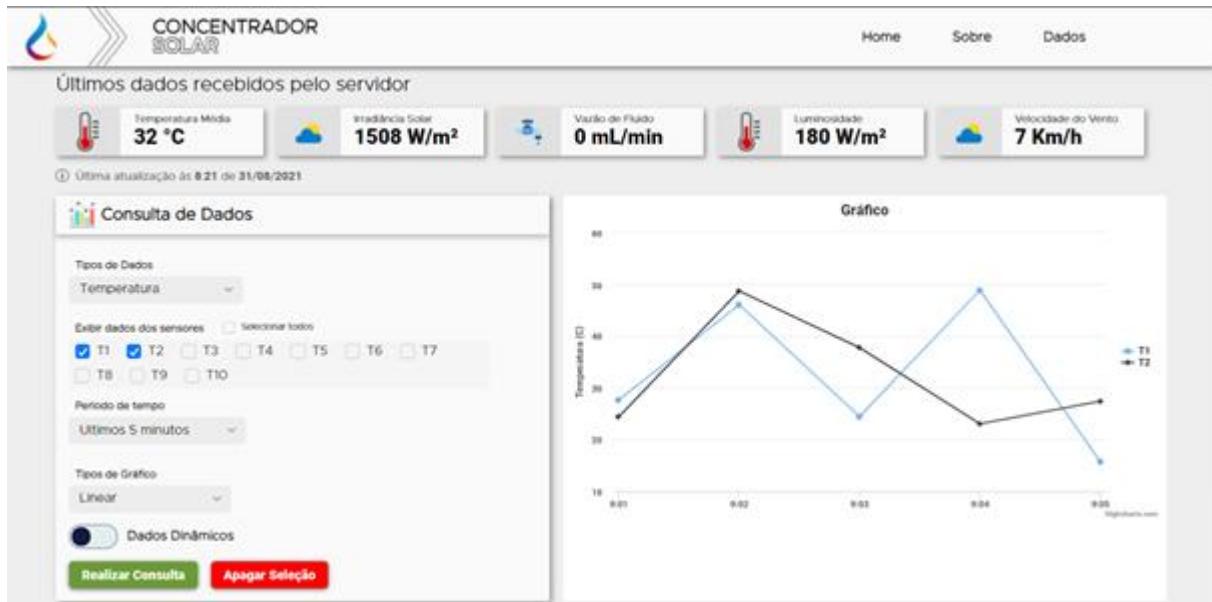
Figura 31 - Fluxograma do sistema de consulta de dados da API



Fonte: Autoria própria

Além disso, o usuário pode definir, também, como prefere visualizar os dados: na forma de um gráfico em linhas, ou em barras. Os gráficos serão construídos tendo no eixo das abscissas os valores de tempo e, nas ordenadas, a grandeza escolhida pelo usuário. A fim de definir as preferências citadas, o usuário pode especificá-las ao alterar os parâmetros nas entradas de seleção do painel “Consulta de Dados”, localizados à esquerda do gráfico, como representado na captura de tela da página, exibida na Figura 32.

Figura 32 - Painel de visualização dos dados hospedado na Vercel



Fonte: Autoria própria

Com a finalidade de facilitar a busca dinâmica de dados pelo painel web, foi elaborada uma API que realiza o gerenciamento e distribuição dos dados dos sensores em função do tempo, em formato UNIX *timestamp*. Além disso, a API foi construída com a linguagem de programação PHP, utilizando-se o sistema de gerenciamento de banco de dados MySQL, e está hospedada pelos autores deste trabalho na plataforma *000WebHost*. A aplicação possui apenas um banco de dados, denominado “tcc” e, dentro dele, há somente uma tabela, intitulada “dados”.

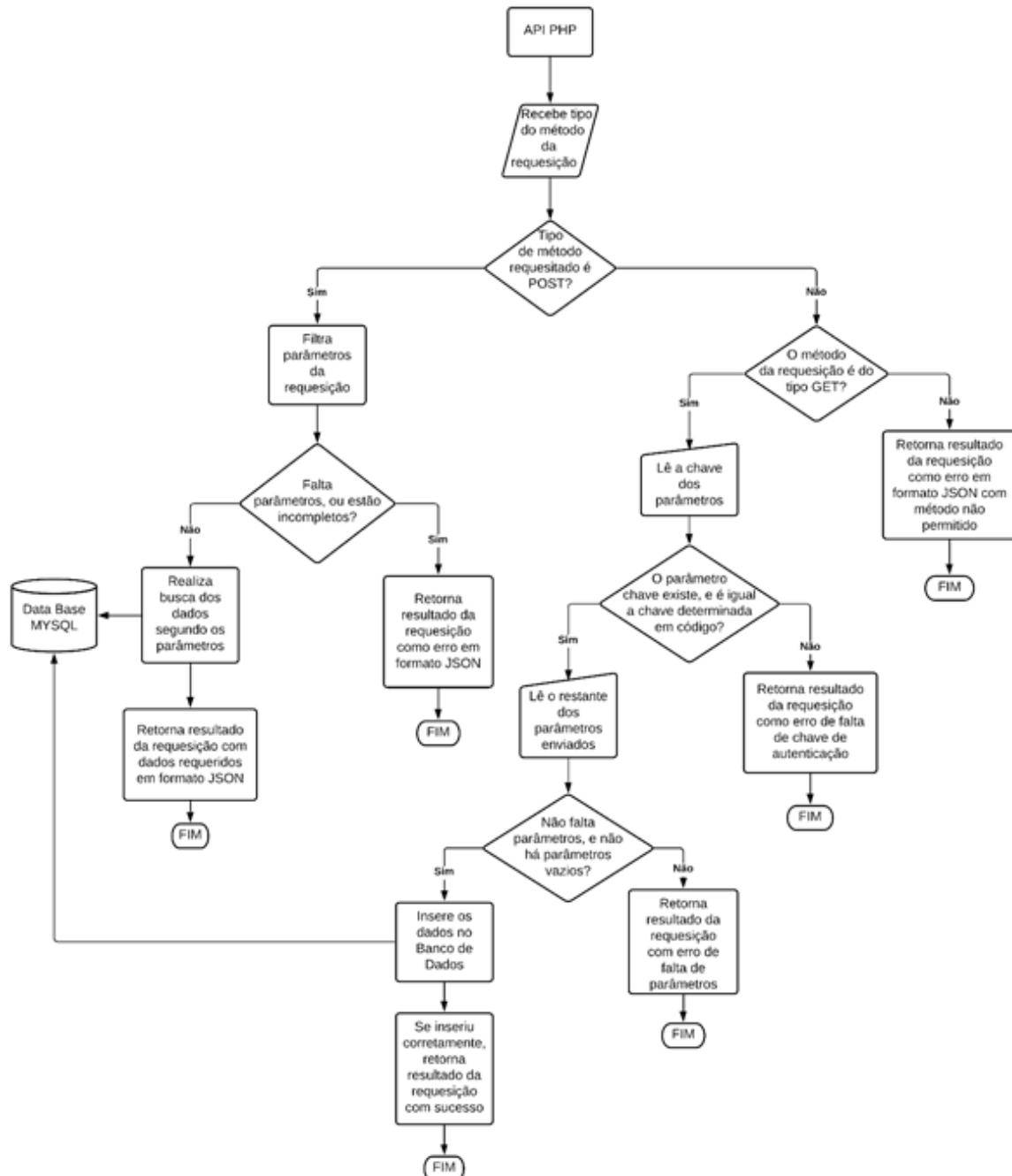
Quanto ao método de utilização da API, caso o usuário deseje receber dados, deverá enviar os parâmetros desejados, como o período e sensores a serem consultados, por uma requisição de método POST no endpoint “/api”. A partir disso, a API tratará a requisição, fará a busca no banco de dados de acordo com os parâmetros recebidos e, se não houver erros, retornará a resposta com código 200 em formato *JavaScript Object Notation* (JSON). O código 200, no *Hyper-Text Transfer Protocol* (HTTP), significa que a requisição foi recebida pelo servidor e realizada com sucesso.

Ademais, para enviar dados a serem alocados no banco de dados, deve ser realizada uma requisição por método GET no endpoint “/send”, contendo parâmetros com valores de todos os sensores lidos, um valor de tempo em formato *Epoch* associado aos dados e uma chave mestra definida no código. Essa chave permite uma comunicação segura entre o servidor e o ESP32, por ela ser estabelecida no código-fonte dos dois sistemas e não poder ser visualizada por

terceiros.

Após realizada a requisição com os parâmetros corretos, a API concede a gravação dos dados de sensores e o tempo associado a eles no banco de dados, como é demonstrado na Figura 33.

Figura 33 - Fluxograma do esquema geral de requisição a API



Fonte: Autoria própria

Por fim, foi criado o *endpoint* “/status”, com o propósito de auxiliar o microcontrolador

na verificação do estado do servidor. O *endpoint* sempre retornará o código HTTP 200 e uma resposta em texto contendo “200” para qualquer requisição, enquanto estiver online. Assim, o microcontrolador verifica primeiro se o servidor está online, por meio desse *endpoint* e, posteriormente, realiza o envio dos dados ao *endpoint* “/send”.

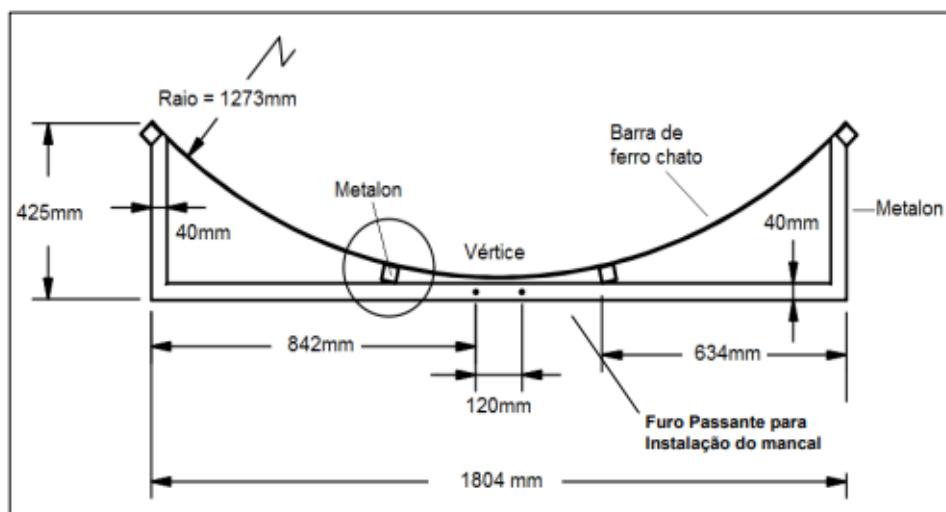
Em virtude de limitações de memória do banco de dados, foi projetado um agendador de tarefas (*webcron*), executado a cada mês, com o propósito de realizar a limpeza completa dos dados registrados. Assim, o banco de dados não chegará ao seu limite de armazenamento e, portanto, continuará operando normalmente.

3.2.3.3 Análise óptica: estimativa do rendimento óptico e simulação de incidência de raios solares na parábola

Para calcular o rendimento óptico (η_o) do coletor concentrador solar de geometria cilíndrico-parabólica desenvolvido neste trabalho, foram utilizados os métodos analíticos propostos por Kalogirou (2014). Para que seja possível o cálculo dos fatores que influenciam a determinação do rendimento óptico, é necessário definir as medidas do projeto técnico.

Desse modo, define-se como W_a o comprimento horizontal da parábola, ou seja, a distância entre suas bordas e, como h_p a altura vertical da parábola, que é a distância vertical entre seu ponto mais baixo, o centro, e seu ponto mais alto, a borda. O comprimento horizontal, a altura vertical e a distância focal da parábola podem ser visualizados na Figura 34, sendo seus valores exatos expostos na Tabela 7.

