

**UNIVERSIDADE REGIONAL DE BLUMENAU**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS**  
**CURSO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO – BACHARELADO**

**CONSTRUÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D DE BAIXO**

**CUSTO**

**JONAS FERNANDO SCHUH**

**BLUMENAU  
2024**

**JONAS FERNANDO SCHUH**

# **CONSTRUÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D DE BAIXO**

## **CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Sistemas de Informação do Centro de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Regional de Blumenau como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Prof. Miguel Alexandre Wisintainer, Mestre – Orientador  
Prof. Cesar Ricardo Câmara da Silva, Mestre – Supervisor/Mentor

**BLUMENAU**  
**2024**

Esta página deverá ser substituída pela folha  
de assinaturas entregue na Banca.

Digitalize a folha e cole aqui para a entrega da  
versão final do TCC.

Atenção: não ultrapasse as margens!

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta a construção de uma impressora 3D de baixo custo. O objetivo principal é a implementação da montagem da solução utilizando peças de baixo custo, com hardware e softwares de código aberto. A ideia inicial era fazer um gravador laser baseado em um protótipo de um roteador de Controle Numérico por Computador (CNC), porém por questões de segurança devido a emissão de raio laser, se optou por construir uma impressora 3D. O protótipo consiste em uma estrutura física de madeira reciclada, estrutura mecânica de baixo custo e hardware baseado nas placas Arduino Mega 2560 e Kit Ramps 1.4. A metodologia consistiu na referência bibliográfica e foi dividida entre parte mecânica, eletrônica e lógica, até o protótipo estar funcional. Grande parte do tempo do projeto foi utilizado para testes e ajustes finos no protótipo. Todas as etapas do processo foram amplamente documentadas de forma sequencial e detalhadas por meio de desenhos técnicos em três dimensões. Na seção de resultados, são expostos vários tipos e técnicas de impressão 3D com seus resultados comentados e evidenciados. Esse protótipo possui um diferencial do eixo Z possuir apenas um motor de passo para realizar o movimento que promove redução de custo, peso e complexidade. Por fim, os resultados obtidos por meio dos testes realizados demonstram que o trabalho desenvolvido atingiu seus objetivos.

Palavras-chave: Impressão 3D, CNC, Arduino, Ramps, Baixo Custo.

## **ABSTRACT**

This work presents the construction of a low-cost 3D printer. The main objective is to implement the assembly of the solution using low-cost parts, with open-source hardware and software. The initial idea was to make a laser engraver based on a prototype of a Computer Numerical Control (CNC) router, but for safety reasons due to laser beam emission, it was decided to build a 3D printer. The prototype consists of a physical structure made of recycled wood, a low-cost mechanical structure and hardware based on Arduino Mega 2560 boards and Ramps 1.4 Kit. The methodology consisted of bibliographical references and was divided into mechanical, electronic and logical parts, until the prototype was functional. Much of the project time was used for testing and fine-tuning the prototype. All stages of the process were extensively documented sequentially and detailed using three-dimensional technical drawings. In the results section, various types and techniques of 3D printing are exposed with their results commented and highlighted. This prototype has a Z axis differential and only one stepper motor to carry out the movement, which promotes cost, weight and complexity reduction. Finally, the results obtained through the tests carried out demonstrate that the work developed achieved its objectives.

Key-words: 3D Printing, CNC, Arduino, Ramps, Low Cost, RepRap.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes básicos de uma impressora 3D.....	15
Figura 2 - Roteador CNC antes de ser transformado em impressora 3D .....	23
Figura 3 - Detalhe de impressora laboratório FURB Campus 1 .....	24
Figura 4 - Impressora 3D FURB - Campus II .....	25
Figura 5 - Engenharia reversa do protótipo construído .....	27
Figura 6 - Esquema elétrico dos componentes da Impressora 3D.....	28
Figura 7 - Compra de peças.....	29
Figura 8 - Vista traseira do projeto da impressora 3D.....	30
Figura 9 - Montagem da base .....	32
Figura 10 - Montagem das torres superiores .....	33
Figura 11 - Parte frontal da montagem das torres superiores .....	33
Figura 12 - Parte traseira da montagem das torres superiores .....	34
Figura 13 - Base do eixo X em MDF - Frente.....	34
Figura 14 - Parte traseira do eixo X.....	35
Figura 15 - Instalação de corrediças eixos X e Y .....	35
Figura 16 - Instalação motor e roldanas GT eixos X e Y .....	36
Figura 17 - Colunas laterais das corrediças do eixo Y .....	37
Figura 18 - Base e fixação da mesa aquecida do eixo Y .....	38
Figura 19 - Instalação física da mesa aquecida .....	39
Figura 20 - Eixo Z – Visão lateral detalhada.....	40
Figura 21 - Eixo Z – Visão lateral montado .....	41
Figura 22 - Eixo Z – Visão traseira .....	42
Figura 23 - Eixo Z – Extrusora detalhada .....	43
Figura 24 - Eixo Z montado no eixo X.....	43
Figura 25 - Fonte de alimentação .....	44
Figura 26 - Placa Arduino Mega .....	44
Figura 27 - Placa Ramps.....	45
Figura 28 - Placa Ramps detalhe .....	45
Figura 29 – Visor de LCD .....	46
Figura 30 - Fim de curso e correia GT .....	46
Figura 31 - Fim de curso eixo Z .....	47

Figura 32 - Alimentador de filamento .....	48
Figura 33 - Suporte do rolo de filamento .....	48
Figura 34 - Esquema elétrico.....	49
Figura 35 - Arquivos do firmware Marlin.....	50
Figura 36 - Arquivo do projeto Marlin.....	51
Figura 37 - Criação de tela de inicialização do visor LCD .....	55
Figura 38 - Compilação do Firmware Marlin.....	56
Figura 39 - Carregamento do firmware no Arduino.....	56
Figura 40 - Tela de inicialização no visor de LCD .....	57
Figura 41 - Montagem da fonte de alimentação .....	57
Figura 42 - Montagem dos controladores de motores de passo .....	58
Figura 43 - Configuração valor de referência no controlador .....	58
Figura 44 - Resolução de Micro passo driver A4988.....	60
Figura 45 - Montagem da mesa aquecida – parte frontal .....	61
Figura 46 - Montagem da mesa aquecida – parte traseira .....	61
Figura 47 - Instalação do módulo de potência.....	62
Figura 48 - Detalhe do módulo de potência .....	62
Figura 49 - Sensor de fim de curso eixo Y .....	63
Figura 50 - Sensor de fim de curso eixo X .....	64
Figura 51 - Sensor de fim de curso eixo Z .....	64
Figura 52 - BLTouch .....	65
Figura 53 - Finalização da montagem física da impressora .....	66
Figura 54 - Calibração do motor do eixo Z .....	67
Figura 55 - Calibração de avanço do eixo Z.....	67
Figura 56 - Calibração avanço extrusora.....	69
Figura 57 - Teste aquecimento da mesa .....	70
Figura 58 – Nivelamento da mesa aquecida.....	71
Figura 59 - Configuração de ligação da impressora no Repetier .....	72
Figura 60 - Configuração da impressora no Repetier .....	73
Figura 61 - Configuração da extrusora no Repetier .....	74
Figura 62 - Configuração da forma da impressora no Repetier .....	75
Figura 63 - Modelo de impressão do cubo de calibração .....	76
Figura 64 - Tela principal do software fatiador.....	77
Figura 65 - Estatísticas de impressão 3D no Repetier .....	77

Figura 66 - Exemplo do GCode gerado pelo fatiador .....	78
Figura 67 - Tela de impressão .....	79
Figura 68 - Primeira impressão com sucesso .....	79
Figura 69 - Primeiro cubo de calibração gerado.....	80
Figura 70 - Cubo gerado após ajustes.....	81
Figura 71 - Primeiro objeto orgânico impresso .....	82
Figura 72 - Configuração específica de fatiamento.....	83
Figura 73 - Perfis de configuração específica do fatiamento .....	83
Figura 74 - Configuração específica de filamento.....	84
Figura 75 - Configuração específica de fatiamento - Velocidade .....	85
Figura 76 - Configuração específica de fatiamento - Qualidade .....	85
Figura 77 - Configuração da extrusora .....	86
Figura 78 - Configuração específica de fatiamento – Saia e Aba .....	87
Figura 79 - Configuração específica de fatiamento - Extrusão .....	87
Figura 80 - Exemplo do fenômeno de retração e de saia.....	88
Figura 81 - Impressão de peça orgânica grande .....	89
Figura 82 - Evidência da impressão de peça orgânica grande.....	89
Figura 83 - Impressão de objetos em baixo relevo.....	90
Figura 84 - Evidência de pintura de objeto com PLA .....	90
Figura 85 - Cubo de calibração em ABS.....	91
Figura 86 - Evidência cubo de calibração em ABS.....	92
Figura 87 - Peça grande em ABS com fixação de fita Kapton.....	93
Figura 88 - Evidência de teste de peça grande em ABS.....	94
Figura 89 - Peça grande em ABS com suporte.....	94
Figura 90 - Evidência de peça grande em ABS com suporte .....	95
Figura 91 - Evidência 3D Benchy .....	95
Figura 92 - Peça alta em ABS .....	96
Figura 93 - Peça grande em ABS finalizada.....	97
Figura 94 - Finalização dos testes.....	98
Figura 95 - Placas feitas em ABS com modelo 3D .....	99
Figura 96 - Placas feitas em PLA com modelo 3D próprio.....	100
Figura 97 - Placa grande em PLA com modelo 3D.....	100
Figura 98 - Evidência da placa grande gerada.....	101
Figura 99 - Evidência da placa grande padrão com conexões.....	102

Figura 100 - Protótipo de conexão entre cantos .....	102
Figura 101 - Evidência de impressão do protótipo de conexão.....	103
Figura 102 - Evidência do teste de conexão entre placas .....	103
Figura 103 - Evidência de solda nas trilhas da mesa aquecida.....	107

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Síntese dos trabalhos correlatos selecionados.....	17
Quadro 2 - Lista de compras de peças.....	31
Quadro 3 - Configuração dos parâmetros do Firmware Marlin - configuration.h .....	51
Quadro 4 - Configuração do parâmetro do Firmware Marlin – configuration_adv.h .....	55
Quadro 5 - Comparativo deste trabalho com os correlatos .....	110

