



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA  
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE BOM JESUS DA LAPA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**VICTOR LUJAN PIRES MARTINS MARCELINO**

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO SOLAR PARA PLACAS  
FOTOVOLTAICAS**

**BOM JESUS DA LAPA - BA**

**2024**

**VICTOR LUJAN PIRES MARTINS MARCELINO**

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO SOLAR PARA PLACAS  
FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, da Universidade Federal do Oeste da Bahia, para aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso.

**ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ ISSAO SATO**

**COORIENTADOR: PROF. DR. LEANDRO BRITO SANTOS**

**BOM JESUS DA LAPA - BA**

**2024**

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

M314 Marcelino, Victor Lujan Pires Martins  
Análise de um sistema de posicionamento solar para placas fotovoltaicas.  
/ Victor Lujan Pires Martins Marcelino. – 2024.

110f.: il.

Orientador: Prof. Dr. André Issao Sato  
Coorientador: Prof. Dr. Leandro Brito Santos  
TCC - Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do  
Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA,  
2024.

1. Energia solar. 2. Energia – transmissão. I. Sato, André Issao. II.  
Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom  
Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 621.473

---

**Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB**

**VICTOR LUJAN PIRES MARTINS MARCELINO**

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO SOLAR PARA PLACAS  
FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, da Universidade Federal do Oeste da Bahia, para aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso.

Bom Jesus da Lapa, 05 de julho de 2024.

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou este Projeto:

---

**Prof. Dr. André Issao Sato, Presidente**  
**Universidade Federal do Oeste da Bahia**

---

**Prof. Dr. Leandro Brito Santos**  
**Universidade Federal do Recôncavo da Bahia**

---

**Prof. Dr. Iug Lopes**  
**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano**

---

**Prof. Dr. Tony Silva Almeida**  
**Universidade Federal do Oeste da Bahia**

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, quero expressar minha gratidão a Deus por Sua infinita graça e por me guiar ao longo de todos os obstáculos e conquistas da minha vida. Durante toda a minha jornada, sua presença constante foi a fonte de toda minha força e inspiração. Sem Ele, nada do que alcancei seria possível.

Dedico minha gratidão mais sincera e especial à minha família, especialmente à minha mãe, Elisangela Pires Martins. Mulher batalhadora, guerreira, seu apoio incondicional e sua força são a base sobre a qual construí minhas realizações. Sua dedicação, seu amor e a maneira como enfrentou cada desafio para garantir que eu tivesse todas as oportunidades necessárias são inspirações constantes em minha vida. Agradeço por sempre estar ao meu lado, me apoiar nas minhas decisões e nunca deixar faltar nada, proporcionando não só o sustento material, mas também o emocional, que foi fundamental para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço imensamente aos meus orientadores, Dr. André Issao Sato e Dr. Leandro Brito Santos, pela paciência, dedicação e ensinamentos valiosos que enriqueceram não só este trabalho, mas toda a minha formação. Prof. Dr. André Issao Sato, sua expertise, sua paciência e orientações técnicas foram essenciais para a realização deste projeto. Prof. Dr. Leandro Brito Santos, sua orientação ao longo da minha jornada acadêmica foi crucial, além da sua capacidade de ensinar e inspirar foi fundamental para o meu crescimento intelectual e profissional.

Agradeço à Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB pelo ambiente acadêmico enriquecedor e pelo suporte durante todos os anos de estudo. Esta instituição proporcionou as ferramentas e o conhecimento necessário para desenvolver este trabalho e serei eternamente grato por cada oportunidade oferecida. Aos meus amigos e colegas de curso, um agradecimento especial por cada momento de apoio, incentivo e colaboração. Vocês tornaram essa jornada mais leve, significativa e cada conquista é também fruto do nosso trabalho em equipe. A amizade e o companheirismo de vocês foram essenciais para a conclusão desta graduação.

Por fim, estendo minha gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Cada palavra de encorajamento, cada gesto de apoio e ensinamento foram fundamentais para que este sonho se tornasse realidade.

## RESUMO

MARCELINO, Victor Lujan Pires Martins. **Análise de um sistema de posicionamento solar para placas fotovoltaicas**. 2024. 108 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Oeste da Bahia, Bom Jesus da Lapa, 2024.

A energia fotovoltaica tem-se destacado como uma das principais alternativas de energia renovável para a matriz energética global, especialmente diante da crescente demanda por fontes limpas e sustentáveis. Contudo, essa tecnologia ainda enfrenta alguns desafios, como o custo de aquisição e a eficiência energética, que depende do ângulo de incidência da radiação solar e da temperatura das células fotovoltaicas. Com o objetivo de avaliar a influência do posicionamento da placa em relação ao Sol, este trabalho desenvolveu um protótipo com um painel fotovoltaico de baixa potência (1,5 W) instalado na cidade de Bom Jesus da Lapa, Bahia. O sistema de posicionamento foi projetado com base no equacionamento da posição do Sol ao longo do dia, utilizando um algoritmo que calcula a altitude e azimute solares a partir de dados como data, hora e coordenadas geográficas. Os valores de tensão e corrente foram coletados por meio de uma placa controladora Arduino® e sensores, como o *Real Time Clock* (RTC), módulo sensor de tensão e módulo micro SD Card. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema de posicionamento solar apresentou uma melhoria de 1,72% na eficiência energética em comparação ao sistema fixo, especialmente em condições climáticas favoráveis. Essa vantagem é ainda mais relevante considerando que o sistema de posicionamento desenvolvido apresenta menores custos de fabricação devido à utilização de tecnologias de manufatura aditiva. Embora o sistema de posicionamento tenha apresentado uma melhoria significativa na eficiência, sua aplicação em larga escala requer mais espaço para evitar problemas de sombreamento entre as placas. Portanto, futuras pesquisas devem focar na investigação da relação entre a temperatura dos painéis e a eficiência energética, bem como no desenvolvimento de soluções mais compactas e escaláveis para a implementação de sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar.

Palavras-chave: Eficiência energética. Painéis fotovoltaicos. Posicionamento solar.

## ABSTRACT

MARCELINO, Victor Lujan Pires Martins. Analysis of a solar positioning system for photovoltaic panels. 2024. 108 p. Monograph (Graduation in Mechanical Engineering) – Federal University of West Bahia, Bom Jesus da Lapa, 2024.

Photovoltaic energy has emerged as one of the main renewable energy alternatives for the global energy matrix, especially given the increasing demand for clean and sustainable sources. However, this technology still faces some challenges, such as acquisition costs and energy efficiency, which depend on the angle of incidence of solar radiation and the temperature of the photovoltaic cells. Aiming to evaluate the influence of panel positioning relative to the Sun, this work developed a prototype with a low-power photovoltaic panel (1.5 W) installed in the city of Bom Jesus da Lapa, Bahia. The positioning system was designed based on the calculation of the Sun's position throughout the day, using an algorithm that computes the solar altitude and azimuth from data such as date, time, and geographic coordinates. Voltage and current values were collected through an Arduino® controller board and sensors, including a Real-Time Clock (RTC), a voltage sensor module, and a micro SD Card module. The results demonstrated that the solar positioning system improved energy efficiency by 1.72% compared to the fixed system, especially under favorable weather conditions. This advantage is even more relevant considering that the developed positioning system has lower manufacturing costs due to the use of additive manufacturing technologies. Although the positioning system showed a significant improvement in efficiency, its large-scale application requires more space to avoid shading issues between panels. Therefore, future research should focus on investigating the relationship between panel temperature and energy efficiency, as well as on developing more compact and scalable solutions for implementing photovoltaic systems with solar tracking.

Keywords: Energy efficiency. Photovoltaic panels. Solar positioning.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa conceitual do modelo da pesquisa	17
Figura 2 — Salto da banda de valência à banda de condução no semicondutor	19
Figura 3 – Espectro eletromagnético da radiação solar com detalhamento da faixa visível humana	20
Figura 4 – Processos de interação da radiação solar	21
Figura 5 — Plano elíptico de órbita da Terra em torno do Sol com a especificação das estações do ano do hemisfério Sul	22
Figura 6 — Trajetória do Sol conforme a estação do ano vigente	22
Figura 7 — Irradiância solar das componentes direta e difusa da Terra	24
Figura 8 — Efeito cosseno sobre a irradiância solar	25
Figura 9 — Representação do ângulo de declinação solar	29
Figura 10 – Ângulos primordiais para o posicionamento do Sol	30
Figura 11 — Total anual de irradiância solar direta em regiões com maior potencial de aproveitamento de energia solar	32
Figura 12 — Placa Arduino®	34
Quadro 1 – Listas de itens para a confecção do protótipo	36
Figura 13 – Modelo esquemático do projeto	40
Figura 14 – Montagem dos componentes eletrônicos	41
Figura 15 – Experimento em funcionamento no pátio do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa	42
Figura 16 – Circuito montado para coleta de dados da tensão dos painéis fotovoltaicos	45
Figura 17 – Posicionando os módulos fotovoltaicos ao 0°N (Norte)	49
Figura 18 – Desenho do sistema com e sem posicionamento solar modelado no CAD	50
Figura 19 – Suporte dos painéis solares modelados no CAD	51
Figura 20 – Desenho CAD da trava	51
Figura 21 – Desenho CAD do eixo	52
Figura 22 – Desenho CAD do suporte para o eixo	52

Figura 23 – Desenho CAD do suporte em U	53
Figura 24 – Desenho CAD do suporte do servo motor	54
Figura 25 – Desenho CAD do conjunto de engrenagens	55
Figura 26 – Desenho CAD dos moldes da caixa	56
Figura 27 – Montagem da caixa no CAD	56
Figura 28 – Impressora GTMax3D Core H4	57
Figura 29 – Impressões de alguns componentes na Impressora 3D	58
Figura 30 – Aplicação de parafuso e rolamento no protótipo de posicionamento solar	59
Figura 31 – Protótipo de posicionamento solar e sem posicionamento	60
Figura 32 – Falhas apresentadas na Impressão 3D	61
Figura 33 – Curvas resultantes das Equações (12) e (13) do ângulo de azimute	62
Figura 34 – Movimento aparente do Sol em um dia qualquer	63
Figura 35 – Potência média do dia [mW] x dia com exceção dos domingos e dia 15/05/2024	64
Figura 36 – Potência média horária [mW] x hora do dia 11/05/2024	65
Figura 37 – Potência média horária [mW] x hora do dia 17/05/2024	66
Figura 38 – Potência média horária [mW] x hora do dia 18/05/2024	66
Figura 39 – Incidência dos raios solares em determinados horários durante o teste do protótipo	67
Figura 40 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora dos dias 11 e 17 de maio de 2024	68
Figura 41 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora do dia 18 de maio de 2024	69
Figura D1 – Vistas da peça suporte dos painéis solares	87
Figura D2 – Vistas da peça trava	88
Figura D3 – Vistas da peça eixo	89
Figura D4 – Vistas da peça suporte para o eixo	90
Figura D5 – Vistas da peça suporte em U	91
Figura D6 – Vistas da peça suporte do servo motor	92
Figura D7 – Vistas da peça complemento do suporte do servo motor	93

Figura D8 – Vistas da peça engrenagem movida acoplada na placa fotovoltaica (coroa)	94
Figura D9 – Vistas da peça engrenagem motora acoplada no servo motor (pinhão)	95
Figura D10 – Vistas da peça da parte inferior do molde da caixa	96
Figura D11 – Vistas da peça da parte superior do molde da caixa	97
Figura D12 – Vistas da peça da parte lateral (esquerda e direita) do molde da caixa	98
Figura D13 – Vistas da peça da parte lateral com abertura da ventoinha do molde da caixa	99
Figura E1 – Potência média horária [mW] x hora do dia 09/05/2024	100
Figura E2 – Potência média horária [mW] x hora do dia 10/05/2024	100
Figura E3 – Potência média horária [mW] x hora do dia 13/05/2024	101
Figura E4 – Potência média horária [mW] x hora do dia 14/05/2024	101
Figura E5 – Potência média horária [mW] x hora do dia 16/05/2024	102
Figura E6 – Potência média horária [mW] x hora do dia 20/05/2024	102
Figura E7 – Potência média horária [mW] x hora do dia 21/05/2024	103
Figura F1 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora dos dias 09 e 10 de maio de 2024	104
Figura F2 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora dos dias 13 e 14 de maio de 2024	105
Figura F3 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora dos dias 16 e 20 de maio de 2024	106
Figura F4 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora do dia 21 de maio de 2024	107
Figura G1 – QR Code para o acesso aos arquivos CAD e os códigos de programação do protótipo	108

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 — Valores dos coeficientes da equação do tempo de Lamm	27
Tabela 2 - Valores da potência média do dia [mW] em relação ao dia da coleta de dados	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
PV	Módulos fotovoltaicos
FV	Fotovoltaica
EOT	<i>Equation Of Time</i>
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
AC	Correntes Alternadas
DC	Correntes Contínuas
CRESESB	Centro de Referência para as Energia Solar e Eólica Sérgio De S. Brito
AM	<i>additive manufacturing</i>
CAD	<i>Computer-aided design</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

## LISTA DE SÍMBOLOS

$I_0$	Irradiância solar	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{SC}$	Constante Solar	[W/m <sup>2</sup> ]
$NDA$	Número de dias do ano	-
$\theta_z$	Ângulo zenital solar ou ângulo de zênite	[°]
$\delta$	Declinação solar	[rad]
$J$	Número do dia do ano (dias julianos)	-
$w$	Comprimento do dissipador	[m]
$I_{0,h}$	Irradiância solar em uma superfície horizontal	[W/m <sup>2</sup> ]
$H_{0,h}$	Radiação solar	[J/m <sup>2</sup> ou BTU/m <sup>2</sup> ]
$\omega$	Ângulo horário solar	[°]
$EOT$	<i>Equation Of Time</i>	[h]
$t_s$	Hora solar	[h]
$t_a$	Hora expressa no relógio	[h]
$D$	Constante indicadora de horário de verão	-
$\Delta long$	Correção da longitude	[kg s <sup>-1</sup> ]
$\Delta long_{local}$	Correção da longitude do meridiano do fuso horário local	-
$\Delta long_{fuso}$	Correção da longitude do local	-
$\alpha$	Altitude solar	[rad]
$L$	Latitude do local	[°]
$\gamma_s$	Ângulo de azimute	[rad]
$\eta$	Eficiência do módulo	[%]
$P_m$	Potência gerada no módulo	[W]
$A$	Área útil do PV	[m <sup>2</sup> ]
$I_m$	Corrente máxima	[A]
$V_m$	Tensão máxima	[V]
$d$	Diâmetro interno	[mm]
$m$	Módulo	[mm]
$z$	Número de dentes	-
$d_e$	Diâmetro externo	[mm]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
<b>1.2</b>	<b>Modelo da pesquisa</b>	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	18
<b>2.1</b>	<b>Módulos fotovoltaicos</b>	18
2.1.1	Efeito fotovoltaico	18
<b>2.2</b>	<b>Radiação Solar e Posicionamento Solar</b>	20
2.2.1	Espectro da radiação solar	20
2.2.2	Movimentos da Terra	21
2.2.3	Métodos para posicionamento solar	23
2.2.4	Cálculo do posicionamento solar	23
2.2.4.1	Irradiância solar	23
2.2.4.2	Determinação da hora solar	26
2.2.4.3	Equação do tempo	26
2.2.4.4	Conversão da hora solar	27
2.2.4.5	Ângulo de declinação solar	28
2.2.4.6	Inclinação	30
2.2.4.7	Ângulo de azimute	31
<b>2.3</b>	<b>Contextualização local</b>	32
<b>2.4</b>	<b>Modelagem construtiva</b>	33
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	35
<b>3.1</b>	<b>Lista de materiais</b>	35
<b>3.2</b>	<b>Experimento</b>	41
<b>3.3</b>	<b>Coleta de dados e comparação</b>	43
<b>3.4</b>	<b>Equacionamento para o posicionamento solar</b>	46
<b>3.5</b>	<b>Programação e modelagem</b>	47
<b>3.6</b>	<b>Modelagem dos componentes</b>	50
3.6.1	Projeto das peças	50
3.6.2	Processo de montagem	57
3.6.3	Desafios enfrentados	60

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO A – EQUAÇÃO GERAL DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZA.....</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGO DO POSICIONAMENTO SOLAR .....</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE B – CÓDIGO DA COLETA E SALVAMENTO DO DADOS .....</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE C – CÓDIGO DE POSICIONAMENTO DO MOTOR DE PASSO NA DIREÇÃO NORTE COM O POTENCIÔMETRO.....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE D – DESENHOS EM 2D DOS COMPONENTES.....</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE E – GRÁFICOS DA POTÊNCIA MÉDIA HORÁRIA.....</b>	<b>100</b>
	<b>APÊNDICE F – GRÁFICOS DA TENSÃO X HORA.....</b>	<b>104</b>
	<b>APÊNDICE G – QR CODE DOS ARQUIVOS CAD E OS CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO .....</b>	<b>108</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As energias renováveis se apresentam como tendência de instalação no cenário mundial, devido a fatores como: crescimento populacional, sustentabilidade ambiental e econômica. Destaca-se o fato de que, conforme dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), 19% das emissões de gases do efeito estufa são provenientes do setor de energia (MATOS, 2019).

Neste âmbito, a energia solar se apresenta como uma fonte energética com nível considerável de consolidação e com contínuo crescimento de instalações e aplicações, ocupando a terceira colocação dentre as principais fontes da matriz energética nacional, superando as termelétricas a gás natural e biomassa, de acordo com a Associação Brasileira De Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR (ABSOLAR, 2022). Para a captação de energia solar por módulos fotovoltaicos (da sigla em inglês, *PV*), sendo dispositivos que convertem a radiação solar em eletricidade, além de ser uma geração de eletricidade sem a produção de emissores de efeito estufa ou outros gases poluentes (KALOGIROU, 2016, P.481).

Embora seja uma alternativa promissora na geração de energia, a energia solar por módulos fotovoltaicos – também chamados de painéis fotovoltaicos – apresenta desafios ainda atuais, dentre eles: o alto custo de aquisição e a dependência do ângulo de incidência da radiação solar sobre a placa, influenciando a eficiência energética da mesma (KRUG; LOPES, 2016).

Uma solução comumente utilizada para permitir o posicionamento da placa em relação ao Sol, ao longo do dia, consiste em um sistema de movimentação da placa para acompanhar a posição relativa do Sol e que opere de forma autônoma. Para tanto, duas possibilidades foram levantadas: posicionamento por meio de sensoriamento da posição solar e posicionamento por meio de modelos semi-empíricos para estimativa da posição solar ao longo do dia. A segunda opção constituiria em um sistema de baixo custo dado a modelagem computacional adequada da posição do Sol ao longo do ano e do dia; cabendo, então, um estudo quanto à viabilidade desta alternativa na eficiência energética da placa solar.

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, foi desenvolvido um sistema de posicionamento solar de pequeno porte utilizando um microcontrolador Arduino®. O objetivo foi analisar o potencial aumento da eficiência energética de um painel solar

fotovoltaico equipado com este sistema em comparação a um sistema fixo. Esta análise visa verificar a viabilidade e os benefícios da implementação de um sistema de posicionamento na finalidade de melhorar o desempenho dos painéis solares.

## 1.1 Objetivos

Em vista do exposto, este trabalho teve como objetivos gerais e específicos apresentados a seguir.

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar um protótipo capaz de estimar o posicionamento solar e movimentar um painel fotovoltaico de pequeno porte, a fim de comparar a potência elétrica gerada com um sistema sem movimentação

### 1.1.2 Objetivos específicos

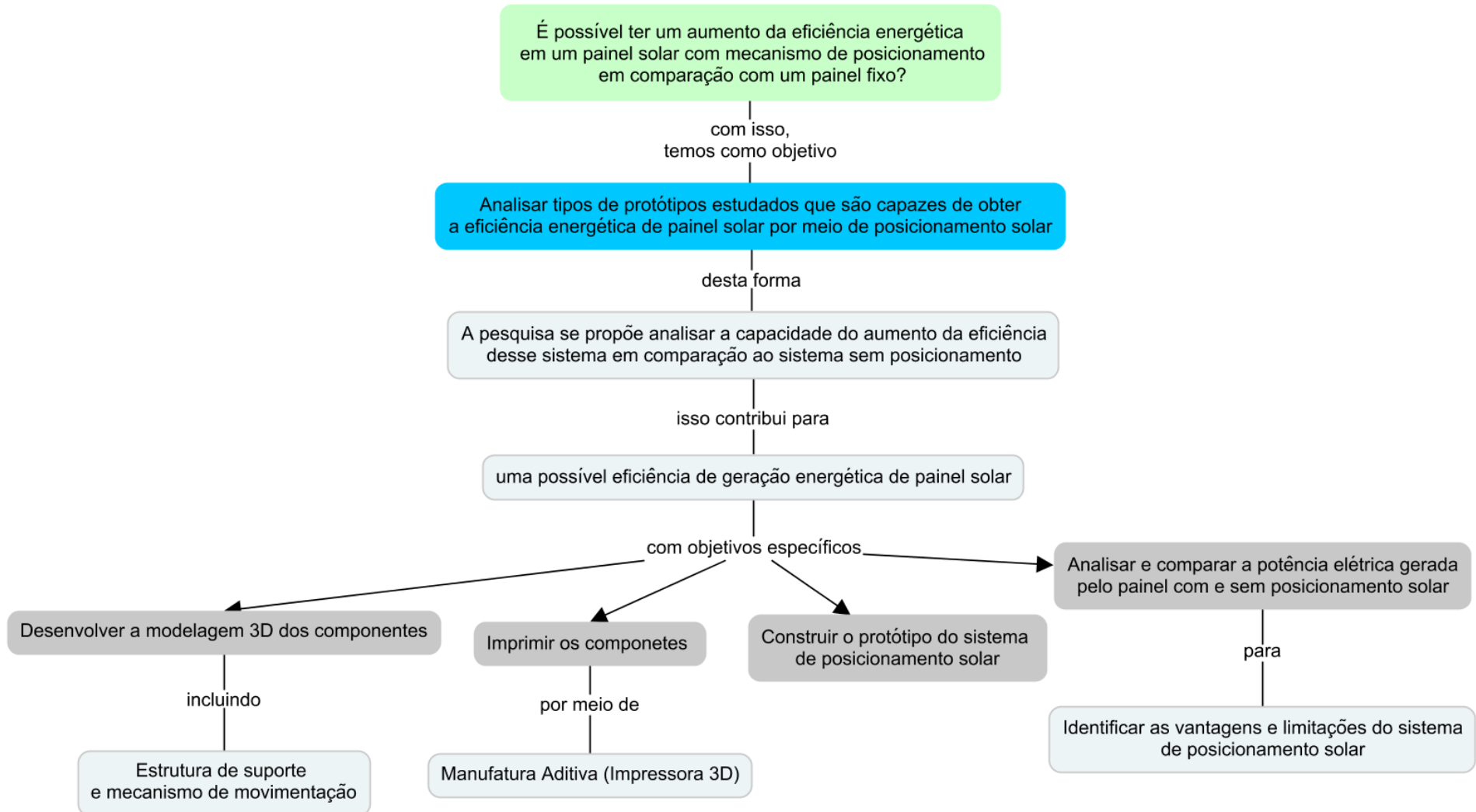
Com intuito de alcançar o objetivo geral, são listados os objetivos específicos:

- Desenvolver a modelagem 3D dos componentes necessários para o sistema de posicionamento solar, incluindo a estrutura de suporte e mecanismo de movimentação;
- Imprimir os componentes modelados em uma impressora 3D;
- Construir o protótipo do sistema de posicionamento solar utilizando os componentes impressos em 3D;
- Realizar testes de campo com o protótipo para avaliar o desempenho do sistema de posicionamento solar em comparação a um painel fotovoltaico fixo;
- Analisar e comparar a potência elétrica gerada pelo painel com posicionamento solar e o painel fotovoltaico fixo, com base nos dados coletados nos testes de campo;
- Identificar as vantagens e limitações do sistema de posicionamento solar desenvolvido.

## **1.2 Modelo da pesquisa**

A Figura 1 apresenta um mapa conceitual do modelo da pesquisa, elaborado para orientar e organizar as ideias no desenvolvimento do trabalho. Este infográfico facilita a compreensão de forma clara e apresenta o planejamento do projeto, contribuindo para uma execução mais eficiente e bem estruturada da pesquisa.

Figura 1 – Mapa conceitual do modelo da pesquisa



Fonte: Autor (2022).

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma base de conhecimentos bibliográficos que fundamentam este trabalho. O conteúdo está organizado em quatro seções distintas.

A primeira seção aborda os módulos fotovoltaicos e o efeito fotovoltaico, explicando o funcionamento e fornecendo uma breve descrição dos equipamentos envolvidos e seus efeitos.

A segunda seção trata do posicionamento solar, apresentando informações e equações necessárias para determinar a orientação ideal dos painéis fotovoltaicos.

A terceira seção discute o local de implementação dos recursos energéticos solares, destacando os fatores que influenciam a escolha da localização dos painéis solares e oferecendo uma visão geral do município.

A quarta seção apresenta o método construtivo do sistema de posicionamento, abordando as ferramentas utilizadas na fabricação do aparato experimental.

### **2.1 Módulos fotovoltaicos**

Os módulos fotovoltaicos são dispositivos responsáveis pela conversão de parte da radiação solar, em energia elétrica. Conforme descreve Kalogirou (2016), o módulo tem a sua construção em diversos tamanhos e potências, podendo gerar desde miliwatts até megawatts.

Uma célula fotovoltaica, ou célula FV, é constituída pela justaposição de duas ou mais camadas de material semicondutor, geralmente pelo material silício. Uma vez exposta à radiação solar, cargas elétricas são geradas, causando o efeito fotovoltaico (KALOGIROU, 2016).

#### **2.1.1 Efeito fotovoltaico**

A descoberta do efeito fotovoltaico foi realizada em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel, que observou a geração de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor devido à absorção da irradiação solar. A própria nomenclatura da palavra “efeito fotovoltaico” descreve esse

processo, onde “foto” vem do grego e significa luz, e “volt” refere-se à unidade de medida de tensão elétrica do Sistema Internacional (SI) (ALVES, 2008).

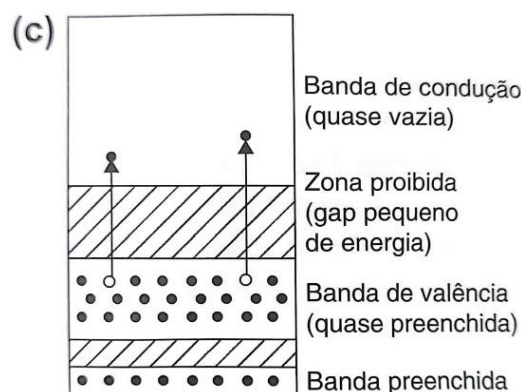
O efeito fotovoltaico ocorre devido à movimentação de elétrons no interior do material semicondutor, que possui uma banda de valência e uma banda de condução, separadas por uma lacuna chamada energia de *gap* (PORTAL SOLAR, 2022). Segundo Kalogirou (2016), a energia de *gap* é “a diferença na energia de um elétron na banda de valência e a camada mais interna da banda de condução”, ou seja, a diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução.

A banda de valência é uma faixa de energia ocupada por elétrons semilivres, enquanto a banda de condução é parcialmente preenchida com elétrons, com uma energia de *gap* entre elas de aproximadamente 1 elétron-volt ( $eV$ ). A corrente elétrica é gerada quando os elétrons da banda de valência do semicondutor recebem fótons com energia suficiente para atravessar a lacuna de energia e alcançar a banda de condução, como ilustrado na Figura 2. Este salto ocorre quando a energia do fóton é maior ou igual à energia de *gap* (PORTAL SOLAR, 2022).

Se a energia do fóton for menor do que a energia de *gap*, o elétron não terá energia suficiente para saltar para a banda de condução, resultando em um excesso de energia que é convertido em energia cinética dos elétrons, aumentando assim a temperatura do material (KALOGIROU, 2016).

Portanto, o efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores, onde a energia solar (fótons) na faixa da luz visível, com energia superior à energia de *gap*, excita os elétrons da banda de valência para a banda de condução. Essa transferência de elétrons nas células dos painéis fotovoltaicos resulta na geração de energia elétrica (SILVA; SANTOS, 2021).

Figura 2 – Salto da banda de valência à banda de condução no semicondutor



Fonte: Kalogirou (2016).

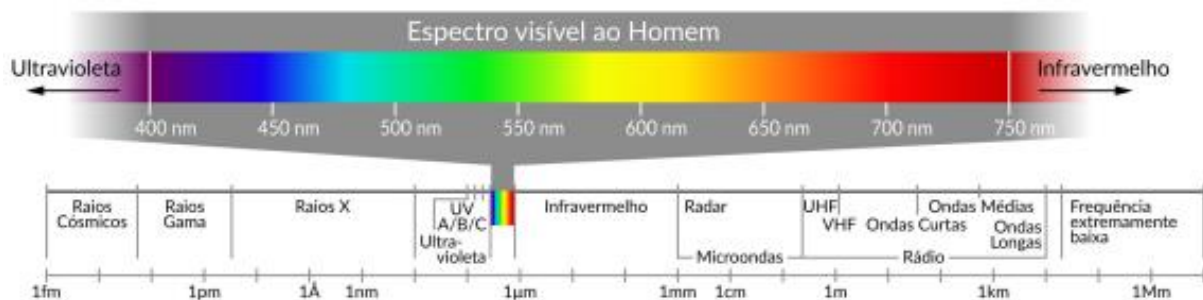
## 2.2 Radiação Solar e Posicionamento Solar

Para a implementação de um sistema de posicionamento solar e para um possível aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos é necessário o entendimento da posição do Sol ao longo do dia e do ano, para um determinado local (ROCHA FILHO, 2016). As seções a seguir apresentam informações e equacionamento relevantes para a implantação de um sistema de posicionamento de painéis fotovoltaicos.

### 2.2.1 Espectro da radiação solar

A faixa do espectro eletromagnético do Sol é composto por luz infravermelha, luz visível e luz ultravioleta, conforme ilustra a Figura 3. Cerca de 81% da energia que entra no sistema Terra/Atmosfera provém da faixa de comprimento de onda, variando do visível ao infravermelho. Esse tipo de energia é responsável por alimentar todos os processos termodinâmicos, dinâmicos e químicos – sejam eles naturais ou produzidos pelo homem – aplicados por conhecimentos científicos e tecnológicos pela sociedade (PEREIRA et al., 2017).

Figura 3 – Espectro eletromagnético da radiação solar com detalhamento da faixa visível humana



Fonte: Pereira et al. (2017).

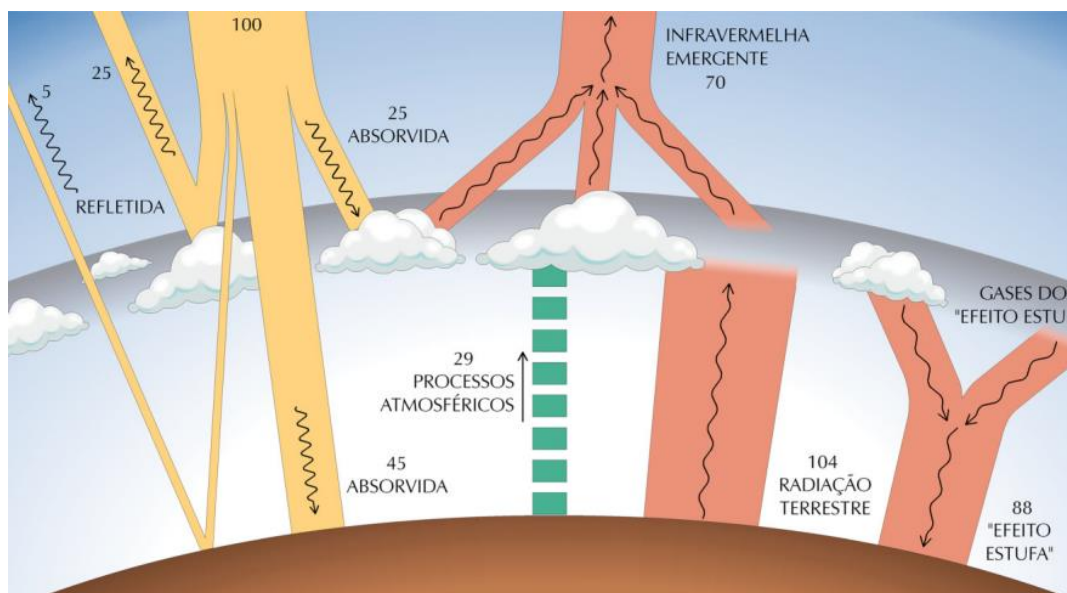
Diversos fatores influenciam a disponibilidade de energia solar, em termos espaciais e temporais. O primeiro fator de influência consiste na relação entre o Sol e a Terra. A Terra orbita o Sol a uma distância média de cerca de 150 milhões de quilômetros e completando um ciclo a cada 365,25 dias solares. Ao longo desse tempo, a distância varia entre  $1,47 \cdot 10^8$  km e  $1,52 \cdot 10^8$  km e, como resultado, também

há variação do fluxo de radiação solar extraterrestre (irradiância solar) que chega à Terra entre  $1325 \text{ W/m}^2$  e  $1412 \text{ W/m}^2$ . (PEREIRA et al., 2017).