Figura 34 - Projeto do suporte e curvatura do concentrador



Fonte: Natividade (2017)

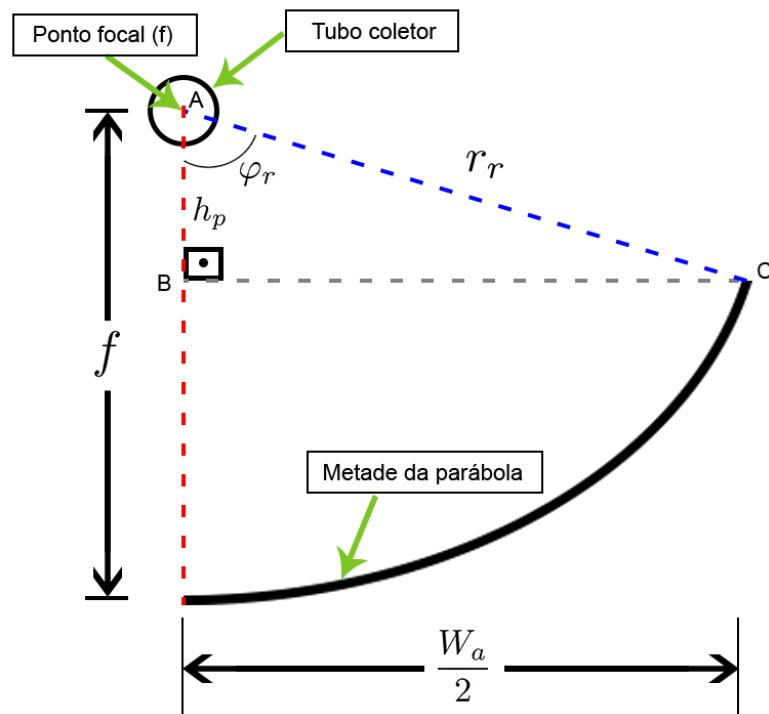
Tabela 7 - Dimensões da parábola

Variável	Valor (metros)
W_a	1,804
h_p	0,385
f	0,6365

Fonte: Natividade (2017)

Observando-se a Figura 7, introduzida na seção 3.1.3, é possível determinar r_r e φ_r , a partir das medidas apresentadas na Tabela 7. Para calcular r_r e φ_r é preciso, primeiro, desenhar um triângulo retângulo ΔABC que parte do centro do tubo absorvedor (ponto A) até a borda externa da parábola (ponto C), como mostra a Figura 35. Como o centro do coletor está posicionado exatamente no ponto focal da parábola, a altura desse triângulo, denotada por $h_{\Delta ABC}$, pode ser determinada fazendo $f - h_p$, conforme exibido na Equação 23.

$$f - h_p = 0,6365 - 0,385 \Rightarrow h_{\Delta ABC} = 0,2515 \text{ m} \quad (23)$$

Figura 35 - Secção reta da parábola e diagrama geométrico de Δ_{ABC} , r_r , h_p e φ_r 

Fonte: Autoria própria

Com isso, utilizando-se o Teorema de Pitágoras, é possível calcular r_r a partir dos catetos de ΔABC , como mostra a Equação 24.

$$r_r = \sqrt{0,902^2 + 0,2515^2} \Rightarrow r_r = 0,9364 \text{ m} \quad (24)$$

Além disso, é possível calcular o ângulo φ_r utilizando-se a função arco tangente, como exibe a Equação 25.

$$\varphi_r = \arctan\left(\frac{0,902}{0,2515}\right) \Rightarrow \varphi_r = 1,2988 \text{ rad} \quad (25)$$

A validação da trigonometria desenvolvida pode ser realizada utilizando-se a equação 6 de Kalogirou (2014). Substituindo-se os valores de r_r e φ_r obtidos anteriormente, é possível validar os resultados ao obter-se o mesmo valor de W_a , especificado na Tabela 7, exposto na Equação 6.1.

$$W_a = 2r_r \cdot \sin(\varphi_r) \quad (6)$$

$$W_a = 2 \cdot 0,9364 \cdot \sin(1,2988 \text{ rad})$$

$$W_a = 1804 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Em seguida, com os valores necessários definidos, é possível calcular A_l para que, posteriormente, o fator geométrico A_f possa ser calculado, a fim de obter-se o rendimento óptico do coletor. Substituindo os valores de W_a , h_p e f na Equação 9 de Soteris (2014), pode-se obter a perda na área de abertura, conforme exibido na Equação 9.1.

$$A_l = \frac{2}{3} W_a h_p + f W_a \left[1 + \frac{W_a^2}{48f^2} \right] \quad (9)$$

$$A_l = \frac{2}{3} \cdot 1,804 \cdot 0,385 + 0,6365 \cdot 1,804 \cdot \left[1 + \frac{1,804^2}{48 \cdot 0,6365^2} \right]$$

$$A_l = \frac{2}{3} 1,804 \cdot 0,385 + 0,6365 \cdot 1,804 \cdot 1,167353582$$

$$A_l = 1,8034 \text{ m}^2 \quad (9.1)$$

Para a obtenção do fator geométrico A_f , é necessário calcular, primeiramente, a área total de abertura da parábola A_a . O valor de A_a pode ser obtido pelo produto do comprimento horizontal da parábola com o seu comprimento no eixo perpendicular ao eixo vertical e horizontal, ou seja, sua profundidade L_z . A área de abertura total foi calculada utilizando-se a Equação 8 introduzida na seção 3.1.3, podendo ser observada na Equação 8.1. Em seguida, o fator geométrico foi calculado utilizando a Equação 8, conforme exibido na Equação 8.2.

$$A_a = 1,804 \cdot 1,200 \Rightarrow A_a = 2,1648 \text{ m}^2 \quad (8.1)$$

$$A_f = \frac{1,8034}{2,1648} \Rightarrow A_f = 0,833 \quad (8.2)$$

Desse modo, para a obtenção de η_o , torna-se necessário o cálculo de mais uma grandeza, o ângulo de incidência solar θ . A fim de conhecer a influência do ângulo de incidência no resultado do rendimento óptico, foi realizado o cálculo de η_o para diferentes ângulos θ variando de $-\frac{\pi}{2}$ a $\frac{\pi}{2}$ rad, espaçados igualmente por um passo de 0.001 rad, isto é, de -90° a 90° espaçados igualmente por um passo de $0,0572^\circ$.

Com o ângulo θ definido, é necessário definir apenas as características ópticas do concentrador e do absorvedor. A absorbância do tubo coletor α_{abs} adotada foi a mesma do trabalho de Natividade (2017), exposta na Tabela 5. Em função da falta de documentação precisa sobre o vidro Borosilicato-3,3 que reveste o tubo absorvedor, foi adotada a transmitância ($\tau_{vidro} = 0,95$) do vidro do tubo absorvedor de um PTC do tipo LS-2, exposto no trabalho de Okonkwo, Abid e Ratlamwala (2019).

Para determinar a refletividade da parábola concentradora, utilizou-se a emissividade obtida por Cavalcanti (2011) para uma superfície polida de aço inoxidável 430 ($\varepsilon_{esp} = 0,17$), exposta na Tabela 1. O material analisado por Cavalcanti (2011) é o mesmo da parábola adotada no presente trabalho. Como a luz não transpassa o material da parábola, sua transmitância é nula ($\tau_{esp} = 0$). Assim, por meio da Equação 4, e da igualdade entre o coeficiente de absorтивidade e emissividade estabelecida na Equação 4.1, introduzidas anteriormente, é

possível calcular a refletividade ρ_{esp} da parábola, como exposto na Equação 26.

$$\rho_{esp} = 1 - \varepsilon_{esp} \quad (26)$$

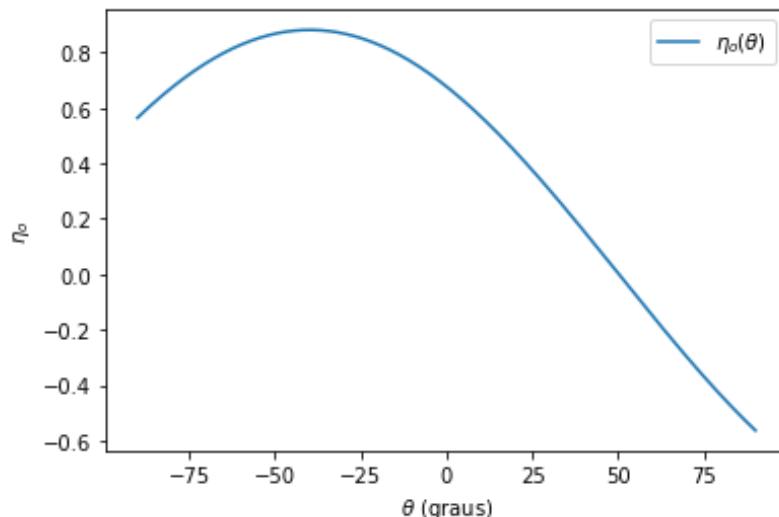
$$\rho_{esp} = 1 - 0,17 = 0,83$$

Por fim, para obter-se o rendimento óptico, torna-se necessário apenas o cálculo do fator de atenuação γ . Em função da complexidade do cálculo das componentes desse fator, que foge do escopo do Ensino Médio, foi adotado como fator de atenuação do PTC do presente trabalho a média dos valores horizontais e verticais do fator de atenuação obtidos por García-Cortés, Bello-García e Ordóñez (2012), evidenciados na Tabela 3. Assim, o fator de atenuação do sistema (γ_{PTC}) é dado pela Equação 30.

$$\gamma_{PTC} = \frac{1}{2}(0,907 + 0,9202) = 0,9136 \quad (27)$$

Desse modo, após obter-se todos os valores necessários, foi implementado um algoritmo em Python para calcular o rendimento óptico em função do intervalo de ângulo de incidência (θ) considerado anteriormente e, em seguida, foi esboçado o gráfico de $\eta_o(\theta)$, apresentado na Figura 36, na qual θ está em graus. O código desenvolvido nesta seção está hospedado, sob licença de código aberto, no diretório “/análise/optica” do repositório no GitHub.

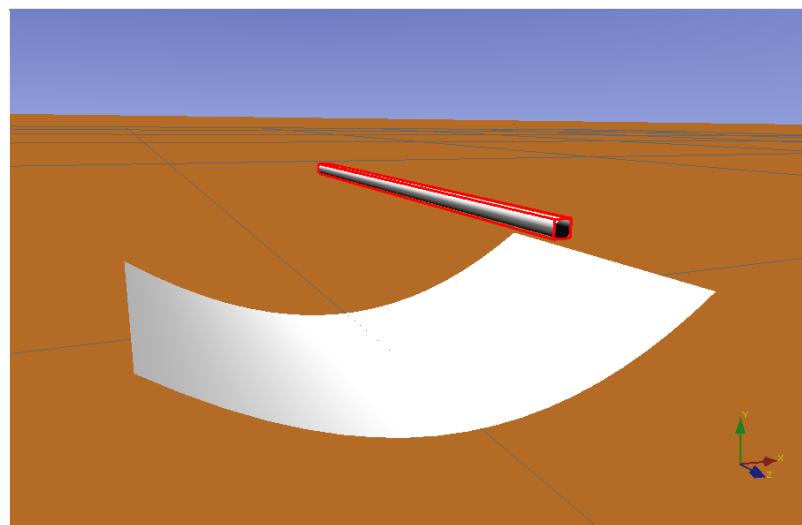
Figura 36 - Rendimento óptico em função do ângulo de incidência em graus



Fonte: Autoria própria

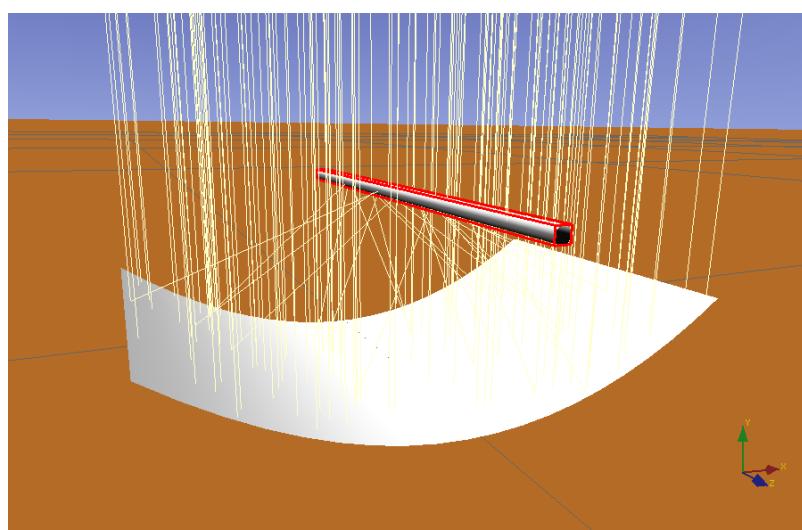
Ademais, a fim de desenvolver uma compreensão geométrica sobre o funcionamento da parábola refletora e o comportamento do tubo absorvedor, foi criado um modelo tridimensional da estrutura no software de código aberto *Tonatiuh*, um programa de simulação óptica de sistemas de concentração solar que utiliza o algoritmo de Monte Carlo. No programa, foram inseridas as propriedades ópticas dos materiais da estrutura e, a partir disso, foi realizada a simulação da incidência de raios solares na parábola. A montagem do aparato é exibida na Figura 37 e o resultado gráfico da simulação pode ser observado na Figura 38.

Figura 37 - Montagem do sistema parábola-tubo, com o tubo destacado em vermelho



Fonte: Autoria própria

Figura 38 - Raios incidindo na parábola e sendo redirecionados ao tubo absorvedor



Fonte: Autoria própria

3.2.3.4 Análise térmica: estimativa de dados meteorológicos e temperaturas e cálculo da eficiência térmica

Conforme exposto na seção “Métodos analíticos e numéricos para estimar dados experimentais”, a fim de realizar o estudo térmico do coletor, foram utilizados alguns métodos analíticos e numéricos, com base nos dados cedidos pelo professor doutor Elson Avallone (2017) e pelo INMET.

Como as ferramentas matemáticas necessárias para realizar uma análise térmica mais realista não integram o conteúdo programático do Ensino Médio, optou-se por métodos mais simples, implementados em um programa em linguagem *Python*, que podem ser deduzidos com os conhecimentos de nível médio. O código desenvolvido nesta seção está hospedado, sob licença de código aberto, no diretório “/analise/termica” do repositório no GitHub.