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

A – Ampere – Unidade de corrente elétrica

ABS – Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno

BPS – Baud Rate per Second

CNC – Controle Numérico por Computador

DIY – Do It Yourself

EEPROM – Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory

FFF – Fabricação de Filamentos Fundidos

IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado

LCD – Liquid Crystal Display

LED – Light-Emitting Diode

MDF – Medium Density Fiberboard

MM – Milímetros

PET – Polietileno tereftalato

PID – Proporcional, Integral e Derivativo

PLA – Poly Lactic Acid

RF – Requisito Funcional

RNF – Requisito Não Funcional

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

USB – Universal Serial Bus

V – Volts

VREF – Voltage Reference

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.2 ESTRUTURA.....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1.1 Impressão 3D .....	15
2.1.2 Marlin Firmware .....	16
2.2 CORRELATOS.....	17
2.2.1 A Filosofia DIY: reaproveitamento de sucata eletrônica para a construção de impressora 3D de baixo custo.....	18
2.2.2 Desenvolvimento de impressora 3D de baixo custo para prototipagem de peças para o meio rural .....	19
2.2.3 Construção de uma impressora 3D de baixo custo com materiais alternativos .....	20
<b>3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.....</b>	<b>22</b>
3.1 REQUISITOS.....	22
3.2 ESPECIFICAÇÃO E DESENHO TÉCNICO.....	22
3.2.1 Concepção da impressora.....	22
3.2.2 Protótipo de roteador CNC em 2D.....	23
3.2.3 Impressora 3D Laboratório de Informática FURB Campus I.....	24
3.2.4 Impressora 3D Laboratório de Engenharia Elétrica - FURB Campus II .....	25
3.2.5 Engenharia reversa do protótipo construído .....	26
3.2.6 Esquema elétrico dos componentes da Impressora 3D .....	27
3.3 IMPLEMENTAÇÃO .....	28
3.3.1 Construção do hardware do protótipo .....	29
3.3.2 Técnicas e ferramentas utilizadas.....	49
3.3.3 Instalação e configuração do firmware .....	50
3.3.4 Configuração da fonte de alimentação e controladores dos motores de passo .....	57
3.3.5 Configuração da mesa aquecida.....	60
3.3.6 Configuração dos sensores de fim de curso .....	63
3.3.7 Calibração do eixo Z .....	67
3.3.8 Calibração da extrusora e eixos X, Y e Z.....	68

3.3.9	Calibração do aquecimento da extrusora e mesa aquecida .....	69
3.3.10	Nivelamento da base da mesa aquecida.....	70
3.3.11	Configuração do software fatiador.....	72
3.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	75
3.4.1	Testes e análise dos resultados.....	76
3.4.2	Operacionalidade da implementação .....	98
3.4.3	Principais problemas e soluções.....	104
3.4.4	Comparação com trabalhos correlatos .....	109
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>112</b>
4.1	EXTENSÕES .....	114
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>115</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de criar objetos em 3D, por meio de uma impressora, é uma inovação revolucionária, pois viabiliza a forma de transformar a maneira de produzir objetos, desde pequenos utensílios domésticos, até grandes componentes industriais (Silva; Silva, 2023). No entanto, Silva e Silva (2023) comentam que apesar desse potencial, um dos principais obstáculos que impedem a adoção em larga escala da impressão 3D é o seu alto custo.

Diante desta premissa, com o crescimento e utilização dessa tecnologia, assim como Celerino *et al.* (2022) descrevem em sua obra, se cria o desafio de construir uma impressora 3D, com peças recicláveis de dispositivos usados e kits eletrônicos que são facilmente encontrados no comércio, sendo possível citar as placas *RepRap* e *Arduino*, que utilizam códigos que são desenvolvidos e disponibilizados por colaboradores de todo o mundo.

A sigla do inglês *Do It Yourself* (DIY), que de forma traduzida se entende como faça você mesmo, está em destaque nas mídias e em sites de grande visibilidade, como YouTube, Instagram e Google. Essa disseminação de conhecimento tem estimulado muitos a aprender e montar sua própria impressora 3D por meio desse cenário colaborativo (Celerino *et al.* 2022).

O ano de 2005 foi provavelmente o ano mais importante na história da impressão 3D moderna, devido ao fato de ser o ano da criação do projeto *RepRap*, por Adrian Bowyer na Universidade de Bath, Inglaterra (Prusa; Stritesky; Bach, 2020). Desde seu início, foi criado para ser de código aberto, que se entende que toda codificação está disponível de forma pública. Graças ao *RepRap* é possível criar impressoras 3D de baixo custo (Prusa; Stritesky; Bach, 2020).

Nesse sentido, esta pesquisa surge com propósito de desenvolver um protótipo de uma impressora 3D de baixo custo. A proposta da construção consiste na utilização de sucata, materiais recicláveis e de kits eletrônicos, além de componentes de marcenaria com objetivo de reduzir o custo. Essa impressora poderá ser utilizada para reproduzir itens, com fim de auxiliar nos estudos de uma maneira mais didática, além de estimular a criatividade.

Diante do cenário exposto, este trabalho visa desenvolver um protótipo de uma impressora 3D que utilize os principais conceitos aqui descritos, como utilização de materiais recicláveis e de baixo custo. Essa solução é uma impressora 3D com estrutura de madeira, corrediças, motores reciclados que é capaz de transformar modelos 3D em peças físicas.

### 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é a montagem de uma impressora 3D com materiais de baixo custo, utilizando o microcontrolador *Arduino*, Kit Ramps e torná-la funcional.

Os objetivos específicos são:

- a) montagem da parte mecânica e da parte eletrônica tornando a impressora funcional;
- b) avaliar se a impressora atinge uma precisão aceitável. Se pretende imprimir um cubo de calibração de 20 milímetros para medir a precisão do equipamento.

## 1.2 ESTRUTURA

Esse trabalho está dividido em quatro capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução e os objetivos do trabalho. O segundo capítulo trata da fundamentação teórica, explicando os principais conceitos e técnicas utilizadas no trabalho. O terceiro capítulo contempla o desenvolvimento do protótipo, onde são descritos a arquitetura do trabalho, por meio de desenhos técnicos, detalhamento da implementação e os resultados obtidos. Por fim, o quarto capítulo apresenta as conclusões, assim como sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo está organizado em duas seções. A seção 2.1 comenta sobre a revisão bibliográfica e a seção 2.2 apresenta os trabalhos correlatos.

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

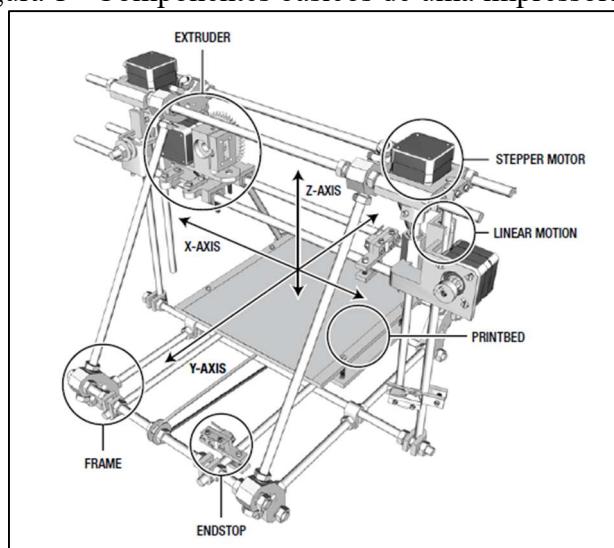
Nessa seção serão apresentados os tópicos da revisão bibliográfica. O critério de seleção se deu pelos assuntos que compõem o título desse projeto “Impressora 3D de baixo custo”. Na subseção 2.1.1, optou-se por contextualizar o conceito da impressão 3D e por fim, na subseção 2.1.2 se optou pela contextualização do firmware *Marlin* que irá gerenciar a fonte de dados.

#### 2.1.1 Impressão 3D

Entende-se por impressão 3D, conforme Prusa, Stritesky e Bach (2020) descrevem em sua obra, como uma sequência de processos automatizados de fabricação que ocorre de forma aditiva, ou seja, em camadas sequenciais, que geram um modelo físico baseado em um objeto digital no formato de três dimensões. Atualmente existem várias tecnologias para esse tipo de impressão e a Fabricação de Filamentos Fundidos (FFF) se destaca como a mais simples. Consiste em um objeto criado por camadas sequenciais, compostas pelo derretimento controlado de um fio plástico (Prusa; Stritesky; Bach, 2020).

Existem vários modelos de impressoras 3D, porém todas compartilham semelhanças na estrutura básica dos componentes, conforme Evans (2012) exibe em sua obra, conforme Figura 1 - Componentes básicos de uma impressora 3D, dos principais componentes, como eixos X, Y, Z, extrusora, cama quente de impressão e controles de fim de curso.

Figura 1 - Componentes básicos de uma impressora 3D



Fonte: Evans (2012).

Por tradução do autor, conforme é ilustrado na Figura 1 - Componentes básicos de uma impressora 3D, o eixo de movimentação X responsável pela largura, eixo Z, responsável pela altura e o eixo Y, responsável pela profundidade. *EndStop*, do inglês, na tradução livre, se entende como os controles de fim de curso e *Printbed*, também do idioma inglês, se entende como cama de impressão ou cama aquecida.

As impressoras 3D estão disponíveis há anos, porém só recentemente estão disponíveis na faixa de poder aquisitivo da maioria de usuários domésticos. Horne e Hausman, (2017) comentam em sua obra que essa tecnologia tem potencial para causar um impacto significativo para os consumidores médios, em virtude que irá viabilizar muitas inovações, por meio de criação de uma gama muito ampla de materiais em suas diversas combinações e formatos.

### 2.1.2 Marlin Firmware

Celerino *et al.* (2022) afirmam que firmware é um software de baixo nível que tem por objetivo se comunicar diretamente com o hardware. Entre outros firmwares disponíveis no mercado, se pode citar o firmware *Marlin*, que atua em microcontroladores ATMega2560 e são largamente utilizados em impressoras 3D (Celerino *et al.* 2022).

O firmware *Marlin* é um projeto de código aberto, hospedado no GitHub, de propriedade e mantido pela comunidade Maker, criado em 2011 para *RepRap* (Zalm *et al.* 2011). Entre suas características, se pode destacar excelente qualidade de impressão e diversas configurações para todos os componentes de uma impressora 3D. Zucca e Machado (2019) comentam em sua obra que para que ele funcione na impressora construída, torna-se obrigatório o ajuste dos parâmetros e configurações de acordo com as características particulares de cada projeto. Se pode citar como configuração as medidas de altura, largura, profundidade, sensores presentes, tipo de placa utilizada, calibração das distâncias percorridas em milímetros, número de revoluções nos motores de acordo com a espessura das engrenagens. Além da calibração esse software auxilia a verificar as temperaturas e dimensionamento do objeto na *hotbed*, que de forma traduzida do inglês se entende como cama quente (Zucca e Machado, 2019).

Silva *et al.* (2023) destacam em sua obra que o *Marlin* também realiza a interpretação dos comandos G-Code, uma linguagem de programação que controla a direção dos movimentos precisos da impressora 3D, resultando na conversão dos sinais de controle para os motores, aquecedores e outros componentes da impressora.