A variação da radiação solar incidente no topo da atmosfera é estabelecida pelos fatores astrofísicos anteriormente citados. No entanto, a energia solar que atinge a superfície do planeta sofre influência de um processo físico (conhecido como transferência radiativa) que reduzem a intensidade da radiação ao longo do percurso. (PEREIRA et al., 2017).

A energia do Sol é liberada na forma de radiação eletromagnética e quando parte dessa energia é captada pela Terra, sofre processos de absorção e propagação devido às interações entre os vários comprimentos de onda da radiação e os gases constituintes da atmosfera. De um modo geral, os processos físicos, gases atmosféricos, reduzem a radiação solar fazendo - a incidir sobre as superfícies (PEREIRA et al., 2017).

Figura 4 – Processos de interação da Radiação solar



Fonte: Pereira et al. (2017).

### 2.2.2 Movimentos da Terra

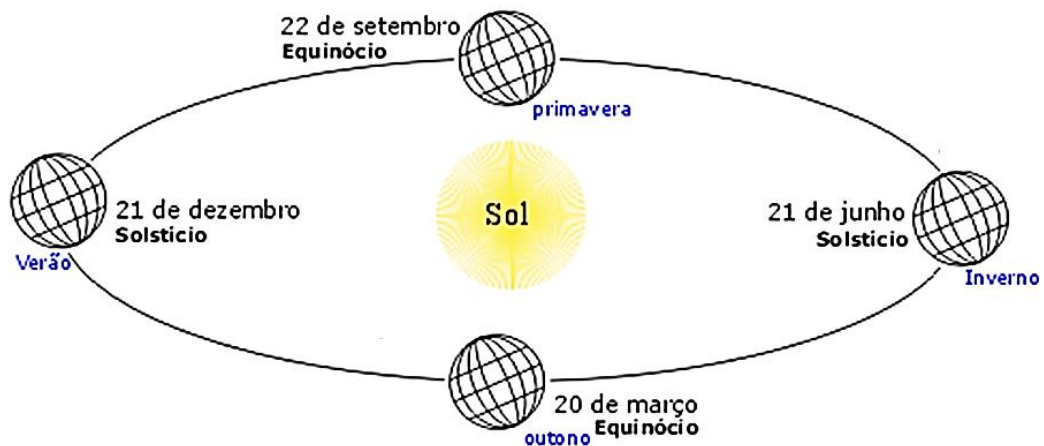
A Terra possui dois principais movimentos responsáveis pela mudança dos dias e anos, são eles: rotação e translação. A rotação é o movimento que ocorre em torno do seu próprio eixo imaginário e que leva, aproximadamente, 24 horas para se completar, sendo perceptível pela mudança do dia pela noite, enquanto a translação

é o giro em trajetória elíptica que a Terra realiza ao redor do Sol, contabilizando 365,25 dias (ROCHA FILHO, 2016).

Para as estações do ano no hemisfério sul, tem-se 4 tipos diferentes de estações, são elas: equinócio de outono, equinócio de primavera, solstício de inverno e solstício de verão. Os termos equinócio e solstício são definidos como sendo os tipos de fenômenos que marcam a posição do Sol em relação a Terra (ALVES, 2008).

A Figura 5 ilustra o plano elíptico de órbita da Terra com dias aproximados dos inícios de cada estação do ano do hemisfério Sul e a Figura 6 mostra a trajetória do Sol para cada tipo de estação do ano vigente.

Figura 5 – Plano elíptico de órbita da Terra em torno do Sol com a especificação das estações do ano do hemisfério Sul



Fonte: Modificado de [websmed.portoalegre.rs.gov.br/](http://websmed.portoalegre.rs.gov.br/).

Figura 6 – Trajetória do Sol conforme a estação do ano vigente



Fonte: <https://nucleoats.ind.br/energia-solar-fotovoltaica/>.

### 2.2.3 Métodos para posicionamento solar

Para que o painel fotovoltaico receba o máximo de radiação solar direta possível ao longo do dia, diversos métodos são empregados para a variação da posição angular. Conforme apresentado por Rocha Filho (2016), destacam-se 3 métodos: horário solar pré-definido na posição do módulo com o valor do incremento da posição angular, algoritmo matemático que calcula a posição do Sol a cada instante de tempo durante o dia e a partir do uso de sensores de luminosidade no módulo para determinar a posição do Sol durante o dia.

Segundo estudo de Rocha Filho (2016), o posicionamento solar a partir da implementação do algoritmo matemático na obtenção da posição solar permitiu o maior ganho energético quando comparado aos demais métodos citados anteriormente. Comparando com uma placa fixa, o sistema apresentou um ganho energético de aproximadamente 52,71%, seguido pelo sensor de luminosidade com 47,15% e o sistema de posição pré-definida da posição do módulo com um valor de 41,05%.

### 2.2.4 Cálculo do posicionamento solar

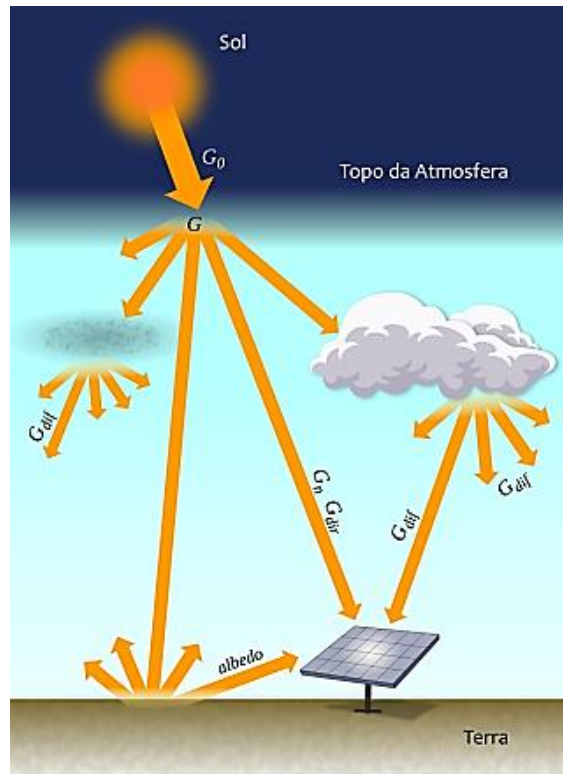
Considerando um sistema de posicionamento por meio da previsão da posição solar por equações, são apresentadas as equações utilizadas para determinar o posicionamento solar, bem como uma descrição de cada expressão matemática.

#### 2.2.4.1 Irradiância solar

A irradiância solar, ou chamada de insolação, é caracterizada como a quantidade de energia solar que atinge a Terra dada pela unidade de medida em Watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ). Além do mais, ela é composta por duas componentes: direta e difusa (PEREIRA et al., 2017).

A irradiância solar direta é a luz que chega diretamente do Sol até a superfície da Terra sem ser desviada pela atmosfera. A irradiância difusa é a luz solar que, ao interagir com partículas e gases na atmosfera, se espalha em várias direções e chega ao solo indiretamente, conforme apresenta a Figura 7 (PEREIRA et al., 2017).

Figura 7 – Irradiância solar das componentes direta e difusa da Terra



Fonte: Pereira et al. (2017).

Sendo que  $G_0$  é a irradiância extraterrestre,  $G_n$  a irradiância direta normal (incide perpendicular à superfície),  $G_{dif}$  é a irradiância difusa,  $G_{dir}$  a irradiância direta (determinada pela irradiação direta normal  $G_n$  e o cosseno do ângulo zenital solar) e  $G$  a irradiância global, dada pela soma de  $G = G_{dif} + G_{dir}$  (PEREIRA et al.,2017).

Conforme apresenta Matos (2019), o valor aproximado da irradiância solar pode ser obtida através da Equação (1), dada por (ALVES, 2008):

$$I_0 = I_{SC} \left[ 1 + 0,034 \cos \left( \frac{360 \cdot NDA}{365,25} \right) \right] \quad (1)$$

Onde:

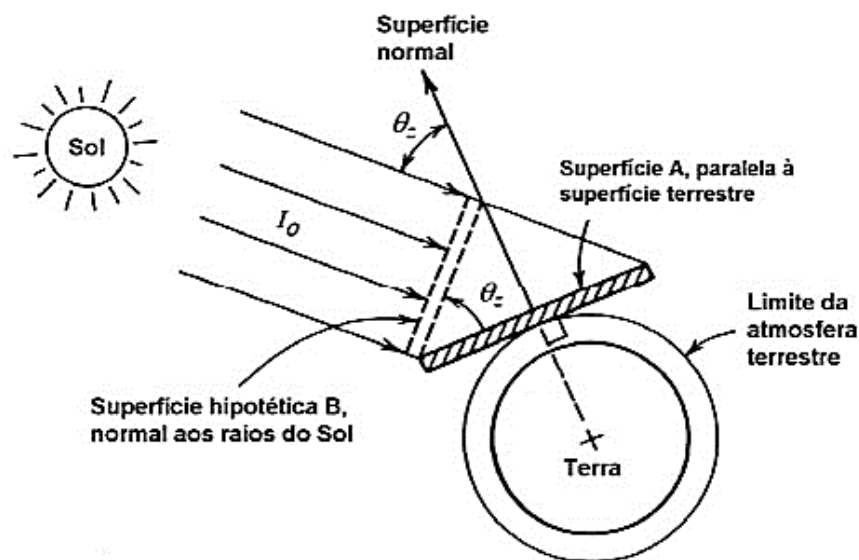
$I_0$  é a irradiância solar [ $W/m^2$ ];

$I_{SC}$  é o valor da Constante Solar dada por  $1367 W/m^2$ ;

$NDA$  é o número de dias do ano, seguindo o calendário Juliano (iniciando em 1° de janeiro).

Outro fator de influência na irradiação incidente em uma superfície plana, consiste no ângulo de incidência da radiação, visto na Figura 8 que apresenta um esquema ilustrativo da incidência da irradiação solar  $I_0$ , em que a superfície A está paralela à superfície terrestre, acima da atmosfera, enquanto a superfície hipotética B consiste na projeção da superfície A inclinada em função do ângulo zenital solar ( $\theta_z$ ) para garantir a incidência da radiação solar direta com um ângulo reto na superfície.

Figura 8 – Efeito cosseno sobre a Irradiância solar



Fonte: Stine e Geyer (2001).

Conforme explicado por Pereira et al. (2017), o ângulo zenital solar ( $\theta_z$ ) é o ângulo formado entre o vetor normal do ponto de observação no plano paralelo à superfície da Terra e o vetor que liga o mesmo ponto de observação ao Sol. Esse ângulo pode ser determinado por meio de expressões que utilizam a latitude local, a declinação solar ( $\delta$ ) e o ângulo horário solar ( $w$ ). Quando o ângulo zenital solar é igual a  $90^\circ$ , o Sol está no horizonte, ou seja, é o momento do nascer ou do pôr do sol.

Para calcular a irradiação solar, considere que a mesma potência solar incide tanto na superfície A quanto na superfície hipotética B. No entanto, como a área da superfície A é maior que a da superfície B, a energia solar distribuída por unidade de área será maior em A do que em B. A irradiação solar em uma superfície paralela ao solo é determinada por essa distribuição de energia, como mostrado na Equação (2) (MATOS, 2019).

$$I_{0,h} = I_0 \cdot \cos \theta_z \quad (2)$$

Sendo que  $I_{0,h}$  é a irradiância solar normal a uma superfície horizontal na superfície terrestre e  $\theta_z$  ângulo de zenital solar, dado em graus.

Segundo Alves (2008), o efeito deste ângulo faz com que o valor da irradiância solar em superfície horizontal ( $I_{0,h}$ ) varie ciclicamente conforme a Terra rotaciona sobre seu eixo.

#### 2.2.4.2 Determinação da hora solar

A determinação da hora solar, ou ângulo horário, baseia-se na ideia de prever a direção dos raios solares em um determinado ponto do planeta Terra, utilizando o relógio de 24 horas como referência. Às 12h00 no horário solar, o Sol está exatamente na direção Norte, com o valor do ângulo horário correspondendo à zero, sendo a determinação do seu valor antes e depois dependente da localidade (longitude). Nota-se que o valor de horário solar difere da hora local marcada no relógio, que é definida pelos fusos horários e outras correções. Para o projeto de sistemas de posicionamento de placas solares fotovoltaicas, é fundamental a definição exata da hora solar, a qual é determinada pela Equação (3) (ALVES, 2008).

$$\omega = 15^\circ (t_s - 12) \quad (3)$$

Sendo que,  $t_s$  é a hora solar medido em horas (numa escala de 0 a 24) e  $\omega$  o ângulo horário medido em graus.

Nota-se pela equação, de acordo com Rocha Filho (2016), que o valor do ângulo horário ( $\omega$ ) às 12 horas é igual a zero, apresentando valores negativos no período da manhã e positivos no período da tarde.

#### 2.2.4.3 Equação do tempo

A “Equação do Tempo” (EOT, do inglês *Equation Of Time*) permite estimar a diferença entre a hora solar média com a hora solar real para uma determinada data, podendo atingir variações de  $\pm 17$  minutos, avaliado dentro de um ciclo anual. Esta

variação pode ser definida pela Equação (4), deduzida como a “Equação do Tempo” (MATOS, 2019).

$$EOT = 2,292(0,0075 + 0,1868 \cos x - 3,2077 \sin x - 1,4615 \cos 2x - 4,089 \sin 2x) \quad (4)$$

Sendo  $x$ , em radiano, o ângulo em relação ao número do dia do ano  $N$  no calendário. A Equação (5) demonstra a relação:

$$x(N) = \frac{2\pi(N - 1)}{365} \quad (5)$$

Para proporcionar uma menor margem de erro, Woof, (1968), e posteriormente, Lamm (1981), desenvolveram uma nova Equação do Tempo, na qual o erro médio relacionado ao posicionamento seria de apenas 0,63s e um erro máximo absoluto de 2s, como é mostrado pela Equação (6) (MATOS, 2019).

$$EOT = 60 \sum_{k=0}^5 (A_k \cos\left(\frac{360k \cdot n}{365,25}\right) + B_k \sin\left(\frac{360k \cdot n}{365,25}\right)) \quad (6)$$

Onde  $n$  é o número de dias em um ciclo de 4 anos, em que  $n = 1$  refere ao dia 1 de janeiro de cada ano bissexto e  $n = 1461$  corresponde ao dia 31 de dezembro do quarto ano do ciclo.  $A_k$  e  $B_k$  são valores tabelados constantes, apresentados pela tabela 1.

Tabela 1 – Valores dos coeficientes da equação do tempo de Lamm

k	$A_k$	$B_k$
0	$2,0870 \times 10^{-4}$	0
1	$9,2869 \times 10^{-3}$	$-1,2229 \times 10^{-1}$
2	$-5,2258 \times 10^{-2}$	$-1,5698 \times 10^{-1}$
3	$-1,3077 \times 10^{-3}$	$-5,1602 \times 10^{-3}$
4	$-2,1867 \times 10^{-3}$	$-2,9823 \times 10^{-3}$
5	$-1,5100 \times 10^{-4}$	$-2,3463 \times 10^{-4}$

Fonte: Stine e Geyer (2001).

#### 2.2.4.4 Conversão da hora solar

Para obter a conversão da hora expressa no relógio para hora solar são necessários: posição geográfica, dia e padrões de ajuste dos relógios do local (ALVES, 2008).

A Equação (7) fornece a hora solar ( $t_s$ ), dada por:

$$t_s = t_a - \Delta long + \frac{EOT}{60} - D \quad (7)$$

Sendo  $t_a$  é a hora expressa no relógio,  $EOT$  o resultado da expressão da Equação (4) do tempo em horas,  $D$  a constante indicadora de horário de verão (1 para “horário de verão” e 0 para locais sem “horário de verão”) e  $\Delta long$  é a correção da longitude, dada pela Equação (8):

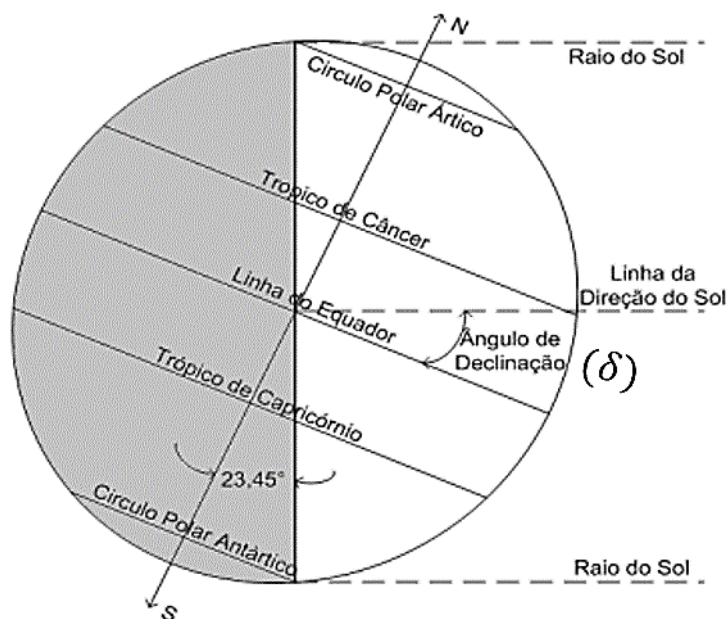
$$\Delta long = \frac{\Delta long_{local} - \Delta long_{fuso}}{15} \quad (8)$$

Sendo,  $\Delta long_{fuso}$  a longitude do meridiano do fuso horário local e  $\Delta long_{Local}$  a longitude do local (MATOS, 2019).

#### 2.2.4.5 Ângulo de declinação solar

Conforme descreve Vieira (2016), a linha formada entre o centro do Sol ao centro do Planeta Terra, em que o ângulo que está nesta linha e o Plano equatorial é nomeado de declinação solar ( $\delta$ ), ou ângulo de declinação ( $\delta$ ). Este ângulo varia entre  $\pm 23,45^\circ$ , a depender do dia do ano. A Figura 9 ilustra o ângulo de declinação solar.

Figura 9 – Representação do ângulo de declinação solar



Fonte: modificado de Kuhn (2013).

Pela figura 9, observa que o ângulo de declinação ( $\delta$ ) atinge valor máximo e mínimo, respectivamente, nos solstícios de verão e inverno. Na situação em que  $\delta = +23,45^\circ$  o Sol atinge a sua posição mais elevada no céu ao meio-dia solar, indicando o início do verão no hemisfério sul (MATOS, 2019).

Conforme a Terra continua sua órbita anual em torno do sol, o segundo solstício ocorre na extremidade mais ao norte do eixo de rotação em que está inclinado em direção ao sol, que se encontra ao meio – dia na sua posição ‘mais baixa’ (MATOS, 2019).

Nos equinócios, especificamente, outono e primavera, o ângulo de declinação ( $\delta$ ) é igual a zero, pois em qualquer lugar sobre a Terra, o Sol é visível durante as 12 horas do dia e no tempo de 12 horas a noite não é visível, podendo ser observado sobre o equador o Sol diretamente sobre a cabeça de um observador e visível durante as 12 horas exatas, ocorrendo esse fenômeno nessas duas estações do ano (MATOS, 2019).

A Equação (9) apresenta a expressão que calcular valor aproximado do ângulo de declinação solar, dado por:

$$\delta = 23,45 \sin \left[ 360 \cdot \frac{J - 80}{365} \right] \quad (9)$$

Sendo  $\delta$  é o ângulo de declinação solar em radiano e  $J$  é o número do dia do ano (dias julianos) (CAMPOS; SILVA, 2020).

#### 2.2.4.6 Inclinação

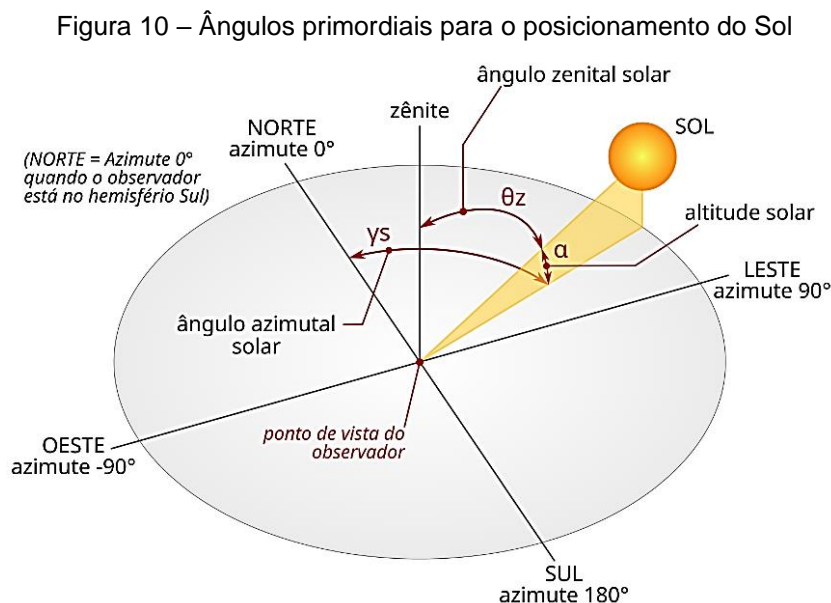
Para determinar a melhor inclinação dos painéis solares ao longo do dia, é preciso determinar a altitude solar ( $\alpha$ ), sendo o ângulo formado entre o Sol e o horizonte, calculado pela Equação (10) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \cdot \sin L + \cos \delta \cdot \cos L \cdot \cos \omega) \quad (10)$$

Sendo que  $L$  é a latitude do local. Com isso, o ângulo de latitude solar é diretamente relacionado ao percurso dos raios solares na atmosfera, sendo que, quanto menor for o ângulo  $\alpha$ , maior é o percurso dos raios (CAMPOS; SILVA, 2020). A Figura 10 apresenta os ângulos solares que descrevem a posição do Sol.

A partir disso, obtém-se o ângulo de zênite, ou ângulo zenital solar ( $\theta_z$ ), expresso pela Equação (11) (DUFFIE; BECKMAN, 2013), que propõe a posição do Sol no dado período do dia.

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (11)$$



Fonte: Martins e Pereira (2019).

#### 2.2.4.7 Ângulo de azimute

O ângulo de azimute ( $\gamma_s$ ), correspondendo o deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido à rotação da Terra, isto é, o ângulo que a projeção do Sol faz com a direção norte (PEREIRA et al., 2017). A Figura 10 representa este ângulo, aonde o valor da angulação é medido a partir do polo norte geográfico, realizando sua projeção da trajetória de incidência direta dos seus raios solares na superfície da Terra, conforme é descrito por Campos e Silva (2020).

O ângulo de azimute pode ser calculado usando a Equação (12), apresentado por Campos e Silva (2020). Embora os cálculos sejam feitos em radianos, o resultado final é convertido e apresentado em graus ( $^\circ$ ).

$$\gamma_s = \cos^{-1}\left(\frac{-\sin \alpha \cdot \sin L + \sin \delta}{\cos \alpha \cdot \cos L}\right) \quad (12)$$

Onde:

$\gamma_s$ : Ângulo de Azimute;

$L$ : Corresponde a latitude em radiano;

$\alpha$ : Altitude solar;

$\delta$ : Declinação Solar.

O ângulo de azimute pode ser calculado também a partir da Equação (13) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left[ \cos^{-1}\left(\frac{\cos \alpha \cdot \sin L - \sin \delta}{\sin \alpha \cdot \cos L}\right) \right] \quad (13)$$

Sendo que  $\gamma_s$  representa o valor de azimute em radiano e  $\text{sign}(\omega)$  é a função do sinal da Equação (3), com valor de +1 para  $\omega$  positivo e -1 para  $\omega$  negativo. (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

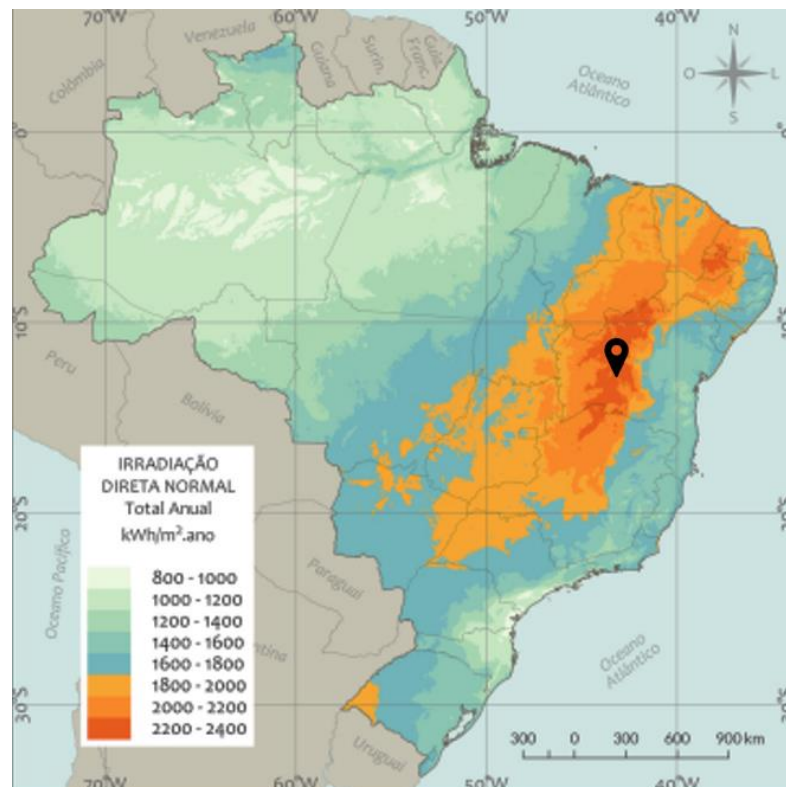
### 2.3 Contextualização local

Segundo Barbosa (2016), o índice de irradiação solar no Brasil é considerado um dos mais altos do mundo, tendo que, grande parte do território brasileiro está localizado relativamente próxima à linha do Equador. A região nordeste, por exemplo, situa próximo a linha do Equador em comparação as demais regiões do Brasil.

Em função do elevado índice de irradiação solar, a região do semiárido brasileiro se torna ideal para a instalação de energia solar. A partir da Figura 11, tem-se que, lugares com maior índice de irradiação solar direta e com baixa nebulosidade possui maior potencial energético (PEREIRA et al., 2017).

Segundo dados obtidos do Portal Solar, o município de Bom Jesus da Lapa, Bahia, localizado com longitude de  $-43,4082828^\circ$  e latitude de  $-13,2526395^\circ$  (Figura 11), é um dos principais municípios do estado com maior geração de energia fotovoltaica. O complexo fotovoltaico da cidade tem capacidade de geração de até 158 MW, contando com cerca de 204 mil painéis solares em uma área de 150 hectares, capaz de abastecer em torno de 166 mil residências.

Figura 11 – Total anual de irradiação solar direta em regiões com maior potencial de aproveitamento de energia solar



Fonte: modificado de Pereira et al. (2017).

## 2.4 Modelagem construtiva

A modelagem construtiva 3D dos componentes foi realizada utilizando o software Autodesk Inventor, microcontrolador Arduino® e o sistema experimental foi construído por manufatura aditiva (*Additive Manufacturing – AM*).

Inicialmente, sabe-se que o Arduino® foi desenvolvido como um recurso auxiliar para o ensino de estudantes. Em 2005, foi comercializado por Massimo Banzi e David Cuartielles, tornando popular entre fabricantes devido à sua facilidade de uso e durabilidade. Em 2014, houve uma disputa judicial entre a equipe original e o principal fabricante das placas, resultando na adoção do nome Genuino Uno fora dos Estados Unidos (MONK, 2017).

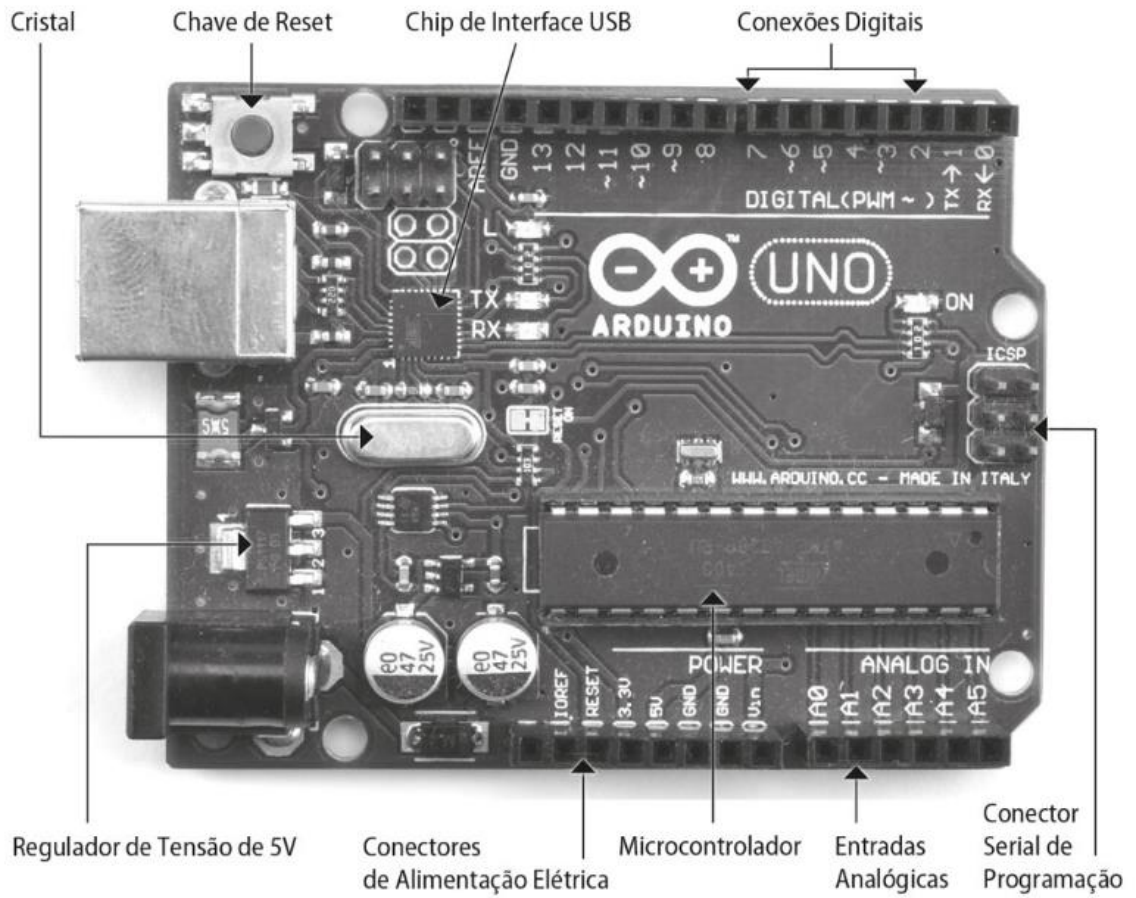
Atualmente, nomeado como Arduino®, tem-se que é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto (open source) que se destaca por seu hardware e software fáceis de usar. No coração do Arduino® está um microcontrolador, um pequeno computador em um chip que contém um processador, memória RAM para armazenamento de dados, memória flash para armazenamento de programas e pinos de entrada e saída. Esses pinos permitem a conexão com diversos sensores e atuadores, possibilitando a leitura de dados digitais e analógicos, bem como o controle de dispositivos eletrônicos (MONK, 2017).