Inicialmente, os bancos de dados do professor e do INMET foram importados no programa e, em seguida, a hora fornecida pelo INMET foi convertida de UTC para o horário de Brasília, 3 horas anterior ao UTC. A partir disso, foram selecionados, em ambos os bancos de dados, os dados obtidos das 9h00 às 15h00 para efetuar a análise.

Após a importação dos dados, é possível utilizá-los para analisar a eficiência térmica do projeto. A eficiência térmica (η) de um coletor solar é, de modo geral, a razão entre o calor absorvido por ele (Q_{abs}) e o calor solar que incide sobre ele (Q_{in}), conforme expresso na Equação 31.

$$\eta = \frac{Q_{abs}}{Q_{in}} \quad (28)$$

O calor incidente pode ser determinado ao multiplicar-se a irradiação solar, que possui unidade de energia por área, pela área de abertura do concentrador. Contudo, para determinar o calor absorvido pelo coletor, faz-se necessário utilizar a Equação 2, já exibida anteriormente na seção 3.1.2.

Ao considerar-se um pequeno intervalo tempo Δt , é possível obter, utilizando-se a Equação 2, o calor absorvido nesse intervalo por uma massa m de água que corre dentro do tubo absorvedor. Nesse caso, a massa de água possui calor específico c_p e sofre uma variação de temperatura ΔT no instante dt , devido à incidência de luz solar. O cálculo de Q_{abs} , a partir das condições introduzidas, pode ser feito utilizando-se a Equação 29.

$$\frac{d}{dt}Q_{abs} = \frac{d}{dt}m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (29)$$

Na equação acima, o operador diferencial $\frac{d}{dt}$ retorna a taxa de variação da quantidade no tempo. Assim, por exemplo, a taxa de variação da massa, também chamada de vazão mássica, é dada por $\frac{d}{dt}m$. No projeto desenvolvido, a vazão da água que corre pelo tubo absorvedor é de 0,2 L/min. Desse modo, considerando a densidade da água ($d_{água}$) como aproximadamente 1 kg/L e sabendo que 1 m³ = 1000 L, a vazão mássica é dada, em kg/s, pela Equação 29.1 e a vazão volumétrica, em m³/s, pela equação 29.2.

$$\frac{d}{dt}m = \frac{0.2 \text{ L}}{\text{min}} = \frac{0.2 \text{ kg}}{60 \text{ s}} = 3,3 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (29.1)$$

$$\frac{d}{dt}m = \frac{0.2 \text{ L}}{\text{min}} = \frac{0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{60 \text{ s}} = 3,3 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (29.2)$$

Todavia, para determinar o calor absorvido Q_{abs} em cada intervalo de tempo Δt , é necessário, também, calcular a variação de temperatura ΔT em cada intervalo. A variação de temperatura é dada pela diferença entre a temperatura de entrada da água (fria, denotada por T_f) e a temperatura de saída da água (quente, denotada por T_q), como evidencia a Equação 30.

$$\Delta T = t_q - t_f \quad (30)$$

Como não é possível medir essas grandezas experimentalmente, em função do período pandêmico em que o trabalho se desenvolveu, faz-se necessário, portanto, obter uma estimativa para elas. Para isso, assumindo o intervalo de tempo Δt como sendo 1 minuto, calculou-se a razão entre as temperaturas T_f e T_q e a temperatura ambiente T_{amb} medidas por Avallone em cada minuto i dentro do intervalo de tempo medido, como exposto nas Equações 31 e 32.

$$r_{tf_i} = \frac{T_{f_i}}{T_{amb_i}} \quad (31)$$

$$r_{tq_i} = \frac{T_{q_i}}{T_{amb_i}} \quad (32)$$

Após calcular as razões r_{tf_i} e r_{tq_i} para cada minuto i dos dados de Avallone, a fim de obter T_f e T_q estimados, multiplicou-se a temperatura ambiente do INMET, medida na mesma hora em que o minuto i faz parte, pelas respectivas razões r_{tf_i} e r_{tq_i} . Assim, por exemplo, para obter as temperaturas estimadas em Ariranha para o horário 11h01, realiza-se os produtos $r_{tf_{11:01}} \cdot T_{bs_{12:00}}$ e $r_{tq_{11:01}} \cdot T_{bs_{12:00}}$.

Vale notar que os dados do INMET, para uma determinada hora de referência h_n , compreendem um período de uma hora. Assim, $T_{bs_{12:00}}$ refere-se à temperatura ambiente das 11h01 às 12h00, de modo que $h_n = 12h00$. O período compreendido entre o primeiro minuto da hora anterior à h_n e h_n será denotado, daqui em diante, por Δh_n .

Desse modo, para qualquer hora de referência h_n do banco de dados do INMET e qualquer minuto i do banco de dados de Avallone tal que i pertence ao período compreendido em Δh_n , as temperaturas estimadas $T_{f_{e_i}}$ e $T_{q_{e_i}}$ são dadas pelas Equações 33 e 34.

$$T_{f_{e_i}} = r_{tf_i} \cdot T_{bs}(h_n) \quad (33)$$

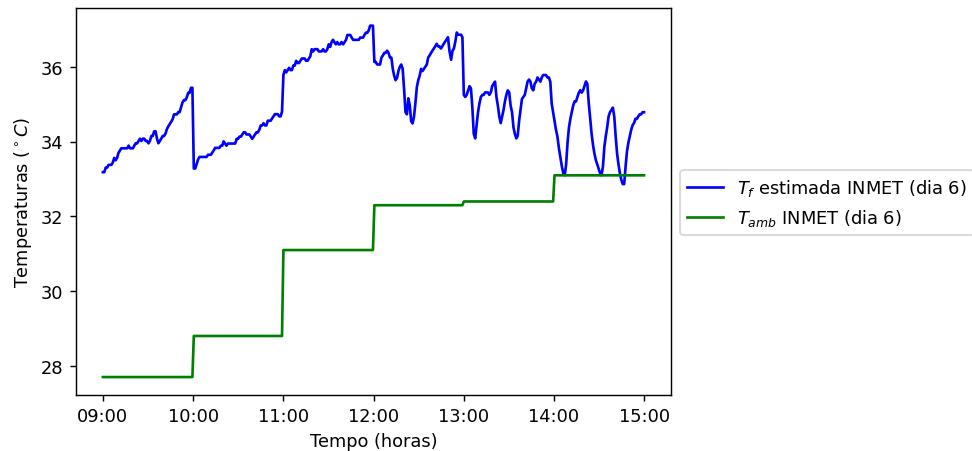
$$T_{q_{e_i}} = r_{tq_i} \cdot T_{bs}(h_n) \quad (34)$$

A partir disso, é possível calcular a variação de temperatura estimada ΔT_i em Ariranha para cada minuto i dos dados de Avallone. Para isso, basta calcular a diferença entre a temperatura quente e a temperatura fria estimadas para cada minuto, como mostra a Equação 35.

$$\Delta T_{e_i} = T_{q_{e_i}} - T_{f_{e_i}} \quad (35)$$

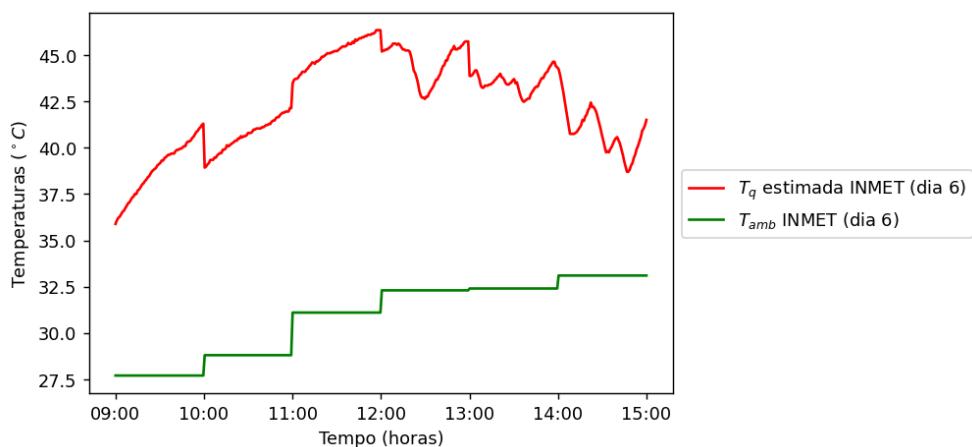
As temperaturas estimadas obtidas para os dias 6/11/2020 e 7/11/2020, na cidade de Ariranha, em função do tempo, podem ser visualizadas nas Figuras 39, 40, 41 e 42 abaixo. Nelas, a temperatura ambiente fornecida pelo INMET no respectivo dia é apresentada, para fins de comparação.

Figura 39 - Temperatura fria estimada para Ariranha no dia 6/11/2020 e temperatura ambiente do INMET, ambas em função do tempo



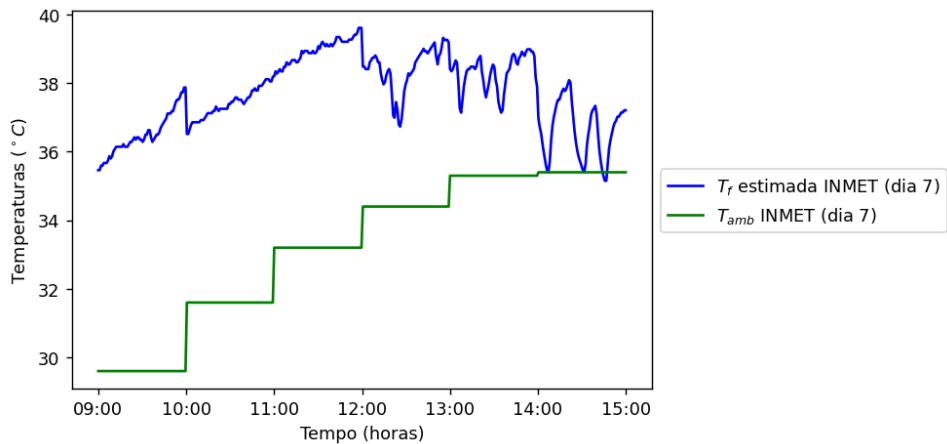
Fonte: Autoria própria

Figura 40 - Temperatura quente estimada para Ariranha no dia 6/11/2020 e temperatura ambiente do INMET, ambas em função do tempo



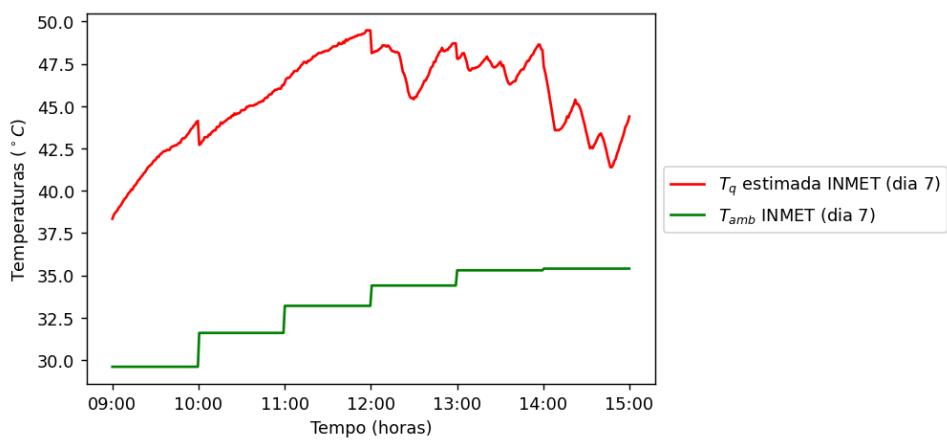
Fonte: Autoria própria

Figura 41 - Temperatura fria estimada para Ariranha no dia 7/11/2020 e temperatura ambiente do INMET, ambas em função do tempo



Fonte: Autoria própria

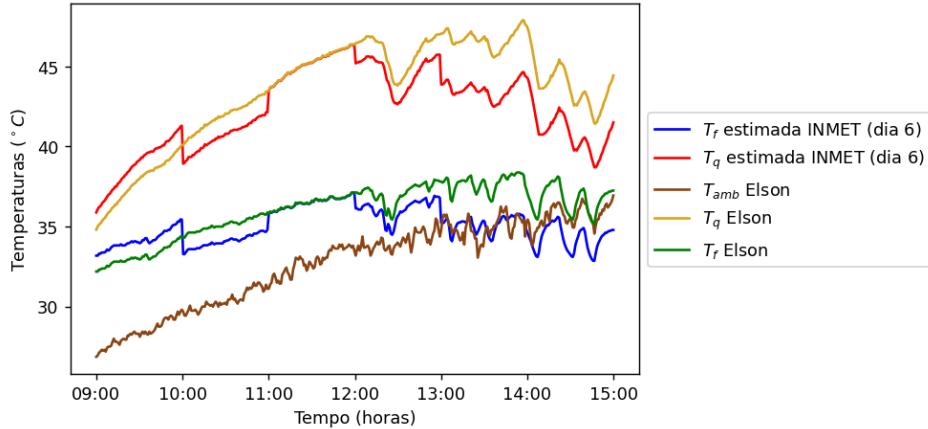
Figura 42 - Temperatura quente estimada para Ariranha no dia 7/11/2020 e temperatura ambiente do INMET, ambas em função do tempo



Fonte: Autoria própria

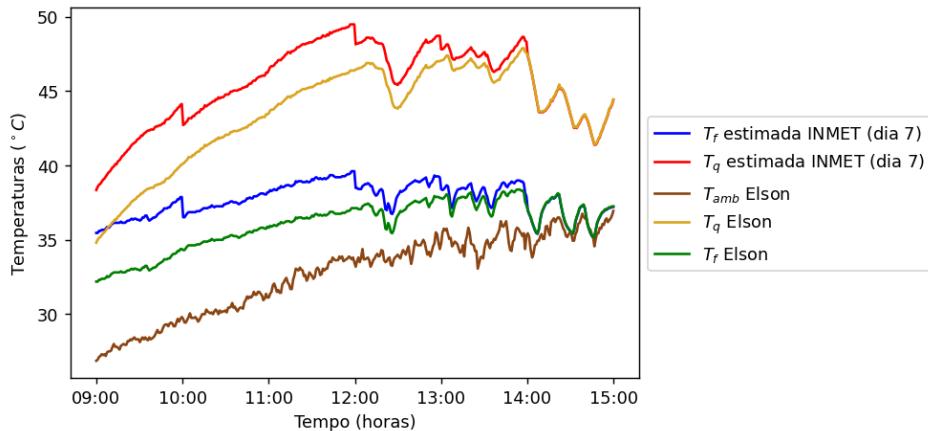
Para fins de comparação, nas Figuras 43 e 44 são exibidas, em cada dia analisado, as temperaturas da água e as temperaturas ambiente, medidas por Avallone, bem como as temperaturas da água estimadas para Ariranha.