## 2.2 CORRELATOS

Nesta subseção serão apresentados os trabalhos listados no Quadro 1. Se realizou pesquisa em vários sites, entre eles o Google, Portal de Periódicos da CAPES, Google Acadêmico e no portal de pesquisas de TCC do Departamento de Sistemas e Computação da FURB.

A fonte de dados selecionada para a pesquisa de trabalhos correlatos ao proposto e suas respectivas fontes bibliográficas foi o site Google Acadêmico, com o filtro “Desde 2019”, palavras-chave “impressora 3D baixo custo”, em que a ferramenta retornou aproximadamente 5.770 resultados. Também foi realizado consulta no Portal de Periódicos da CAPES, ao qual retornou apenas 15 recursos online, porém não foi encontrado nenhum registro relevante ao trabalho proposto.

Foram selecionados seis trabalhos correlatos, pelo motivo de haver afinidade com o projeto e após um refinamento, foram eleitos três trabalhos mais relevantes que apresentam características mais semelhantes ao trabalho proposto. O primeiro trabalho selecionado é “A Filosofia DIY: reaproveitamento de sucata eletrônica para a construção de impressora 3D de baixo custo”, (*Level et al. 2022*). O segundo trabalho selecionado foi o “Desenvolvimento de impressora 3D de baixo custo para prototipagem de peças para o meio rural” de (*Zucca; Machado, 2019*) e por fim “Construção de uma impressora 3D de baixo custo com materiais alternativos”, desenvolvido por (*Batista, 2021*).

Quadro 1 - Síntese dos trabalhos correlatos selecionados

Assunto	Filtro	Referência
A Filosofia DIY: reaproveitamento de sucata eletrônica para a construção de impressora 3D de baixo custo	impressora 3D baixo custo	<i>Level et al. (2022)</i>
Desenvolvimento de impressora 3D de baixo custo para prototipagem de peças para o meio rural	impressora 3D baixo custo	<i>Zucca e Machado (2019)</i>
Construção de uma impressora 3D de baixo custo com materiais alternativos	impressora 3D baixo custo	<i>Batista (2021)</i>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Ao considerar as premissas descritas, foram selecionadas as bases teóricas relevantes ao assunto, para resolver o problema proposto. Entre os trabalhos correlatos selecionados, todos possuem em comum o fato que as impressoras foram montadas pelos alunos, porém cada um com sua particularidade e com diferentes técnicas e modelos, diferentes ao projeto proposto. Além disso, os três trabalhos correlatos, tiveram por objetivo a redução de custos e reutilização de peças de descarte.

Os critérios de seleção e refinamento utilizados para a seleção dos trabalhos correlatos a este projeto, foram na obra de Level *et al.* (2022), a questão que a impressora 3D foi construída de peças reutilizadas de lixo eletrônico, com a ideia de reaproveitar peças usadas, transformar novamente em algo útil. O trabalho de Zucca e Machado (2019), foi selecionado pelo motivo que esse projeto não foi financiado e que foram utilizados variados métodos para redução de gastos ao máximo. Também se pode citar que foi utilizado o Arduino Mega 2560, o mesmo que será utilizado nesse trabalho, além possuir as demais características, entre elas, conotação pedagógica, abordagem de dificuldades enfrentadas durante a realização do projeto, como problemas mecânicos e de aquecimento dos componentes eletrônicos. Por fim, o terceiro trabalho selecionado foi o de Batista (2021), que também focou na utilização de materiais alternativos de baixo custo ou de descarte e tem um foco na utilização de firmwares e softwares livres disponibilizados de forma gratuita.

### 2.2.1 A Filosofia DIY: reaproveitamento de sucata eletrônica para a construção de impressora 3D de baixo custo

Desenvolvido por Level *et al.* (2022), o artigo apresenta a criação de uma impressora 3D visando o reaproveitamento de lixo eletrônico, promovendo a sustentabilidade, reutilização e a questão da filosofia *Do It Yourself* (DIY), que de forma traduzida do idioma inglês, se entende como faça você mesmo.

A estrutura física do protótipo foi construída com sobras de madeira MDF, porcas, parafusos e arruelas. Na parte mecânica, foram utilizados eixos lisos e roscados, unidade extrusora, motores de passo NEMA17 e sua parte eletrônica composta por unidade controladora baseada na placa Arduino, com controladores de potência com regulagem de tensão e corrente para cada motor, painel de LCD com objetivo de exibir informações do processo e temperatura. (Level *et al.* 2022).

O software utilizado para o funcionamento do protótipo foi a biblioteca GRBL Master, através da plataforma Arduino UNO. Level *et al.* (2022) comenta que por meio desta biblioteca, foi possível utilizar o software de código aberto GRBL para controlar os eixos X, Y e Z, porém os três motores estavam com defeito e tiveram que ser substituídos por motores novos, adquiridos em um total de R\$ 223,90 entre produto e frete. A extrusora também precisou ser comprada no valor de R\$ 180,00, totalizando um custo de R\$ 403,90.

Após o protótipo estar operacional, Level *et al.* (2022) expõem os resultados obtidos no experimento, onde foi realizada uma comparação de desempenho entre o protótipo desenvolvido pelos autores em relação a uma impressora comercial. Nesse experimento foram

analisados os seguintes parâmetros: resolução, tempo de impressão, preenchimentos (%), erros e desperdício de material impresso (%). Os resultados obtidos de forma geral demonstraram o potencial de produção de uma impressora de alta tecnologia com material de sucata, evidenciando que é possível sim fazer do reaproveitamento uma alternativa real para que equipamentos antigos possam ter a sua utilidade recriada. (Level *et al.* 2022).

Level *et al.* (2022) concluíram que todos os objetivos de seu trabalho foram atingidos. Os resultados obtidos demonstraram ser possível criar uma impressora 3D com orçamento reduzido e resultados satisfatórios. Também enfatizam o uso de práticas sustentáveis que buscaram contribuir com o desenvolvimento socioeconômico e preservação ambiental.

## 2.2.2 Desenvolvimento de impressora 3D de baixo custo para prototipagem de peças para o meio rural

Zucca e Machado (2019) desenvolveram uma impressora 3D de baixo custo com objetivo de propor sua utilização no desenvolvimento de peças, ferramentas ou protótipos no meio agrícola. Os objetivos específicos da obra consistem na montagem de uma impressora 3D com baixo custo apta a imprimir um número variado de objetos, a comparação da qualidade de impressão com peças impressas por impressora similar comercializada no mercado, além da avaliação do custo de montagem e de peças importadas em relação a impressoras comercializadas no Brasil (Zucca; Machado, 2019).

O protótipo desenvolvido na obra, utilizou placas Arduino Mega 2560 e Ramps (RepRap Contributors, 2024) versão 1.4, kit extrusora e placa aquecida compradas. Os motores dos eixos X e Y foram reutilizados de impressoras de texto antigas e seu conjunto de guias lineares e correias. A montagem foi realizada em três partes, sendo a primeira a parte estrutural e mecânica, posteriormente a parte elétrica e por fim se realizou a instalação dos softwares e firmware utilizados na impressora 3D (Zucca; Machado, 2019).

Durante os testes, Zucca e Machado (2019) realizaram a comparação de uma peça impressa pela impressora construída com o resultado de uma peça impressa por uma impressora *Prusa* i3 já testada e certificada e concluíram que os resultados foram idênticos, ou seja, uma impressora 3D de baixo custo se mostrou como alternativa de qualidade em relação a impressoras comerciais com valor mais elevado. Também para demonstrar a aplicação da impressora fabricada no meio rural, foram impressas várias engrenagens de tamanho ajustável para serem utilizados em galpões de aves, além de suportes para hortas. O custo total do projeto ficou estimado em R\$ 1126,10. Também concluíram que se os componentes fossem comprados

diretamente na China, o valor ficaria estimado em R\$ 586,29, ou seja, o projeto cairia praticamente pela metade do preço.

Zucca e Machado (2019) alcançaram todos os objetivos em sua obra. Concluíram que é possível construir uma impressora 3D *RepRap* para uso no meio rural de baixo custo. Também afirmam que a tecnologia 3D *RepRap* possibilitou a redução no custo de praticamente metade do valor que seria investido na aquisição de uma impressora 3D comercializada no mercado nacional. Em estudos futuros, recomendam realizar testes de resistência das peças produzidas pela impressora 3D de baixo custo, com objetivo de simular esforços reais que ocorrem durante o processo produtivo ao repor peças quebradas por peças produzidas utilizando a impressão 3D.

### 2.2.3 Construção de uma impressora 3D de baixo custo com materiais alternativos

Batista (2021) desenvolveu uma impressora 3D de baixo custo e utilizou em grande parte materiais provenientes de descarte e lixo eletrônico. Na parte estrutural foram utilizadas peças retiradas de impressoras matriciais antigas e de outros equipamentos obsoletos, como tubos plásticos, cantoneiras de alumínio, sobras de MDF, barras roscadas, parafusos e abraçadeiras. Na parte elétrica se reutilizou uma fonte chaveada, motores de passo retirados de impressoras fora de uso e alguns componentes eletrônicos. As demais peças utilizadas na montagem foram adquiridas por meio de um kit eletrônico, contendo as placas Arduino UNO e CNC Shield e um bico extrusor.

O firmware utilizado nesse experimento foi o *Teacup* que é gratuito e de código aberto. Batista (2021), afirma também que embora o *Teacup* seja muito útil por ser simples, está sendo substituído com vantagens pelo framework *Marlin*, porém o *Marlin* não é compatível com o Arduino UNO, o que justificou a escolha do *Teacup*.

Batista (2021) conclui em seu trabalho que a construção de uma impressora 3D envolve várias áreas de conhecimento, entre elas, montagem estrutural, elétrica e uso de softwares computacionais. Por isso requer uma pesquisa organizada, disciplina e paciência na obtenção desses conhecimentos para atingir o resultado esperado. Também comenta que durante a montagem e utilização da impressora proposta ocorreram várias dificuldades. Uma delas foi o excesso de folga entre as buchas plásticas e guias lineares, o que dificultou a precisão necessária, percebida já nas primeiras impressões.

Outro problema percebido, segundo Batista (2021) que afetou a precisão dos eixos X e Y foi a folga existente entre a porca, que desempenhava a função de castanha e barra roscada. A resolução dessa situação ocorreu com fixação dos motores através de adaptação com cola quente. Batista (2021) também enfatiza que percebeu que não existe um controle apurado para

a velocidade de entrada no filamento da extrusora. Também mencionou que a não utilização da mesa aquecida, denotou no descolamento de várias peças da mesa, resultado em perda de tempo e do material utilizado.

Batista (2021) também comenta que não foram utilizados sensores de fim de curso nesse protótipo, com objetivo de simplificação do projeto. Por fim, foi concluído que apesar das limitações propositais impostas o dispositivo se mostrou funcional e útil (Batista, 2021).