Segundo Monk (2017), o microcontrolador precisa de eletrônica de suporte para fornecer uma tensão precisamente regulada e um meio de comunicação com o computador para ser programado. A placa Arduino® Uno é baseada no microcontrolador ATmega328, fabricado pela Atmel, que inclui todos os componentes necessários para o funcionamento do microcontrolador, conforme ilustra a Figura 12.

A manufatura aditiva (*Additive Manufacturing – AM*), chamado como impressão 3D (tridimensional), é o processo de fabricação que envolve a moldagem por adição de material em camadas, utilizando um modelo geométrico 3D criado por um sistema CAD (*Computer-aided design*). Ele permite a construção de componentes físicos a partir de materiais em várias formas, aplicando diferentes princípios de manufatura (VOLPATO, 2018).

O tipo de material utilizado no desenvolvimento da estrutura do sistema de posicionamento solar foi o filamento de PLA (polímero termoplástico). O motivo do seu uso foi o custo-benefício e experiência adquirida pelo coorientador deste trabalho.

Figura 12 – Placa de Arduino®



Fonte: Monk (2017).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve sobre: lista de materiais que foram utilizados para a confecção do sistema de posicionamento solar, realização do experimento, a modelagem dos componentes, a implementação do algoritmo matemático na obtenção da posição solar, a lógica de programação e informações encontrados pela literatura sobre o possível aumento da eficiência energética do painel solar, com base em estudos já elaborado por outros autores, tais como: Alves (2008), Campos e Silva (2020), Matos (2019), Rocha Filho (2016) e Vieira (2014).

#### 3.1 Lista de materiais





Os materiais que foram utilizados na elaboração do protótipo estão listados no Quadro 1, apresentando os itens, os componentes eletrônicos e suas descrições.

No projeto, conforme ilustra a Figura 13, foram utilizadas duas placas controladoras Arduino®: uma dedicada à coleta de dados e uma responsável pelo controle do posicionamento solar durante o dia. Cada Arduino® possui seu próprio RTC para registrar o horário de cada coleta, assegurando a marcação temporal dos dados e determinar a hora exata para ajustar o posicionamento solar, garantindo precisão nos cálculos e ajustes. Essa configuração permitiu que cada Arduino® operasse de forma independente, reduzindo interferências e facilitando a manutenção do sistema.

Foi utilizada duas fontes de alimentação da protoboard para fornecer energia elétrica aos componentes eletrônicos e circuitos montados, sem a necessidade de alimentação por baterias individuais ou fontes de alimentação mais complexas, mantendo estabilidade e proteção em caso de sobrecarga, curto-circuito e picos de tensão.





A Figura 14 ilustra a montagem dos componentes eletrônicos listados no Quadro 1, dentro de uma estrutura em formato de caixa retangular e com dimensões 200x190x138 mm (comprimento x largura x altura). Uma ventoinha de 12V foi adicionada para resfriar os componentes. À esquerda da figura, está a parte destinada à coleta de dados, enquanto a direita está o circuito elétrico do sistema de posicionamento solar.

Quadro 1 – Listas de itens para a confecção do protótipo

Itens	Fotos	Quantidade	Descrição
Arduino® Uno R3		1	Microcontrolador ATmega328
Arduino® Mega 2560		1	Microcontrolador ATmega328
Painel fotovoltaico		2	Mini painel fotovoltaico de silício policristalino de 12 V, 1,5 W, 150 mA, 110x110 mm
Módulo Sensor de tensão		2	Módulo Sensor de tensão 0-25V DC; 25x13 mm; Capacidade de leitura de 0,02445V – 25V DC




Continua

Quadro 1 – Listas de itens para a confecção do protótipo (Continuação)

Real Time Clock RTC DS3231		2	Relógio de tempo real com calendário completo
Jumper		-	Kit jumper macho fêmea
Filamento PLA 1kg		2	Voolt3D; Laranja e marrom com diâmetro do filamento de 1,75 mm
Módulo Micro SD Card		1	Comunicação SPI; Dimensões de 42x24x3,5 mm

Continua

Quadro 1 – Listas de itens para a confecção do protótipo (Continuação)

Servo motor		1	MG 995 Metálico de 180° Tower Pro; 40x19x43 mm; 69 g
Resistor		2	10 kΩ; Tolerância: ±5%
Motor de passo + Módulo de controle (Driver ULN2003)		1	28BYJ-48 5V com 5 vias de alimentação e 4 fases
Parafuso para madeira Phillips chata		13	3,0 x 25 mm; Aço Carbono Bicromatizado

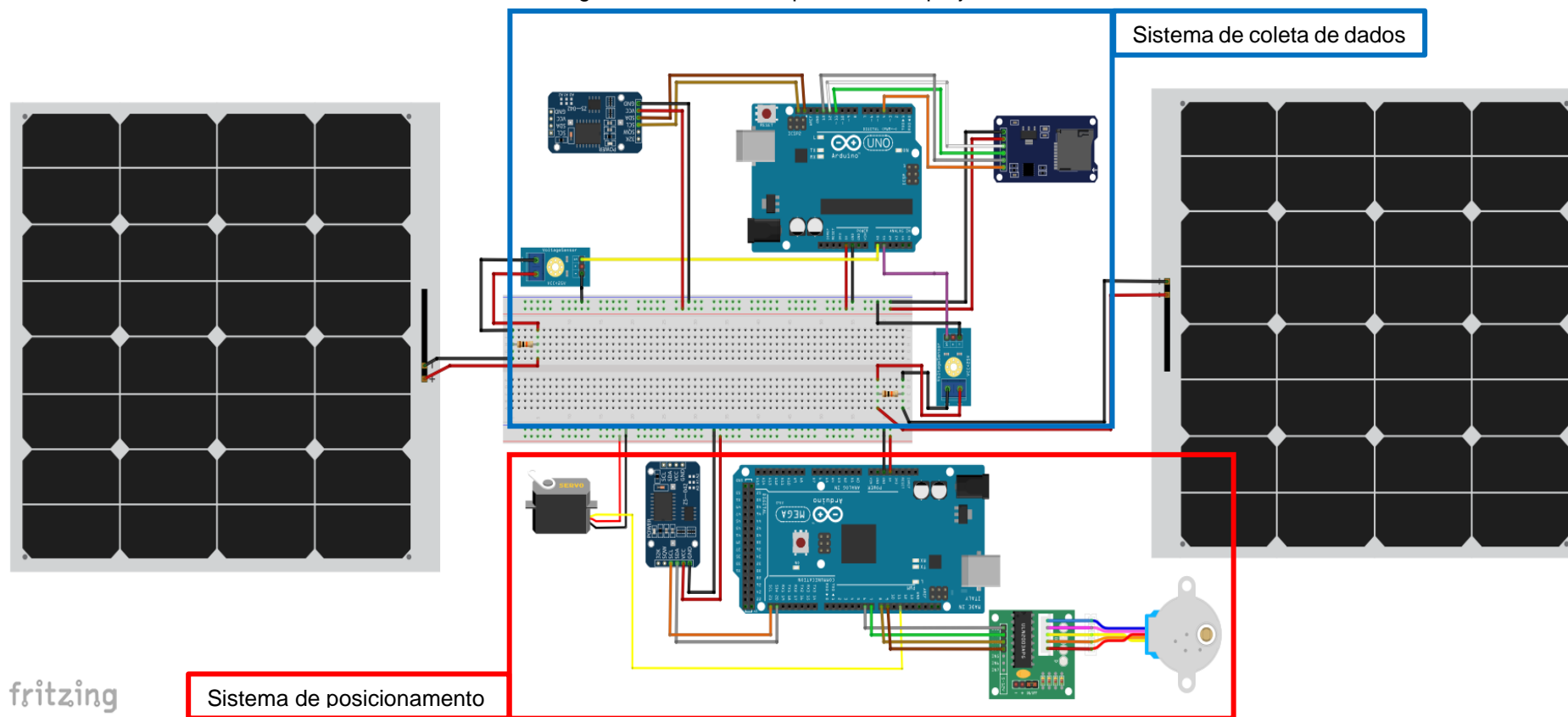
Continua

Quadro 1 – Listas de itens para a confecção do protótipo (Continuação)

Parafuso redonda Fenda		1	UNC 1/4" X 7/8" Ferro Zincado (Trivalente)
Rolamento		2	6005 ZZ C3 25X47X12 mm
Rolamento		1	6000 ZZ C3 WHX 10X26X8 mm
Rolamento		2	697 zz 7x17x5 mm

Fonte: Autor (2024).

Figura 13 – Modelo esquemático do projeto

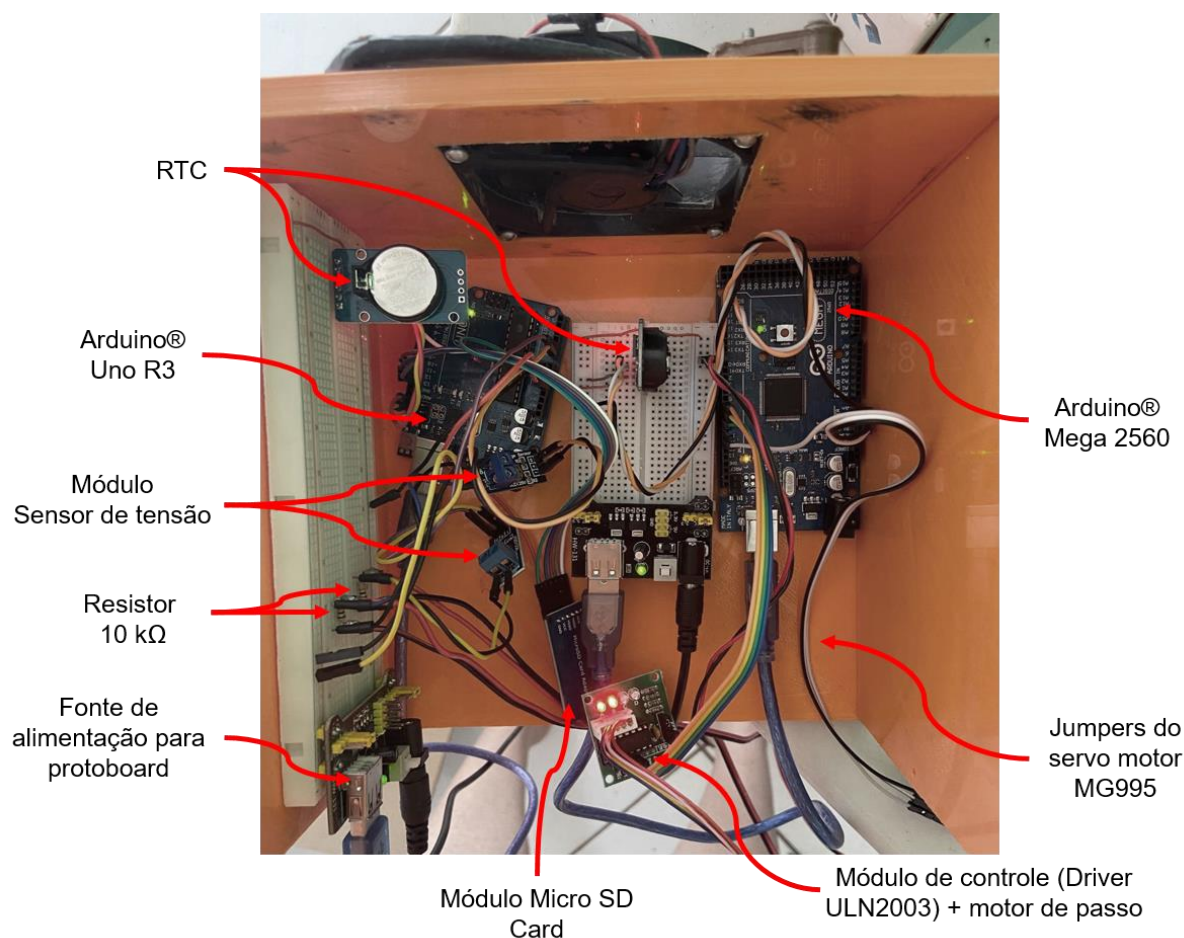


fritzing

Sistema de posicionamento

Fonte: Autor (2024).

Figura 14 – Montagem real dos componentes eletrônicos



Fonte: Autor (2024).

### 3.2 Experimento

A análise do desempenho de ambos os painéis solares (com e sem posicionamento) iniciou-se no dia 09 (nove) de maio de 2024, no pátio do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, ilustrado na Figura 15, com início aos testes e coleta de dados às 7h30 min, trinta minutos após o Centro abrir, com finalização do experimento às 18h. Os ensaios tiveram duração de 10 dias, coletando um número significativo de informações, finalizando no dia 21 de maio de 2024, com exceção dos domingos e a quarta-feira do dia 15 de maio de 2024.

Os testes não ocorreram aos domingos, pois o Centro Multidisciplinar não estava aberto. O dia 15 de maio de 2024, uma quarta-feira, o ensaio não foi realizado devido à desconexão de um jumper da *protoboard*, o que interferiu no sistema de posicionamento e resultou-se na coleta de dados desse dia com informações incoerentes da tensão e a corrente. Observa-se na Figura 15 que foi utilizada uma

caixa de papelão para elevar a placa fixa. Este uso foi adotado para garantir que o sistema fixo seja posicionado na mesma altura que o sistema com posicionamento solar durante os testes. A igualação das alturas é fundamental para assegurar a consistência nas medições e uniformidade dos dados.

Figura 15 – Experimento em funcionamento no pátio do centro multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa



(a) 7:30h



(b) 12:00h



(c) 15:00h



(d) 18:00h

Fonte: Autor (2024).

Na Figura 15 observam-se 4 (quatro) imagens registradas no dia 13 de maio de 2024, sem horário de verão. Na figura é possível visualizar a movimentação do sistema de posicionamento solar em quatro momentos registrados durante o período de teste e ao lado o painel fixo com inclinação de 13°N (Norte). Recomenda-se a instalação dos painéis fixos em Bom Jesus da Lapa – BA com 13° ao Norte, inclinação e direção, conforme é informado pelo CRESESB – Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (2018).

Na Figura 15, (a) é uma fotografia tirada após o sistema posicionar na direção do Sol, com seu início no polo norte geográfico (0°N). Na Figura 15 (b) o registro foi feito por volta das 12h, quando o sistema realiza sua máxima inclinação solar em direção aos raios solares. Na Figura 15 (c) tem-se o protótipo já direcionado ao oeste (W) com uma determinada angulação do horário solar. E a Figura 15 (d) o registro da finalização do ensaio do dia, com o seguidor solar direcionado ao 0°N, notificando a finalização do teste do dia. Assim o sistema desativa a movimentação do servo motor e do motor de passo, iniciando no outro dia, a partir das 6h da manhã, conforme é descrito na implementação do código de Arduino®.

Os dados foram coletados e armazenados em um cartão microSD em formato .CSV. Após cada dia de experimento, era feita a observação dos dados coletados em uma planilha de Excel. Os valores de tensão foram salvos a cada 5 segundos em uma duração de 10 horas e 30 minutos de teste, gerando um total significativo de dados para a análise, podendo ter uma melhor visualização das informações, conforme é elaborado por Blaszczak (2017) em seu experimento com sistema *tracker* seguidor solar e por Miranda, Oliveira e Sanches (2021) em seu trabalho.

### 3.3 Coleta de dados e comparação

A coleta de dados foi realizada utilizando o módulo Sensor de tensão, ilustrado no Quadro 1. Este módulo é um divisor de tensão para estimativa da tensão na linha. Desta forma, o sensor foi ligado em paralelo ao resistor em série à placa para as medições.

O módulo mede a tensão na faixa de 0,02445 VDC até 25 VDC, através de uma porta analógica do Arduino®, com uma resolução de 0,00489V, contendo um custo-benefício de aquisição do componente, dois resistores na sua estrutura de

valores de 30 k e 7,5 k $\Omega$ , ambos com uma tolerância de 1%, representados, por exemplo, 7,5 k $\Omega \pm 1\%$  (ELETROGATE, 2024).

Para a armazenagem dos dados da tensão durante o período de experimento, utilizou-se um módulo leitor/registrador de cartão micro SD.

Outro módulo utilizado foi o *Real Time Clock* (RTC) de modelo DS3231, conforme é representado no Quadro 1. Segundo apresentado pelo Guia de Projeto Danfoss (2011), o componente é preciso e consumo de energia de 3,5  $\mu$ A, permitindo informações em tempo real do relógio e datas (ano, mês e dia da semana) por meio de alimentação própria, com uma precisão do relógio superior a  $\pm 20$  ppm (parte por milhão), em 25°C, o que representa um erro de aproximadamente  $\pm 1$  minuto por mês.

A coleta de dados foi realizada utilizando, em cada painel solar, um resistor de 10 k $\Omega$  que determinou a corrente que passa por ele. O resistor tem uma incerteza de 5%, segundo o site Eletrogate (2024), podendo influenciar na precisão das medições, principalmente na determinação da corrente com base na tensão medida. Com isso, foi estimado a propagação da incerteza nos valores da corrente elétrica obtida por meio da coleta de dados realizada. A Figura 16 apresenta o esquemático do circuito utilizado para a realização da medição da tensão dos módulos fotovoltaicos.

Na parte da comparação entre os sistemas, determinou-se o valor da eficiência energética gerada nos painéis solares, com posicionamento solar e sem posicionamento, sendo expressa pela Equação (16) (VIEIRA, 2014).

$$\eta = \frac{P_m}{A \cdot I_0} \quad (16)$$

Em que:

$\eta$ : eficiência do módulo

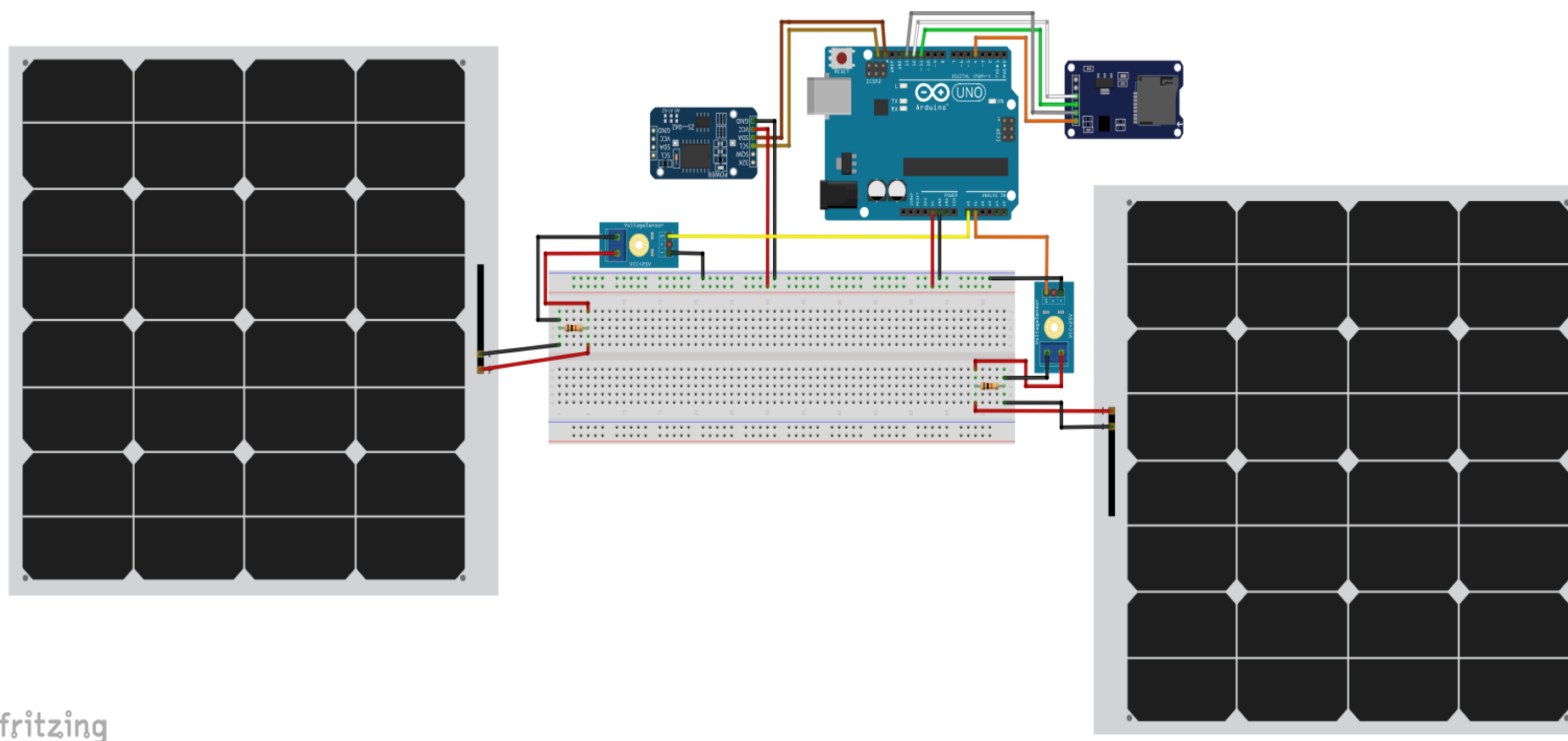
$P_m$ : Potência gerada no módulo

$A$ : Área útil do PV

$I_0$ : Irradiância Solar

A Potência gerada no módulo ( $P_m$ ), expressa em (Watt pico,  $W_p$ ), foi obtida pelos valores fornecidos no painel do módulo, tendo a tensão máxima ( $V_{max}$ ) e a corrente máxima ( $I_{max}$ ) encontrada no processo (VIEIRA, 2014).

Figura 16 – Circuito montado para coleta de dados da tensão dos painéis fotovoltaicos



fritzing

Fonte: Autor (2024).

### 3.4 Equacionamento para o posicionamento solar

A partir do método escolhido, conforme é descrito na seção 2.2.3 deste trabalho – o método do equacionamento para obter a posição média do Sol durante o período do dia – é dito como um dos métodos que possui maior precisão e maior ganho na geração de energia elétrica, comparada com os outros mecanismos, tendo um ganho de aproximadamente 52,71%, conforme descreve Rocha Filho (2016).

Os passos que foram utilizados para a determinação da posição solar ao longo do dia se iniciam a partir do cálculo da Equação (5), que determina o valor do ângulo em relação ao número do dia do ano no calendário, sendo a equação  $x(N)$ . Após determinar este valor, informando o dia médio do mês em que foi realizado o experimento, neste caso no mês de maio, tendo como valor de  $N = 135$  (corresponde quantidade de dias do dia 1 de janeiro até 15 de maio), substitui o valor de  $x(N)$  encontrado na Equação (4), determinando o valor da Equação do Tempo (EOT).

Em seguida, realizou-se a correção da longitude, expresso pela Equação (8), com os valores da longitude do local e a longitude do meridiano do fuso horário local, sendo  $-45^{\circ}W$  (Oeste) considerando o valor do meridiano central do fuso horário, aonde o fuso horário da região é UTC-3 (Tempo Universal Coordenado), conforme é fundamentada e abordada nas publicações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2024). Após obter o valor da correção da longitude, em radiano, aplicou-se na Equação (7), tendo o valor da hora solar ( $t_s$ ), a depender do horário expresso no relógio pela variável  $t_a$  na equação. Com o valor da hora solar, encontrou-se o ângulo horário, expresso pela Equação (3).

Subsequente, determinou-se o ângulo de declinação solar pela Equação (9). Logo após, substituem-se os valores encontrados na Equação (10) para encontrar a altitude solar, determinando assim o percurso dos raios solares na atmosfera em um momento específico do horário do dia. Após isso, encontrou-se o valor de zênite pela Equação (11), tendo no final o melhor posicionamento do painel solar a cada mudança de horário do relógio.

E por fim, calcula-se o ângulo de azimute utilizando a Equação (12) ou Equação (13), o que resulta no valor do deslocamento angular do movimento aparente do Sol em relação ao polo norte geográfico. Esses ângulos (Altitude solar, zênite e

azimute), como mostrado na Figura 10, considerado necessários para determinar a posição do sol, de acordo com o horário do relógio do dia (CAMPOS; SILVA, 2020).

### 3.5 Programação e modelagem

O modelo computacional utilizada neste trabalho foi a linguagem C/C++, com o processo de compilação no IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) do sistema embarcado, sendo armazenado o código de C++ na placa do Arduino® via USB, com o código dividido em três partes: estrutura, variáveis e funções (SOUZA, 2017).

A construção do código para o posicionamento solar é dada pelos seguintes passos:

1. Uso das bibliotecas dos módulos listados na seção 3.1 deste capítulo;
2. Declaração do tipo de módulo RTC utilizado;
3. Definição das portas analógicas do driver ULN2003 do motor de passo 28BYJ-48 5V com 5 vias de alimentação e 4 fases;
4. Definição das variáveis com os valores fixo do dia médio do mês, latitude, longitude, descritos em graus e radianos, para a aplicação nas equações do posicionamento solar;
5. Conversão da quantidade de passos em graus do motor de passo, além de informar a comunicação do driver e controlador do servo;
6. Construção de uma função para mover o motor de passo para a posição específica do valor de azimute, aonde o motor de passo será responsável por posicionar todo sistema na direção do ângulo de azimute;
7. Iniciação das variáveis, comunicação serial e dos módulos utilizados dentro da função *setup()*;
8. Execução contínua do código na função *loop()*, determinando os valores das equações a partir da hora relógio informada pelo módulo RTC DS3231, substituindo os valores das variáveis declaradas inicialmente nas equações a cada 5 segundos expresso pela função *delay()*;
9. Estruturas condicionais dentro do *loop()* para a realização do posicionamento e finalização do percurso dos motores em um intervalo de hora definido, realizando a movimentação das 6h da manhã até as 18h, a partir disso, o

motor de passo retorna à posição inicial e desativa, voltando a atuar quando atende o intervalo de tempo definido;

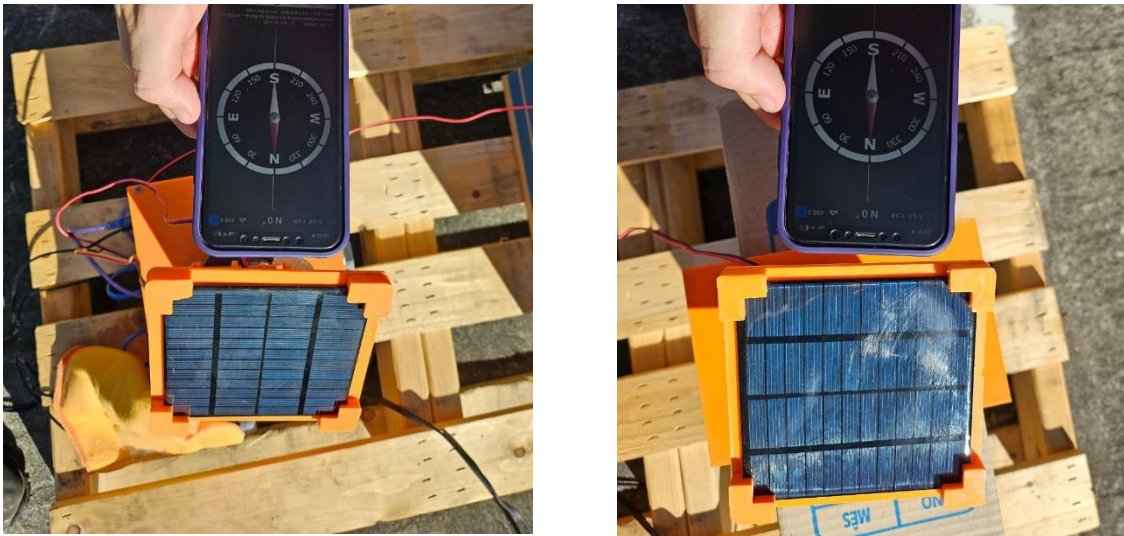
#### 10. Apresentação dos valores obtidos pelo equacionamento no Monitor Serial.

O algoritmo de coleta de dados foi desenvolvido seguindo as seguintes etapas:

1. Integração das bibliotecas do cartão SD, SPI para a comunicação SPI e do módulo RTC;
2. Declaração das variáveis do pino de seleção do chip (*chipSelect*) do cartão SD e do RTC DS3231 (ELETROGATE, 2024);
3. Configuração inicial do *setup()* com a comunicação do serial e inicialização do RTC DS3231 e do cartão SD, analisando se foi inicializado corretamente;
4. Realização do *loop()* obtendo a data e hora atual do RTC utilizando "*rtc.now()*";
5. Realização da leitura dos valores analógicos dos pinos A0 e A1 dos módulos de tensão, conseguinte, calculando as correntes com base nas resistências conhecidas;
6. Estrutura condicional para o intervalo de tempo de salvamento dos dados;
7. Dentro do bloco condicional, abre-se o arquivo .CSV à placa fixa e à placa móvel, realizando o salvamento da data, hora, tensão e corrente;
8. Finalização do salvamento com o fechamento dos arquivos e em caso de erro de abertura do arquivo, imprimir no monitor serial uma mensagem de erro;
9. Atraso de 1 segundo com a função *delay()* antes da próxima execução do loop principal.

E por fim, foi implementado um algoritmo de posicionamento do motor de passo com o uso do potenciômetro, utilizado no primeiro dia do experimento para estabelecer a posição inicial do sistema, direcionando o motor de passo no polo norte geográfico, isto é, 0°N (Norte). Para que o sistema de posicionamento solar fosse orientado ao 0°N, foi utilizado a bússola do smartphone, conforme é ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Posicionando os módulos fotovoltaicos ao 0°N (Norte)



(a) Posicionando o sistema móvel ao 0°N

(b) Posicionando o sistema fixo ao 0°N

Fonte: Autor (2024).

Observe-se abaixo a construção da lógica de programação do posicionamento do motor de passo com o uso do potenciômetro.

1. Implementação da biblioteca do motor de passo;
2. Definição das portas analógicas do driver ULN2003 do motor de passo 28BYJ-48 5V com 5 vias de alimentação e 4 fases;
3. Constantes de configuração do motor de passo convertendo de passos para graus;
4. Iniciação do *setup()* definindo a velocidade e a taxa de aceleração do motor de passo;
5. Função *loop()* utilizado para a leitura do valor do potenciômetro mapeando para o intervalo de graus de 0° a 360°, convertendo o ângulo desejado para quantidade de passos;
6. Verificando a direção do movimento com base na posição atual do motor de passo e movendo para a nova posição;
7. Execução do movimento do motor de passo e imprimindo a quantidade de graus movidos no monitor serial com um pequeno atraso de realização, evitando leituras excessivas do potenciômetro.

### 3.6 Modelagem dos componentes

Nesta seção, são apresentados o desenvolvimento tridimensional das peças, além do processo de montagem dos componentes fabricados e os desafios enfrentados na construção do protótipo.

#### 3.6.1 Projeto das peças

A figura 18 apresenta o desenho do sistema montado com e sem posicionamento solar, apresentando todos os componentes modelados em CAD. No Apêndice D deste trabalho compõem as vistas e as dimensões de cada peça modelada. O Apêndice G contém o QR Code que fornece o acesso aos arquivos CAD e os códigos de programação do sistema de posicionamento solar, coleta de dados e a lógica de programação do posicionamento do motor de passo com o uso do potenciômetro.

A primeira peça modelada foi o suporte dos painéis solares, ilustrado na Figura 19. Este componente, com dimensões de 125x125 mm e espessura de 3 mm, foi responsável por sustentar os painéis fotovoltaicos. Nas laterais do suporte, foram desenhados furos passantes, com diâmetro de 3,5 mm, para o encaixe de travas dos painéis.