Figura 43 - Comparação entre temperaturas estimadas para Ariranha no dia 6/11/2020 e as temperaturas medidas por Avallone, em função do tempo



Fonte: Autoria própria

Figura 44 - Comparação entre temperaturas estimadas para Ariranha no dia 7/11/2020 e as temperaturas medidas por Avallone, em função do tempo



Fonte: Autoria própria

Com as temperaturas estimadas obtidas, é possível calcular o calor absorvido para cada minuto dos períodos analisados em Ariranha. Para isso, a Equação 29 foi discretizada em períodos de 1 minuto. A partir dessa modificação, exibida na Equação 36, é possível calcular o calor absorvido estimado para cada minuto i , multiplicando a vazão mássica em um segundo ($\frac{0.2}{60}$) pelo calor específico da água (c_{p_i}), medido por Avallone no minuto i , pela variação de temperatura estimada para Ariranha (ΔT_{e_i}) no minuto i .

$$Q_{abs_{e_i}} = \frac{0.2}{60} \cdot c_{p_i} \cdot \Delta T_{e_i} \quad (36)$$

Após obter-se o calor absorvido em cada minuto, conforme visto na Equação 28, a última incógnita a ser determinada é o calor incidente sobre a parábola concentradora (Q_{in}). Para determinar Q_{in} , utilizou-se um método numérico baseado na Soma de Riemman, disposto a seguir.

Nesse sentido, tendo em vista que os dados do INMET fornecem apenas a radiação global para cada hora de referência h_n e sabendo que a radiação global fornecida é a integral da irradiação de minuto a minuto no período Δh_n , faz-se necessário estimar a irradiação em cada minuto desse período, para determinar o calor incidente.

Para isso, calculou-se a integral numérica da irradiação no período Δh_n do banco de dados de Avallone, utilizando a Soma de Riemman, conforme exposto na Equação 37. A partir disso, foi determinada a razão entre a irradiação em cada minuto i , denotada por $G(i)$, e a integral da irradiação no período Δh_n do qual o minuto i faz parte, chamada de $H_{\text{Avallone}\Delta h_n}$, como evidenciado na Equação 38.

$$H_{\text{Avallone}\Delta h_n} = \sum_{i=1}^{59} G(i)\Delta t_i \quad (37)$$

$$r_{G_i} = \frac{G(i)}{H_{\text{Avallone}\Delta h_n}} \quad (38)$$

Na Equação 37, o intervalo de tempo Δt_i não é constante, devido à uma variação no instante em que as irradiações são medidas no trabalho de Avallone. Contudo, pode-se assumir que o intervalo Δt_i é aproximadamente constante e que ele possui um valor muito próximo de 1 minuto, já que varia entre 56 e 67 segundos. Assim, para cada minuto i , tem-se que $\Delta t_i = i - (i - 1)$, com i em segundos.

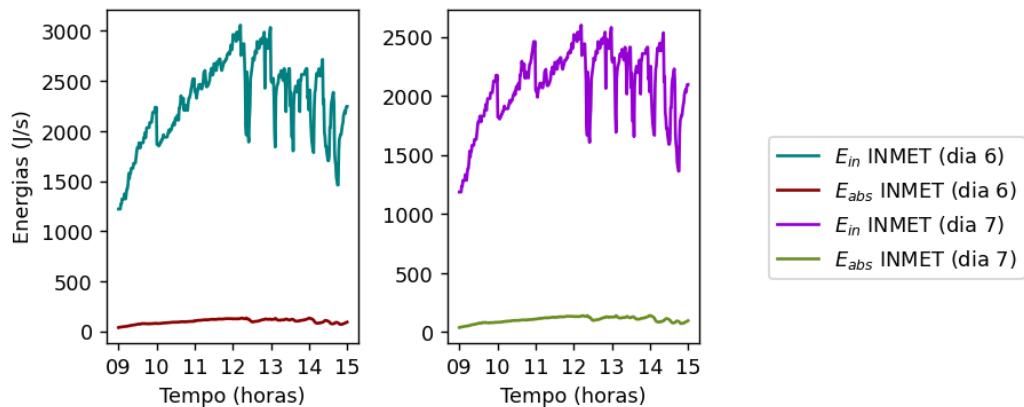
Após determinar as razões, para estimar a irradiação em cada minuto i para Ariranha, as razões r_{G_i} obtidas foram multiplicadas pela radiação global fornecida pelo INMET no período Δh_n do qual i faz parte, como pode ser observado na Equação 39. Assim, foi obtida a irradiação estimada para Ariranha nos dois dias analisados, denotada por G_{e_i} . Com isso, é possível, então, calcular a energia incidente sobre a superfície da parábola para cada minuto i , denotada por $Q_{in_{e_i}}$, como mostra a Equação 40.

$$G_{e_i} = r_{G_i} \cdot H_{\Delta h_n} \quad (39)$$

$$Q_{in_{e_i}} = G_{e_i} \cdot A_a \quad (40)$$

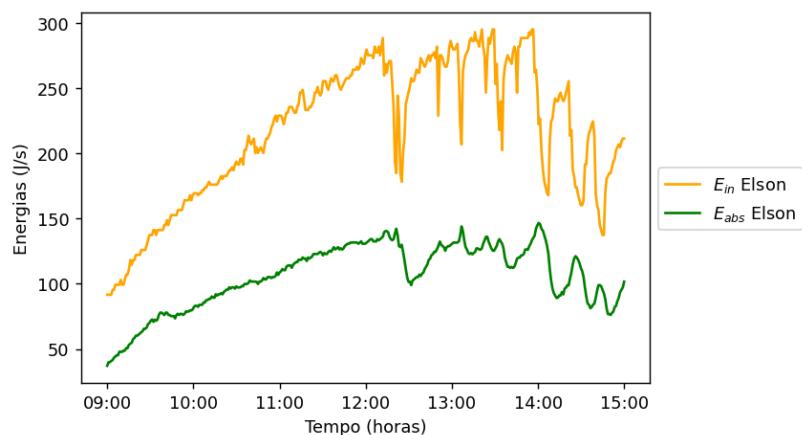
Todavia, após a obtenção dos valores de $Q_{in_{e_i}}$, observou-se que eles não eram compatíveis com os dados de Avallone, pois são muito maiores que os valores de Q_{abs} obtidos para Ariranha. Isso é evidenciado ao comparar, utilizando-se as Figuras 45 e 46, a energia incidente e absorvida para Ariranha e os valores medidos por Avallone.

Figura 45 - Energia incidente e absorvida estimadas para Ariranha nos dias 6/11/2020 e 7/11/2020, sem a constante de correção



Fonte: Autoria própria

Figura 46 - Energia incidente e absorvida medidas por Avallone



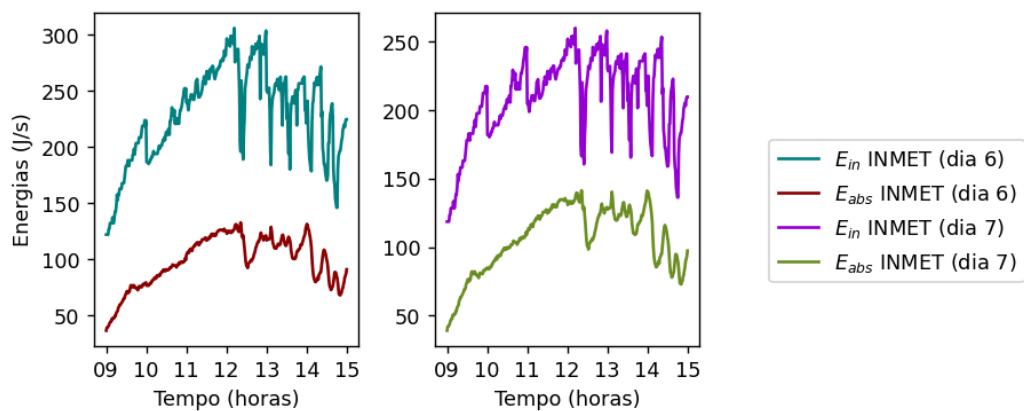
Fonte: Autoria própria

Para corrigir o erro, assumiu-se que o calor incidente deveria ser multiplicado por uma constante $k = \frac{1}{10}$. Assim, o calor incidente estimado para cada minuto em Ariranha é dado pela

Equação 41. A Figura 47 exibe a comparação entre a energia incidente e absorvida para Ariranha utilizando o fator de correção k . Os valores corrigidos e a comparação deles com os medidos por Avallone serão exibidos nas figuras a seguir, evidenciando a validade do uso da constante para corrigir o erro.

$$Q_{in_{e_i}}^* = G_{e_i} \cdot A_a \cdot k \quad (41)$$

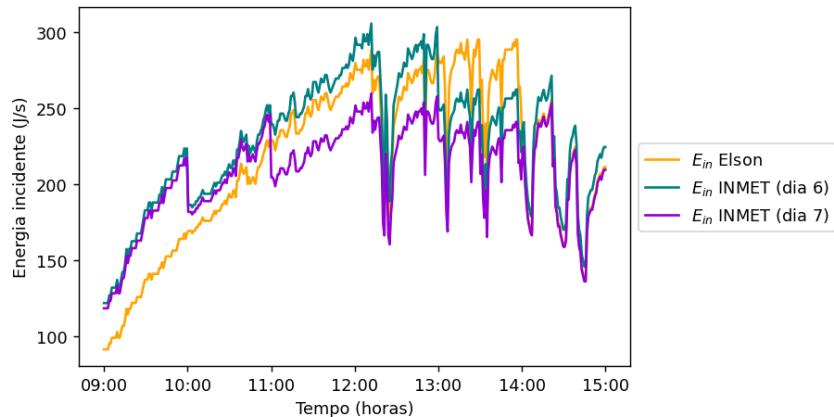
Figura 47 - Energia incidente e absorvida estimadas para Ariranha nos dias 6/11/2020 e 7/11/2020, com a constante de correção



Fonte: Autoria própria

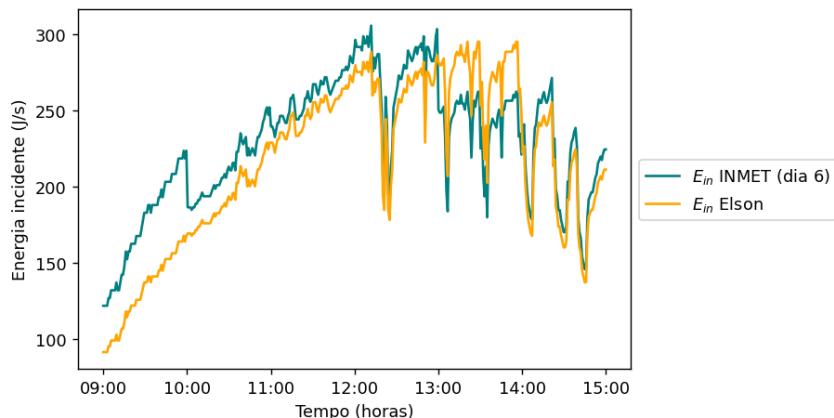
Na Figura 48 são expostos os valores de $Q_{in_{e_i}}^*$ em função do tempo, para os dois dias analisados, em comparação aos valores de calor incidente observados por Avallone em função do tempo, para um coletor de geometria CPC, na cidade de Bauru. Na Figura 49, é exposta a comparação entre $Q_{in_{e_i}}^*$ para o dia 6/11/2020 e os valores de Avallone e, na Figura 50, são comparados os dados de $Q_{in_{e_i}}^*$ para o dia 7/11/2020 e os dados de Avallone.