### 3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Este capítulo demonstra as etapas do desenvolvimento do protótipo. Na seção 3.1 são apresentados os principais requisitos. A seção 3.2 apresenta a especificação e desenho técnico. A seção 3.3 descreve de forma detalhada a implementação. Por fim, a seção 3.4 demonstra os resultados dos testes, sugestões e melhorias do protótipo.

#### 3.1 REQUISITOS

O protótipo deverá:

- a) permitir ao usuário imprimir um cubo de calibração de 20 milímetros (RF);
- b) permitir ao usuário avaliar se o protótipo gera objetos 3D com uma precisão aceitável (RF);
- c) permitir ao usuário realizar a impressão 3D de peças do projeto Furbot (RF);
- d) ser montado com peças de baixo custo (Requisito não funcional – RNF);
- e) utilizar firmware de código aberto (RNF);
- f) operar com software de código aberto (RNF);
- g) promover de maneira geral a reutilização de lixo eletrônico para algo novamente útil (RNF);
- h) utilizar componentes reciclados de outros dispositivos eletrônicos (RNF);
- i) utilizar madeira reciclada (RNF);
- j) possuir capacidade de operar por mais de 10 horas sem falhas (RNF);
- k) utilizar o Framework Marlin (RNF);
- l) utilizar hardware de código aberto (RNF).

#### 3.2 ESPECIFICAÇÃO E DESENHO TÉCNICO

Esta seção apresenta a especificação do protótipo através de um modelo bibliográfico, a estrutura de um antigo protótipo de um plotter CNC, a criação de um modelo 3D por meio de engenharia reversa da concepção da impressora e um esquema elétrico de ligação dos componentes. As ferramentas utilizadas foram os aplicativos SketchUp e o Microsoft Paint.

##### 3.2.1 Concepção da impressora

A ideia inicial para o desenvolvimento do protótipo se deu por meio de pesquisa bibliográfica em livros estrangeiros, em virtude que existe pouca bibliografia sobre esse tema no idioma português. Também foi levado em conta pesquisas em trabalhos acadêmicos e artigos científicos sobre o tema.

O modelo se trata de uma impressora 3D do tipo Prusa, conforme Figura 1, que serviu de base para vislumbrar os principais componentes de uma impressora 3D e sua estrutura mecânica e eletrônica. A seleção se deu em virtude de as partes mecânicas operarem da mesma forma que o protótipo do antigo roteador CNC, da Figura 2, como exemplo, o eixo Y se movimenta na base para frente e para trás. Existem outros modelos de estrutura de impressão, que o eixo Y fica estático e a movimentação se dá através dos outros eixos.

### 3.2.2 Protótipo de roteador CNC em 2D

A base desse projeto teve início a partir do protótipo de um roteador CNC 2D finalizado em 2018, conforme Figura 2, desenvolvido como hobby pelo autor e utilizou peças recicladas e uma placa controladora CNC Shield, controlada por uma placa Arduino UNO. Uma motivação para utilização foi o aproveitamento das peças e estrutura, como exemplo os motores de passo, corrediças telescópicas e estrutura de madeira reciclada.

Figura 2 - Roteador CNC antes de ser transformado em impressora 3D



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Também se pode mencionar a questão do esquadro e ângulos, que no decorrer do estudo se mostrou fundamental para a impressora 3D funcionar corretamente. Como exemplo,

conforme Figura 2, se pode observar nas corrediças superiores do eixo X, que as madeiras foram cortadas com serra manual e sem nenhum ângulo.

A decisão de fazer uma impressora 3D surgiu da sugestão feita pelo futuro orientador na época, professor da disciplina de eletrônica da FURB, Prof. Ms. Miguel Alexandre Wisintainer (Wisintainer, 2014). A sugestão do autor era fazer um gravador laser, visto que toda estrutura do CNC iria trabalhar apenas com os eixos X e Y, ou seja, em 2D, mas após estudos, se concluiu que a impressora 3D foi a melhor opção, devido ao fato do laser ser perigoso em virtude dos raios ultravioleta que podem causar sérios problemas de visão durante os testes.

Durante esse período, não se tinha conhecimento de todos os problemas conhecidos neste trabalho. Como exemplo citado em trabalhos correlatos, se pode constatar problemas mecânicos, de aquecimento, trepidação, oscilação, falta de precisão que foram ajustados durante a fase de testes.

### 3.2.3 Impressora 3D Laboratório de Informática FURB Campus I

Durante o período de graduação do autor no curso de Sistemas de Informação na Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB), se observou uma impressora 3D no laboratório de informática localizado no quarto andar do bloco I dessa instituição. Conforme é ilustrado na Figura 3, se observa detalhes dos componentes da impressora, como estrutura mecânica e alguns componentes eletrônicos.

Figura 3 - Detalhe de impressora laboratório FURB Campus 1



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

O autor observa que a estrutura dessa impressora tem funcionamento mecânico diferente do modelo *Prusa* encontrado na bibliografia. Esse modelo é fechado e ideal para impressões

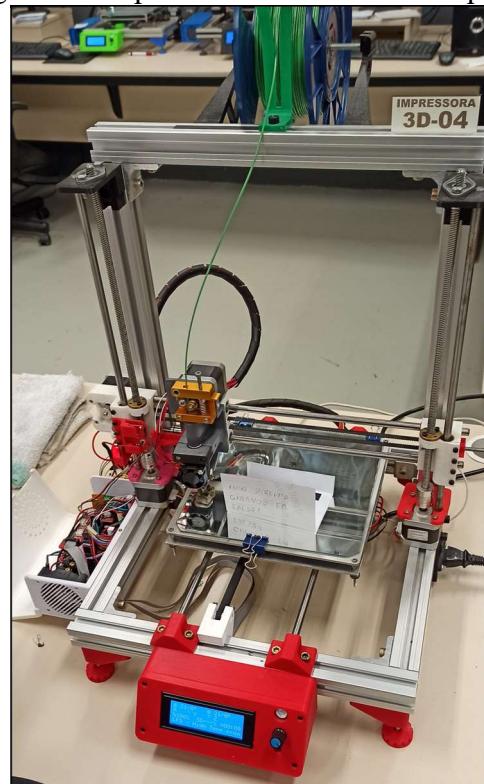
com o plástico ABS e tem em sua base uma mesa aquecida fixa que sobe e desce. Se trata de uma impressora comercial, de marca e tecnologia proprietária. A impressão em 3D deve começar com a base no topo e conforme as camadas de impressão são realizadas, a base vai descendo até a finalização do trabalho de impressão. Também se observa que esse modelo comercial utiliza fusos para deslizamento dos carros de impressão e a tração dos eixos ocorre por meio de correias.

### 3.2.4 Impressora 3D Laboratório de Engenharia Elétrica - FURB Campus II

Durante a fase de projeto desse trabalho acadêmico, se realizou uma visita ao laboratório de Engenharia Elétrica da FURB - Campus II, para realizar o convite do futuro mentor do projeto, professor do Curso de Engenharia Elétrica, Prof. Ms. Cesar Ricardo Câmara da Silva (Silva, 2017).

Durante a visita nas dependências do laboratório, conforme Figura 4, se pode observar várias impressoras 3D em funcionamento, além de um roteador CNC Laser de grande porte.

Figura 4 - Impressora 3D FURB - Campus II



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Em conversa com o mentor do projeto, o autor comentou a concepção do projeto da criação de uma impressora 3D de baixo custo e realizou perguntas sobre a estrutura básica de uma impressora 3D, além de alguns detalhes técnicos, como o uso de relé de estado sólido como fonte alternativa de energia para a mesa aquecida, como medida paliativa a utilização de ligação

da mesa aquecida direto na placa Ramps (RepRap Contributors, 2024). Também se observou o uso de spray para fixação de cabos extraforte, que é utilizado para auxiliar na fixação dos objetos 3D impressos nas impressoras.

O autor observa, na Figura 4, que a estrutura dessa impressora é similar ao modelo 3D *Prusa*, que possui uma estrutura parecida com a ideia de adaptação do roteador CNC. Nesse modelo de arquitetura, a mesa aquecida está localizada no eixo Y e se move para frente e para trás com auxílio de correias.

### 3.2.5 Engenharia reversa do protótipo construído

A construção do desenho técnico da estrutura do protótipo em 3D ocorreu após o protótipo estar funcional. O início da criação dos desenhos foi realizado com a ferramenta de código aberto FreeCad (FreeCad Team, 2024) que se trata de uma ferramenta para desenhos paramétricos em 3D. Se realizou cursos online para aprender a utilizar o aplicativo, porém se constatou que é muito trabalhoso a utilização para fins de ilustração. O ponto de maior dificuldade foi a questão que todos os ângulos e arcos do objeto em 2D devem ser desenhados, interligados para então gerar um modelo em 3D. A construção do modelo ocorre de forma incremental em várias camadas de pequenos objetos em 3D até finalizar a peça.

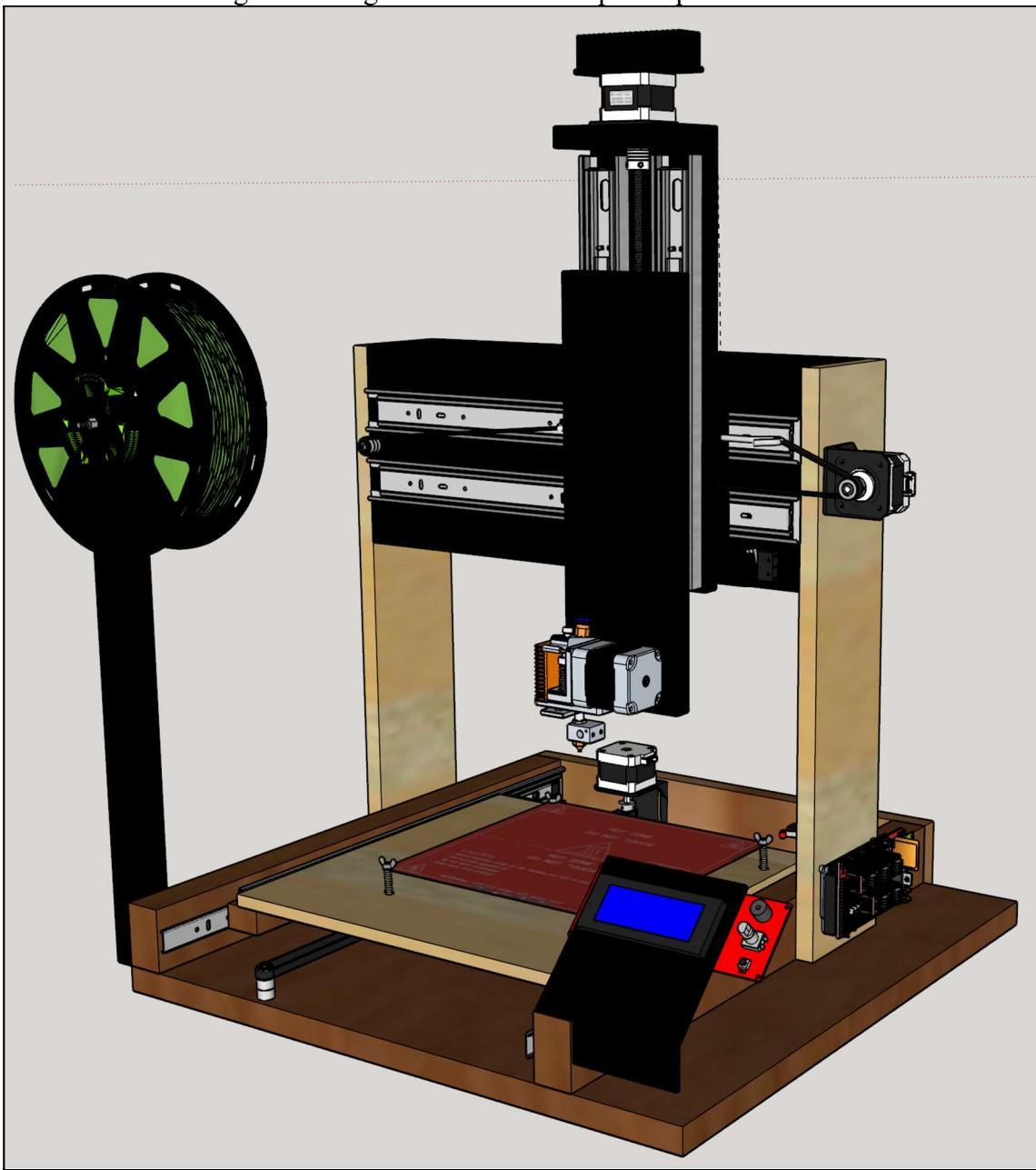
Diante dessa situação, foi realizado pesquisa de outra ferramenta mais adequada aos propósitos de construção das ilustrações e a solução mais apropriada foi a ferramenta SketchUp (Trimble Inc, 2023). Essa ferramenta possui versões pagas e por assinatura, porém foi utilizada a versão online disponibilizada de forma gratuita.