Figura 18 – Desenho do sistema com e sem posicionamento solar modelado no CAD

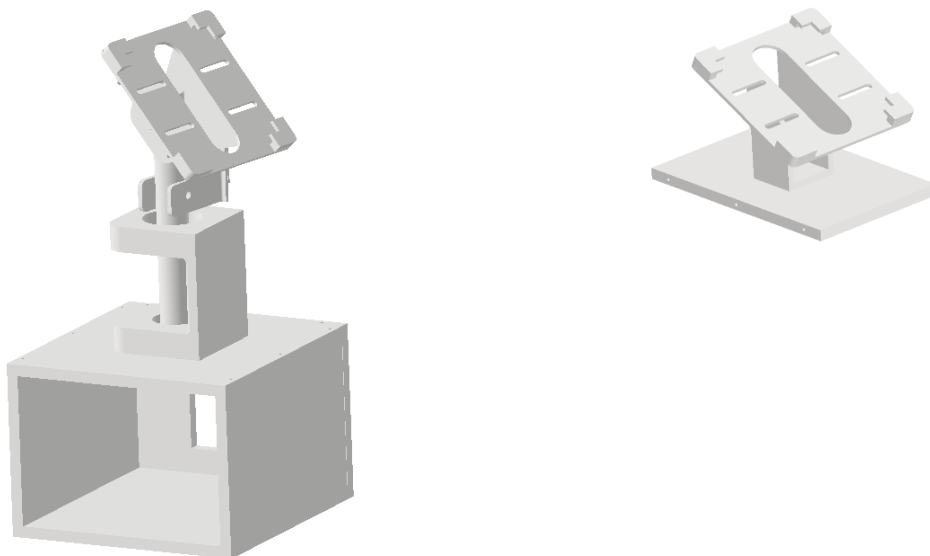
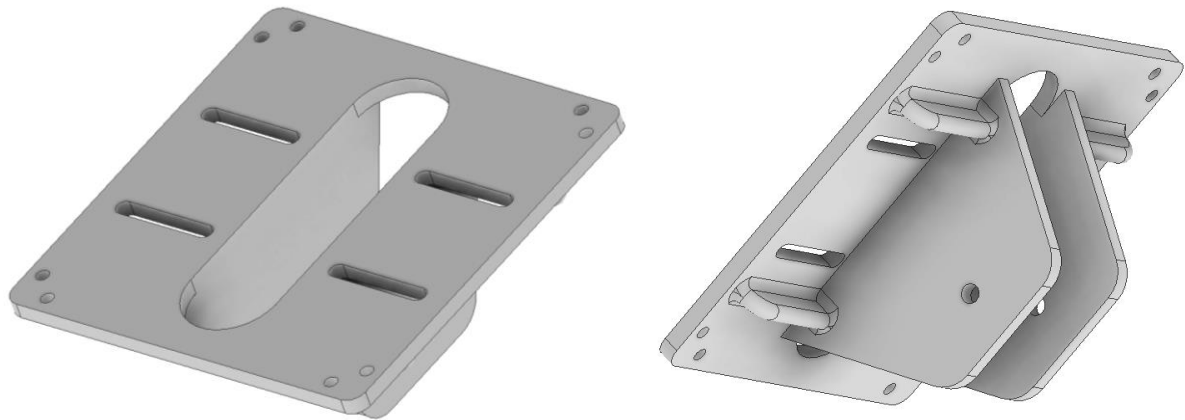


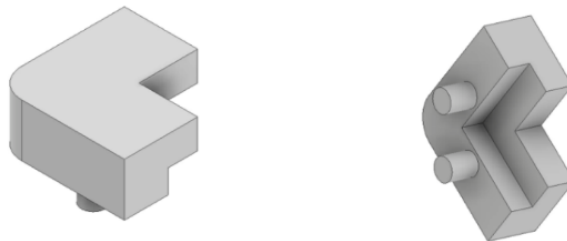
Figura 19 – Suporte dos painéis solares modelados no CAD



Fonte: Autor (2024).

A segunda peça desenhada foi a trava, apresentada na Figura 20. Esta peça foi projetada para fixar a placa solar ao suporte, garantindo que o painel fotovoltaico permanecesse fixo durante o experimento.

Figura 20 – Desenho CAD da trava



Fonte: Autor (2024).

Após a construção da peça anterior, foi criado um eixo para a movimentação do suporte do painel ao longo do ângulo horário.

O eixo, ilustrado na Figura 21, possui um comprimento de 200 mm e um diâmetro de 24,9 mm. O mesmo foi construído com um furo passante na extremidade superior para o encaixe de um rolamento, modelo 626 ZZ de 6x19x6 mm, para facilitar o movimento rotativo do painel no movimento do ângulo de declinação solar.

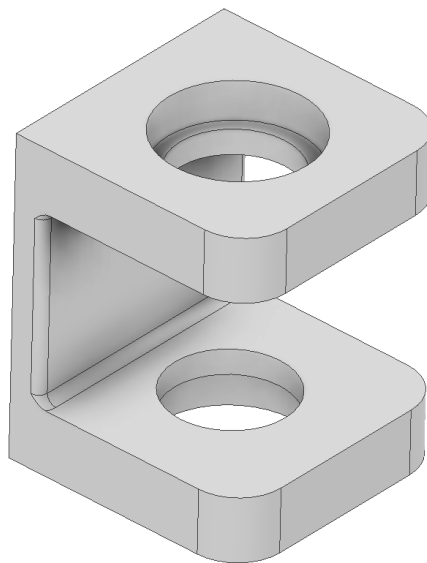
Figura 21 – Desenho CAD do eixo



Fonte: Autor (2024).

Para suportar o eixo, foi desenhado um suporte para dois mancais de rolamentos esférico, ilustrado na Figura 22. O objetivo desse suporte foi alinhar o eixo construído com o eixo do motor de passo e permitir um giro do sistema com baixo atrito e maior precisão.

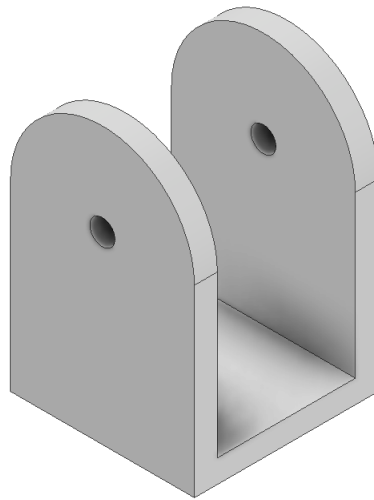
Figura 22 – Desenho CAD do suporte para o eixo



Fonte: Autor (2024).

A Figura 23 ilustra um suporte em U, criado no CAD, com a finalidade de fixar o suporte da placa solar para o sistema sem posicionamento. Esta placa atua como um sistema fixo e a peça desenvolvida possui furos passante nas suas extremidades para facilitar a montagem e garantir uma fixação entre elas.

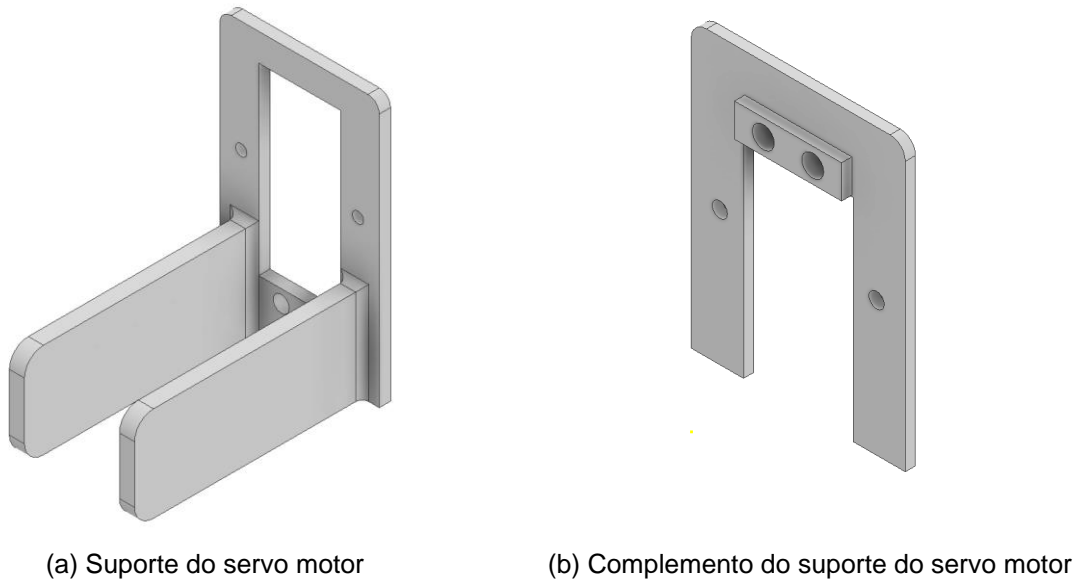
Figura 23 – Desenho CAD do suporte em U



Fonte: Autor (2024).

O suporte do servo motor consistiu em duas peças que eram montadas por meio de fixação com parafusos, sendo as peças ilustradas na Figura 24. Esse suporte fixou o servo motor no eixo vertical da base móvel, sendo o servo motor responsável pela movimentação do suporte do painel solar na direção dos raios solares. O suporte foi desenvolvido de acordo com as dimensões do servo motor para ter o encaixe perfeito e a fixação ideal no conjunto do sistema.

Figura 24 – Desenho CAD do suporte do servo motor



Fonte: Autor (2024).

Para a transmissão do movimento do servo motor na movimentação da declinação solar, foi empregado um par de engrenagens de dentes retos, ilustrado na Figura 25. As engrenagens de dentes retos foram escolhidas por permitirem uma transmissão/multiplicação de torque de forma eficiente e simples (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

As engrenagens foram projetadas com uma de transmissão de 2:1, em que a cada duas voltas da engrenagem motora (pinhão) acoplada no servo motor, a engrenagem movida acoplada na placa fotovoltaica (coroa) completaria uma volta (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

O conjunto de engrenagem foi modelado no software Autodesk Inventor, a partir de valores fornecidos, de diâmetro externo, módulo da engrenagem, número de dentes, diâmetro primitivo e altura dos dentes (AUTODESK, 2024).

Para dimensionar uma engrenagem, utilizou-se a Equação (14) (BUDYNAS; NISBETT, 2016):

$$d = m \times z \quad (14)$$

Onde:

$d$ : diâmetro primitivo;

$m$ : módulo;

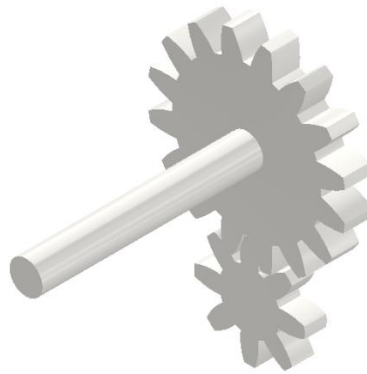
$z$ : número de dentes.

Logo em seguida, o diâmetro externo foi calculado a partir da Equação (15) (BUDYNAS; NISBETT, 2016):

$$d_e = d + 2m \quad (15)$$

Com a determinação desses parâmetros, foi possível criar uma representação da engrenagem cilíndrica de dentes retos no Autodesk Inventor, conforme ilustra na Figura 25.

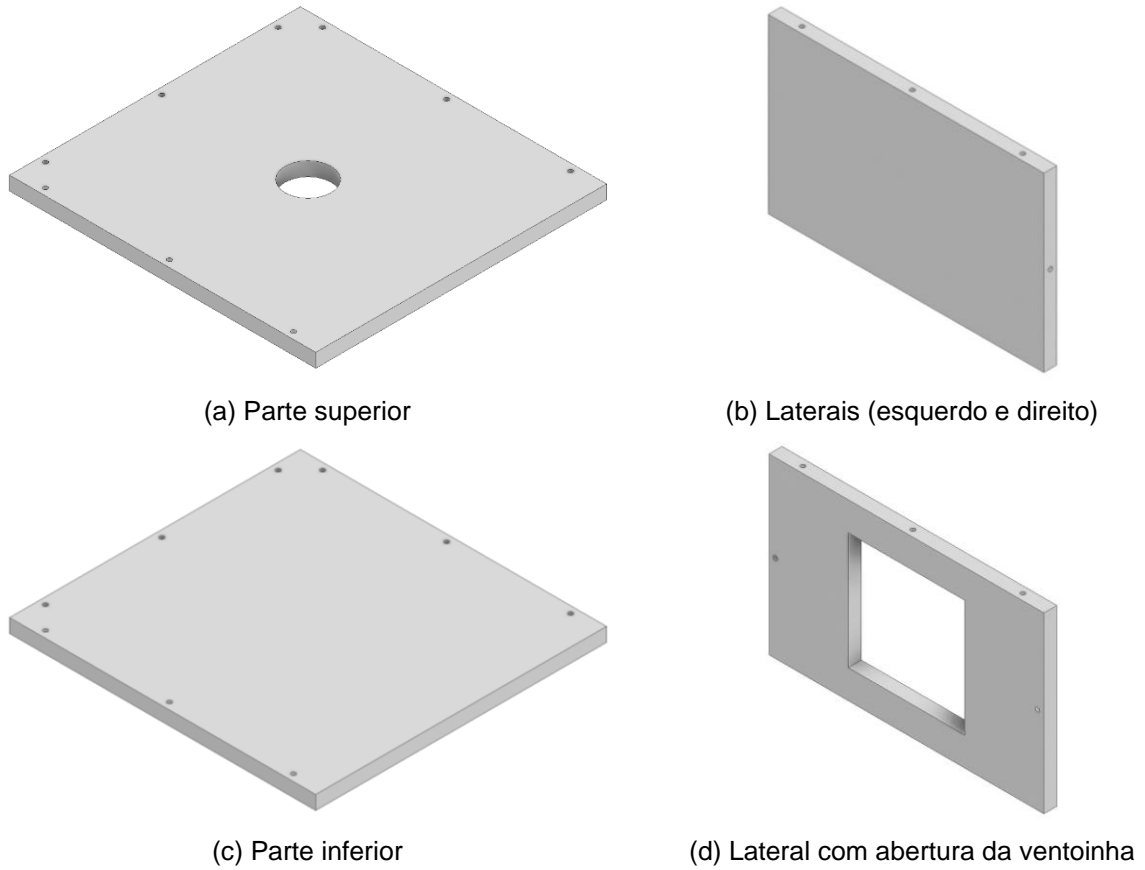
Figura 25 – Desenho CAD do conjunto de engrenagens



Fonte: Autor (2024).

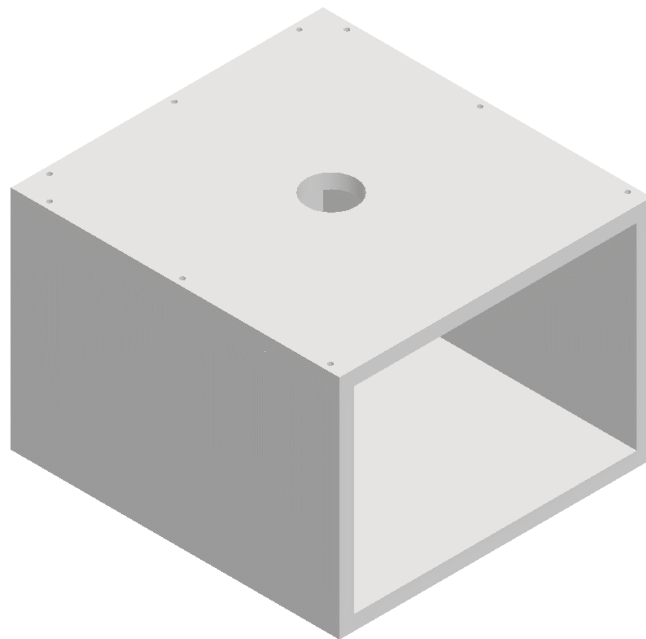
Por fim, foi modelada uma caixa composta de 5 partes, conforme ilustrado na Figura 26. A caixa final possui dimensões 200x190x138 mm (comprimento x largura x altura) e foi projetada para abrigar os componentes eletrônicos durante os ensaios. A montagem final da caixa é apresentada na Figura 27.

Figura 26 – Desenho CAD dos moldes da caixa



Fonte: Autor (2024).

Figura 27 – Montagem da caixa no CAD



Fonte: Autor (2024).

### 3.6.2 Processo de montagem

O primeiro passo no processo de montagem foi a impressão das peças utilizando a impressora GTMax3D Core H4, ilustrado na Figura 28.

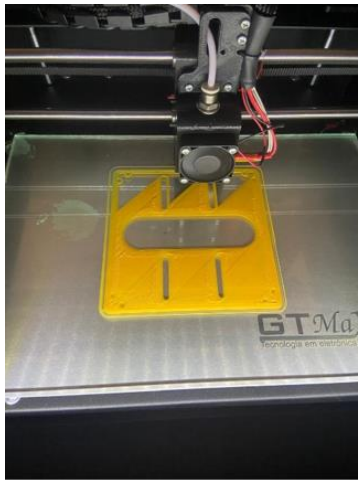
Figura 28 – Impressora GTMax3D Core H4



Fonte: GTMAX3D (2024).

Utilizando, para tanto as seguintes configurações da impressão: temperatura do bico de impressão de 210°C, temperatura de mesa de 70°C, percentual de preenchimento de 20% e formato padrão de preenchimento em colmeia. Na Figura 29, tem – se a impressora em ação formando algumas peças essenciais do projeto.

Figura 29 – Impressões de alguns componentes na Impressora 3D



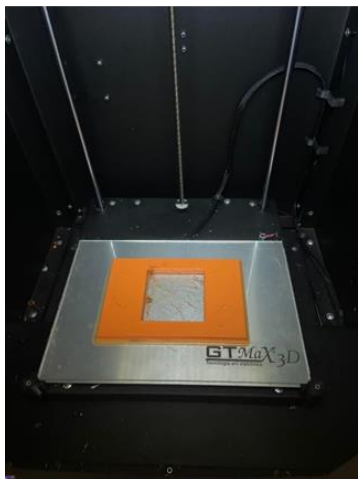
(a) Suporte do mini painel solar (início)



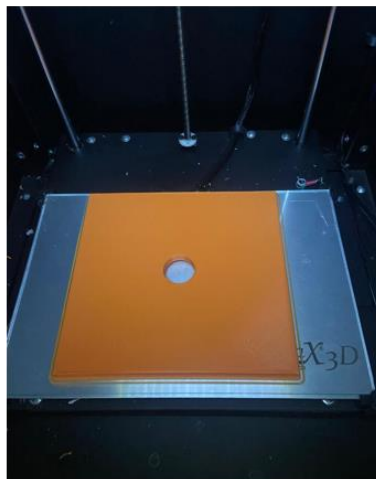
(b) Suporte do mini painel solar (final)



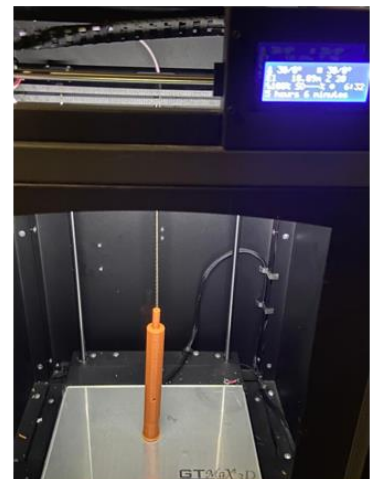
(c) Presilha grampo do Cooler



(d) Lateral com abertura do cooler



(e) Parte superior da caixa



(f) Corpo cilíndrico

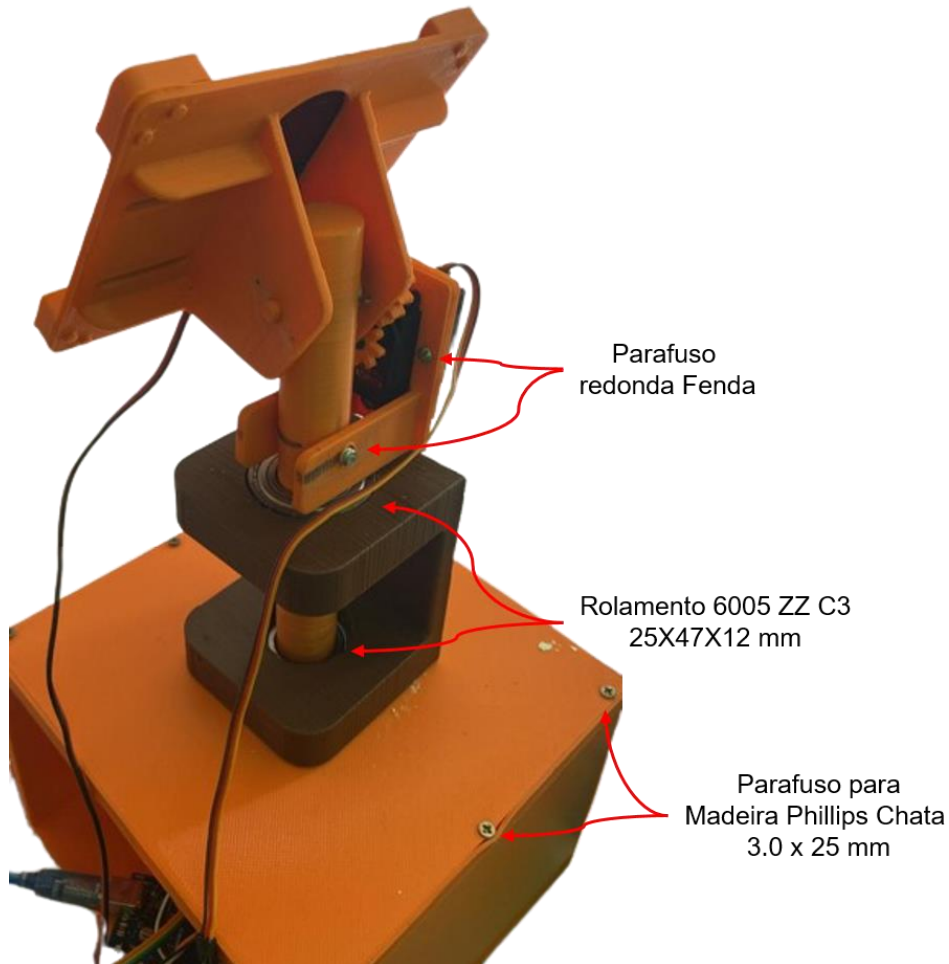
Fonte: Autor (2024).

Após a realização da impressão, as peças foram cuidadosamente fixadas utilizando parafusos de madeira e de rosca, incluindo a fixação dos motores: servo motor e o motor de passo. Esses parafusos, com um tipo de acionamento (formato e tipo da cabeça do parafuso), permitem a união e a desmontagem das peças, proporcionando uma fixação firme, consistente e garantindo a estabilidade do conjunto final (QUADROS, 2018).

Além de parafusos, foram utilizados alguns tipos de rolamentos, que permitiu a movimentação suave, diminuem o atrito entre superfícies dos eixos girantes e os elementos de apoio, oferecendo grande versatilidade de aplicação (QUADROS,

2018). A Figura 30 apresenta os locais de aplicação dos parafusos e dos rolamentos no protótipo do sistema de posicionamento solar.

Figura 30 – Aplicação de parafuso e rolamento no protótipo de posicionamento solar



Fonte: Autor (2024).

Com isso, a representação final do protótipo com e sem posicionamento solar para teste está ilustrada na Figura 31 (a) e Figura 31 (b), respectivamente. A figura mostra todos os componentes mencionados na seção anterior – Etapas do desenvolvimento tridimensional – incluindo os elementos de fixação (parafusos e rolamentos). Para a montagem, foram utilizadas diversas ferramentas para auxílio, tais como: um paquímetro para garantir encaixes precisos, uma parafusadeira para implantação dos parafusos, chaves de fendas e uma furadeira para fazer furos precisos nos pontos de inserção dos parafusos, assegurando um ajuste adequado.

Figura 31 – Protótipo de posicionamento solar e sem posicionamento



(a) Protótipo de posicionamento solar



(b) Protótipo sem posicionamento solar

Fonte: Autor (2024).

### 3.6.3 Desafios enfrentados

Durante o processo de impressão das peças, enfrentou-se desafios que impactaram na produção do protótipo, destacam-se o entupimento do bico da impressora 3D em decorrência da qualidade do filamento, falhas de impressão em decorrência das configurações realizadas na impressora para o uso do filamento de PLA e a demanda de outro docente no uso do equipamento, gerando atraso no trabalho e impedindo que uma caixa similar fosse construída para o sistema de placa

fotovoltaica fixa. A Figura 32 apresenta algumas falhas de impressão que ocorreram durante o processo de fabricação do sistema de posicionamento solar.

Com relação à programação, as dificuldades encontradas compreenderam: escolha das bibliotecas, sincronismo das movimentações dos motores, periodicidade do cálculo das posições solares e confiabilidade na coleta de dados experimentais. Para as bibliotecas, utilizou-se o trabalho de Campos e Silva (2020) na escolha das mesmas. O sincronismo dos movimentos foi realizado por meio da suspensão do código enquanto os dois motores eram movimentados. A periodicidade do cálculo das posições solares foram com intervalos tempo de cada 5 segundos, conforme elaborado por Miranda et al (2021). A confiabilidade na coleta de dados experimentais foi a utilização de sensores de tensão com leitura de valores em faixas mínimas em uma análise durante 10 dias.

Figura 32 – Falhas apresentadas na impressão 3D



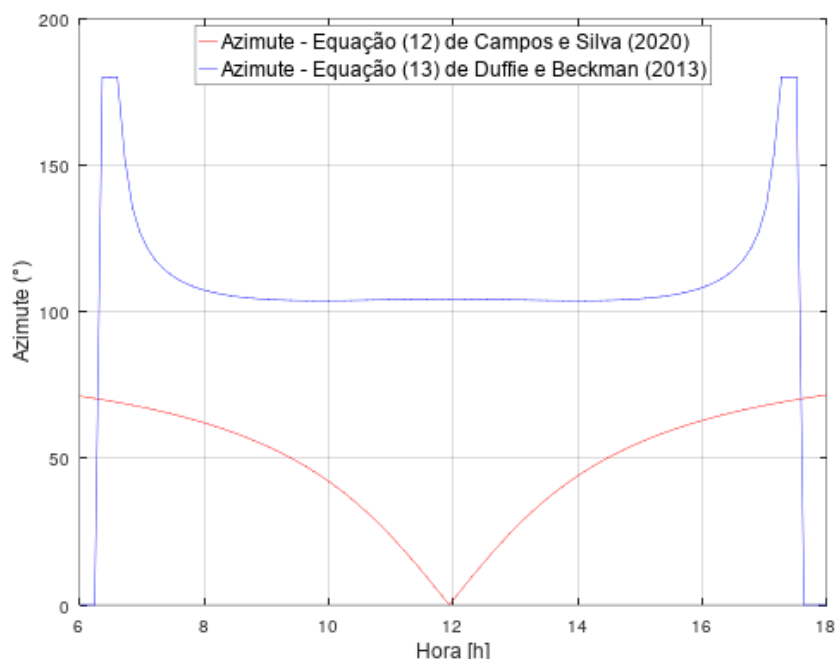
Fonte: Autor (2024).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos do sistema com e sem posicionamento são apresentados a seguir. A Figura 33 apresenta as curvas resultantes das equações do ângulo de azimute, conforme descrito na Equação (12) e Equação (13). A Equação (12) está representada pela linha da cor vermelha, demonstrando que o ângulo de azimute é maior nas primeiras horas da manhã, diminui até o meio-dia e volta a aumentar à medida que o Sol se move em direção ao oeste. Isso confirma que o Sol começa mais baixo no horizonte ao leste, atinge seu ponto mais alto ao meio-dia e aumenta em direção ao oeste ao final da tarde. A Equação (13) está representada pela linha da cor azul, apresentando no gráfico o valor do ângulo de azimute negativo pela manhã, indicando que o Sol está a leste. Por volta do meio-dia, o azimute se aproxima do zero, atingindo seu ponto mais alto durante o dia. Após o meio-dia, o valor de azimute se torna positivo, indicando que o Sol está a oeste.

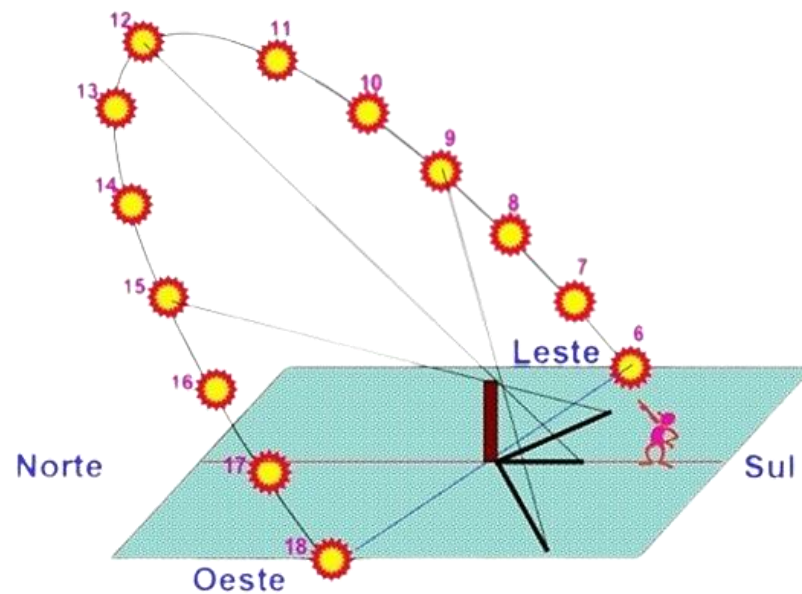
Para a pesquisa, foi adotada a Equação (12) em vez da Equação (13). A razão da escolha é que a Equação (12) apresenta maior similaridade com a movimentação real do Sol ao longo do dia, adaptado ao sistema de posicionamento solar desenvolvido e além de representar um movimento mais próximo da trajetória solar, conforme é ilustrado na Figura 34 o movimento aparente do Sol em um dia qualquer.

Figura 33 – Curvas resultantes das Equações (12) e (13) do ângulo de azimute



Fonte: Autor (2024).

Figura 34 – Movimento aparente do Sol em um dia qualquer



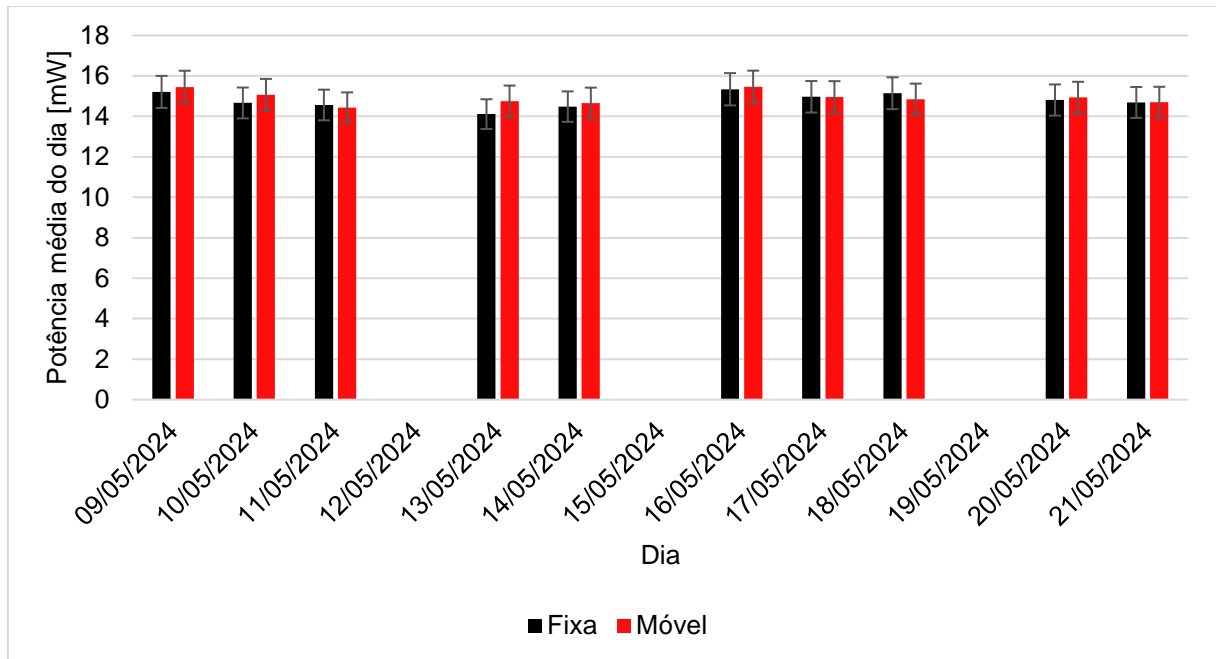
Fonte: modificado de GEDAI (2019).