Figura 48 - Calor incidente estimado para Ariranha em 6/11/2020 e 7/11/2020 em comparação ao calor incidente medido por Avallone, todos em função do tempo



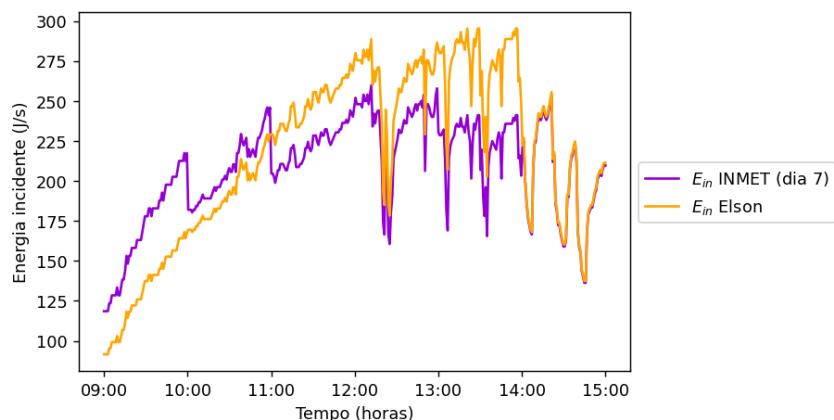
Fonte: Autoria própria

Figura 49 - Calor incidente estimado para Ariranha em 6/11/2020 em comparação ao calor incidente medido por Avallone, ambos em função do tempo



Fonte: Autoria própria

Figura 50 - Calor incidente estimado para Ariranha em 7/11/2020 em comparação ao calor incidente medido por Avallone, ambos em função do tempo



Fonte: Autoria própria

Consequentemente, após a obtenção do calor incidente e absorvido para cada minuto, torna-se possível calcular a eficiência térmica instantânea em cada minuto. Discretizando a Equação 28 em intervalos de 1 minuto, a eficiência térmica instantânea (η_i) em cada minuto i pode ser calculada a partir de $Q_{abs_{e_i}}$ e $Q_{in_{e_i}}$, conforme exposto na Equação 42.

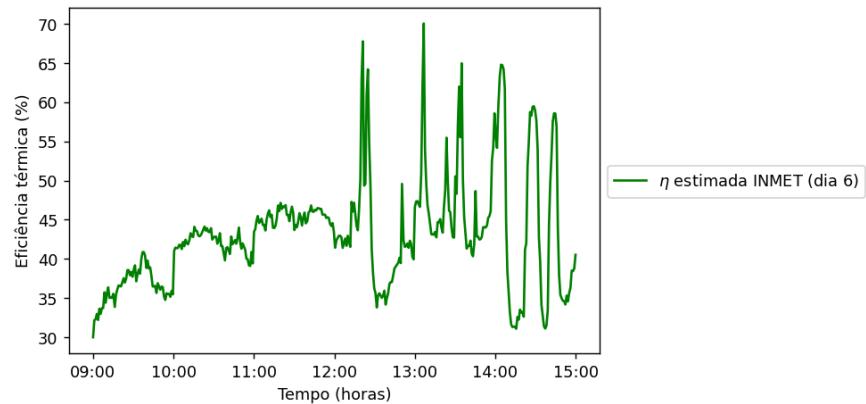
$$\eta_i = 100\% \cdot \left(\frac{Q_{abs_{e_i}}}{Q_{in_{e_i}}} \right) \quad (42)$$

A partir dos valores de η_i , calculou-se a eficiência térmica média em período Δh_n analisado de Ariranha (denotada por $\eta_{M_{\Delta h_n}}$), dividindo o somatório de todos os valores de eficiência η_i obtidos pertencentes ao período, pelo total de minutos pertencentes ao período Δh_n , como evidenciado na Equação 43. O total de minutos pertencentes ao período, denotado por $N_{i_{\Delta h_n}}$ não é igual a 60, pois os minutos i possuem variação na duração, conforme exposto anteriormente.

$$\eta_{M_{\Delta h_n}} = \frac{\sum_{i=1}^{59} \eta_i}{N_{i_{\Delta h_n}}} \quad (43)$$

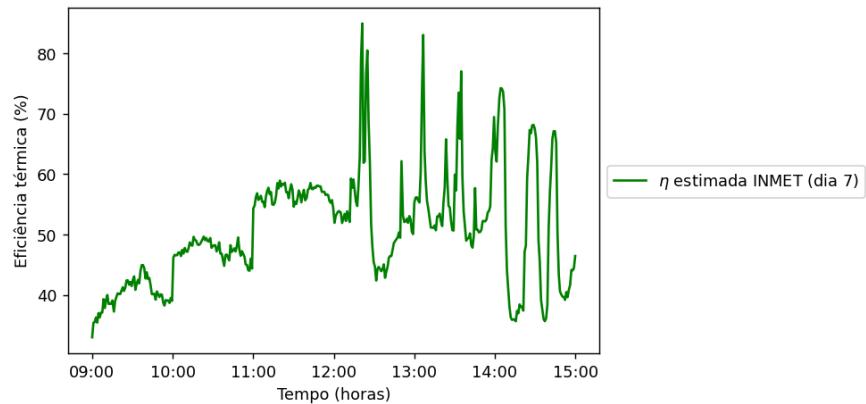
Na Figura 51, são dispostas as eficiências instantâneas obtidas para o dia 6/11/2020 em função do tempo e, na Figura 52, os valores para o dia 7/11/2020 em função do tempo. Nas Figuras 53 e 54, são exibidas as eficiências instantâneas obtidas, respectivamente, para os dias 6/11/2020 e 7/11/2020, em função do tempo.

Figura 51 - Valores de η_i obtidos para o dia 6/11/2020 em Ariranha, em função do tempo



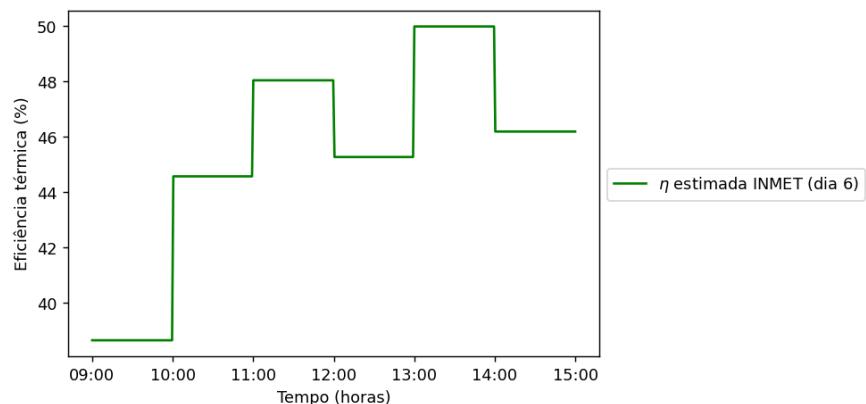
Fonte: Autoria própria

Figura 52 - Valores de η_i tidos para o dia 7/11/2020 em Ariranha, em função do tempo



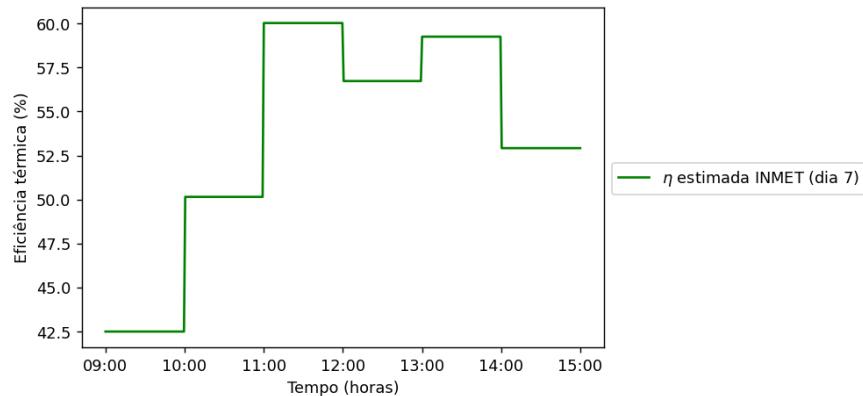
Fonte: Autoria própria

Figura 53 - Valores de $\eta_{M_{\Delta h_n}}$ obtidos para o dia 6/11/2020 em Ariranha, em função do tempo



Fonte: Autoria própria

Figura 54 - Valores de $\eta_{M_{\Delta h_n}}$ obtidos para o dia 7/11/2020 em Ariranha, em função do tempo



Fonte: Autoria própria

Por fim, calculou-se a eficiência térmica média para cada dia (η_{M_d}), dividindo o somatório das eficiências médias em cada período ($\eta_{M_{\Delta h_n}}$) pelo número de períodos Δh_n registrados no dia, denotados por $N_{\Delta h_n}$, conforme exibe a Equação 44.

$$\eta_{M_d} = \frac{\sum \eta_{M_{\Delta h_n}}}{N_{\Delta h_n}} \quad (44)$$

A eficiência média para cada dia analisado é disposta na Tabela 8.

Tabela 8 - Eficiência térmica média para cada dia analisado em Ariranha

Dia analisado	Eficiência térmica média
6/11/2020	45,44%
7/11/2020	53,59%

Fonte: Autoria própria

4 CONCLUSÃO

Em face ao exposto e desenvolvido durante o trabalho, conclui-se que, a partir do projeto da estrutura mecânica, da simulação geométrica da incidência dos raios solares na parábola e da análise do rendimento óptico do concentrador, é possível obter uma vasta compreensão sobre o funcionamento mecânico de um coletor concentrador cilíndrico-parabólico com rastreador solar automático e os fenômenos físicos que agem sobre ele, mesmo sem a realização de experimentos em campo.

Ademais, com o cálculo da eficiência térmica do coletor a partir da estimativa da irradiação e das temperaturas da água para cada minuto, em Ariranha, nos dias analisados, evidencia-se que o projeto desenvolvido possui uma eficiência considerável, pois de toda a energia solar incidente no concentrador, metade dela, aproximadamente, é transformada em energia térmica.

Conclui-se, além disso, que a implementação do rastreamento solar automático e do sistema de sensoriamento remoto utilizando o microcontrolador ESP32, bem como a construção de um sistema de armazenamento e visualização dos dados na internet, contribuem para tornar mais fácil a identificação de problemas no projeto, diminuem a necessidade de intervenção humana no sistema e facilitam a consulta dos dados lidos pelos sensores.

Propõe-se, para realização de trabalhos futuros, o aperfeiçoamento da construção física do concentrador e a comprovação empírica de seu funcionamento, no IFSP Câmpus Catanduva, assim como sua análise óptica e térmica, utilizando-se dados experimentais. Sugere-se, ainda, a análise teórica do protótipo em outros locais, utilizando-se os dados meteorológicos disponíveis.

5 REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, S.; BADRAN, O. O. Sun tracking system for productivity enhancement of solar still. **Desalination**, European Desalination Society and Center for Research and Technology Hellas (CERTH), Sani Resort 22 –25 April 2007, Halkidiki, Greece. v. 220, n. 1, p. 669–676, 1 mar. 2008.
- ABDULHAMED, A. J. et al. Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 822–831, 1 ago. 2018.
- ASANO, C. H.; COLLI, E. **Cálculo Numérico - Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: [s.n.].
- AUGUSTO, A. D. R. Modelagem térmica e análise paramétrica de concentradores solares cilíndrico-parabólicos. n. 10, 2010.
- AVALLONE, E. Avaliação da eficiência térmica de um coletor solar tipo tubo evacuado modificado. p. 77, 2013.
- AVALLONE, E. [UNESP. Estudo de um coletor solar, tipo tubo evacuado modificado, utilizando um concentrador cilíndrico parabólico (CPC). 30 out. 2017.
- AZAD, K. A.; SHARMA, S.; RASUL, M. G. **Clean Energy for Sustainable Development: Comparisons and Contrasts of New Approaches**. [s.l.] Academic Press, 2016.
- CAVALCANTI, M. A. DE V. Análise da influência de superfícies refletivas nas perdas de calor de sistema térmicos. 28 fev. 2011.
- DA ROCHA QUEIROZ, J. et al. Construction and Automation of a Microcontrolled Solar Tracker. **Processes**, v. 8, n. 10, p. 1309, out. 2020.
- DE CARVALHO, R. M. Análise óptica e térmica de um coletor solar parabólico com tubo evacuado para aplicação em sistemas de refrigeração por absorção. p. 105, 2018.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2013.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Series Datasheet**, 2021. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 1 set. 2021
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. L. **The Feynman Lectures on Physics: Commemorative Issue**. [s.l.] Addison-Wesley, 1989.
- GAMA, A. et al. Design and realization of a novel sun tracking system with absorber displacement for parabolic trough collectors. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 5, n. 3, p. 033108, 1 maio 2013.
- GARCÍA-CORTÉS, S.; BELLO-GARCÍA, A.; ORDÓÑEZ, C. Estimating intercept factor of a parabolic solar trough collector with new supporting structure using off-the-shelf

photogrammetric equipment. **Applied Energy**, v. 92, p. 815–821, 1 abr. 2012.