O SketchUp (Trimble Inc, 2023) possui uma metodologia diferente de utilização para a construção de objetos em 3D. Se destaca pela simplicidade de utilização em virtude que não necessita efetuar a ligação dos ângulos e arcos. O desenho é feito em 2D e após a forma geométrica ser criada, é transformada de forma automática em 3D.

Os modelos 3D das peças da impressora como motor de passo, corrediças telescópicas, parafusos, extrusora foram utilizados do repositório de modelos 3D Warehouse (Trimble Inc, 2024). Alguns modelos em 3D de peças que não foram encontrados nesse repositório foram desenhados pelo autor, como exemplo se pode citar o suporte para o visor de LCD e chapas de tração da barra rosada utilizada no eixo Z.

O protótipo foi construído de forma incremental, conforme Figura 5, descrito passo a passo na seção 3.3. Após estar concluído, foi elaborado a engenharia reversa por meio de modelos em 3D com objetivo de facilitar o entendimento do que foi construído em todas suas etapas.

Figura 5 - Engenharia reversa do protótipo construído



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 5, se pode observar o modelo em 3D do protótipo criado, já funcional e com todos os componentes finais.

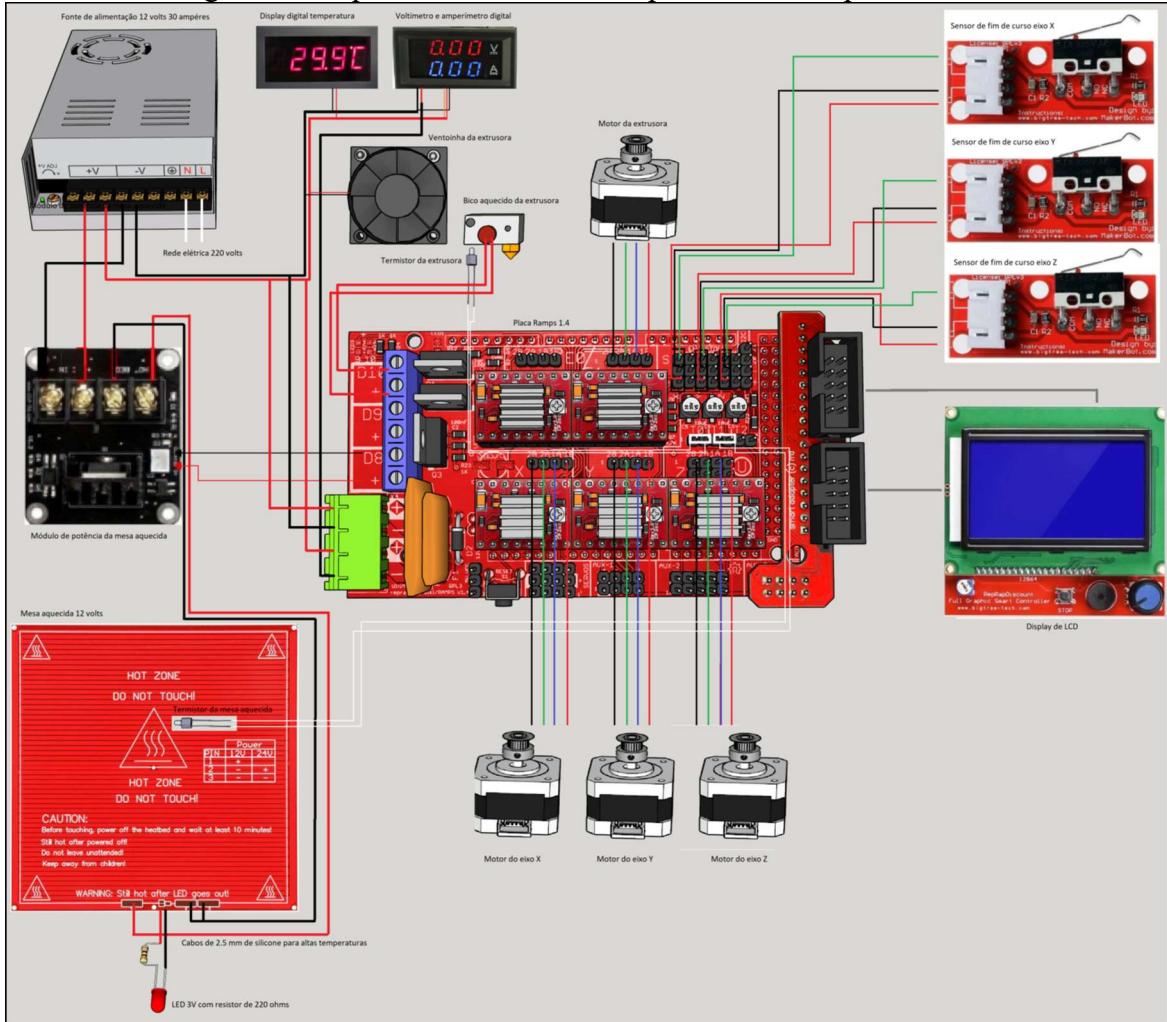
### 3.2.6 Esquema elétrico dos componentes da Impressora 3D

A ligação dos componentes elétricos do protótipo também ocorreu de forma incremental e seu esquema elétrico na versão funcional está ilustrado na Figura 6, elaborado por meio de engenharia reversa. O desenvolvimento em detalhes está descrito na seção 3.3, porém se pode afirmar que durante a fase inicial, alguns componentes foram conectados de forma isolada e

conforme foi se obtendo sucesso, foi sendo incorporado as melhorias. Também nessa fase ocorreram vários problemas onde o esquema elétrico teve que ser alterado e adaptado.

Na Figura 6 se pode observar a versão final do esquema elétrico funcional com todos os componentes utilizados, entre eles, sensores e atuadores.

Figura 6 - Esquema elétrico dos componentes da Impressora 3D



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Essa ilustração técnica foi criada com a ferramenta Microsoft Paint e os modelos em 3D dos componentes foram importados da ferramenta SketchUp (Trimble Inc, 2023) e do repositório 3D Warehouse (Trimble Inc, 2024).

### 3.3 IMPLEMENTAÇÃO

Esta seção mostra o detalhamento da implementação do trabalho. Na seção 3.3.1, são apresentados os detalhes da compra e construção do hardware do protótipo. A seção 3.3.2 mostra as técnicas e ferramentas utilizadas. Por fim, a seção 3.3.3 detalha a instalação e configuração dos componentes eletrônicos, firmware e softwares.

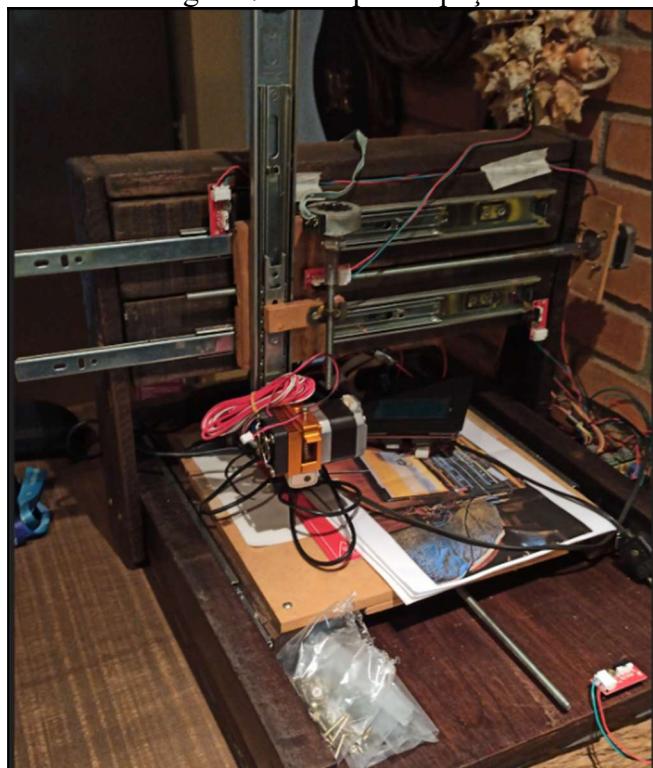
### 3.3.1 Construção do hardware do protótipo

A construção da parte física do protótipo ocorreu de forma incremental. Em uma primeira etapa, foi realizado uma pesquisa bibliográfica aprofundada de livros, artigos científicos, Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC), encontrados em plataformas como Google Acadêmico entre outros, para embasar a ideia inicial a respeito da construção do protótipo. A partir desse estudo, foi elaborado uma lista dos materiais necessários para montagem do protótipo.

#### 3.3.1.1 Compra de peças

As peças iniciais utilizadas no protótipo, tiveram como base a estrutura do roteador CNC e seus componentes, conforme Figura 7, além da compra de parafusos, cabos elétricos, brocas de furadeira, ferramentas para aferir nível e esquadro para aferir ângulos.