A Figura 34 detalha a potência média diária [mW] em relação aos dias de análise do sistema, tanto com posicionamento solar móvel quanto fixo. O período de análise compreende os dias de 09/05/2024 a 21/05/2024, com exceção dos domingos e do dia 15/05/2024 (quarta-feira) dentro deste intervalo.

Na Figura 35, observa-se que o sistema com posicionamento solar apresentou uma potência média maior em comparação ao sistema fixo, na maioria dos dias, com o valor percentual de 1,72% maior do que do sistema sem posicionamento. Nos dias 11, 17 e 18 de maio de 2024, a média da potência da placa fixa foi maior em relação da placa móvel, sendo em até 0,92% menor. Essas variações na média da potência podem ser atribuídas devido a presença de nuvens em determinados intervalos de tempo, limitações do módulo fotovoltaico ao atingir sua máxima tensão e ao fato de que os valores da potência média são estimados a partir da dissipação de potência do sistema utilizando um resistor de  $10\text{ k}\Omega \pm 5\%$  para medir a corrente elétrica.

Conforme demonstrado no Apêndice E, ao longo dos 10 dias analisados, observou-se uma tendência de aumento no consumo de potência média pelo sistema móvel. Esta tendência é indicado nos dias 09, 10, 13, 14, 16, 20 e 21 de maio de 2024.

Figura 35 – Potência média do dia [mW] x dia com exceção dos domingos e dia 15/05/2024



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 2 apresenta os valores da potência média do dia [mW] em relação ao dia da coleta de dados, como mostrado na Figura 35. Os dados na tabela fornecem uma visão da variação diária da potência média da placa fixa em relação a placa móvel ao longo do período.

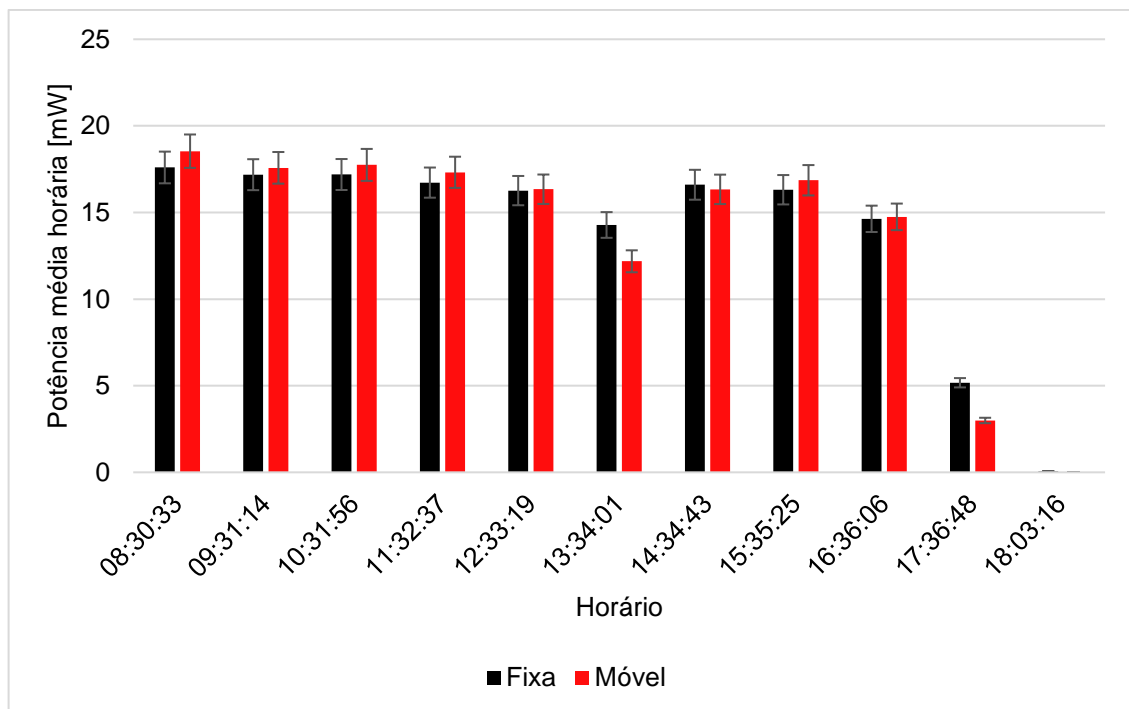
Tabela 2 – Valores da potência média do dia [mW] em relação ao dia da coleta de dados

Data	Potência média do dia [mW]	
	Placa móvel	Placa fixa
09/05/2024	15,45	15,21
10/05/2024	15,07	14,66
11/05/2024	14,44	14,56
12/05/2024	Domingo	Domingo
13/05/2024	14,76	14,11
14/05/2024	14,66	14,48
15/05/2024	Quarta-feira	Quarta-feira
16/05/2024	15,46	15,34
17/05/2024	14,96	14,97
18/05/2024	14,85	15,14
19/05/2024	Domingo	Domingo
20/05/2024	14,93	14,80
21/05/2024	14,70	14,68

Fonte: Autor (2024).

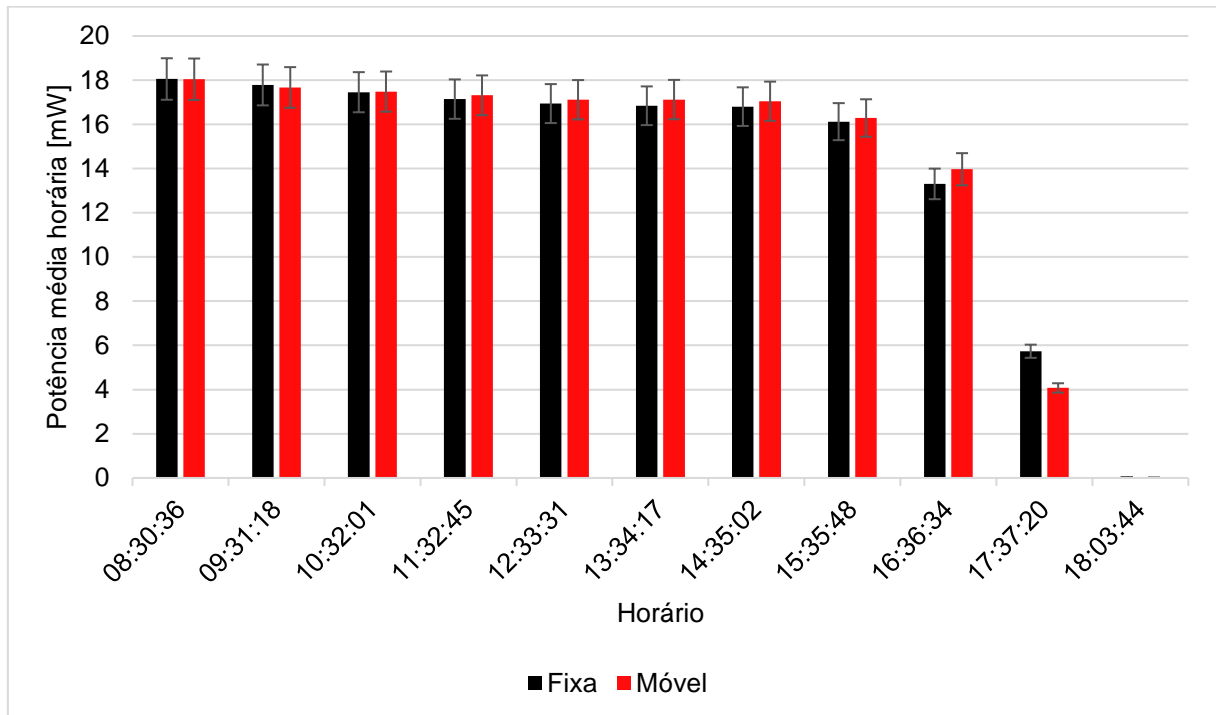
As Figuras 36, 37 e 38 a seguir ilustram a potência média [mW] a cada 1h dos dias 11, 17 e 18 de maio de 2024, respectivamente. Observa-se que, em determinados intervalos de hora, a média da potência da placa fixa é superior da placa móvel. Essas variações podem ser atribuídas devido as influências externas durante a coleta de dados, como a passagem de nuvens, que pode alterar a incidência solar. Além disso, a temperatura da placa fotovoltaica pode afetar na sua eficiência, pois placas mais quentes tendem a ser menos eficientes na conversão de energia solar, conforme é descrito por Mello (2021). Com o uso de resistor de  $10\text{ k}\Omega \pm 5\%$  utilizado para medir a corrente elétrica também pode influenciar nos valores das potências médias obtidas, apresentando uma incerteza 5,2% no valor final. Essas condições variáveis, incluindo a temperatura e as características dos componentes do sistema, podem refletir nos valores entre os sistemas de posicionamento móvel e fixo.

Figura 36 – Potência média horária [mW] x hora do dia 11/05/2024



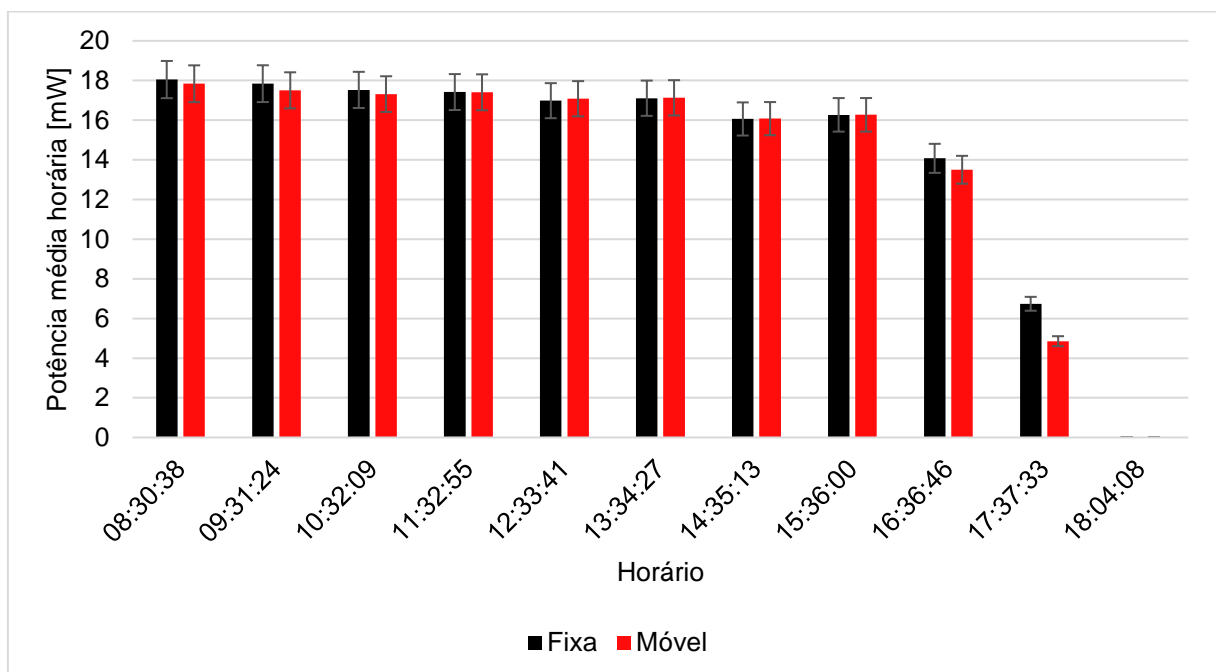
Fonte: Autor (2024).

Figura 37 – Potência média horária [mW] x hora do dia 17/05/2024



Fonte: Autor (2024).

Figura 38 – Potência média horária [mW] x hora do dia 18/05/2024



Fonte: Autor (2024).

A figura 39 ilustra o comportamento da radiação solar em 3 horários distintos: 15h20, 16h20 e 16h30. A Figura 39 (a) tem-se a placa solar recebendo a incidência

de luz solar direta, tendo uma boa geração de energia no painel solar. Contudo, a Figura 39 (b), às 16h20, nota-se a ausência de luz solar direta, devido à sombra que formou sobre o mini painel solar fotovoltaico. Esta mudança é causada pelo movimento do Sol e a presença de um obstáculo a frente, que bloqueia a radiação solar direta, como o edifício da instituição, como apresentado na Figura 39 (d).

Essa variação na incidência solar tem um impacto direto nos dados coletados, conforme mostrado na Figura 40 e na Figura 41. A Figura 40 e a Figura 41 apresentam a tensão do sistema em função do tempo ao longo do dia. Observa-se que a tensão mantém relativamente estável até aproximadamente às 16h20. A partir desse horário, ocorre uma queda acentuada na tensão registrada, coincidindo com a ausência de radiação solar direta, conforme observado na Figura 39 (c).

Figura 39 – Incidência dos raios solares em determinados horários durante o teste do protótipo



(a) 15:20h



(b) 16:20h

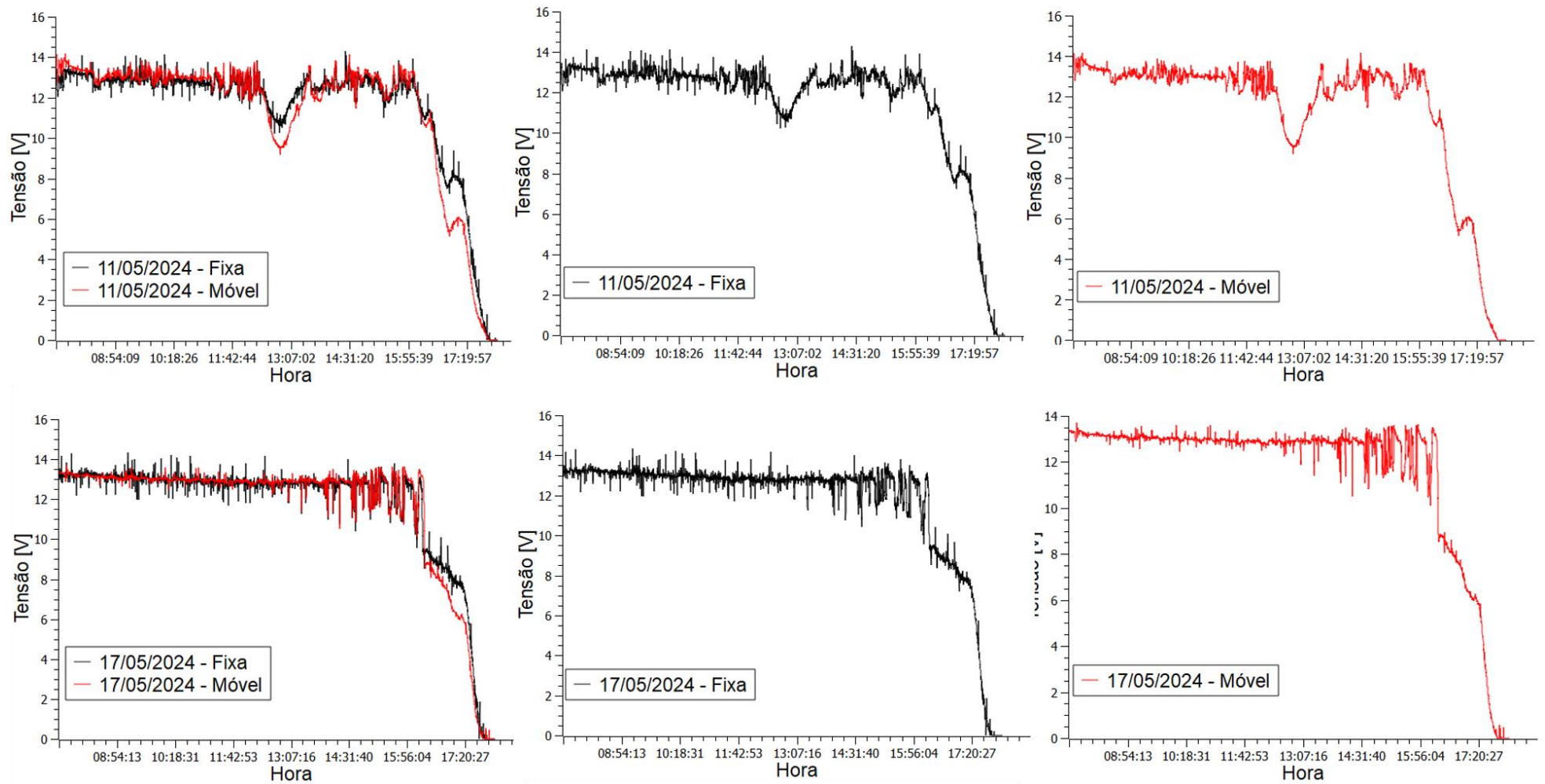


(c) 16:30h



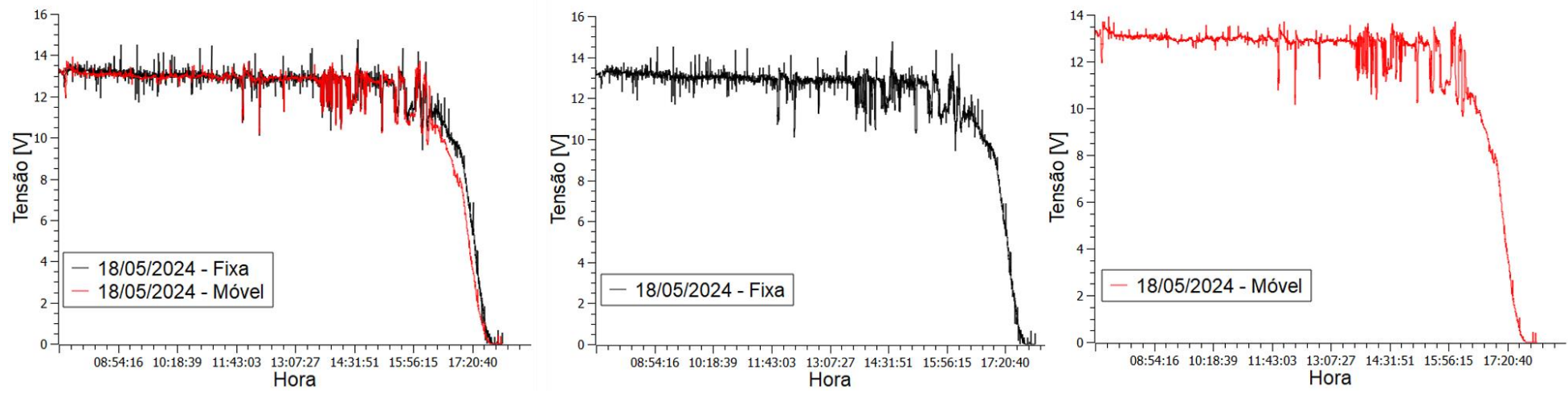
(d) 16:30h

Figura 40 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora dos dias 11 e 17 de maio de 2024



Fonte: Autor (2024).

Figura 41 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora do dia 18 de maio de 2024



Fonte: Autor (2024)

## 5 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos e *in loco*, é possível concluir que o sistema de posicionamento solar oferece uma vantagem significativa em comparação ao sistema sem posicionamento, conforme demonstrado pelos dados coletados durante o período de experimento. Ao longo prazo, os benefícios desse sistema tornam-se mais evidentes.

Durante os 10 dias de coleta de dados, a média da potência elétrica dissipada pelo sistema com posicionamento solar foi consistentemente maior do que o sistema fixo, em dias com boas condições climáticas, com percentual de 1,72% maior que o sistema sem posicionamento. A capacidade do sistema de ajustar a orientação das placas fotovoltaicas em direção aos raios solares resulta em uma maior captação de energia. Além disso, o uso de manufatura aditiva e o dimensionamento com processadores de baixo custo contribuiu no custo-benefício, manutenção e otimização do tempo de construção dos componentes.

No entanto, a aplicação de sistemas de posicionamento solar em larga escala apresenta desafios. A necessidade de mais espaço para operar e evitar o sombreamento entre os painéis solares pode ser um problema em áreas com limitações de espaço ou em projetos residenciais com ambientes menores.

Para futuras pesquisas, recomenda-se uma análise mais aprofundada da relação entre a temperatura dos painéis solares e as variações na geração de potência elétrica em sistemas com posicionamento solar. A temperatura pode impactar a eficiência dos painéis e, portanto, deve ser considerada para otimizar o desempenho do sistema.

Outra aplicação viável seria o desenvolvimento de sistemas de posicionamento para placas solares de maiores dimensões e capacidade de geração de energia elétrica. Isso incluiria a implementação de atuadores mais robustos para a movimentação das placas e o uso de manufatura aditiva para a produção em larga escala dos componentes necessários.

## REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **O notável avanço da energia solar.** Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/o-notavel-avanco-da-energia-solar/>>. Acesso em 06 de outubro de 2022.

ALVES, Alceu Ferreira. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos.** Tese de Doutorado. 2008. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/101817/alves\\_af\\_dr\\_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/101817/alves_af_dr_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em 14 de novembro de 2022.

AUTODESK. Autodesk Inventor Professional 2024. 2024. Disponível em: <<https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2024/PTB/?guid=GUID-60E70D2F-D362-4FCE-A8FC-F8759BA2A0AF>>. Acesso em 19 de maio de 2024.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. Elementos de máquinas de Shigley. 10ªEd. 2016.

CAMPOS, Guilherme Amaral do Prado; SILVA, João Pedro Garcia da. **Rastreador solar impresso: Um projeto open source.** CEFET-RJ. 2020.

CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO. **Potencial energético.** 2018. Disponível em: <<https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em 18 de maio de 2024.

DANFOSS. **Design Guide VLT® HVAC Drive Guia de Projeto.** 2011. Disponível em: <[https://files.danfoss.com/download/Drives/doc\\_MG11BA28.pdf](https://files.danfoss.com/download/Drives/doc_MG11BA28.pdf)>. Acesso em 18 de maio de 2024.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar engineering of thermal processes.** New York: Wiley, 1980.

ELETROGATE. **Módulo Sensor de tensão.** Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/modulo-sensor-de-tensao-0-25v-dc>>. Acesso em 18 de maio de 2024.

ELETROGATE. **Real time clock RTC DS3231.** Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/real-time-clock-rtc-ds3231>>. Acesso em 18 de maio de 2024.

FERNANDES, Sthefania. **Divisor de Tensão.** 2022. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/divisor-de-tensao/>>. Acesso em 18 de maio de 2024.  
Fritzing. **Fritzing.** Disponível em: <<https://fritzing.org/>>. Acesso em 16 de maio de 2024.

GARRETT, Filipe. **O que é cooler? Veja tipos e saiba a importância no computador.** TechTudo. 2022. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/2022/12/o-que-e-cooler-veja-tipos-e-saiba-importancia-no-computador.ghtml>>. Acesso em 16 de maio de 2024.

GEDAI. **Movimento relativo Terra – Sol**. CEFET-MG. 2019. Disponível em: <<https://www.cac.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/30/2019/10/Atividade-Movimento-aparente-do-Sol.pdf>>. Acesso em 06 de junho de 2024.

GTMAX3D. Impressora 3D PRO – GTMAX3D CORE H4. 2024. Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/impressora-3d-pro/gtmax3d-core-h4>>. Acesso em 20 de maio de 2024.

IBGE. **Atlas geográfico escolar**. 9<sup>a</sup> ed. 2023. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102069.pdf>> Acesso em 15 de maio de 2024.

IEMA. **As emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos setores de Energia e de Processos Industriais em 2019**. Disponível em: <<http://energiaeambiente.org.br/as-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-nos-setores-de-energia-e-de-processos-industriais-em-2019-20201201>>. Acesso em 08 de outubro de 2022.

KAGGLE. **IBGE censo – CEP coordenadas Renda Per capita**. 2010. Disponível em: <<https://www.kaggle.com/datasets/silveiragustavo/ibge-censo-cep-coordenadas-renda-per-capita>>. Acesso em 26 de novembro de 2022.

KALOGIROU, Soteris A. **Engenharia de energia solar: processos e sistemas**. 2. Ed. Rio de Janeiro – RJ: Elsevier, 2016.

KRUG, Gregory Lusa; LOPES, Marcel Braga. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painel solar fotovoltaico através de sensores e estudo de eficiência**. 2016. Disponível em: <[http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8210/2/CT\\_COEAU\\_2016\\_1\\_2.pdf](http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8210/2/CT_COEAU_2016_1_2.pdf)>. Acesso em: 07 de outubro de 2022.

KUHN, Raul Ledur. **Rastreamento diário e anual dos níveis máximos de radiação solar para otimização da produção fotovoltaica**. 2013. Disponível em: <<https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/bitstream/rii/997/1/Rastreamento%20di%C3%A1rio%20e%20anual%20dos%20n%C3%ADveis%20m%C3%A1ximos%20de%20radia%C3%A7%C3%A3o%20solar%20para%20otimiza%C3%A7%C3%A3o%20da%20pr%20du%C3%A7%C3%A3o%20fotovoltaica.pdf>>. Acesso em 13 de junho de 2024.

LIMA, João Victor Figueredo; GONÇALVES, Pedro Henrique. **A influência do ângulo de inclinação na incidência de radiação solar em painéis fotovoltaicos**. 2019. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/24290>>. Acesso em 08 de outubro de 2022.

Loja voolt 3D. **Filamento PLA vermelho**. Disponível em: <[https://www.lojavooit3d.com.br/filamento-pla-vermelho?utm\\_source=Site&utm\\_medium=GoogleMerchant&utm\\_campaign=GoogleMerchant&sku=PL-VM-1&gclid=CjwKCAiAp7GcBhA0EiwA9U0mtr0UhRyincXY3gz\\_Og4JHAc4yUNGjXupe0Yc843T5fyT1nadh-A57RoC4sAQAvD\\_BwE](https://www.lojavooit3d.com.br/filamento-pla-vermelho?utm_source=Site&utm_medium=GoogleMerchant&utm_campaign=GoogleMerchant&sku=PL-VM-1&gclid=CjwKCAiAp7GcBhA0EiwA9U0mtr0UhRyincXY3gz_Og4JHAc4yUNGjXupe0Yc843T5fyT1nadh-A57RoC4sAQAvD_BwE)>. Acesso em 03 de dezembro de 2022.

MASTERS, G. M. **Renewable and Efficient Electric Power Systems, s.l.: John Wiley & Sons**. 2004. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=onT0dkq1qWsC&oi=fnd&pg=PP8&dq=Masters,+G.+M.,+2004.+Renewable+and+Efficient+Electric+Power+Systems,+s.l.:+John+Wiley+%26+Sons&ots=gHD5crc0dS&sig=VpCQr\\_ekL5M846pLzSMXUBu7ico#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=onT0dkq1qWsC&oi=fnd&pg=PP8&dq=Masters,+G.+M.,+2004.+Renewable+and+Efficient+Electric+Power+Systems,+s.l.:+John+Wiley+%26+Sons&ots=gHD5crc0dS&sig=VpCQr_ekL5M846pLzSMXUBu7ico#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em 15 de novembro de 2022.

MATOS, Leonardo Rocha. **Projeto de sistema de posicionamento automático para painel solar**. 2019. Disponível em: <[https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24296/1/2019\\_LeonardoRochaMatos\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24296/1/2019_LeonardoRochaMatos_tcc.pdf)>. Acesso em 06 de outubro de 2022.

MELLO, Gabriel Ozorio Linhares de. **Estudo da influência da temperatura na produção de energia gerada por placas fotovoltaicas**. 2021. Disponível em: <<https://posgraduacao.ufms.br/portal/trabalho-arquivos/download/9568>>. Acesso em 18 de junho de 2024.

MIRANDA, Rodrigo Marcelino; OLIVEIRA, Daniel de; SANCHES, Rodrigo Fazani Esteves. **Otimização de um Sistema Fotovoltaico Visando Aumentar a Eficiência na Captação de Energia Solar num Sistema Residencial**. 2021.

MONK, Simon. **Programação com Arduino: começando com sketches**. 2. ed. – Porto Alegre: Bookman. 2017.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes de; RUTHER, Ricardo; ABREU, Samuel Luna de; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Silvia Vitorino; SOUZA, Jefferson Gonçalves de. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 ed. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2017. Disponível em: <[https://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html)>. Acesso em 14 de novembro de 2022.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos. **Energia Solar: Estimativa e Previsão de Potencial Solar**. Editora Appris. 2019.

PORTAL SOLAR. **Efeito fotovoltaico x efeito fotoelétrico: o que são e quais as diferenças**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/efeito-fotovoltaico-x-efeito-fotoeletrico-o-que-sao-quais-diferencas>>. Acesso em 12 de novembro de 2022.  
PORTAL SOLAR. **Energia solar na Bahia**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-na-bahia>>. Acesso em 12 de novembro de 2022.

PORTAL SOLAR. **Tudo sobre a eficiência da painel solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-eficiencia-do-painel-solar.html>>. Acesso em 06 de maio de 2024.

PORTO ALEGRE. **Estações do ano e movimentos da terra**. Disponível em: <[https://websmed.portoalegre.rs.gov.br/escolas/obino/cruzadas1/estacoes\\_inicial/movimentos\\_terra.html](https://websmed.portoalegre.rs.gov.br/escolas/obino/cruzadas1/estacoes_inicial/movimentos_terra.html)>. Acesso em 16 de novembro de 2022.

QUADROS, Marcelo Luiz de. **Elementos de máquinas**. Porto Alegre: SAGAH. 2018.

ROCHA FILHO, José Itanor do Couto. **Sistema de seguimento solar em um eixo com diferentes estratégias de seguimento para módulos fotovoltaicos**. 2016. Disponível em: <[https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/20644/1/2016\\_dis\\_jicrochafilho.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/20644/1/2016_dis_jicrochafilho.pdf)>. Acesso em 14 de novembro de 2022.

SOUZA, Marco Polo Moreno de. **Curso básico de Arduino**. 2017. Disponível em: <<http://www.arduino.unir.br/images/downloads/apostila-arduino.pdf>>. Acesso em 03 de dezembro de 2022.

STINE, W. B., GEYER, M. **Power from the Sun**. 2001. Disponível em: <<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter02/chapter02.html>>. Acesso em 15 de novembro de 2022.

Time and date. **UTC atual, fuso horário (horário universal coordenado)**. Disponível em: <<https://www.timeanddate.com/worldclock/timezone/utc>>. Acesso em 15 de maio de 2024.

USINA INFO. **Projeto medindo corrente com o sensor ACS712 e o Arduino**. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/blog/projeto-medindo-corrente-com-o-sensor-ac712-e-o-arduino/>>. Acesso em 03 de novembro de 2022.

USP. **Propagação de incertezas**. 2019. Disponível em: <<https://fap.if.usp.br/~crepaldi/posts/experimental%20physics/propagacao-de-incertezas.html>>. Acesso em 25 de maio de 2024.

VIEIRA, Romênia Gurgel. **Análise comparativa do desempenho entre um painel solar estático e com rastreamento no município de Mossoró-RN**. 2014. Disponível em: <[https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/tede/519/1/RomeniaGV\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/tede/519/1/RomeniaGV_DISSERT.pdf)>. Acesso em 07 de outubro de 2022.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1ªEd. 2018. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ni9dDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA15&dq=manufatura+aditiva&ots=Jr2NgxDvXQ&sig=LQzwAsl9PSYJ3PXeadSSi5Ljers#v=onepage&q=manufatura%20aditiva&f=false>>. Acesso em 18 de maio de 2024.

WISHBOX. **Para que serve o PLA: o que é, vantagem e como imprimir em 3D**. Disponível em: <<https://www.wishbox.net.br/blog/pla/#:~:text=Para%20que%20serve%20o%20PLA,das%20dimens%C3%B5es%20finais%20do%20objeto>>. Acesso em 18 de maio de 2024.

## ANEXO A – EQUAÇÃO GERAL DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZA

Neste anexo é apresentado a equação geral da propagação de incerteza empregada na análise dos dados deste trabalho. A seguir, detalha-se a formulação da equação e sua aplicação específica.

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial z}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2}$$

Onde:

$\sigma_z$ : A função dependente das variáveis;

$\frac{\partial z}{\partial x_n}$ : A derivada parcial da função dependente em relação a  $x_n$ ;

$\sigma_{x_n}$ : A incerteza associada a variável a  $x_n$ .