GHODBANE, M.; BOUMEDDANE, B. A numerical analysis of the energy behavior of a parabolic trough concentrator. **Journal of Fundamental and Applied Sciences**, v. 8, p. 671–691, 1 set. 2016.

GLOBAL SOLAR ATLAS. **Global Solar Atlas**. Disponível em:
<https://globalsolaratlas.info/map?c=11.609193,8.613281,3>. Acesso em: 24 ago. 2021.

GOMES, M.; GUEDES, G. **Desenvolvimento de um concentrador solar cilíndrico parabólico para aquecimento de fluidos**. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 21 set. 2010. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/275953512_DESENVOLVIMENTO_DE_UM_CO NCENTRADOR_SOLAR_CILINDRICO_PARABOLICO_PARA_AQUECIMENTO_DE_F LUIDOS.

GUIDO RAMALHO. **Como estimar o torque fornecido por um redutor através da potência do motor elétrico**. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/como-estimar-o-torque-fornecido-por-um-redutor-atrav%C3%A9s-guido-ramalho>. Acesso em: 9 out. 2021.

GUIDORIZZI, H. L. **Um Curso de Cálculo**. 5. ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 1

HEWITT, P. **Física Conceitual - 12.Ed.** [s.l.] Bookman Editora, 2015.

IBELE, W. E. **Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy**. Menlo Park, Calif.: Stanford Research Institute, 1956.

JINGZHUO, W.; CHENGLONG, G. **Research on 1-Wire Bus Temperature Monitoring System**. 2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Anais... In: 2007 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENTS. ago. 2007.

KALOGIROU, S. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. Second edition ed. Amsterdam; Boston: Elsevier, AP, Academic Press is an imprint of Elsevier, 2014.

KALOGIROU, S. A. Solar Thermal Collectors and Applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 3, p. 231–295, 1 jan. 2004.

MATRAI, B. B. Projeto e construção de um aquecedor solar concentrador. p. 10, 2008.

MOUSAVIDE MALEKI, S. A.; HIZAM, H.; GOMES, C. Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces: Models Re-Visited. **Energies**, v. 10, n. 1, p. 134, jan. 2017.

NATIVIDADE, P. S. G. Desenvolvimento e Análise Experimental de Coletor Solar Tipo Tubo Evacuado Modificado Dotado de Concentrador Cilíndrico-Parabólico. 2017.

NERI, A. J. P. et al. **br3n0henrique/solarconcentrator**. Disponível em:
<https://github.com;br3n0henrique/solarconcentrator>. Acesso em: 16 nov. 2021.

NERI, A. J. P. et al. **Concentrador Solar**. Disponível em:
<https://concentradorsolar.vercel.app/>. Acesso em: 17 nov. 2021a.

NERI, A. J. P. et al. **API do concentrador solar.** Disponível em:
<https://concentradorsolar.000webhostapp.com/>. Acesso em: 17 nov. 2021b.

NEWTON, I. **The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy.** [s.l.] Univ of California Press, 1999.

OKONKWO, E. C.; ABID, M.; RATLAMWALA, T. A. H. Comparative Study of Heat Transfer Enhancement in Parabolic Trough Collector Based on Modified Absorber Geometry. **Journal of Energy Engineering**, v. 145, n. 3, p. 04019007, 1 jun. 2019.

PALOTA, P. H. et al. An inexpensive anemometer using Arduino board. **Facta universitatis - series: Electronics and Energetics**, v. 32, n. 3, p. 359–368, 2019.

RAGHEB, M. **Solar thermal power and energy storage historical perspective.** Disponível em:
<http://www.ragheb.co/NPRE%20498ES%20Energy%20Storage%20Systems/Solar%20Thermal%20Power%20and%20Energy%20Storage%20Historical%20Perspective.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2020.

RIEDL, M. J. **Optical Design Fundamentals for Infrared Systems.** [s.l.] SPIE Press, 2001.

SAYIGH, A. A. M. **Solar Energy Engineering.** [s.l.] Elsevier, 1977.

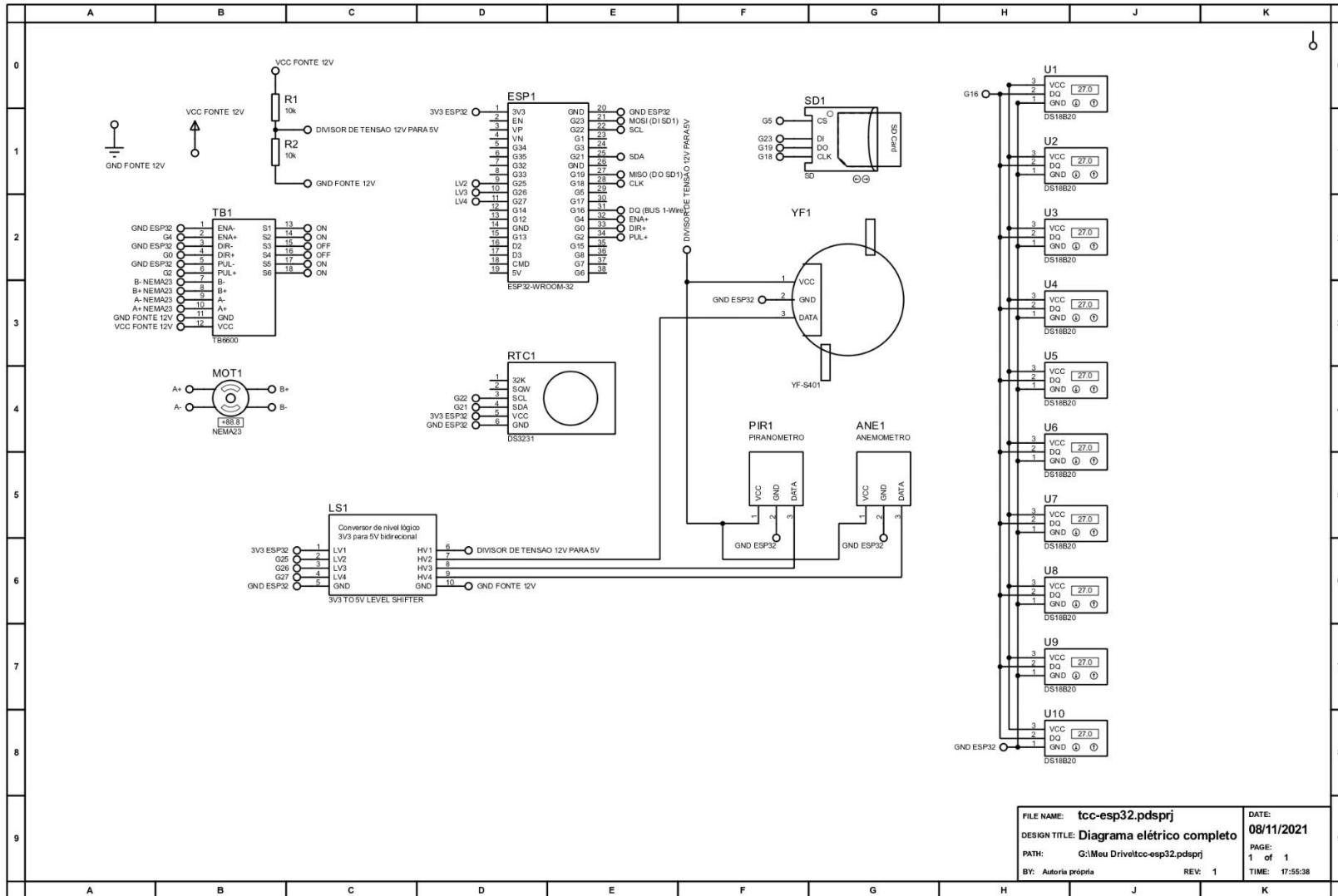
SILVA, L. P. DE L. Desenvolvimento de um coletor solar cilíndrico parabólico para baixas e médias temperaturas. 31 ago. 2015.

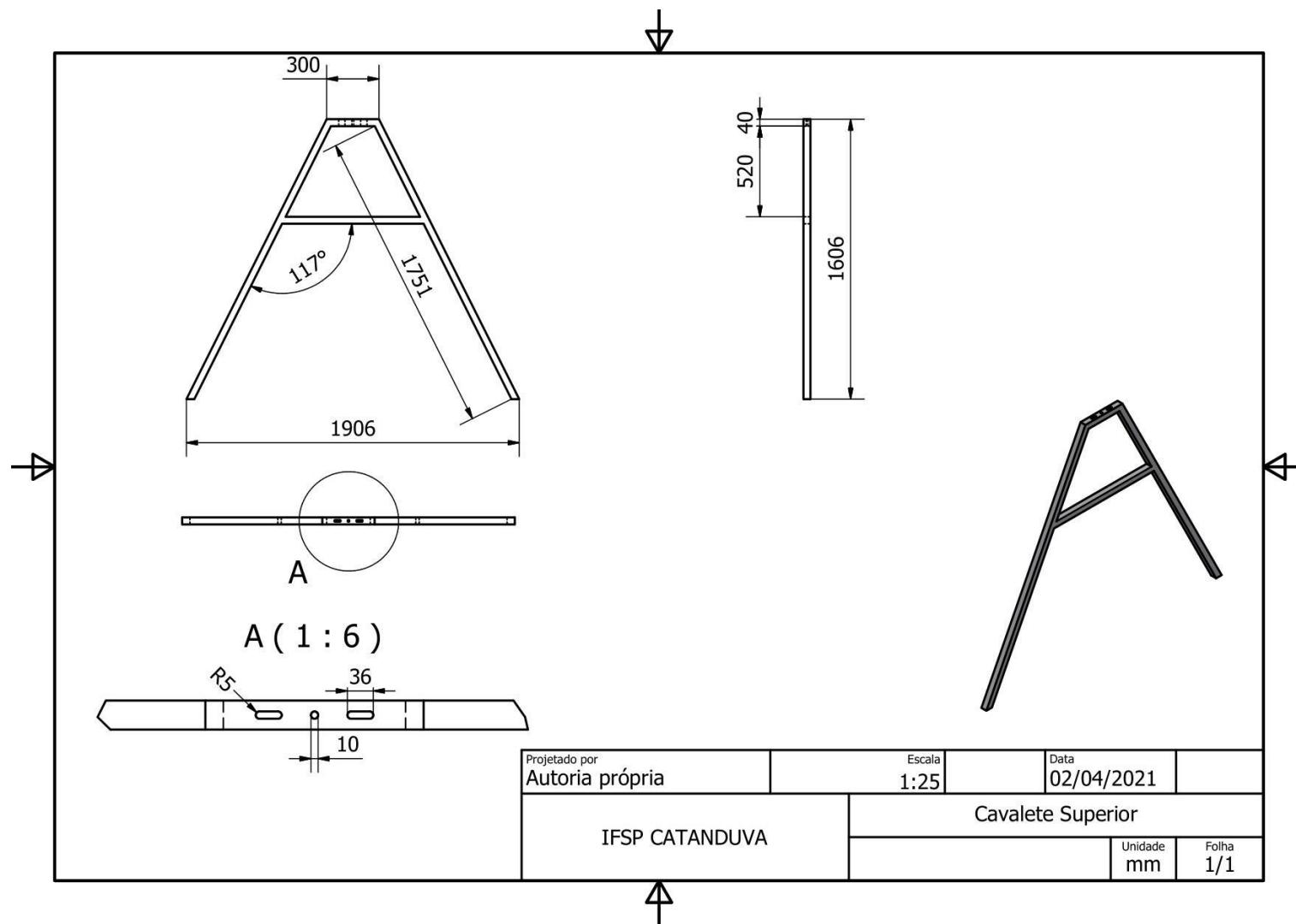
SRIDHAR, K. et al. Performance of Cylindrical Parabolic Collector with Automated Tracking System. **Applied Solar Energy**, v. 54, n. 2, p. 134–138, 1 mar. 2018.