Figura 7 - Compra de peças



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

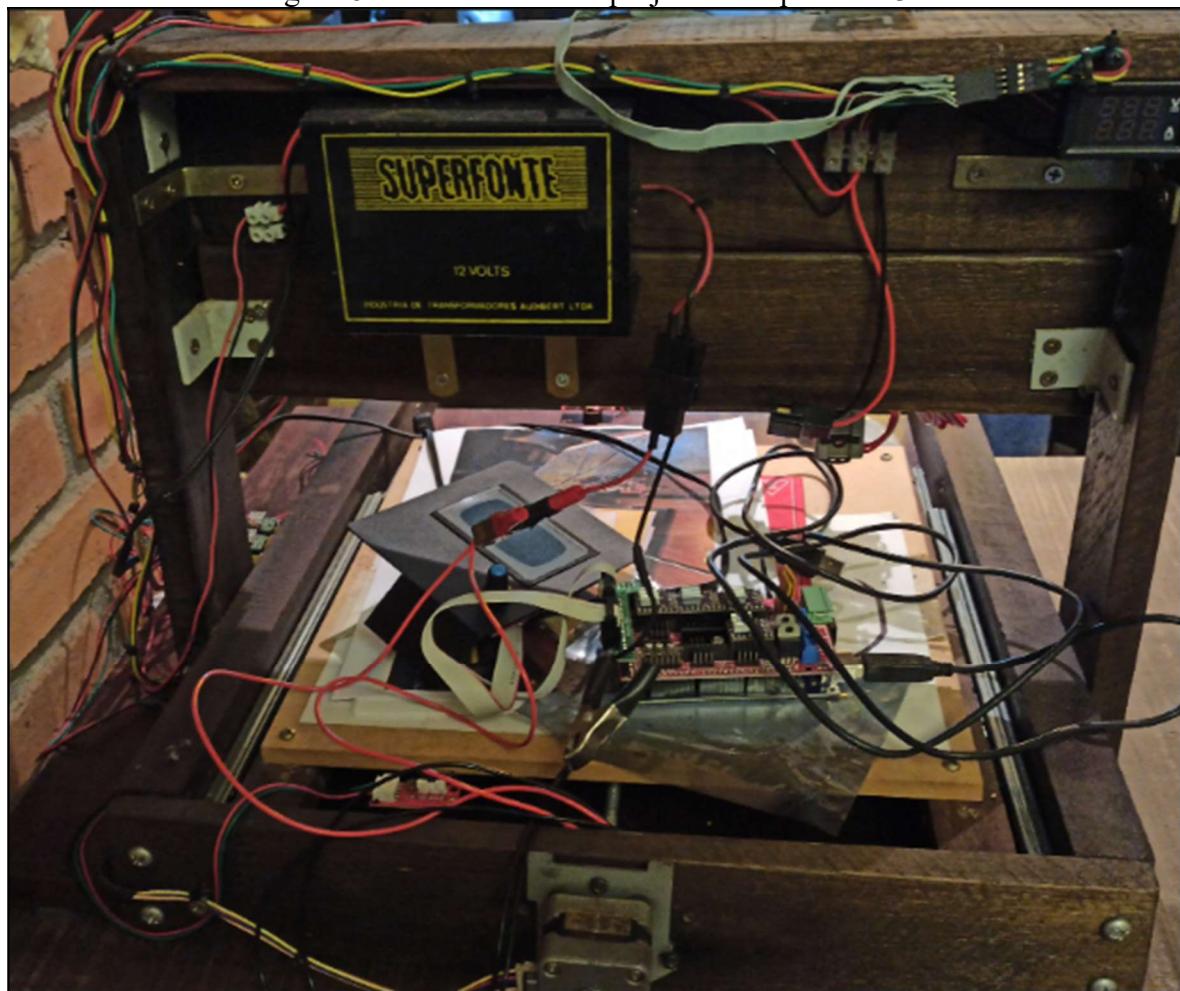
Se realizou a importação de alguns componentes eletrônicos da China, por meio do site Aliexpress, pelo fato do preço ser mais em conta que o encontrado no Brasil. Os componentes adquiridos foram o kit eletrônico Ramps 1.4 para impressora 3D que é composto por uma mesa aquecida modelo Mk2, placas Arduino Mega 2560 e Ramps 1.4, cinco sensores de fim de curso, dois sensores de temperatura e uma extrusora MK8 completa com todos os cabos de

alimentação. O pagamento dos componentes foi realizado pelo site Aliexpress e a remessa chegou via correio em aproximadamente em três semanas na residência do autor.

Se pode observar na Figura 7 que nessa época o protótipo ainda continha barras rosadas de avanço para todos os eixos, que posteriormente foram substituídos pelas correias dentadas, que aumentaram a velocidade de impressão e facilitaram a manutenção.

A parte traseira do protótipo inicial está ilustrada na Figura 8 e continha uma fonte de alimentação de energia de 12V com transformador, de 70 watts de potência, ou seja, 7 amperes, que também foi substituída por uma fonte chaveada de 12V e 30 amperes, em virtude do protótipo construído funcionar com 12V e demandar mais energia, pelo fato de ser incorporado à mesa aquecida que demanda aproximadamente 11 amperes e a extrusora cerca de 2 amperes.

Figura 8 - Vista traseira do projeto da impressora 3D



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Também se pode observar que todos os encaixes da parte de madeira estavam com fixação por meio de cantoneiras e toda estrutura foi serrada com serra manual, sem nenhuma preocupação com esquadro. Esses itens foram substituídos com objetivo de melhorar o alinhamento e acabamento do novo protótipo.

A lista de compras das peças iniciais, disponível no Quadro 2, possui valores com cotados na época da elaboração e aquisição dos itens da lista, no mês de outubro de 2023. Os componentes foram obtidos através de doações por empresas localizadas na cidade de Blumenau, Santa Catarina e por acervo pessoal do autor.

A estrutura de madeira foi montada com parte da estrutura do antigo CNC, retalhos de MDF de propriedade do autor e da reciclagem de pallets coletados no lixo de uma construção civil perto da residência do autor. Os motores foram retirados de sucata de três impressoras jato de tinta da marca Epson, que foram doados pela empresa SOS Impressoras, localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina.

Quadro 2 - Lista de compras de peças

Material	Quantidade	Preço R\$	Origem
Madeira base 50x50cm	1	0,00	Reciclagem/Doação
Madeiras estrutura 7cmx35cm	6	0,00	Reciclagem pallet
Corrediça telescópica 30cm	2	31,64	Keunecke Ferragens
Chapa grossa dobrável 50mm	1	7,06	Keunecke Ferragens
Parafusos Aço 3,5 x 14mm	30	1,87	Keunecke Ferragens
Barra Roscada ¼ polegadas	2	4,98	Açopar
Porcas e chapas de fixação	3	10,00	Açopar
Solda das porcas na chapa	1	30,00	Ferreiro
Motores de passo impressora Epson 132 colunas	2	0,00	Doação SOS Impressoras
Motores de passo impressora Epson Jato de Tinta	1	0,00	Doação SOS Impressoras
Fonte 12v 7 amperes	1	0,00	Doação pessoal
Visor Voltagem e Amperagem Visor Digital de Temperatura	1	20,34	Aliexpress
Rampas de impressora 3D 1.4 Kit, Arduino Mega 2560, Hotbed mk2b, Visor de LCD 12864, Controlador LCD, Driver A4988, 3 Fim de cursos mecânicos com cabos	1	212,56	Aliexpress
Impressora 3D Capa LCD 12864 ender3	1	53,17	Aliexpress
Ramps-Mk8 Extrusora com 0,4mm Bico Kit Filamento para Motor, J-cabeça de extrusão, Hotend Head 1.75mm, 12v 40w	1	116,43	Aliexpress
Cabos 0,7mm	10	25,00	Proesi Componentes Eletrônicos
<b>TOTAL</b>		<b>513,05</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As chapas, parafusos, corrediças telescópicas, foram adquiridas na empresa Keunecke Ferragens, localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina. Os parafusos, porcas, arruelas, barras roscadas foram adquiridas na empresa Açopar localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina. Os cabos elétricos utilizados no protótipo foram adquiridos na empresa Proesi

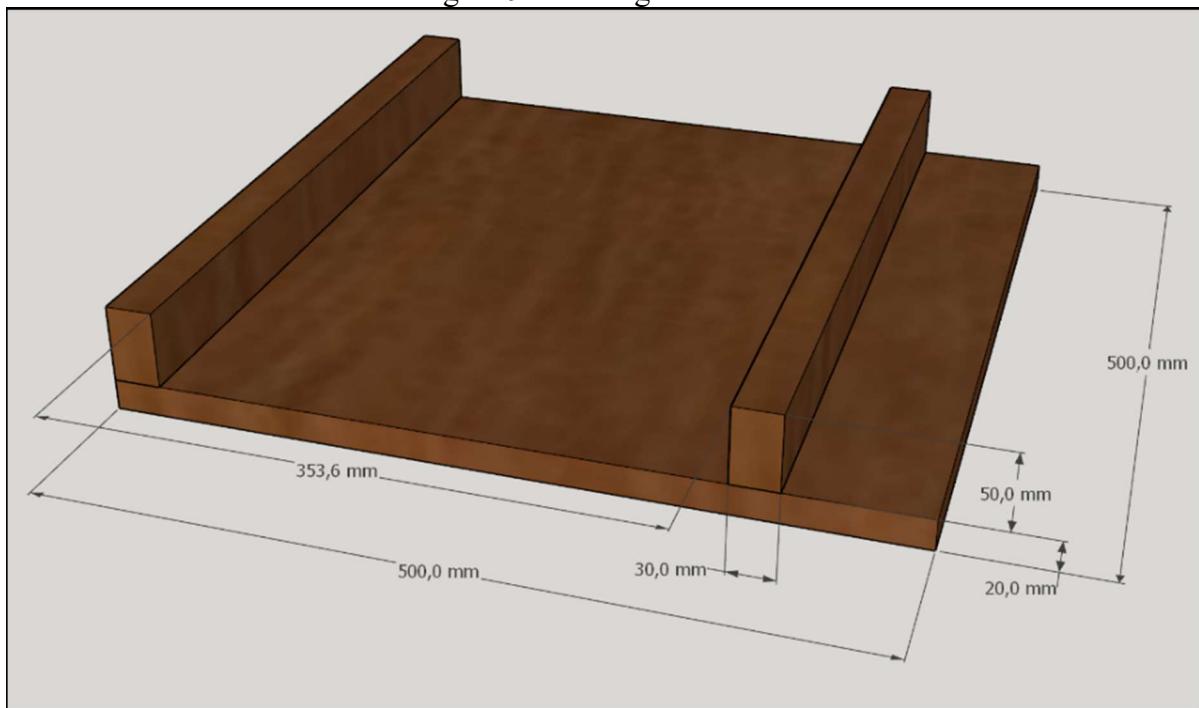
Componentes Eletrônicos, localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina. A aquisição dos kits eletrônicos se realizou por meio de importação de encomenda da China por meio do site de comércio eletrônico Aliexpress.