Na equação da Lei de Ohm para obter a incerteza da corrente elétrica, sendo que tensão e resistor possui incerteza, tem-se:

$$U = R \cdot i$$

$$i = \frac{U}{R}$$

Aplicando a derivada parcial, encontra-se:

$$\frac{\partial i}{\partial x_U} = \frac{1}{R}$$

$$\frac{\partial i}{\partial x_R} = -\frac{U}{R^2}$$

A Incerteza de U e R é dada por:  $\sigma_{x_U} = 1\% V$  e  $\sigma_{x_R} = 5\% \Omega$ , respectivamente.

Substituindo, tem-se:

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{1}{R} \cdot \sigma_{x_U}\right)^2 + \left(-\frac{U}{R^2} \cdot \sigma_{x_R}\right)^2}$$

Logo,

$$\sigma_i = \sqrt{\left(\frac{1}{R} \cdot (U \cdot 0,01)\right)^2 + \left(-\frac{U}{R^2} \cdot (R \cdot 0,05)\right)^2}$$

Para Potência, tem-se:

$$P = U \cdot i$$

Aplicando a derivada parcial, obtém-se:

$$\frac{\partial P}{\partial x_U} = i$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_i} = U$$

A incerteza de U é dada por:  $\sigma_{x_U} = 1\% V$  e a incerteza de i é  $\sigma_{x_i}$

Logo,

$$\sigma_z = \sqrt{(i \cdot \sigma_{x_U})^2 + (U \cdot \sigma_{x_i})^2}$$

Após isso, substitui os valores e encontra-se a incerteza dos dados coletados.

## APÊNDICE A – CÓDIGO DO POSICIONAMENTO SOLAR

```

#include <Wire.h> // Biblioteca do módulo RTC
#include "RTCLib.h" // Biblioteca do módulo RTC
#include <AccelStepper.h> // Biblioteca do motor de passo
#include <Servo.h> // Biblioteca do servo motor
#include <math.h> // Biblioteca das funções trigonométricas

RTC_DS3231 rtc; // tipo do módulo rtc utilizado

// Definição das portas analógicas do driver ULN2003 do motor de passo
#define PIN1 6 // IN1
#define PIN2 7 // IN2
#define PIN3 8 // IN3
#define PIN4 9 // IN4

// Valor de PI
#define PI 3.141592653589

// Valores definidos de latitude, longitude, latitude (radiano) e longitude do meridiano
const double latitude = -13.2526395; // latitude local
const double longitude = -43.4082828; // longitude local
const double lat_rad = latitude * PI/180.0; // latitude em radiano
const double long_rad = longitude * PI/180; // longitude em radiano
const double long_meridiano = -45;

int j = 135; // O valor de j é o número do dia do ano atual (dia médio do mês de maio - 121 a 153 dias)
int posicao_servo = 0;

// Quantidade de passos necessários para completar uma rotação completa, transformando em graus
const float STEPS_PER_REVOLUTION = 2048;
const float STEPS_PER_DEGREE = STEPS_PER_REVOLUTION / 360.0; // 5.7 rev/graus

// Pins do motor de passo, comunicação do driver do motor de passo
AccelStepper stepper(AccelStepper::FULL4WIRE, PIN1, PIN3, PIN2, PIN4);

Servo servo; // Controlar o Servo com o nome de "servo"

// Variável booleana para controlar o movimento do motor de passo
bool movimento_motor_ativo = true;

// Função para mover o motor de passo para a posição específica em graus
void moveStepperToAzimuth(double azimuth){

```

```

    // conversão do valor de azimute em graus para passos do motor de
    passo
    double position = azimute*STEPS_PER_DEGREE;
    // mover o motor de passo para a posição desejada
    stepper.moveTo(position);
    // Enquanto o motor não alcançar a posição desejada, continue movendo
    while (stepper.distanceToGo() != 0) {
        stepper.run();
    }
}

void setup(){

    Serial.begin(9600);
    // Aguarda 5 segundos após ter ligado o arduino para iniciar os módulos
    delay(5000);
    // Motor de passo
    stepper.setMaxSpeed(1000); // Velocidade máxima do motor de passo em
    passos/segundos
    stepper.setAcceleration(650); // Taxa de aceleração do motor de passo
    moveStepperToAzimuth(0); // O motor de passo inicia na posição inicial (0
    graus)

    // Servo
    servo.attach(11); // Anexa o servo ao pino 11
    // RTC
    rtc.begin();
    //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); // Ajusta de data e hora
    automatico
    //rtc.adjust(DateTime(2024, 4, 27, 10, 17, 00)); // Ajusta o tempo do RTC
    manualmente
    //Ordem (Ano,Mes,Dia,hora,minutos,segundos)
    //Executar apenas quando precisar ajustar a data e hora, depois comentar
    essa linha
    delay(1000); // 1000 Milissegundos

}

void loop(){

    // Módulo RTC DS3231
    DateTime now = rtc.now();
    int hora_atual = now.hour();
    int minutos_atual = now.minute();
    // Converte os minutos em horas
    float horas_convertidas = minutos_atual / 60.0;
    // Adiciona as horas convertidas à hora atual
    float hora_total = hora_atual + horas_convertidas;

```

```

// Equações (Variáveis)
double declinAng = 0;
double corrig_long_ang = 0;
double corrig_long_rad = 0;
double eot = 0;
double horaSolar = 0;
double detHora = 0;
double valor_x = 0;
double altitudeRad = 0;

// Equações da Posição do sol (Pelo Horário)
double altitude = 0;
double azimute = 0;
double zenite = 0;

// Calculos das equações
declinAng = 23.45*sin((PI/180.0)*(360*((j-80)/365.0))); // Cálculo da
declinação solar em graus
corrig_long_ang = (longitude-long_meridiano)/15.0; // Correção da longitude
corrig_long_rad = corrig_long_ang * PI/180.0;
valor_x = (2*PI*(j-1))/365.0; // Ângulo em relação ao número do dia do ano
eot = 2.292*(0.0075+0.1868*cos(valor_x)-3.2077*sin(valor_x)-
1.4615*cos(2*valor_x)-4.089*sin(2*valor_x)); // Equação Horária do Tempo (EOT)
em radiano
horaSolar = hora_total - corrig_long_rad + (eot/60.0) - 0; // Conversão da
hora relógio em hora solar (h)
detHora = 15.0*(horaSolar - 12); // Determinação da hora solar aonde prever
a posição do sol

// Conversão dos valores em radianos
double declin_rad = declinAng*PI/180.0;
double detHoraRad = detHora*PI/180.0;

// Cálculo das equações da Posição do sol (Pelo Horário)
altitudeRad =
asin(sin(declin_rad)*sin(lat_rad)+cos(declin_rad)*cos(lat_rad)*cos(detHoraRad)
); // Altitude Solar em radiano
altitude = altitudeRad*180.0/PI; // Conversão em graus
azimute = (acos((-
sin(altitudeRad)*sin(lat_rad)+sin(declin_rad))/(cos(altitudeRad)*cos(lat_rad))
))*180.0/PI; //Ângulo de azimute em Graus
zenite = 90.0-altitude; // Ângulo de zênite

// Verifica se é 18h ou antes da 6h da manhã no RTC e o movimento do motor
está ativo
if ((hora_total >= 18 || hora_total < 6) && movimento_motor_ativo){
// Move o motor de passo para a posição inicial (0 graus)
Serial.println("Desativando movimento do motor.");
moveStepperToAzimuth(0);
}

```

```

// Para o movimento do motor de passo
stepper.stop();
// Para o movimento do servo motor
servo.detach();
// Desativa o movimento do motor para que ele não se mova novamente nesta
condição
movimento_motor_ativo = false;
}
// Se passou das 6h da manhã e o movimento do motor não está ativo
else if (hora_total >= 6 && hora_total < 18 && !movimento_motor_ativo){
  Serial.println("Ativando movimento do motor.");
  // reanexa o servo
  servo.attach(11);
  // Ativa o movimento do motor de passo novamente
  movimento_motor_ativo = true;
}
// Se é 6h da manhã e antes das 18h e o movimento está ativo, mova o servo,
mova o motor de passo e atualize o horário
else if(hora_total >= 6 && hora_total < 18 && movimento_motor_ativo){
  if (hora_total >= 12){
    // Move o motor de passo para o novo azimute
    if(hora_total == 12 && minutos_atual == 0){
      moveStepperToAzimuth(0);
    }
    else{
      Serial.println("Movendo para azimute negativo.");
      moveStepperToAzimuth(-azimute);
      // Mapeia o valor de atitude (0 a 90 graus) para a faixa de valores
do servo (0 a 180 graus)
      posicao_servo = map(altitude, 0, 90, 0, 180);
      // Define a posição do servo de acordo com o valor de altitude
calculado
      servo.write(posicao_servo);
      // Atualiza o tempo do RTC enquanto o motor de passo está se movendo
      now = rtc.now();
    }
  }
}
else{
  Serial.println("Movendo para azimute POSITIVO.");
  posicao_servo = map(altitude, 0, 90, 0, 180);
  servo.write(posicao_servo);
  moveStepperToAzimuth(azimute);
  now = rtc.now();
}
}

Serial.print("declinação: ");
Serial.println(declinAng);
Serial.print("declinação radiano: ");

```

```
Serial.println(declin_rad);
Serial.print("Correção longitude em rad: ");
Serial.println(corrig_long_rad,5);
Serial.print("hora Solar: ");
Serial.println(horaSolar);
Serial.print("Determinação Solar em rad: ");
Serial.println(detHoraRad);
Serial.print("Determinação da hora Solar: ");
Serial.println(detHora);
Serial.print("Altitude Solar: ");
Serial.println(altitude);
Serial.print("Azimute: ");
Serial.println(azimute);
Serial.print("zenite: ");
Serial.println(zenite);
Serial.print("Horas: ");
Serial.println(hora_total, 2);
Serial.print("posição do servo: ");
Serial.print(posicao_servo);
Serial.println();

// Aguarda um tempo antes de verificar novamente
delay(5000); // Verifica a cada 5 segundos
}
```

## APÊNDICE B – CÓDIGO DA COLETA E SALVAMENTO DO DADOS

```

#include <SD.h> // Biblioteca do cartão SD
#include <SPI.h> // Biblioteca para comunicação SPI
#include <Wire.h> //Biblioteca do RTC DS3231
#include "RTCLib.h"

const int chipSelect = 4; // Pino CS do módulo SD
RTC_DS3231 rtc;

char diaDaSemana[7][12] = {"Domingo", "Segunda", "Terca", "Quarta", "Quinta",
"Sexta", "Sabado"};
unsigned long ultimoTempoSalvo = 0;
// Variável para armazenar o último tempo de salvamento
const unsigned long intervaloSalvamento = 5000;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  rtc.begin();

  //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); // Ajusta de data e hora
  automatico
  //rtc.adjust(DateTime(2022, 7, 25, 9, 53, 00)); //Ajusta o tempo do RTC
  manualmente
  //Ordem (Ano,Mes,Dia,hora,minutos,segundos)
  //Executar apenas quando precisar ajustar a data e hora, depois comentar
  essa linha

  // Inicializando o cartão SD
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Falha ao inicializar o cartão SD");
    return;
  }
  Serial.println();
  Serial.println("Cartão SD inicializado com sucesso");
}

void loop() {
  DateTime now = rtc.now(); // Faz a leitura de dados de data e hora

  float tensaoFixa = analogRead(A0) * 5.0 * 5.0 / 1024.0;

  float tensaoMovel = analogRead(A1) * 5.0 * 5.0 / 1024.0;

```

```

if (millis() - ultimoTempoSalvo >= intervaloSalvamento) {
    ultimoTempoSalvo = millis();

    // Abre o arquivo "dadosF.txt" no cartão SD para escrita
    File dadosFile1 = SD.open("DadosF.csv", FILE_WRITE);
    if (dadosFile1) {
        dadosFile1.print(diaDaSemana[now.dayOfTheWeek()]);
        dadosFile1.print(",");
        dadosFile1.print(now.day());
        dadosFile1.print("/");
        dadosFile1.print(now.month());
        dadosFile1.print("/");
        dadosFile1.print(now.year());
        dadosFile1.print(",");
        dadosFile1.print(now.hour());
        dadosFile1.print(":");
        dadosFile1.print(now.minute());
        dadosFile1.print(":");
        dadosFile1.print(now.second());
        dadosFile1.print(",");
        dadosFile1.print(tensaoFixa);
        dadosFile1.println();
        dadosFile1.close(); // Fecha o arquivo
        Serial.println("Dados da Placa Fixa gravados com sucesso");
    } else {
        Serial.println("Erro ao abrir o arquivo DadosF.csv");
    }

    File dadosFile2 = SD.open("DadosM.csv", FILE_WRITE);
    if (dadosFile2) {
        dadosFile2.print(diaDaSemana[now.dayOfTheWeek()]);
        dadosFile2.print(",");
        dadosFile2.print(now.day());
        dadosFile2.print("/");
        dadosFile2.print(now.month());
        dadosFile2.print("/");
        dadosFile2.print(now.year());
        dadosFile2.print(",");
        dadosFile2.print(now.hour());
        dadosFile2.print(":");
        dadosFile2.print(now.minute());
        dadosFile2.print(":");
        dadosFile2.print(now.second());
        dadosFile2.print(",");
        dadosFile2.print(tensaoMovel);
        dadosFile2.println();
        dadosFile2.close();
        Serial.println("Dados da Placa Movel gravados com sucesso");
    } else {

```

```
        Serial.println("Erro ao abrir o arquivo DadosM.csv");
    }
}
delay(1000);
}
```

## APÊNDICE C – CÓDIGO DE POSICIONAMENTO DO MOTOR DE PASSO NA DIREÇÃO NORTE COM O POTENCIÔMETRO

```

#include <AccelStepper.h>

// Definição das portas analógicas do driver ULN2003 do motor de passo
#define PIN1 6 //IN1
#define PIN2 7 //IN2
#define PIN3 8 //IN3
#define PIN4 9 //IN4

// Quantidade de passos necessários para completar uma rotação completa,
transformando em graus
const float STEPS_PER_REVOLUTION = 2048;
const float DEGREES_PER_STEP = 360.0 / STEPS_PER_REVOLUTION;

// Pins do motor de passo, comunicação do driver do motor de passo
AccelStepper myStepper(AccelStepper::FULL4WIRE, PIN1, PIN3, PIN2, PIN4);

// Pino do potenciômetro
const int potPin = A0;

void setup() {
  // Configurações iniciais
  myStepper.setMaxSpeed(3000); // Velocidade máxima do motor de passo em
passos/segundos
  myStepper.setAcceleration(650); // Taxa de aceleração do motor de passo

  // Inicializa a comunicação serial
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Lê o valor do potenciômetro
  int potValue = analogRead(potPin);

  // Mapeia o valor do potenciômetro (0-1023) para um intervalo de graus de 0
a 360
  int targetAngle = map(potValue, 0, 1023, 0, 360);

  // Converte o ângulo alvo em quantidade de passos
  int stepsToMove = targetAngle / DEGREES_PER_STEP;

  // Verifica a direção do movimento com base na posição atual do motor de
passo
  if (stepsToMove > myStepper.currentPosition()) {
    // Gira no sentido anti-horário

```

```
    myStepper.moveTo(stepsToMove);
} else {
    // Gira no sentido horário
    myStepper.moveTo(-stepsToMove);
}

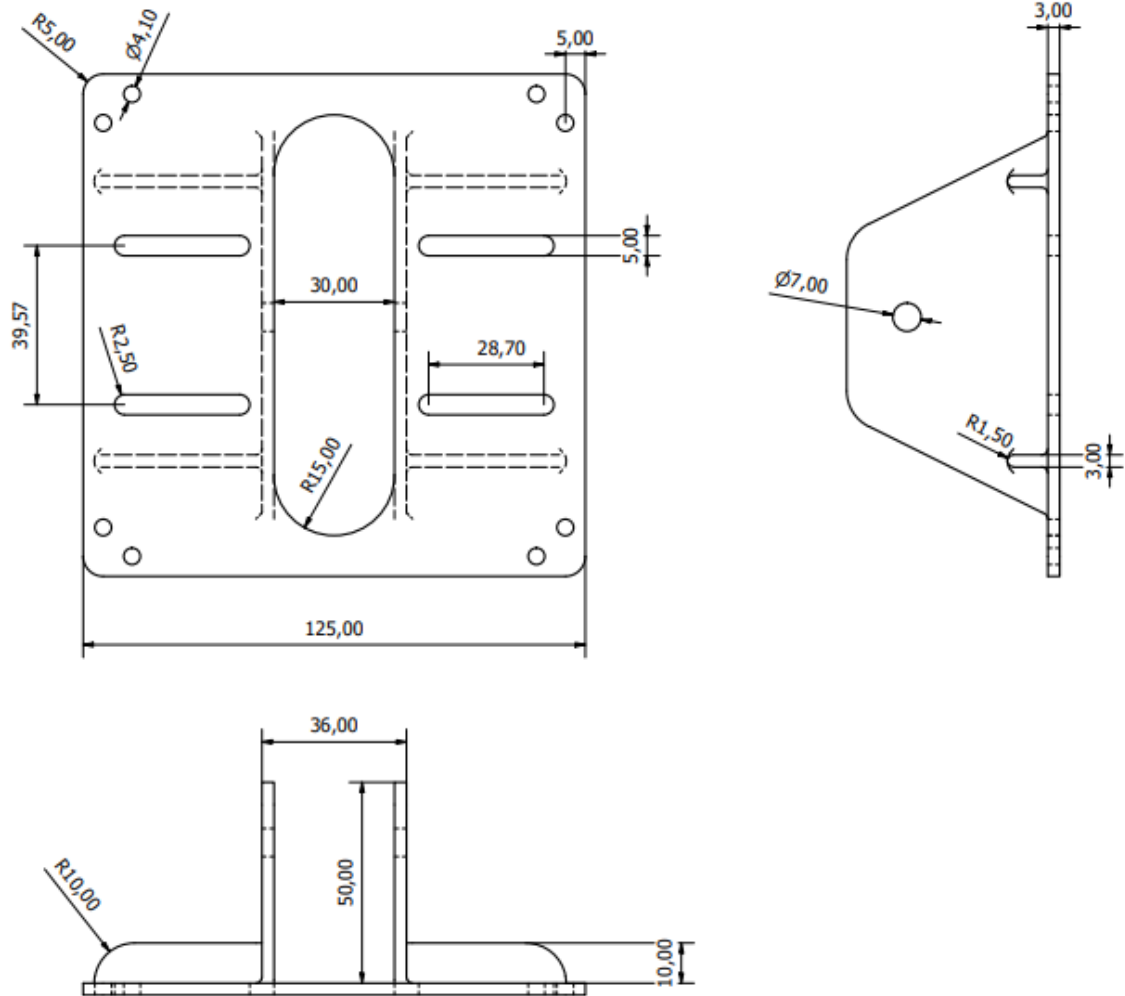
// Executar o movimento
myStepper.run();

// Mostra a quantidade de graus movidos no monitor serial
Serial.print("Graus movidos: ");
Serial.println(abs(myStepper.currentPosition()) * DEGREES_PER_STEP);

// Aguarda um curto período de tempo
delay(10);
}
```

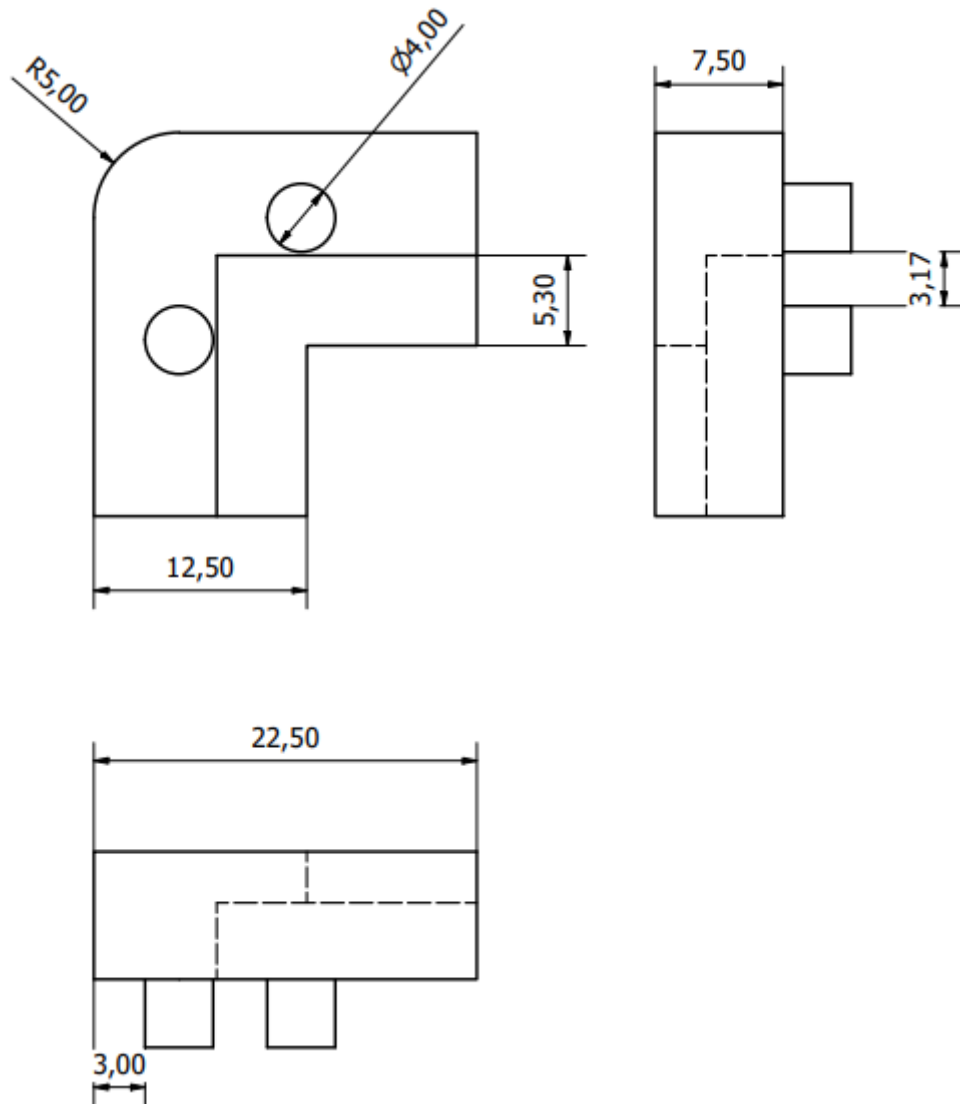
**APÊNDICE D – DESENHOS EM 2D DOS COMPONENTES**

Figura D1 – Vistas da peça suporte dos painéis solares



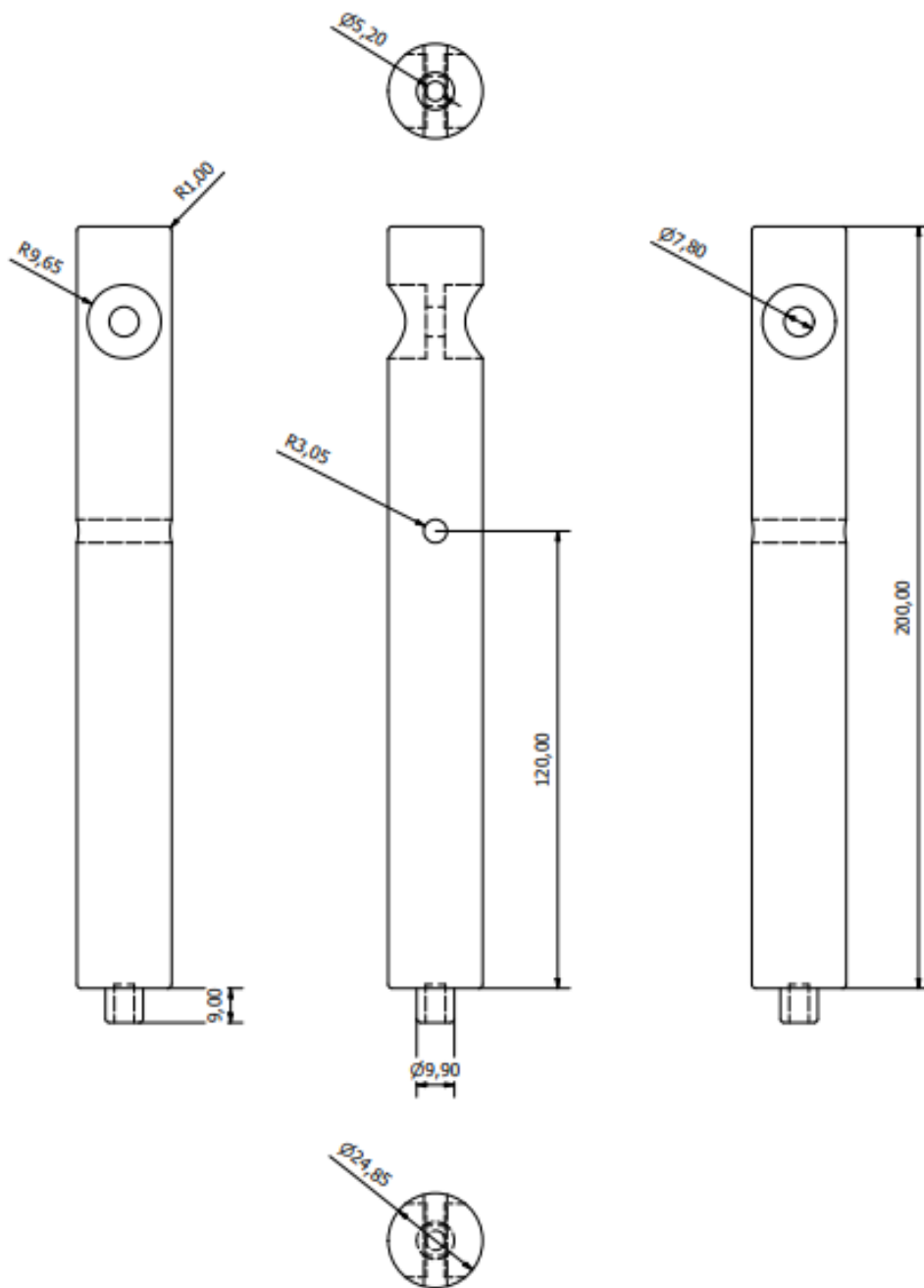
Fonte: Autor (2024).

Figura D2 – Vistas da peça trava



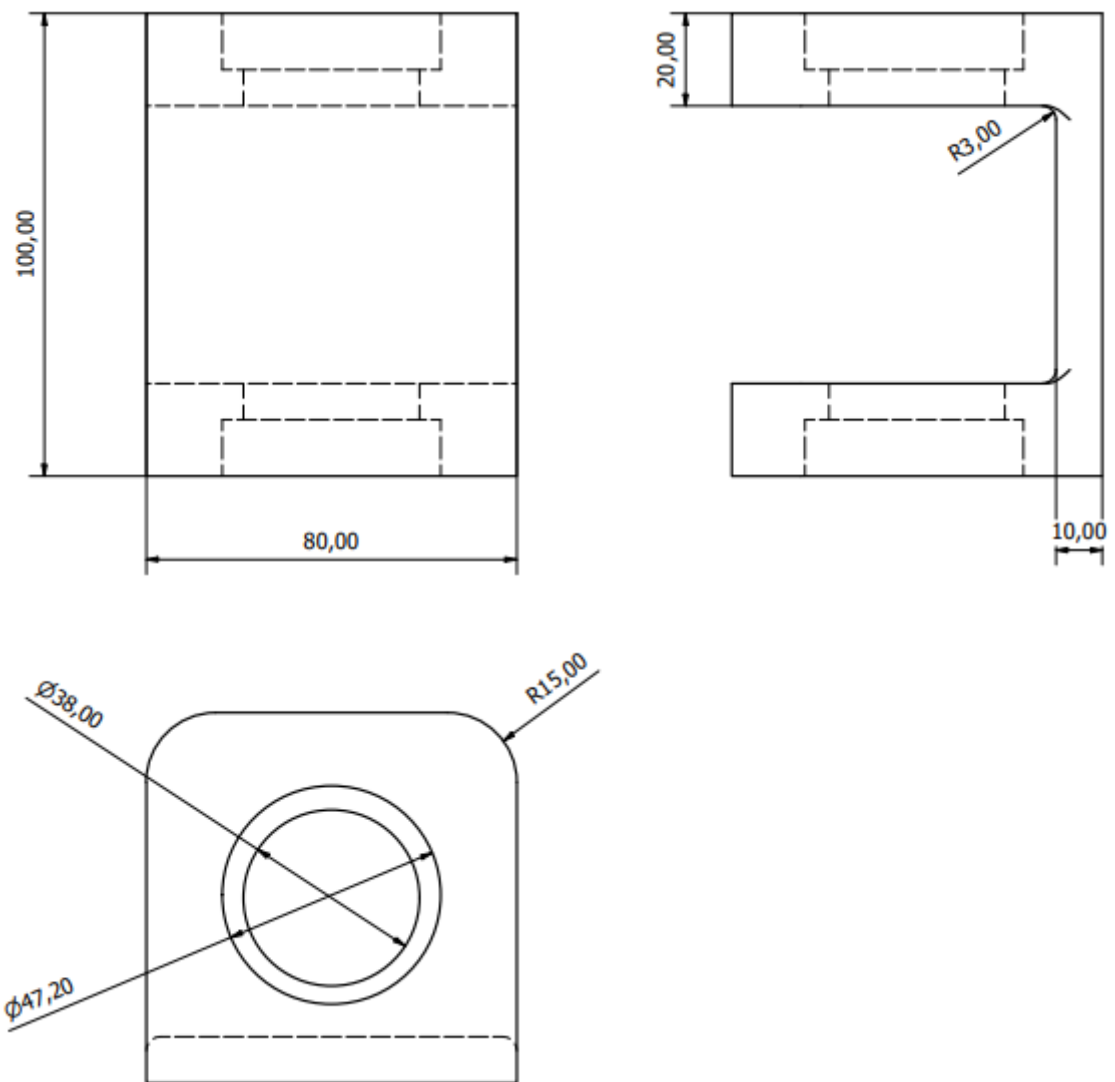
Fonte: Autor (2024).

Figura D3 – Vistas da peça eixo



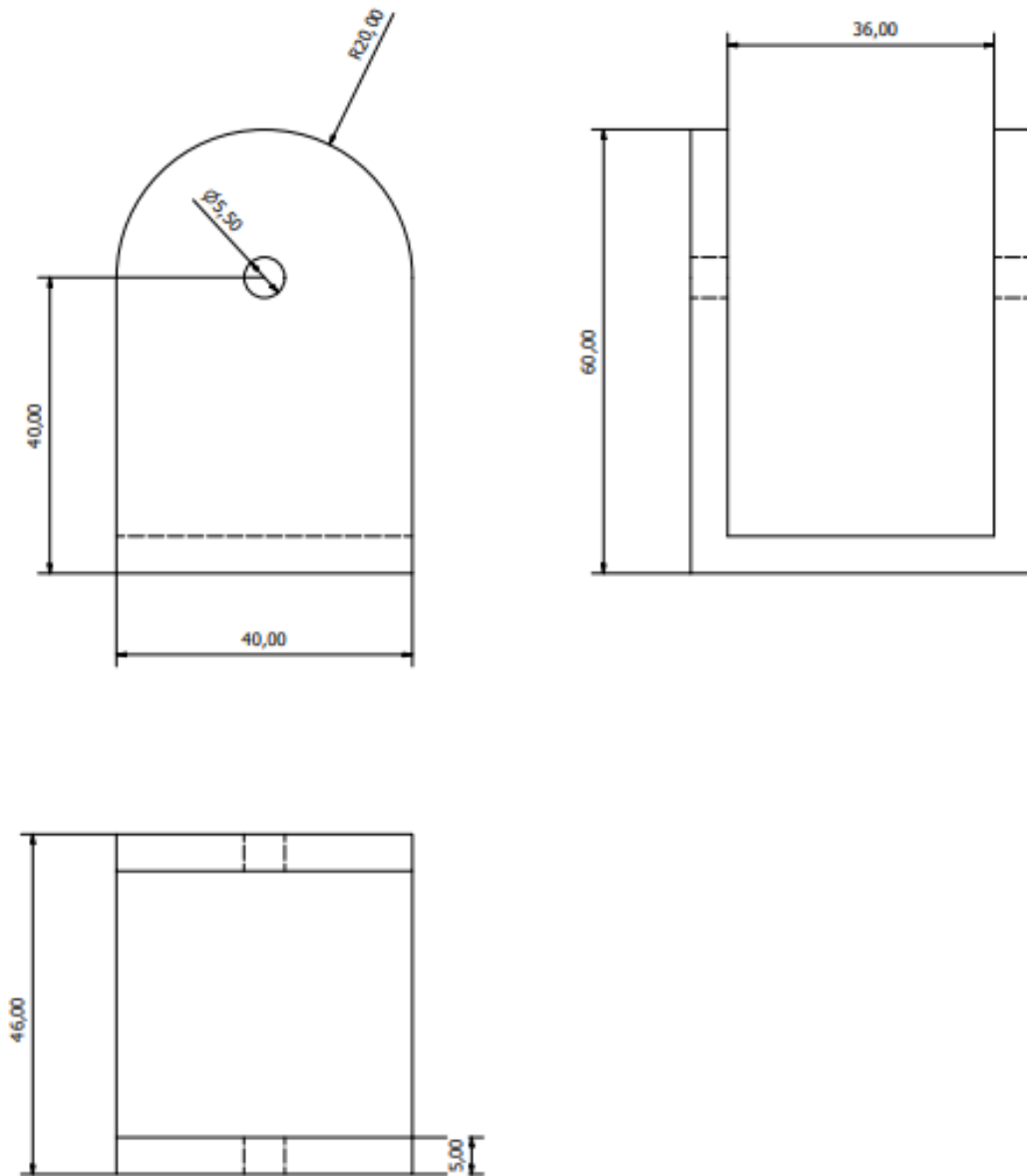
Fonte: Autor (2024).