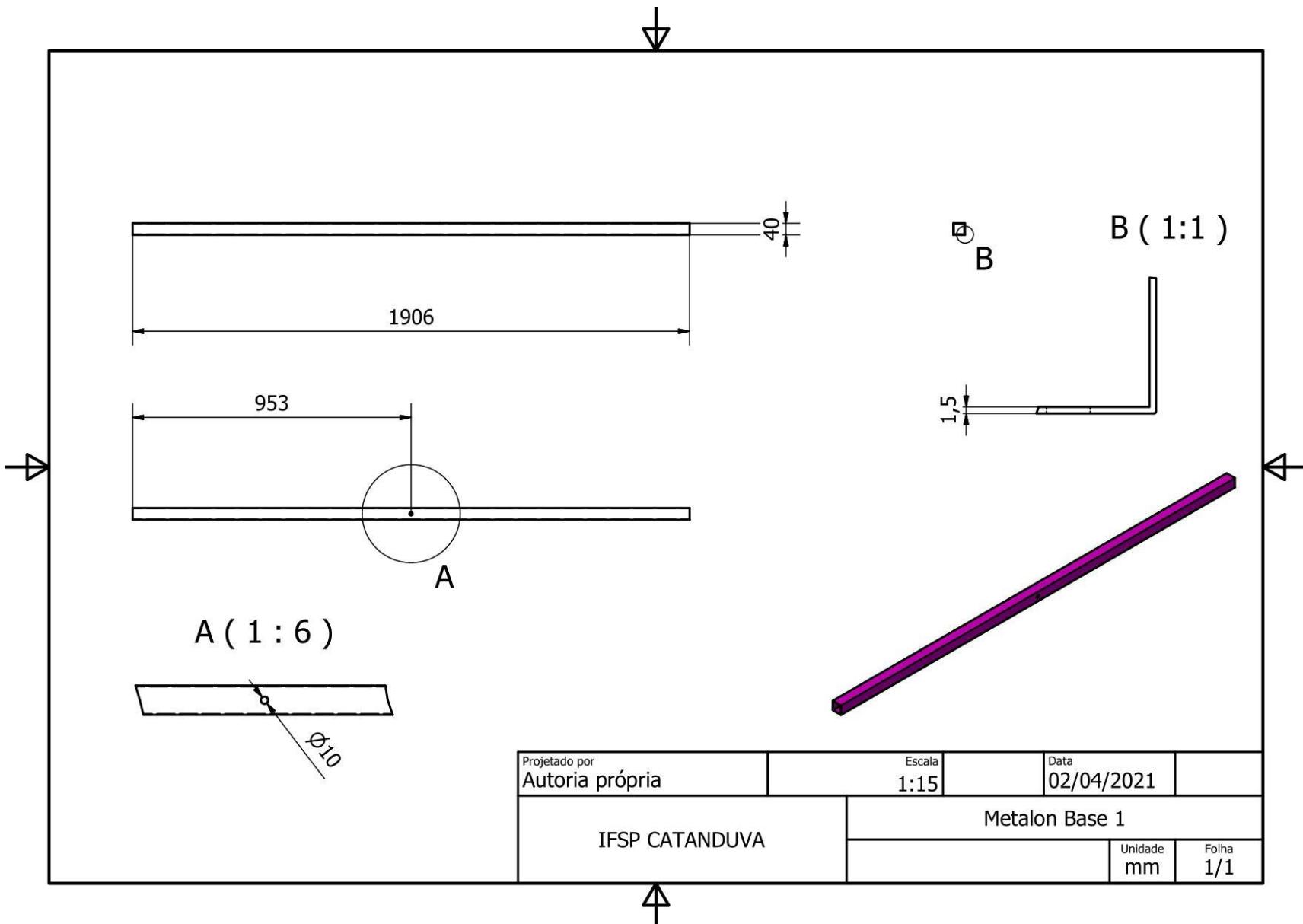
TIAN, Y.; ZHAO, C. Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. **Applied Energy**, v. 104, p. 538–553, 1 abr. 2013.

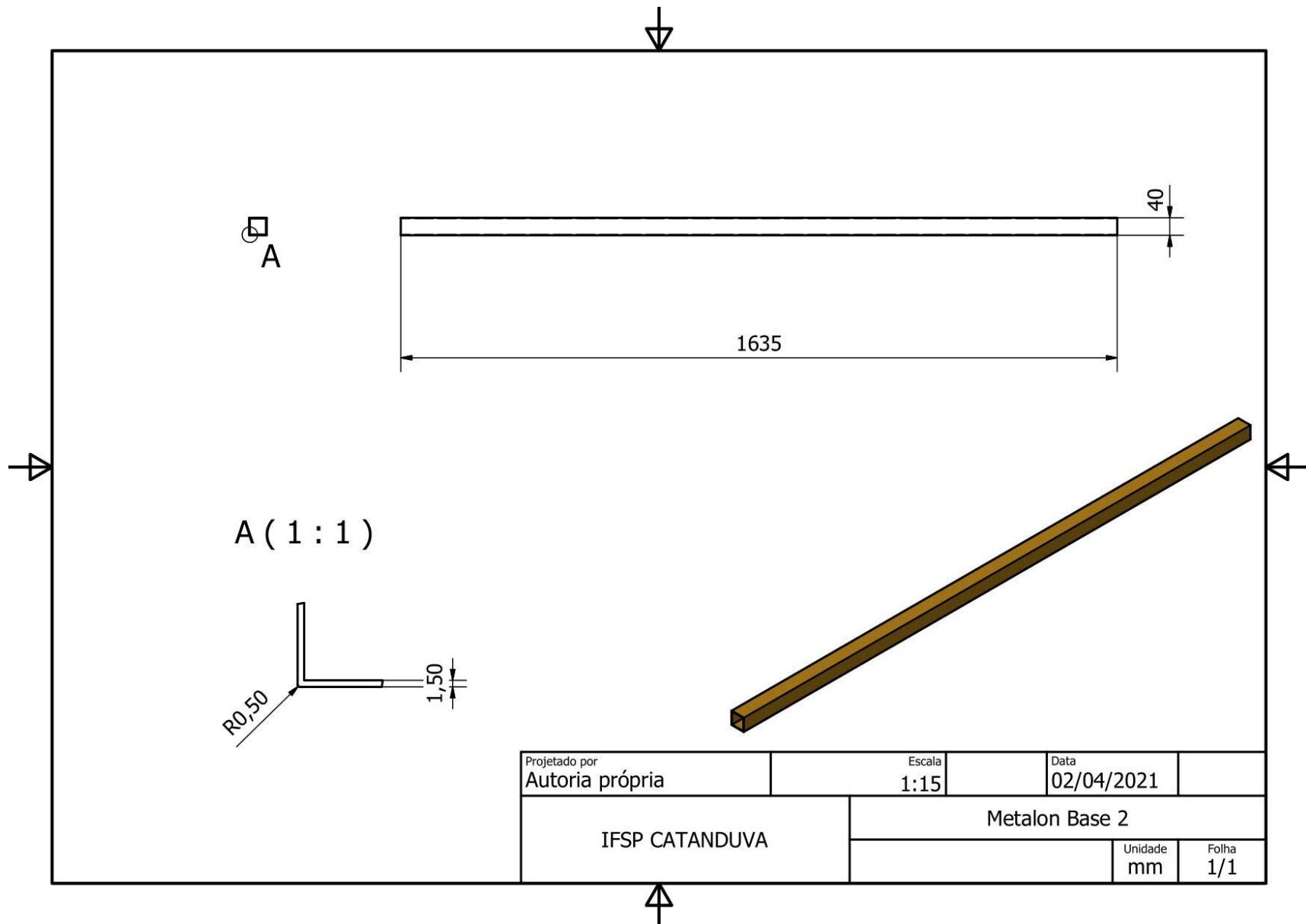
WALKER, J.; RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Fundamentals of physics.** 10th edition ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.