### 3.3.1.2 Montagem da estrutura física principal

A montagem do protótipo se iniciou com a desmontagem do antigo protótipo CNC, com objetivo de reutilizar várias peças, entre elas a base, composta por uma chapa de madeira canela e duas colunas inferiores, como se observa na Figura 9.

As torres do protótipo inicial, com madeiras de pallets foram substituídas por madeira de MDF reutilizadas. O motivo principal foi a falta de ângulo de 90 graus em virtude do corte com serra manual e pelo fato das madeiras estarem com a curvatura irregular, que impossibilitaria o ângulo perfeito e sem variações para o curso de impressão.

Figura 9 - Montagem da base

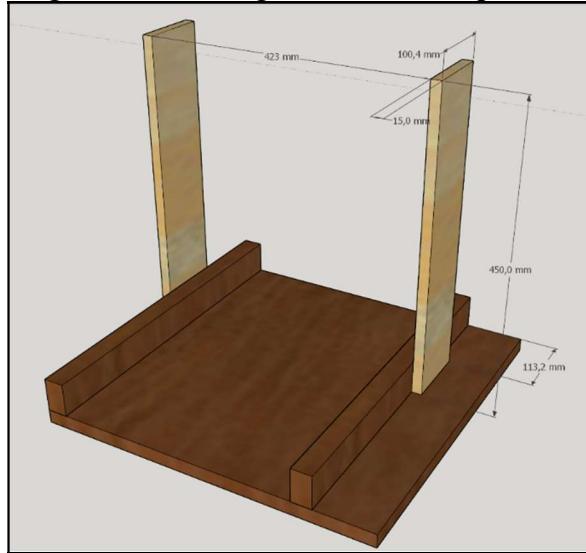


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Durante a implementação, essas torres foram montadas e desmontadas três vezes, em diferentes posições, até atingir um alinhamento compatível com os demais componentes da impressora, como o curso da cama aquecida posicionada no eixo Y e com a posição inicial da extrusora. Também nessa etapa, as ferramentas de esquadro e de nível foram fundamentais, para corrigir variações de ângulo durante a fixação. A madeira utilizada foi MDF de 15 milímetros, que sobrou da construção do móvel da cozinha do apartamento do autor. Também

se aferiu o nível da mesa em que a impressora foi montada, e o alinhamento das torres se deu no mesmo nivelamento, conforme Figura 10.

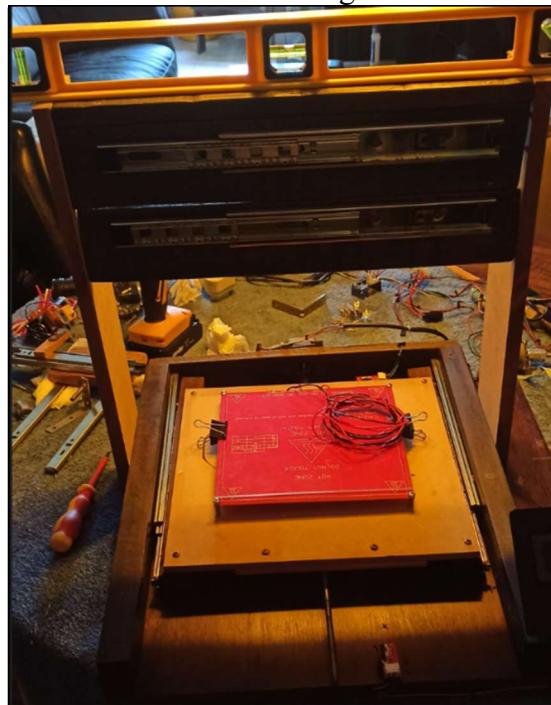
Figura 10 - Montagem das torres superiores



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

As madeiras foram cortadas por máquina profissional pela empresa Compensados Keunecke localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina, onde se obtém um ângulo perfeito de 90 graus. Nessa etapa foram realizados vários ajustes com o esquadro até atingir o ângulo perfeito entre as duas colunas e base. A fixação se deu por parafusos soberbos de 3.5 x 25 mm e os furos foram feitos com broca de 2.5 mm. Na Figura 10 se pode observar detalhes de alinhamento da parte frontal durante a montagem das torres superiores.

Figura 11 - Parte frontal da montagem das torres superiores



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Durante a construção, se utilizou muito uma régua de nível, pelo motivo que o alinhamento da impressora deve estar em 180 graus da base e em 90 graus cada torre, conforme Figura 11.

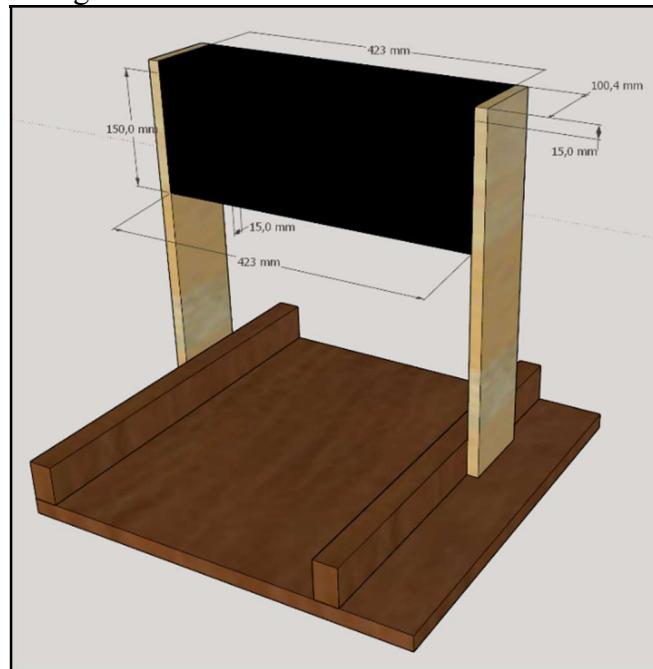
Figura 12 - Parte traseira da montagem das torres superiores



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 12, se observa que nessa etapa, ainda estava sendo utilizado madeira de pallet para unir as torres superiores, mas posteriormente também foram substituídas por madeira MDF pelo fato de as madeiras de pallets possuírem curvaturas irregulares.

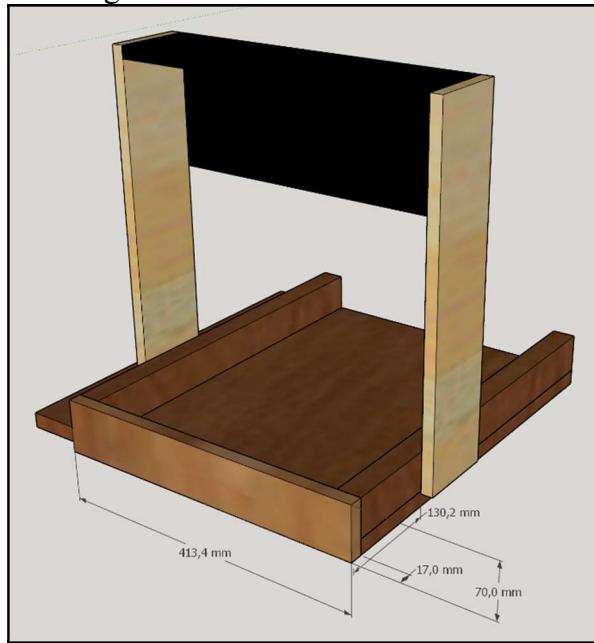
Figura 13 - Base do eixo X em MDF - Frente



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A base do eixo X, conforme se observa na Figura 13, foi substituída por madeira MDF reutilizada, em virtude do esquadro e ângulo de 90 graus. Foram utilizadas duas chapas que o autor possuía em sua residência. O corte foi realizado também pela empresa Compensados Keunecke localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina com máquina profissional de corte. A fixação se deu por parafusos soberbos de 3.5 x 40 mm e os furos foram feitos com broca de 2.5 mm.

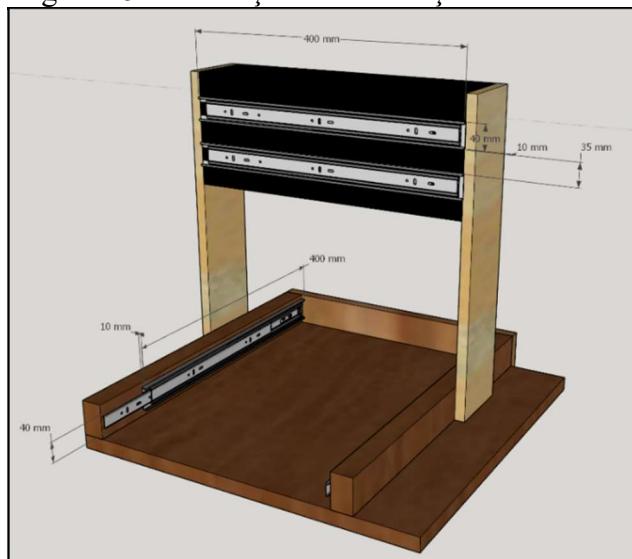
Figura 14 - Parte traseira do eixo X



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A parte traseira da base do eixo X se manteve do projeto original, conforme Figura 14, sendo de madeira de pallet reciclado. A fixação se deu por parafusos soberbos de 4 x 20 mm.

Figura 15 - Instalação de corrediças eixos X e Y

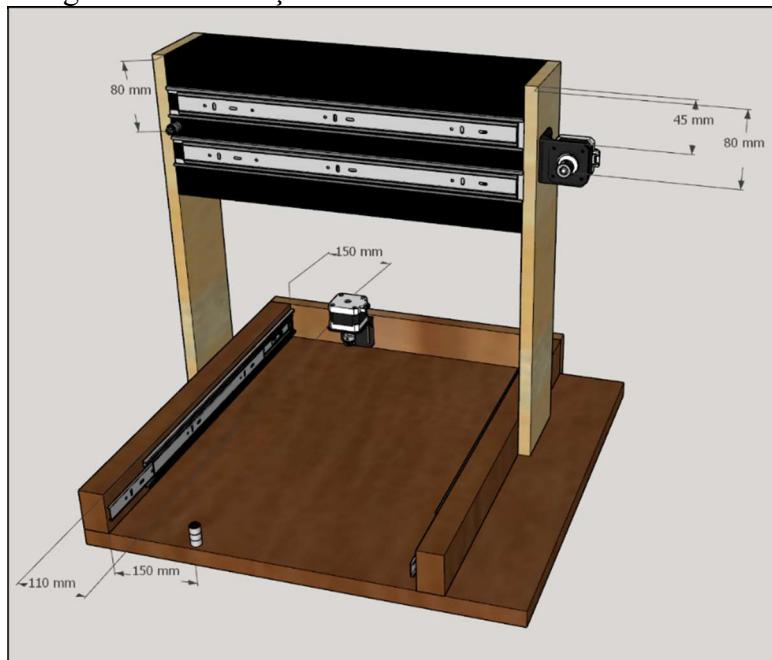


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

As corrediças telescópicas utilizadas são do modelo de 40 centímetros para suportar até 50 quilos, usualmente utilizadas na marcenaria para construção de peças móveis como gavetas. Esses componentes são facilmente encontrados em lojas de ferragens para construção de móveis e existem dois tipos mais comuns de corrediças, a normal e a reforçada. Nesse contexto, se optou pelo modelo reforçado, em virtude de possuir mais rolamentos em sua estrutura. Um detalhe muito importante foi a observação da fixação das corrediças no ângulo perfeito de 90 graus, porque devem percorrer facilmente seu curso, como se observa na Figura 15 e foram fixadas com parafusos 3.5 x 15 mm. O último estágio, ou seja, a parte mais fina da corrediça, teve um pedaço serrado e foi motivado por objetivos estéticos, para não ficar aparecendo para fora da impressora, quando estiver no final do curso do eixo X. Durante essa etapa, as corrediças receberam lubrificação extra com graxa azul, específica para rolamentos.