Figura D4 – Vistas da peça suporte para o eixo



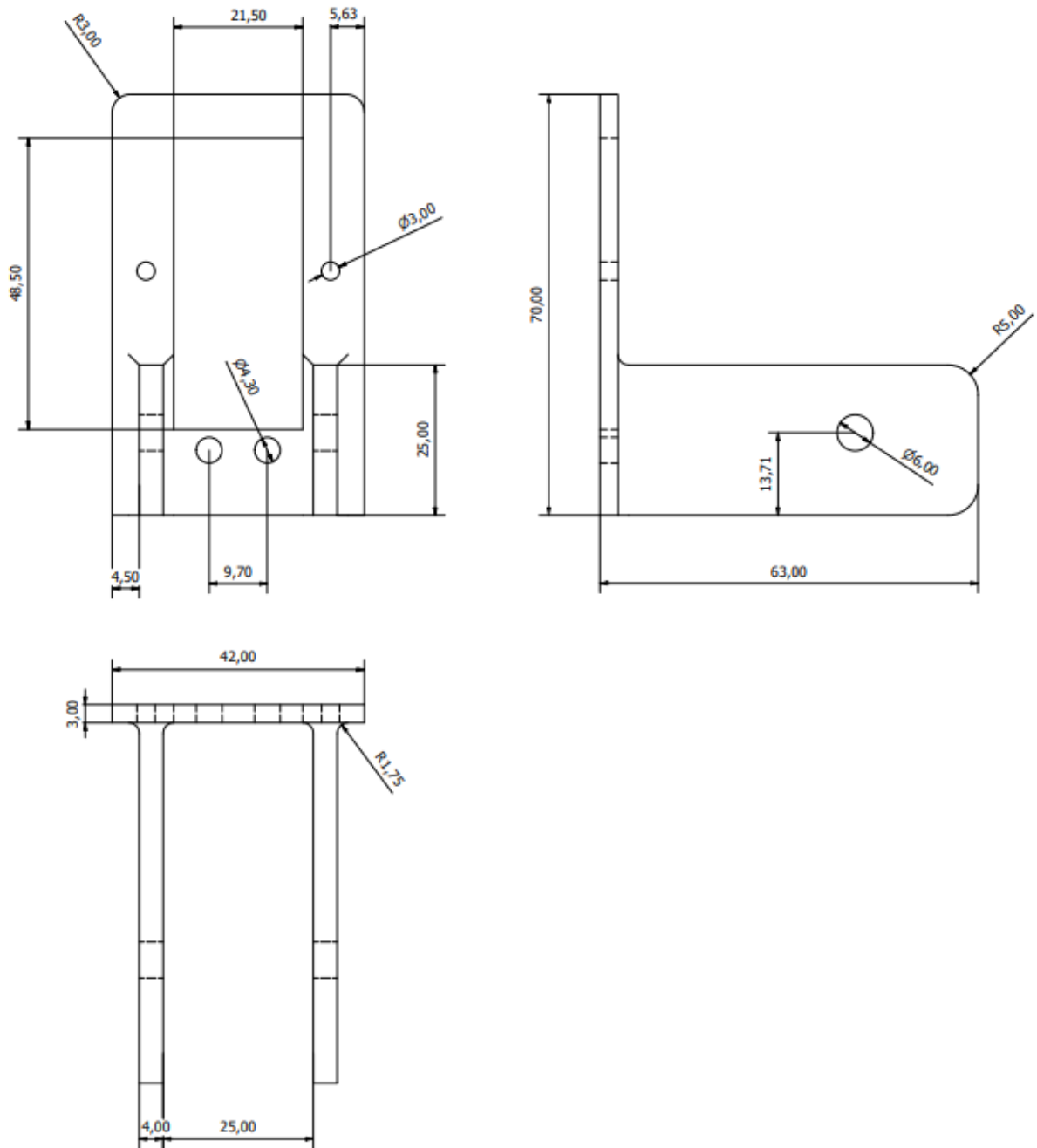
Fonte: Autor (2024).

Figura D5 – Vistas da peça suporte em U



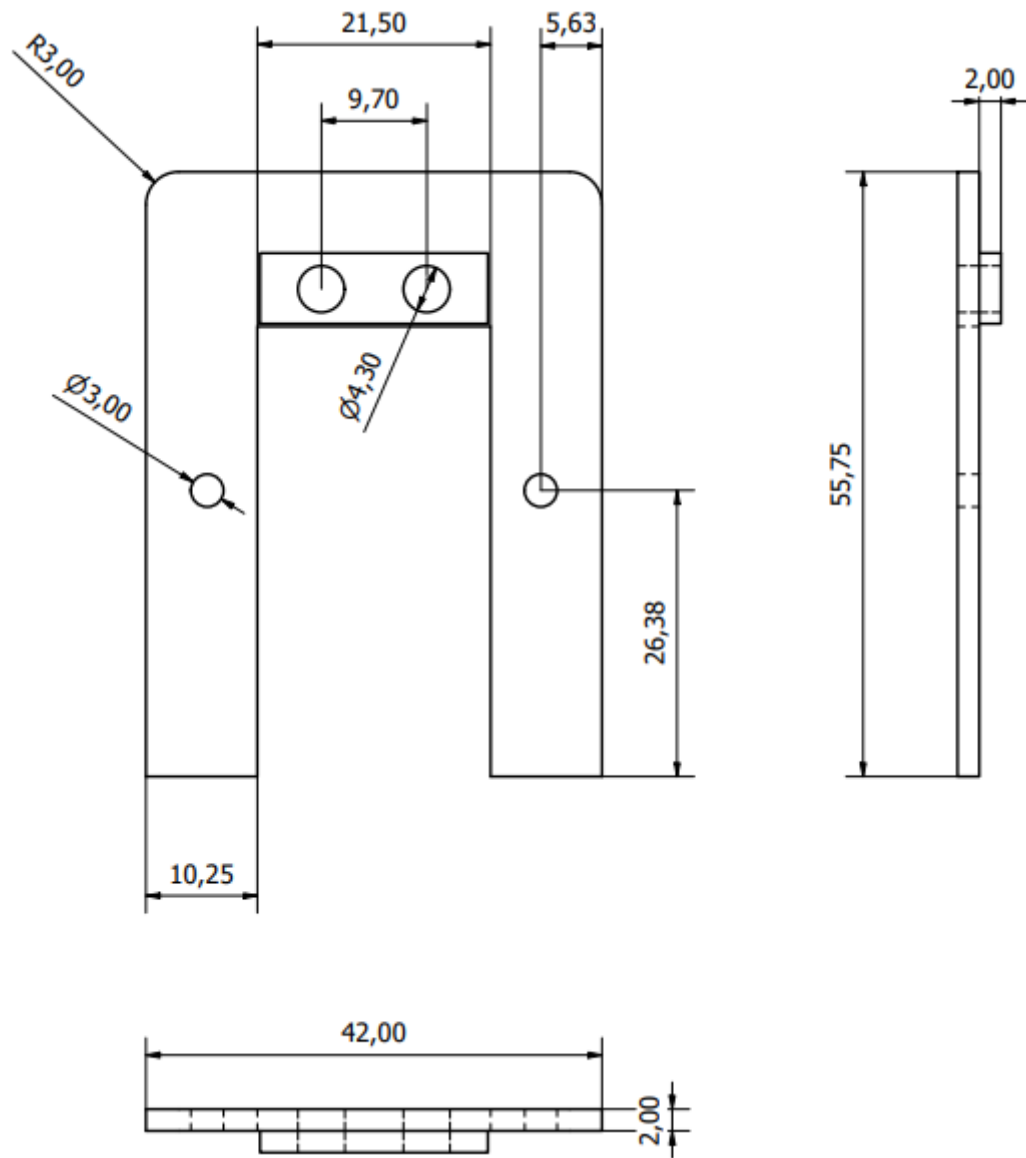
Fonte: Autor (2024).

Figura D6 – Vistas da peça suporte do servo motor



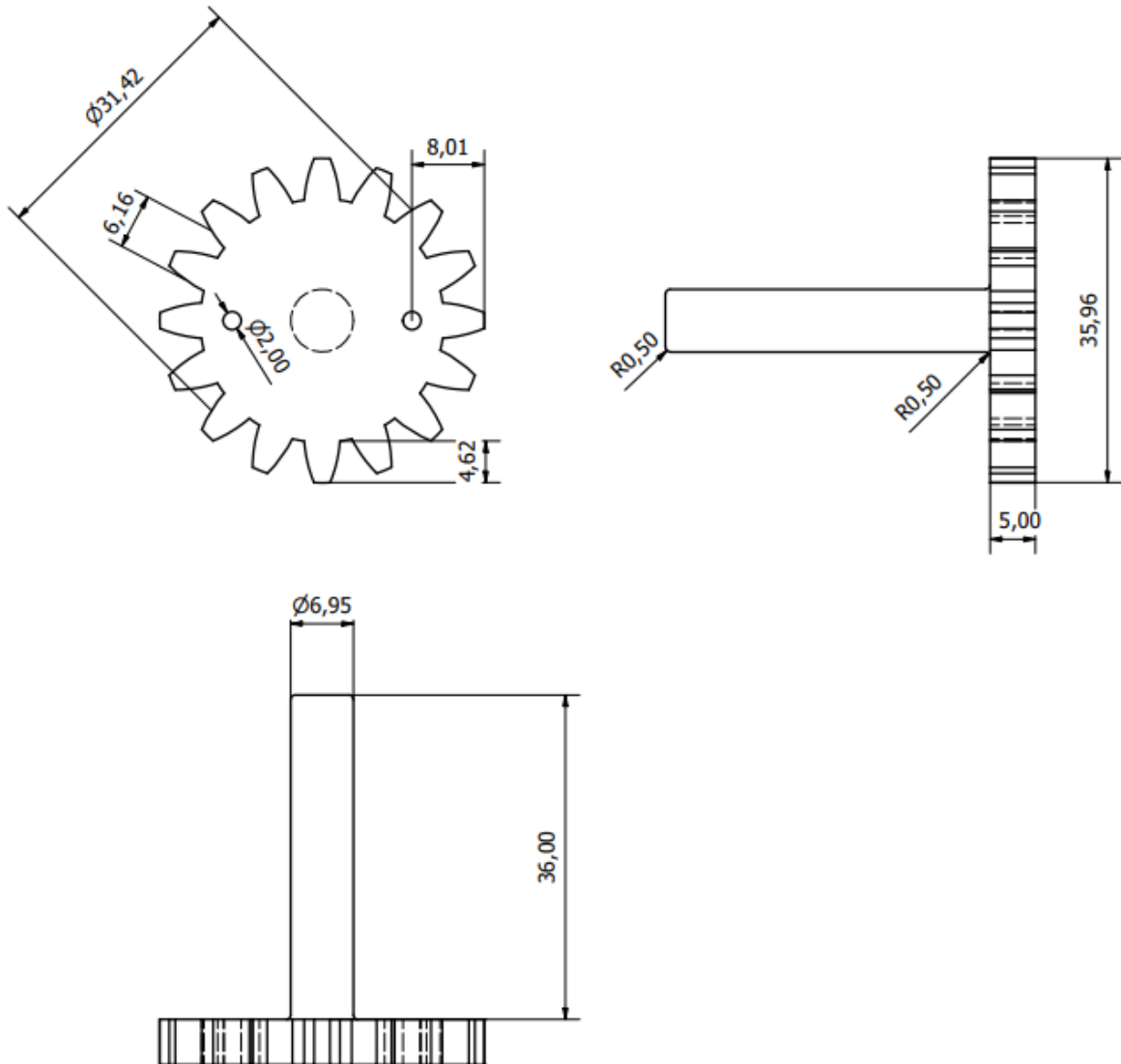
Fonte: Autor (2024).

Figura D7 – Vistas da peça complemento do suporte do servo motor



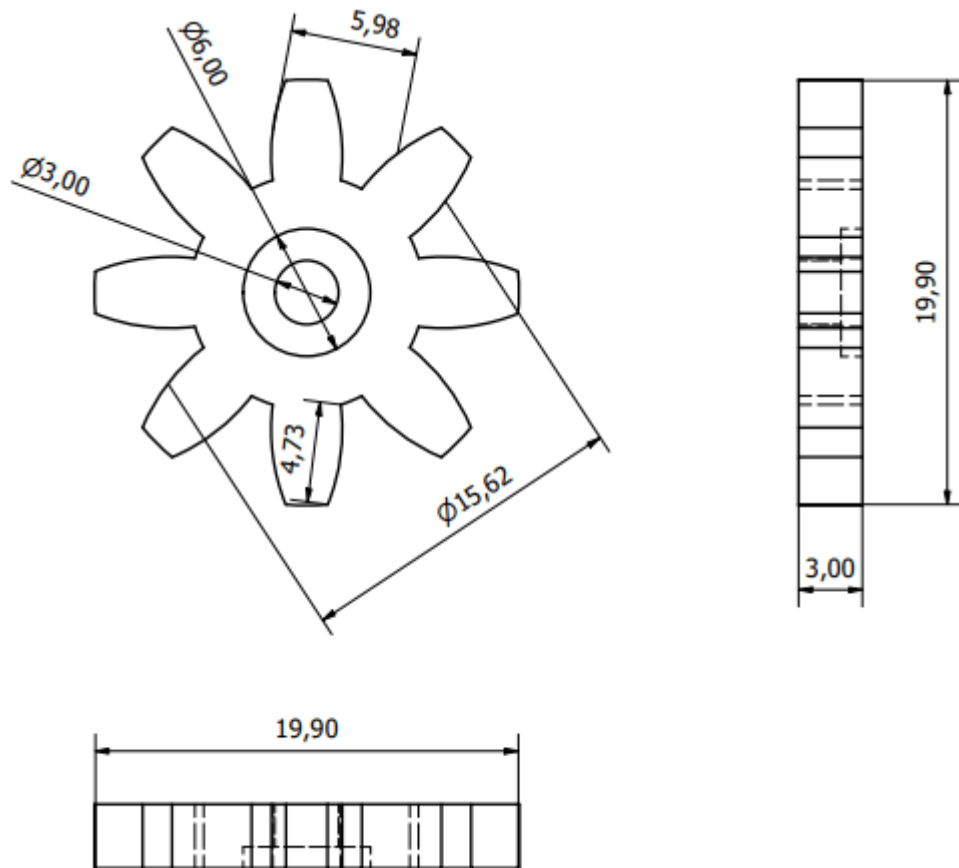
Fonte: Autor (2024).

Figura D8 – Vistas da peça engrenagem movida acoplada na placa fotovoltaica (coroa)



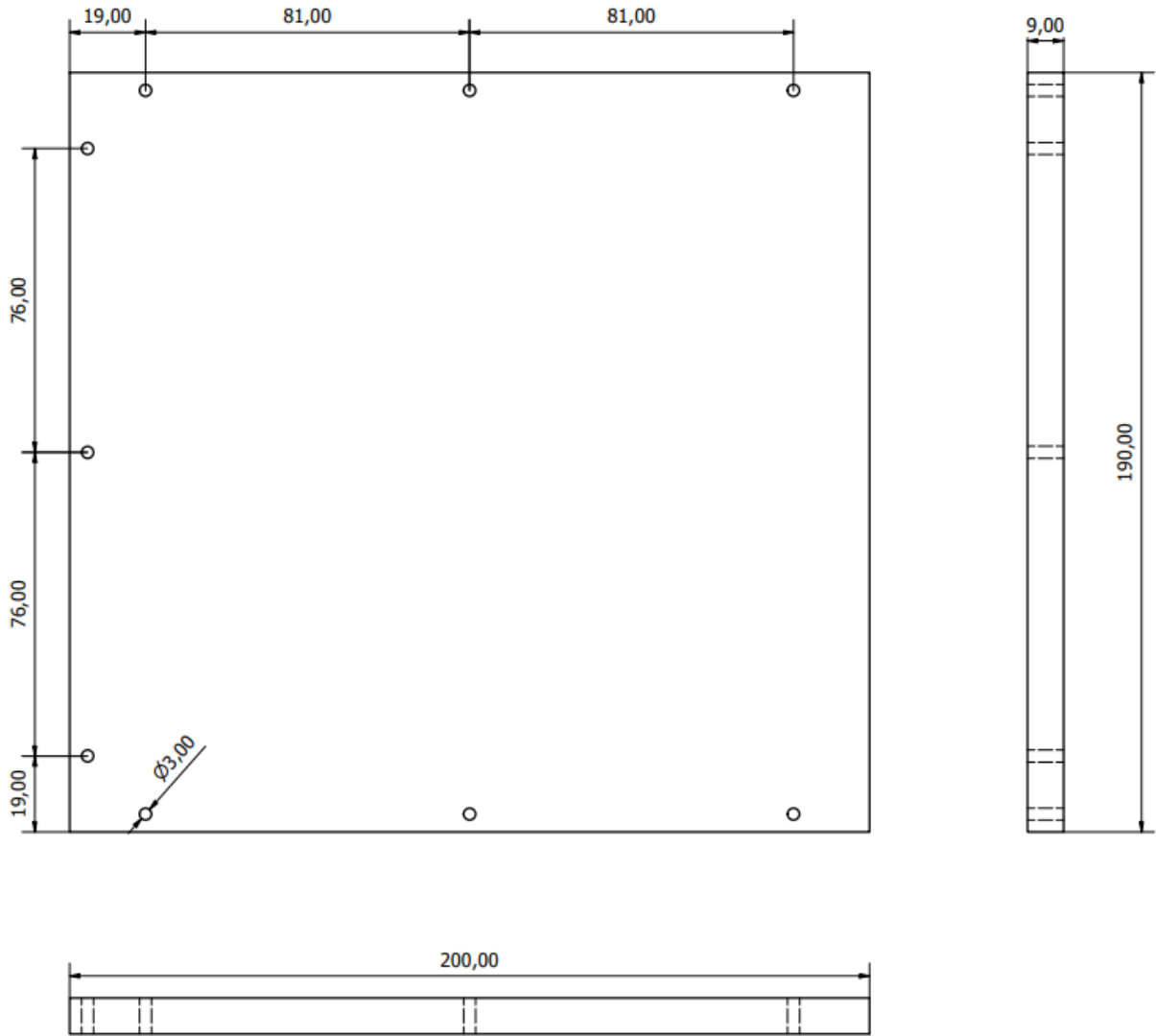
Fonte: Autor (2024).

Figura D9 – Vistas da peça engrenagem motora acoplada no servo motor (pinhão)



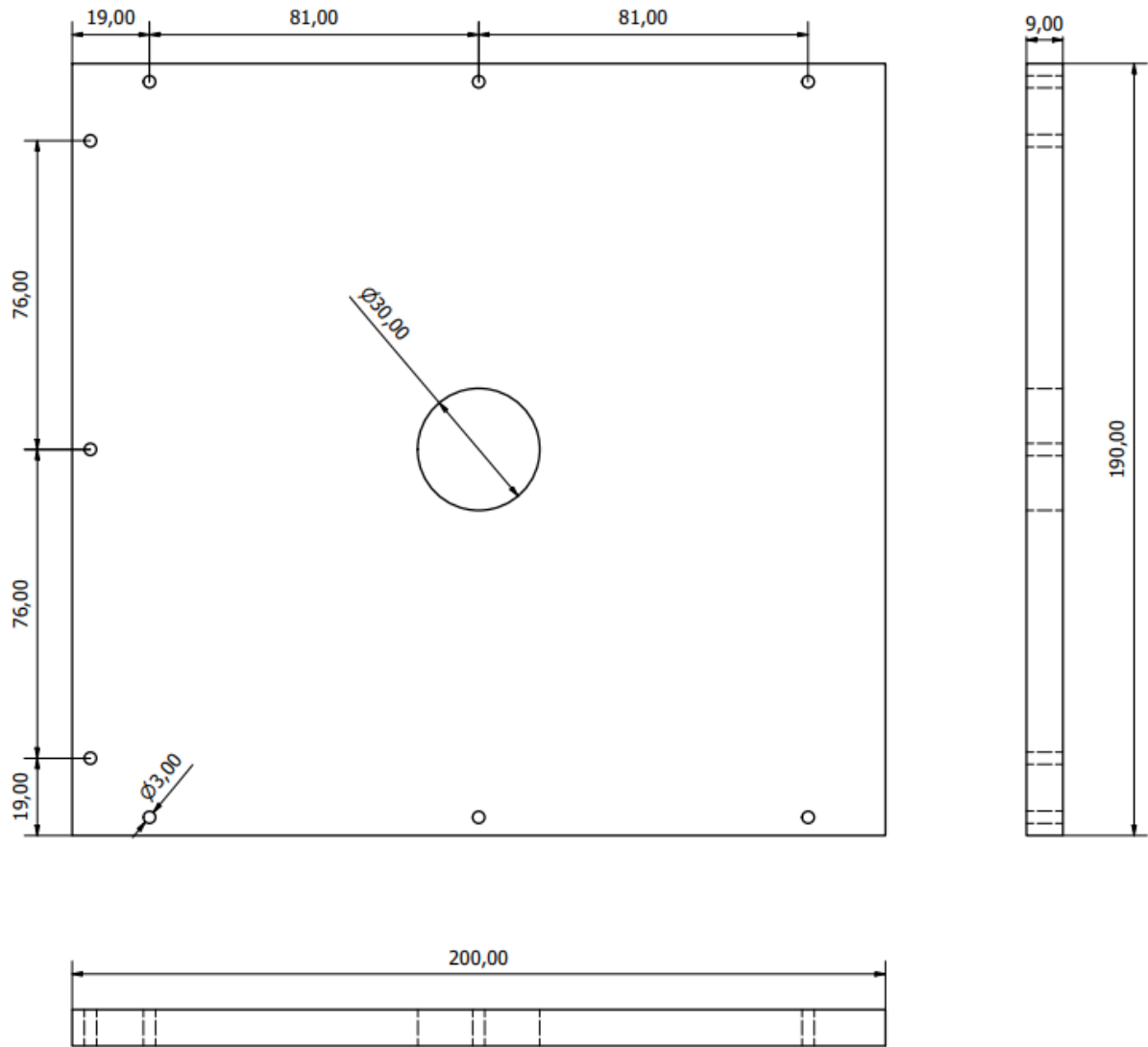
Fonte: Autor (2024).

Figura D10 – Vistas da peça da parte inferior do molde da caixa



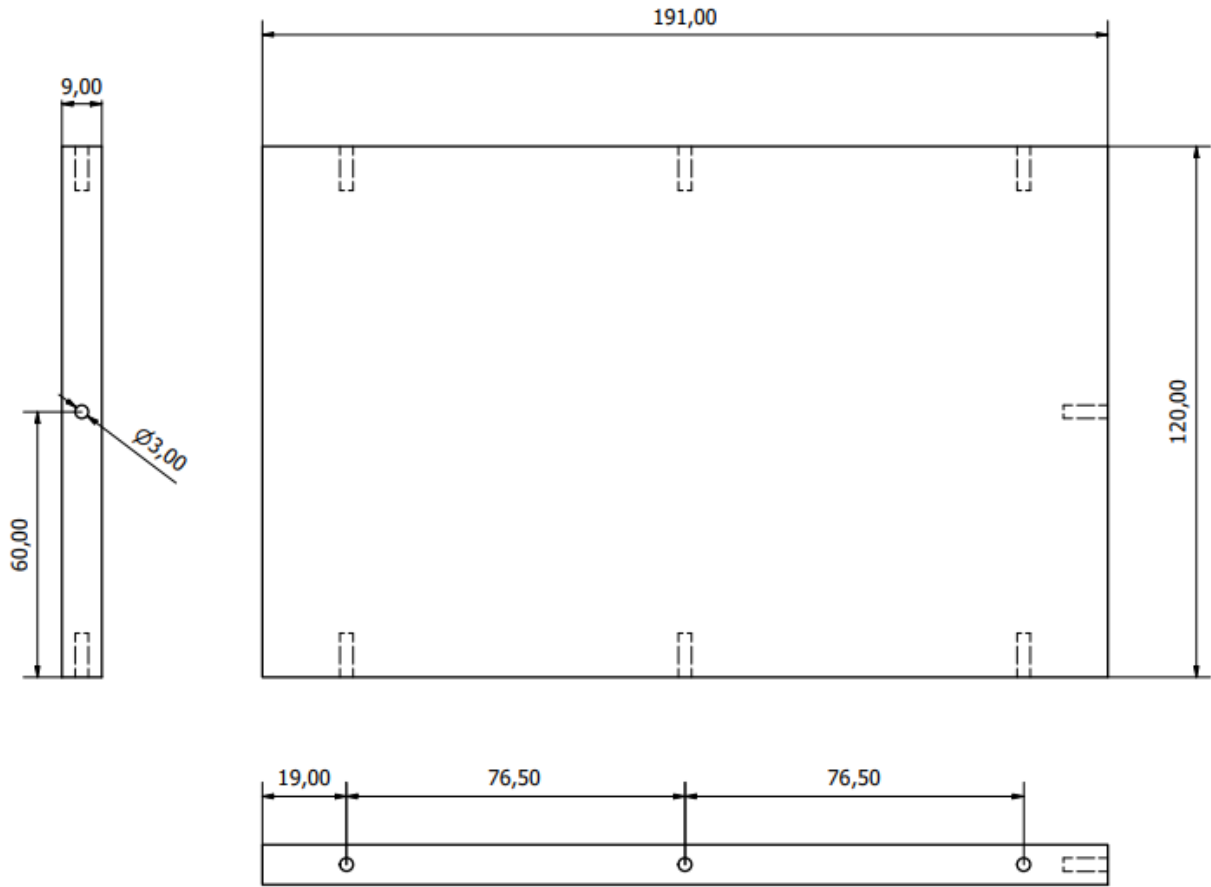
Fonte: Autor (2024).

Figura D11 – Vistas da peça da parte superior do molde da caixa



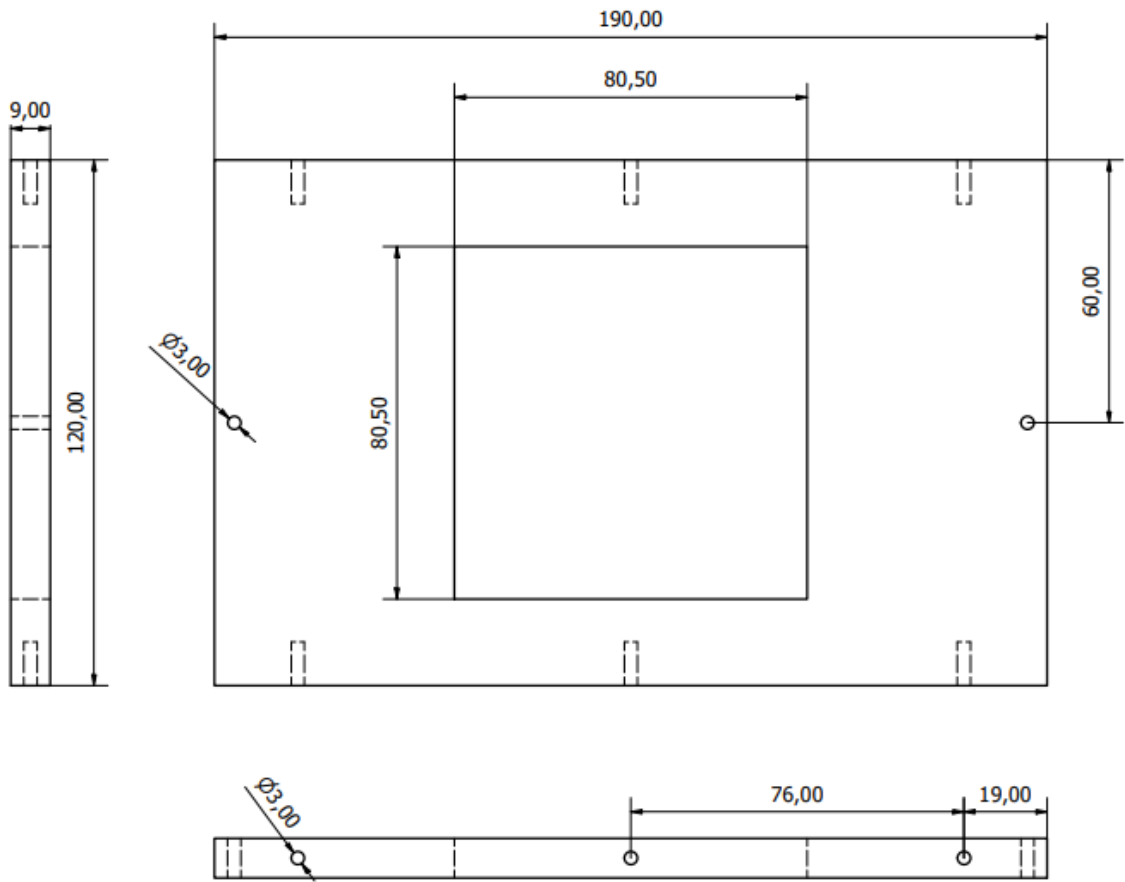
Fonte: Autor (2024).

Figura D12 – Vistas da peça da parte lateral (esquerda e direita) do molde da caixa



Fonte: Autor (2024).

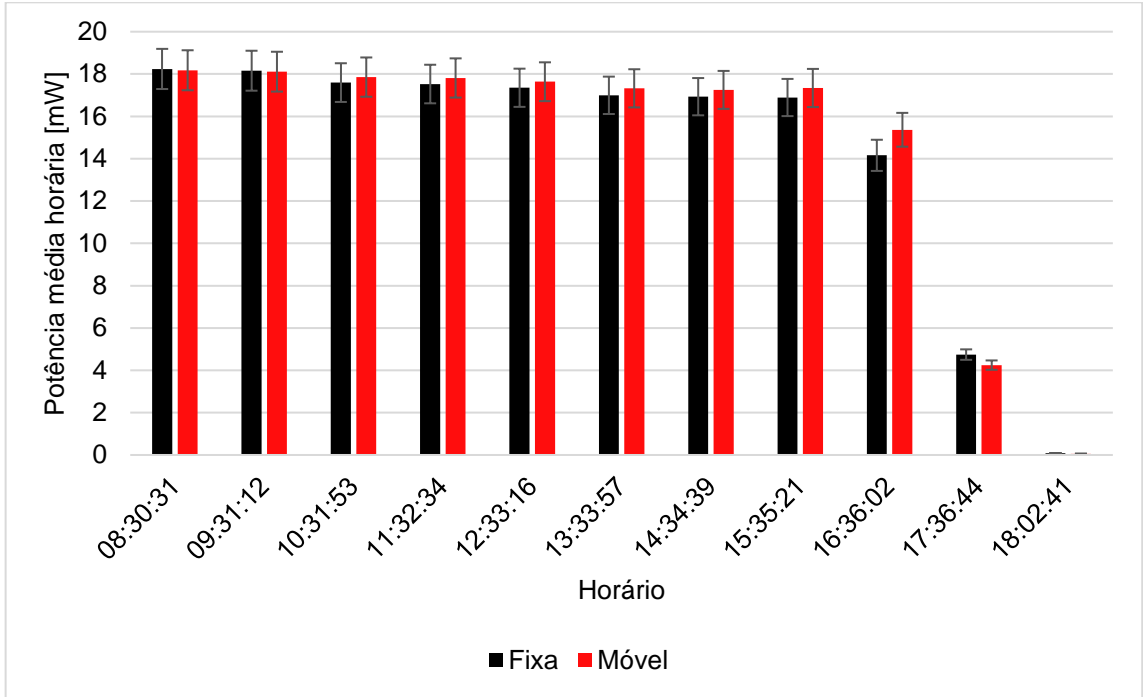
Figura D13 – Vistas da peça da parte lateral com abertura da ventoinha do molde da caixa



Fonte: Autor (2024).