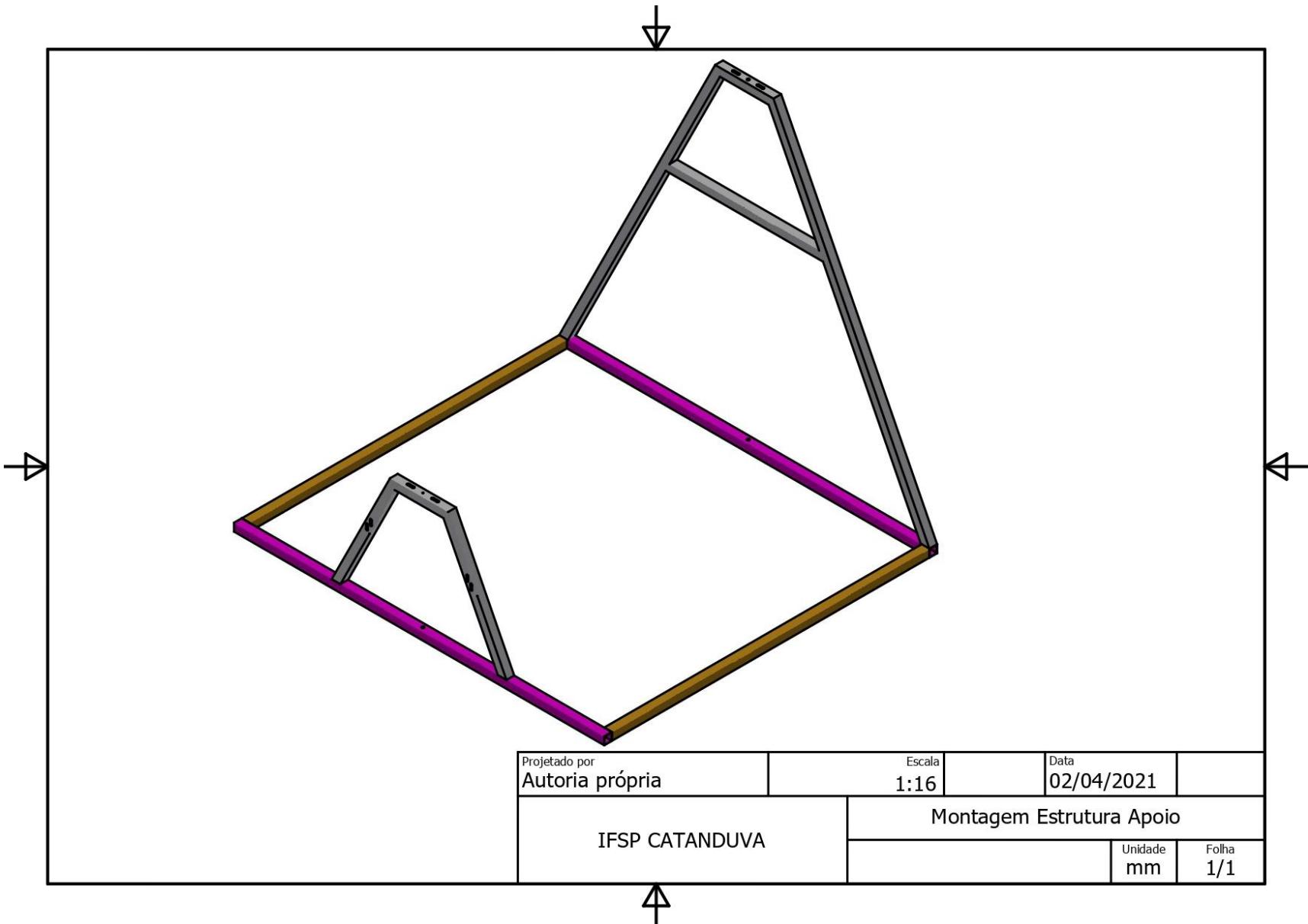
APÊNDICE A – DIAGRAMA ELÉTRICO COMPLETO

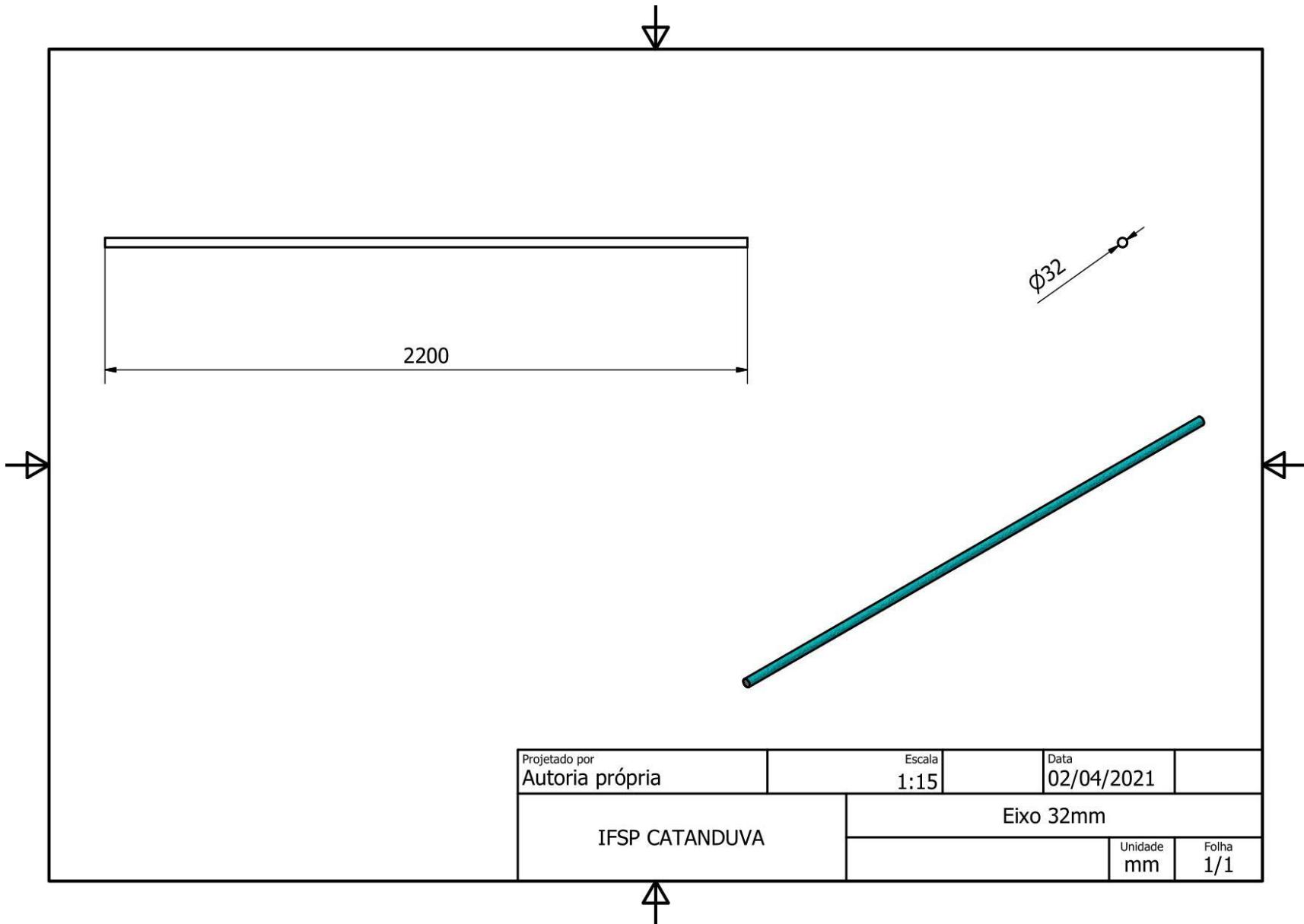


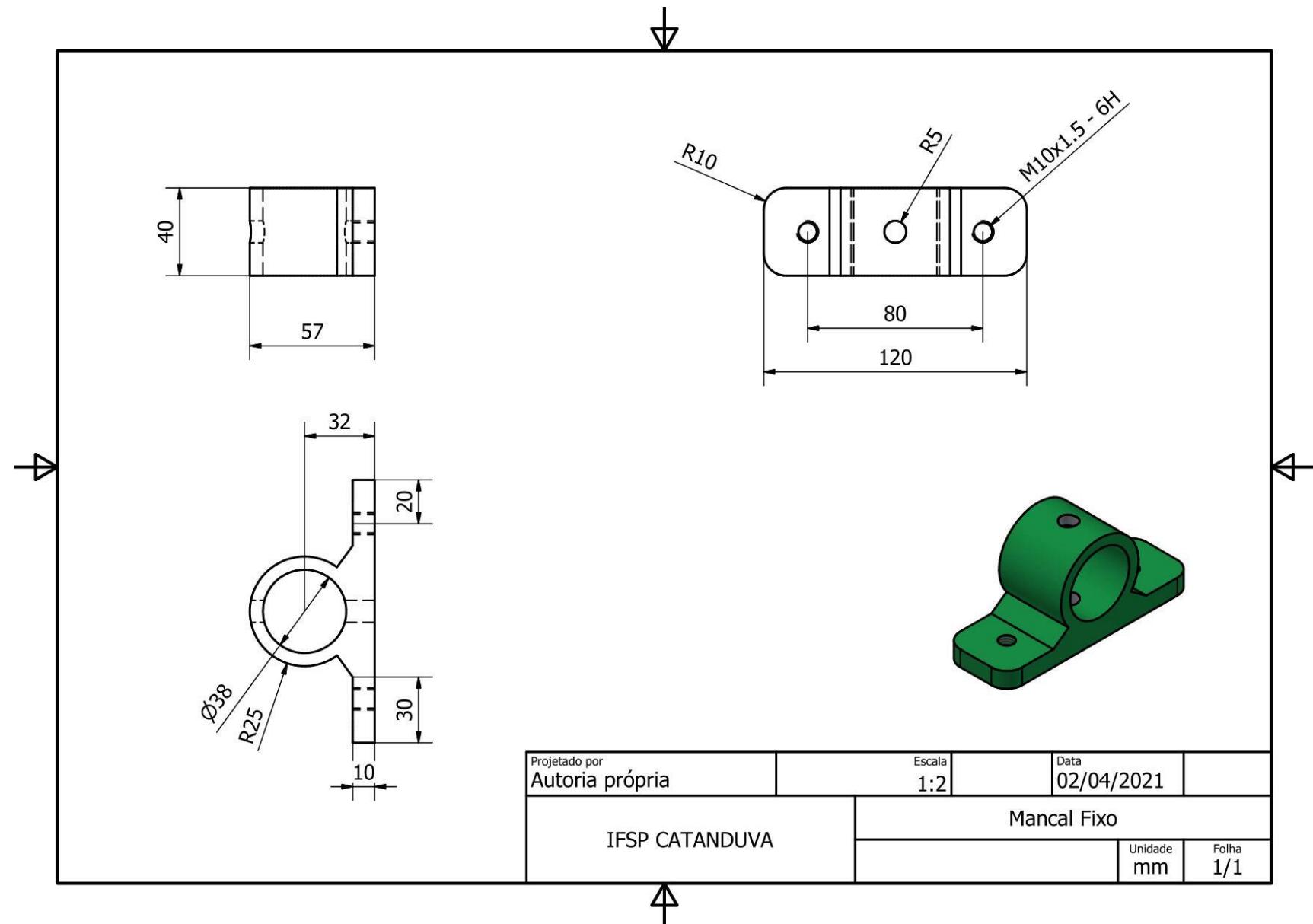
APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DAS PEÇAS DA ESTRUTURA PROJETADA

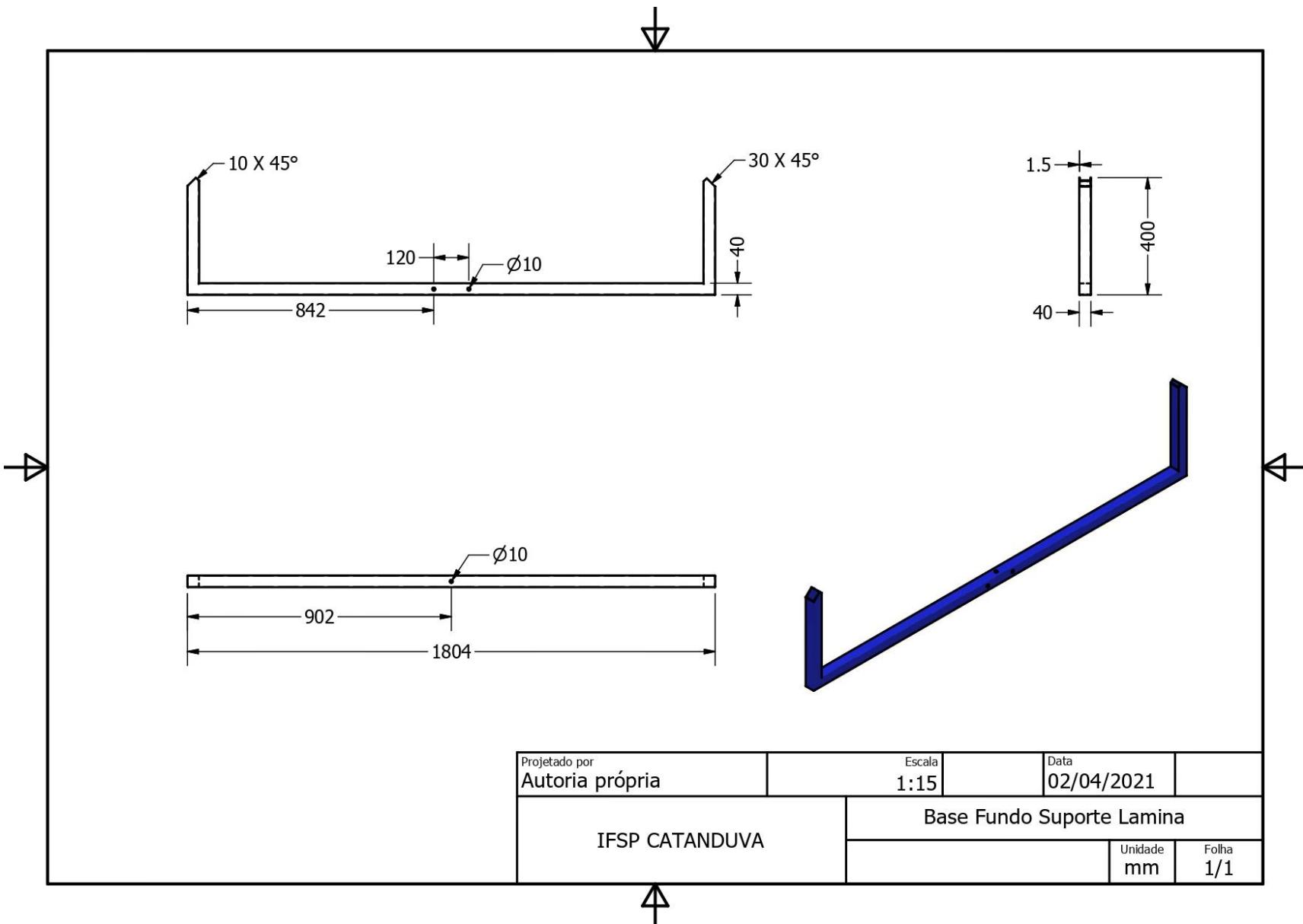


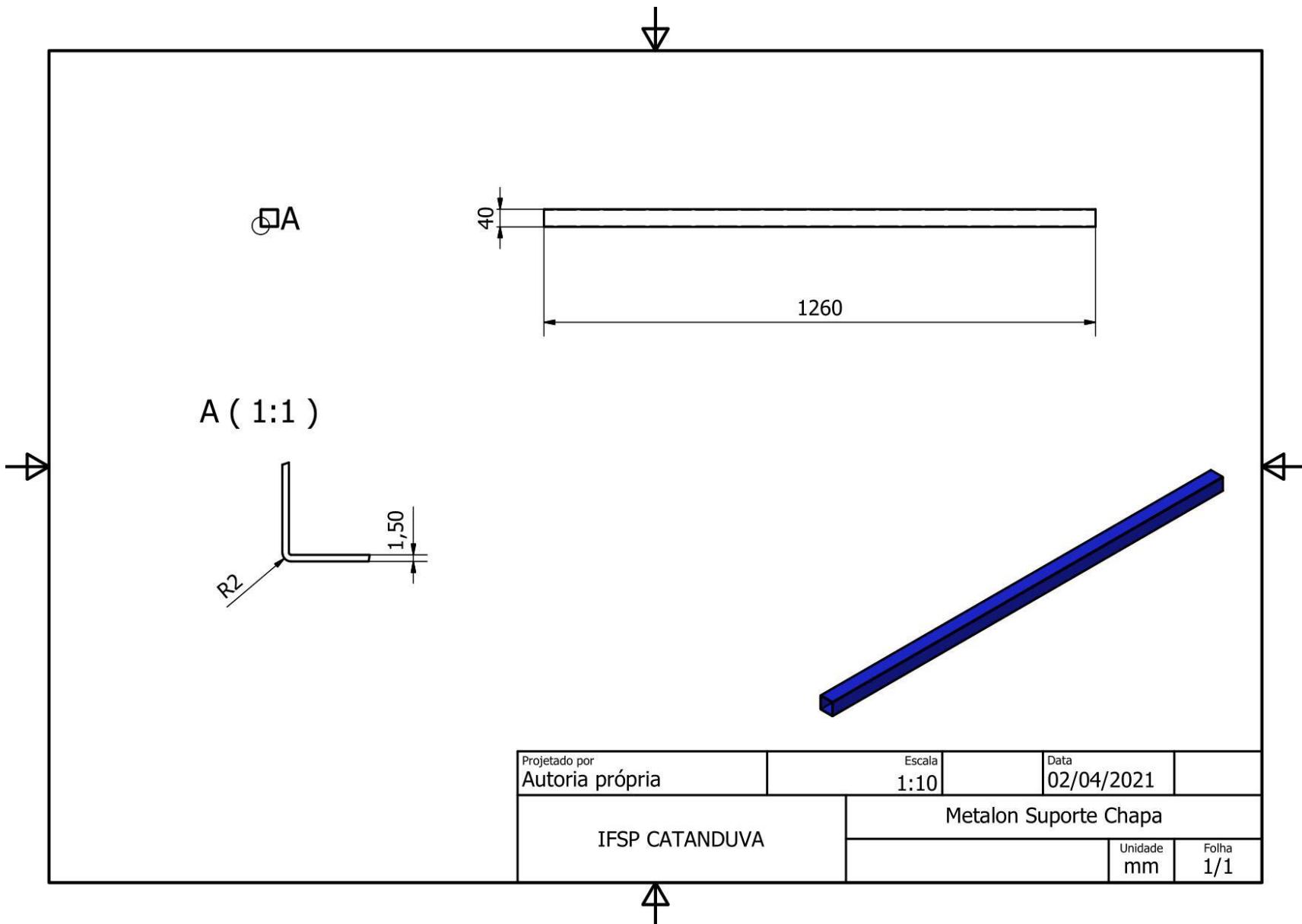












100