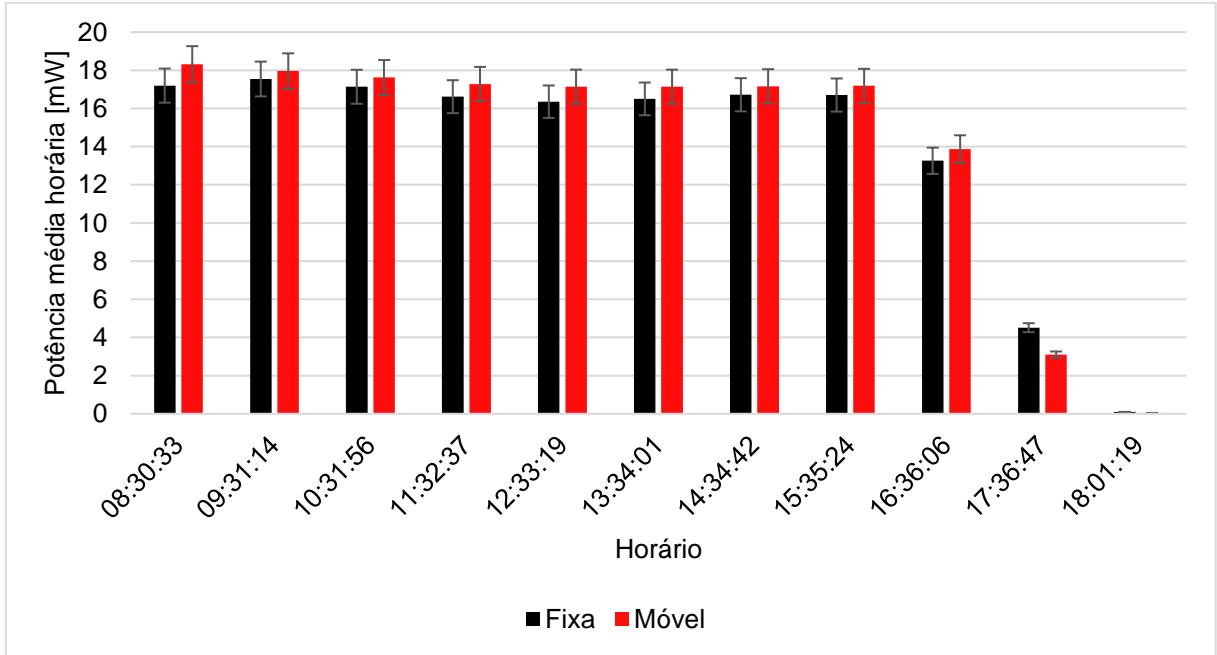
## APÊNDICE E – GRÁFICOS DA POTÊNCIA MÉDIA HORÁRIA

Figura E1 – Potência média horária [mW] x hora do dia 09/05/2024



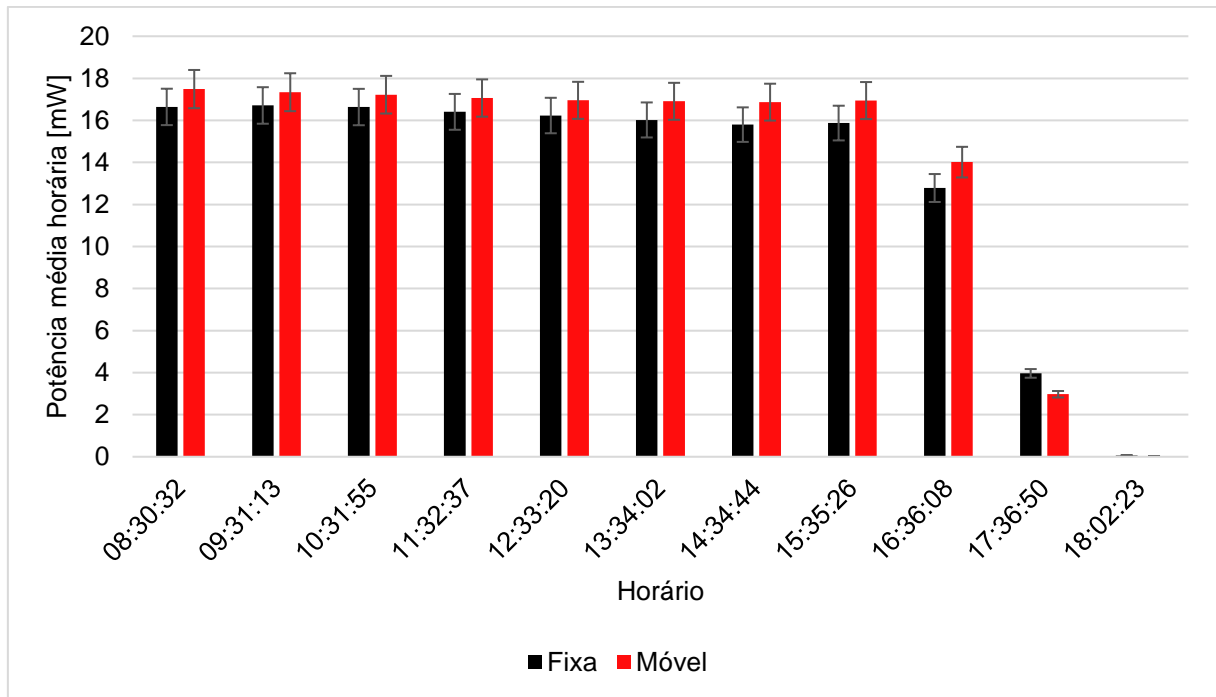
Fonte: Autor (2024).

Figura E2 – Potência média horária [mW] x hora do dia 10/05/2024



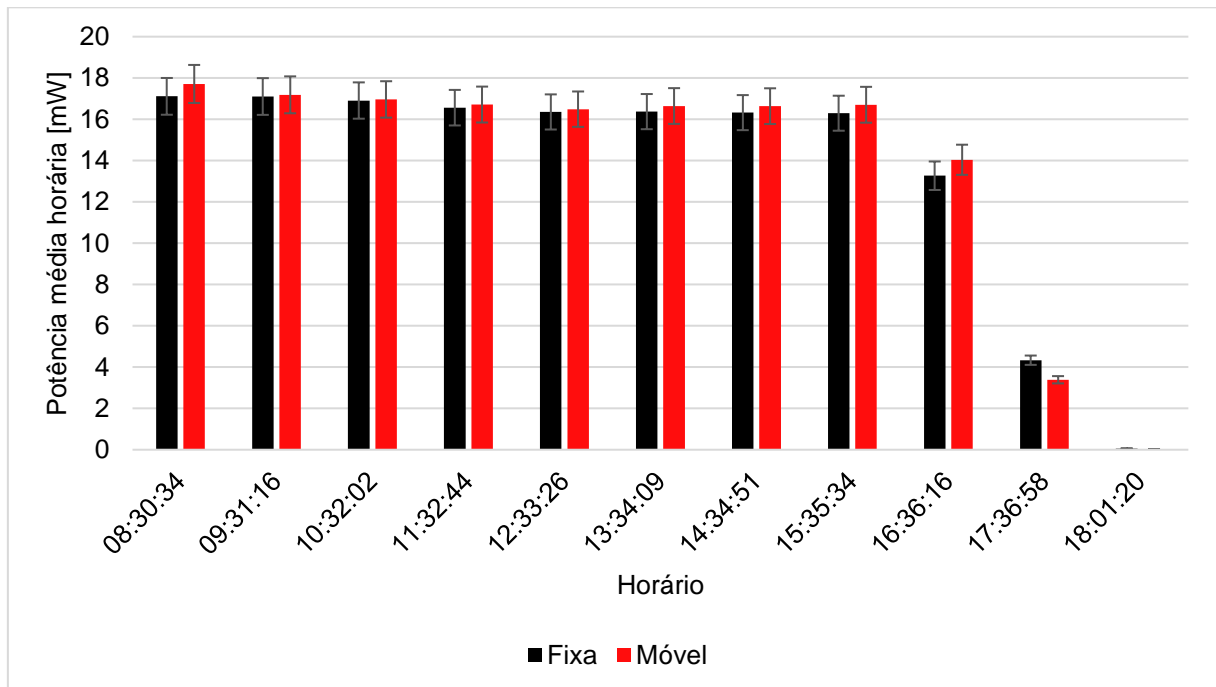
Fonte: Autor (2024).

Figura E3 – Potência média horária [mW] x hora do dia 13/05/2024



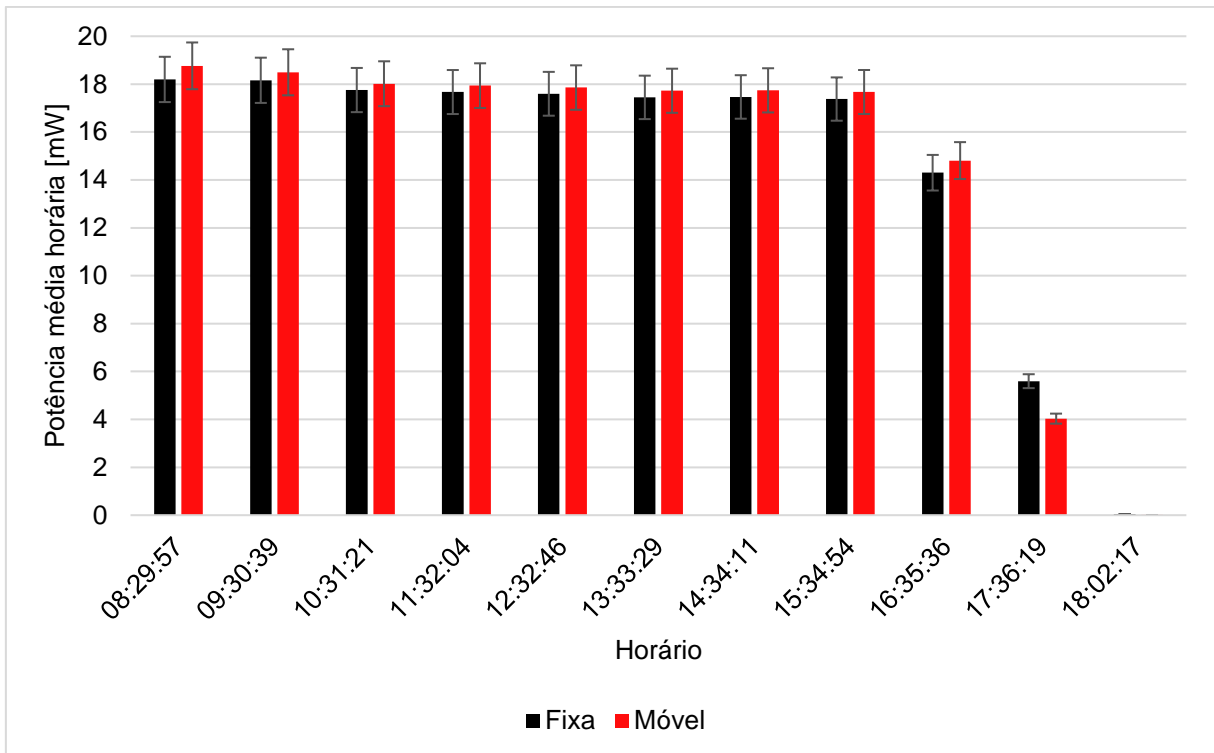
Fonte: Autor (2024).

Figura E4 – Potência média horária [mW] x hora do dia 14/05/2024



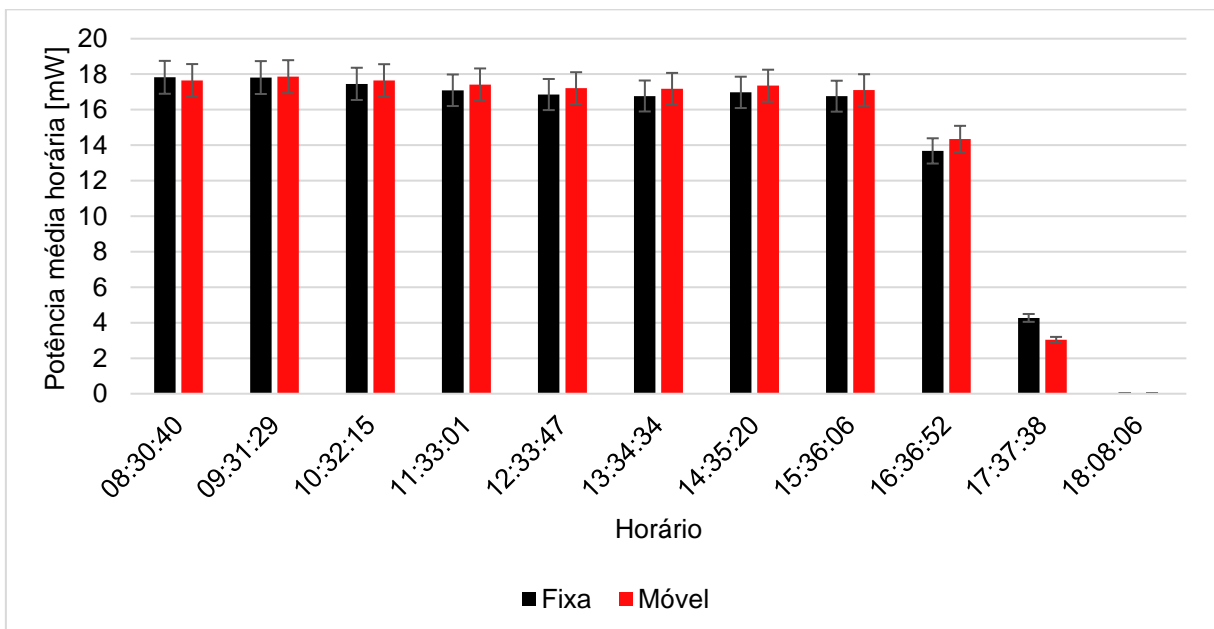
Fonte: Autor (2024).

Figura E5 – Potência média horária [mW] x hora do dia 16/05/2024



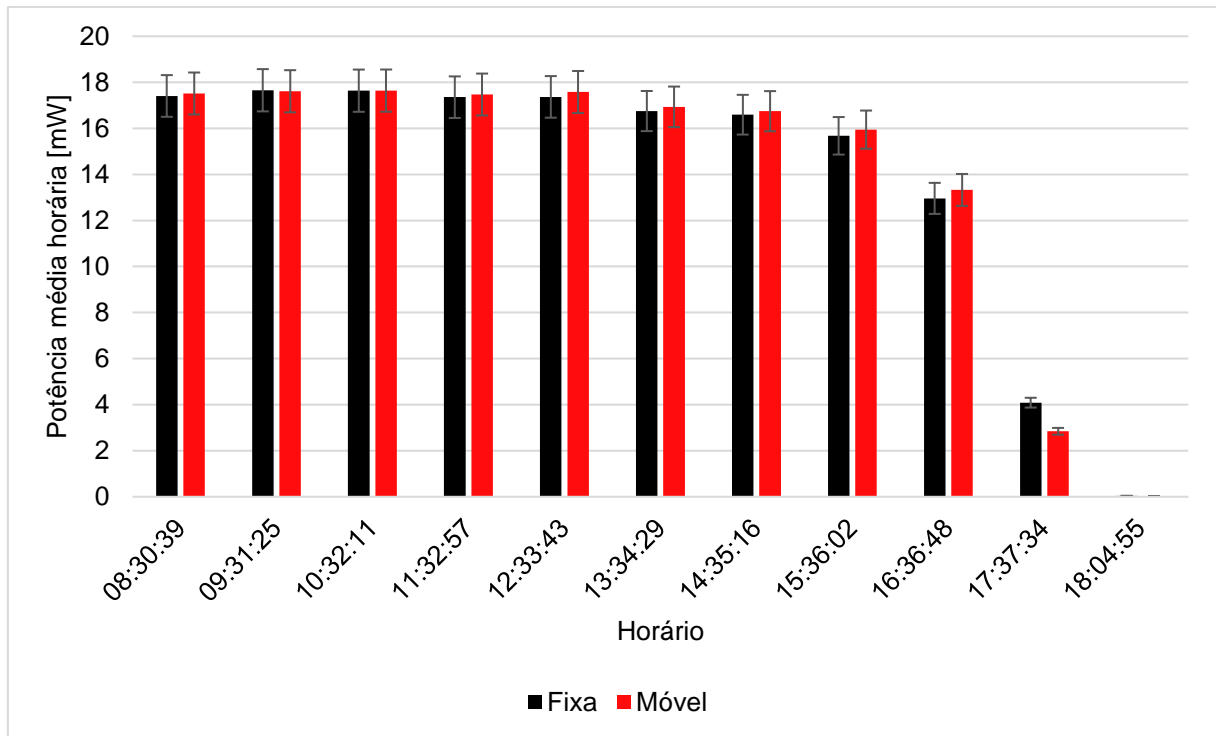
Fonte: Autor (2024).

Figura E6 – Potência média horária [mW] x hora do dia 20/05/2024



Fonte: Autor (2024).

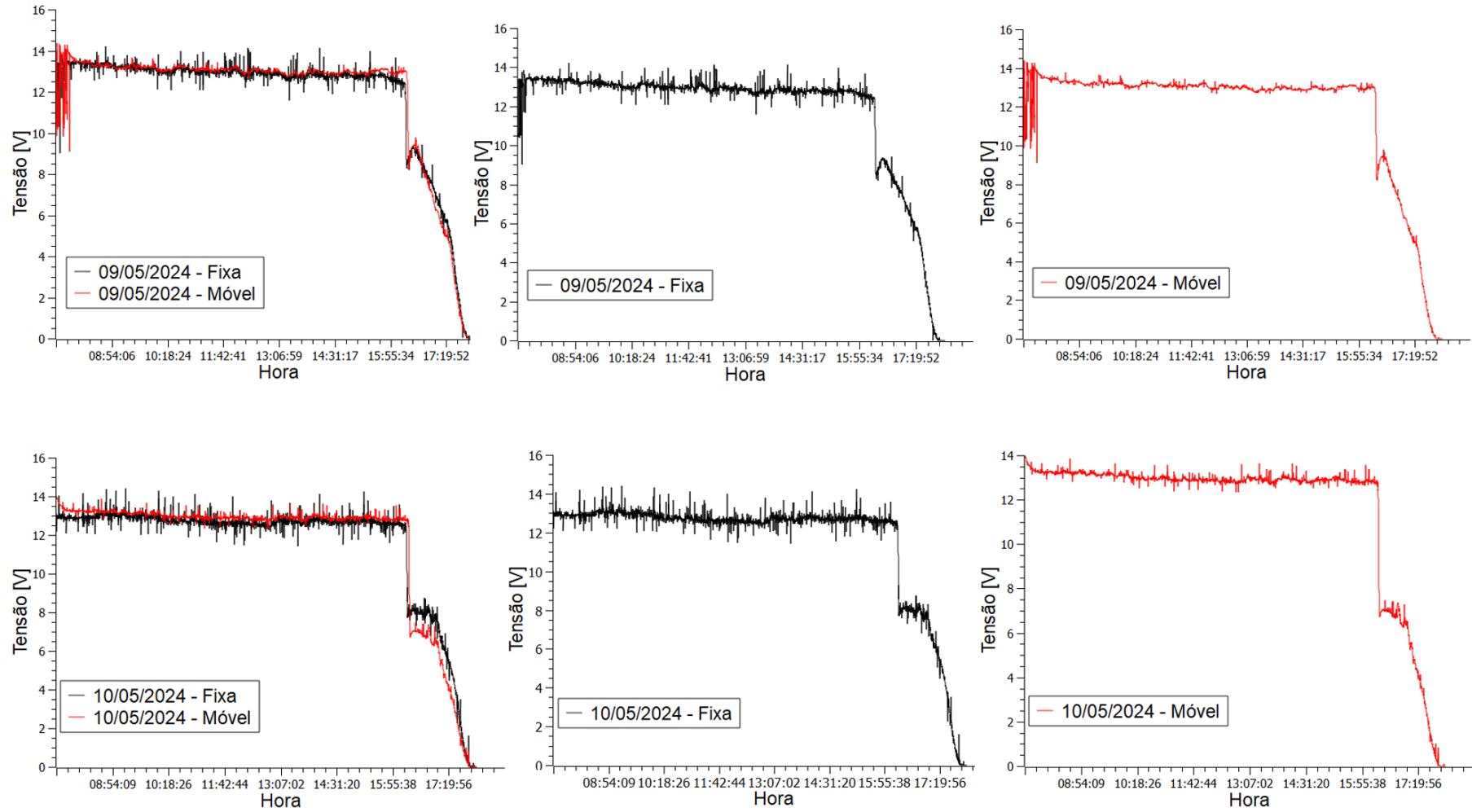
Figura E7 – Potência média horária [mW] x hora do dia 21/05/2024



Fonte: Autor (2024).

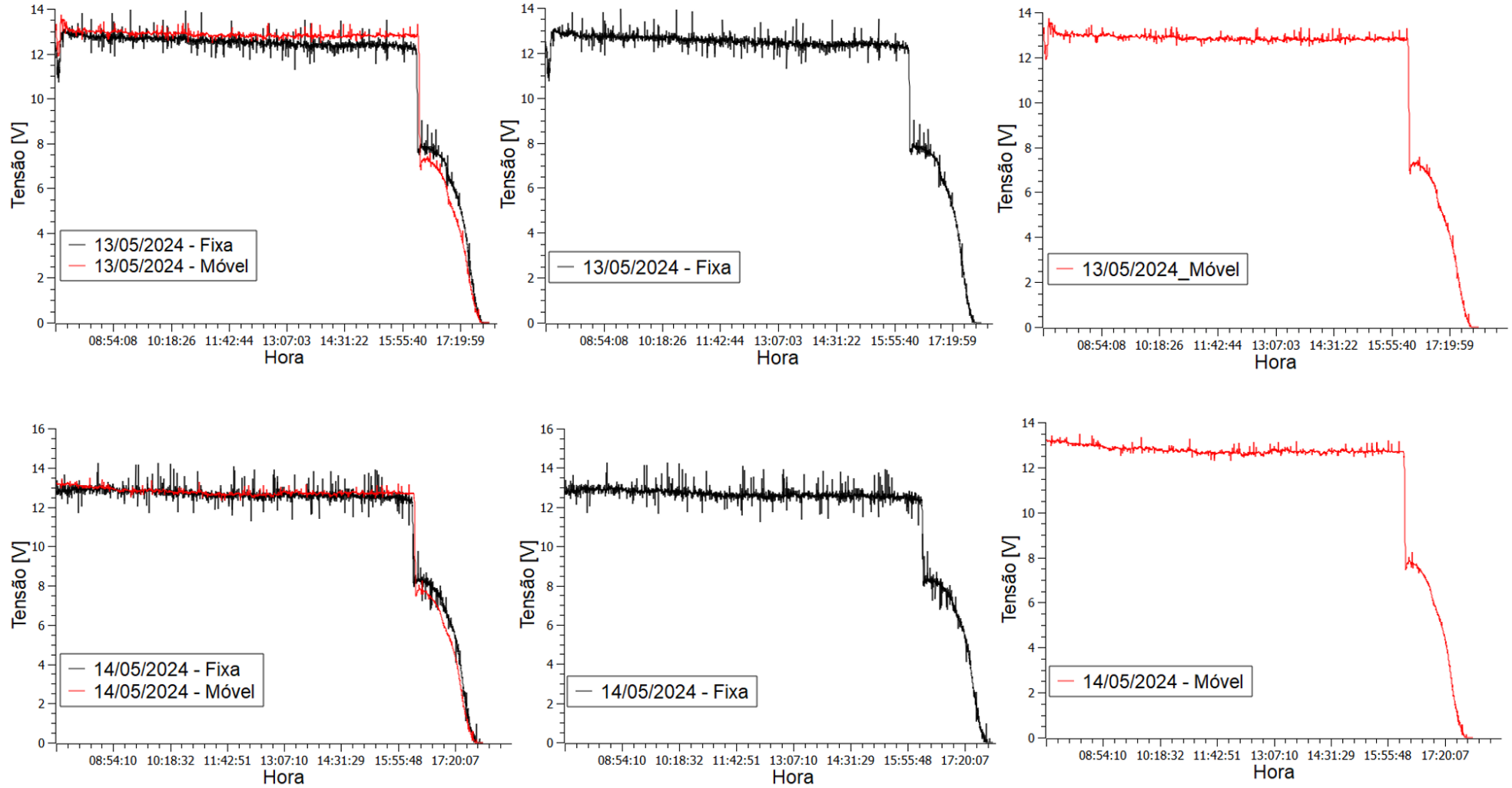
## APÊNDICE F – GRÁFICOS DA TENSÃO X HORA

Figura F1 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora dos dias 09 e 10 de maio de 2024



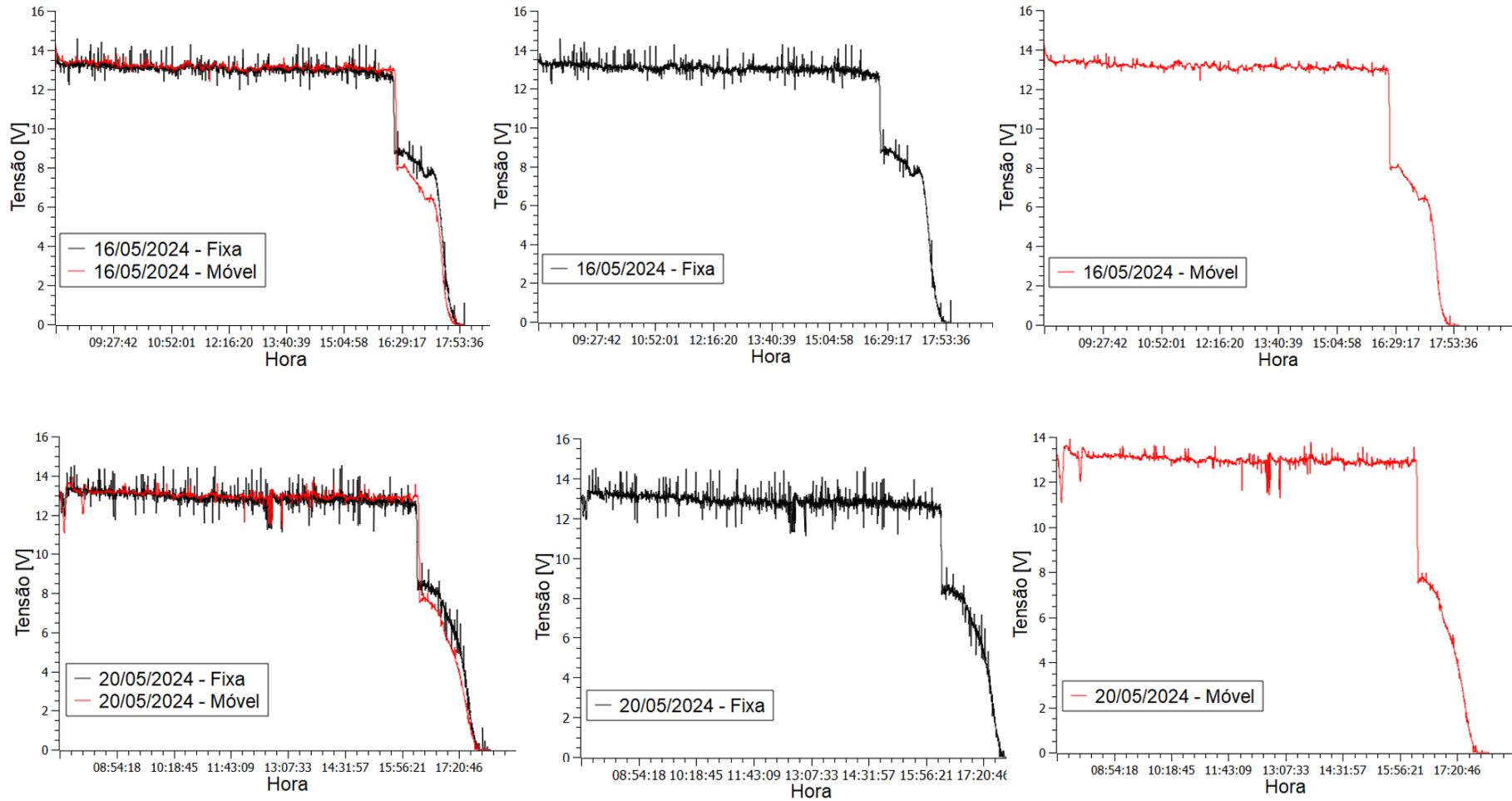
Fonte: Autor (2024).

Figura F2 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora dos dias 13 e 14 de maio de 2024



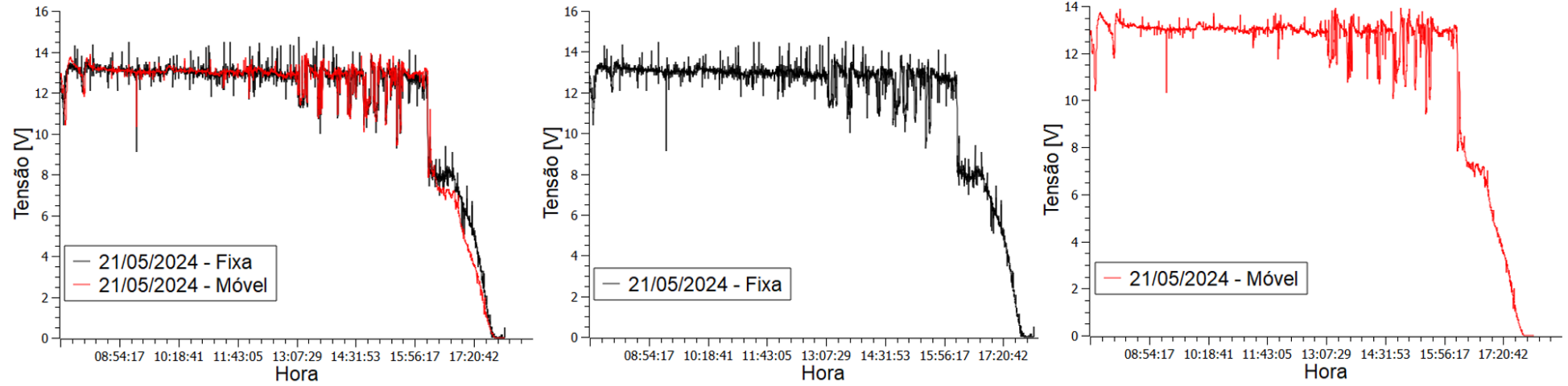
Fonte: Autor (2024).

Figura F3 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora dos dias 16 e 20 de maio de 2024



Fonte: Autor (2024).

Figura F4 – Plotagem dos gráficos de tensão [V] em relação a hora do dia 21 de maio de 2024



Fonte: Autor (2024).

## APÊNDICE G – QR CODE DOS ARQUIVOS CAD E OS CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO

Figura G1 – QR Code para o acesso aos arquivos CAD e os códigos de programação do protótipo



Fonte: Autor (2024).