O motor do eixo Y, em virtude de aproveitar a estrutura do protótipo CNC e utilizar menos espaço foi instalado invertido. Foi fixado em um suporte de aço de 90 graus, com furação padrão dos motores Nema 17. As polias instaladas são compatíveis com correia GT2 de 20 dentes e espessura de 6 mm. As roldanas dos eixos Y e X, foram instaladas por meio de parafuso soberbo de 3.5 x 35 mm, com três espaçadores para ficar na altura da polia do motor. Os espaçadores utilizados foram 3 porcas de 6 mm combinados com arruelas. O motor do eixo X foi instalado em sua posição normal, com suporte de aço com ângulo de 90 graus. A furação do suporte também segue o padrão de furação dos motores Nema 17, conforme é ilustrado na Figura 16.

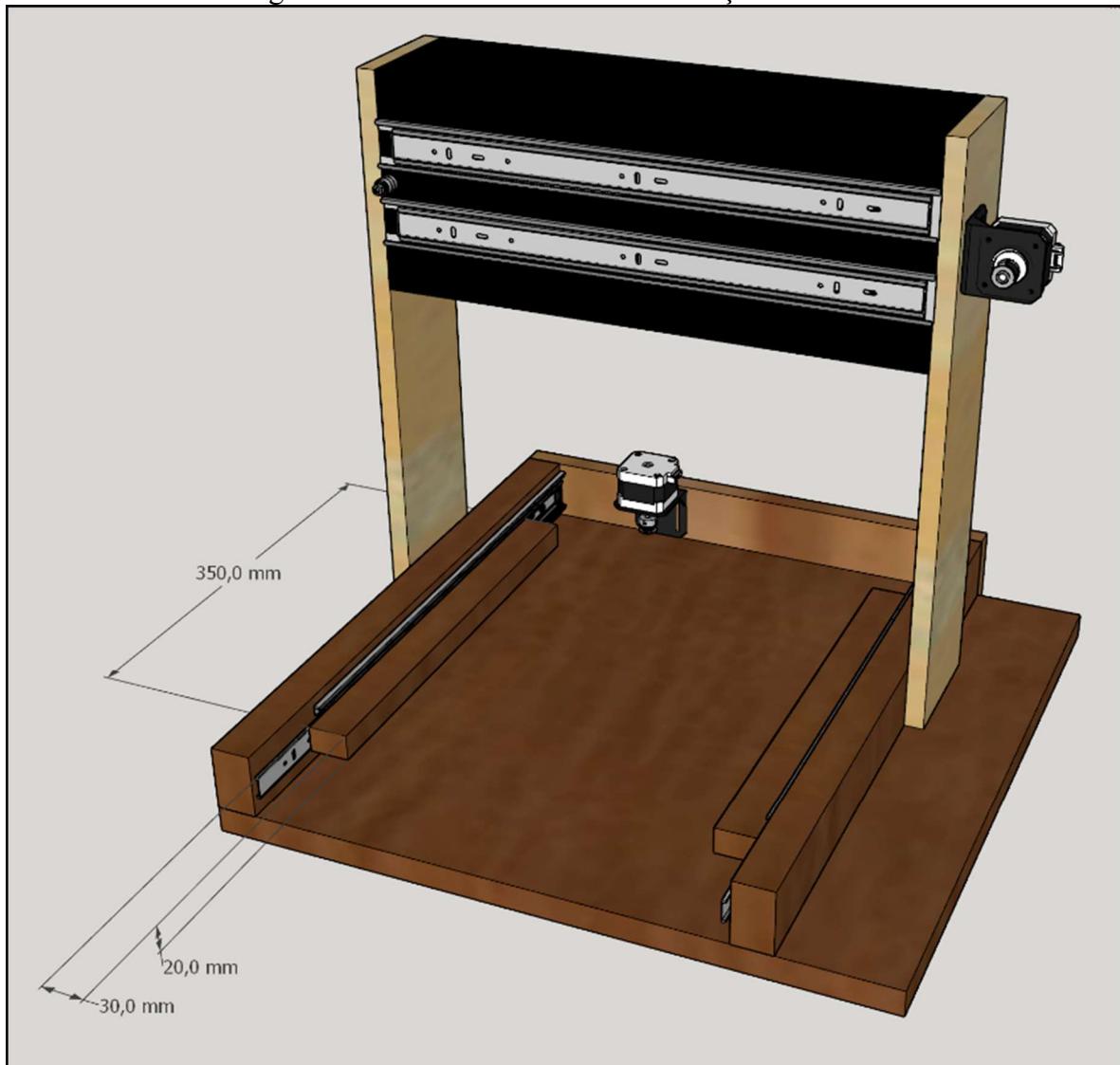
Figura 16 - Instalação motor e roldanas GT eixos X e Y



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Nas fotos iniciais do protótipo, o projeto seria feito com barras rosadas nos eixos X e Y, porém devido a velocidade e manutenção, se optou para uma melhoria com as polias GT2 que renderam uma velocidade superior, além de facilitar a movimentação dos eixos quando a impressora está desligada, como se observa na Figura 17. Também se pode destacar que esse sistema permitirá manutenção e instalação de forma mais simplificada. Se observa, que a correia GT2 com o tempo de uso e desgaste natural da borracha, surgem folgas, tornando necessário reaperto constantes, aproximadamente a cada 20 horas de impressão.

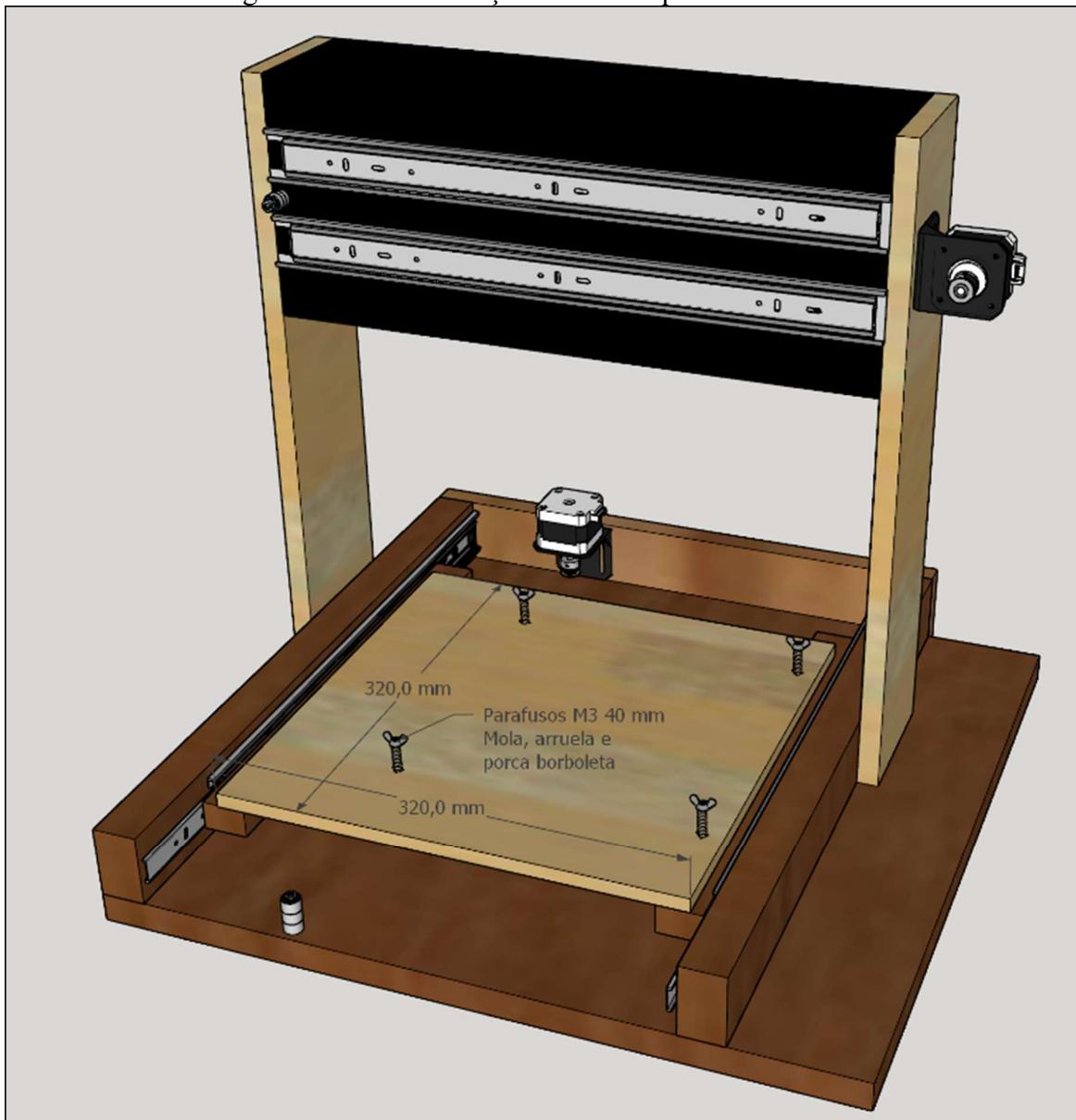
Figura 17 - Colunas laterais das corrediças do eixo Y



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

As colunas laterais das corrediças do eixo Y são opcionais no projeto. No caso desse protótipo foram utilizadas, em virtude de reutilizar o material que já havia no protótipo do roteador CNC, mas a base para a mesa aquecida pode ser instalada diretamente nas corrediças sem necessidade dessas colunas. As colunas em questão são de madeira canela e foram fixadas com parafusos de 3.5 x 10 mm na parte interna da corrediça do eixo Y, conforme Figura 17.

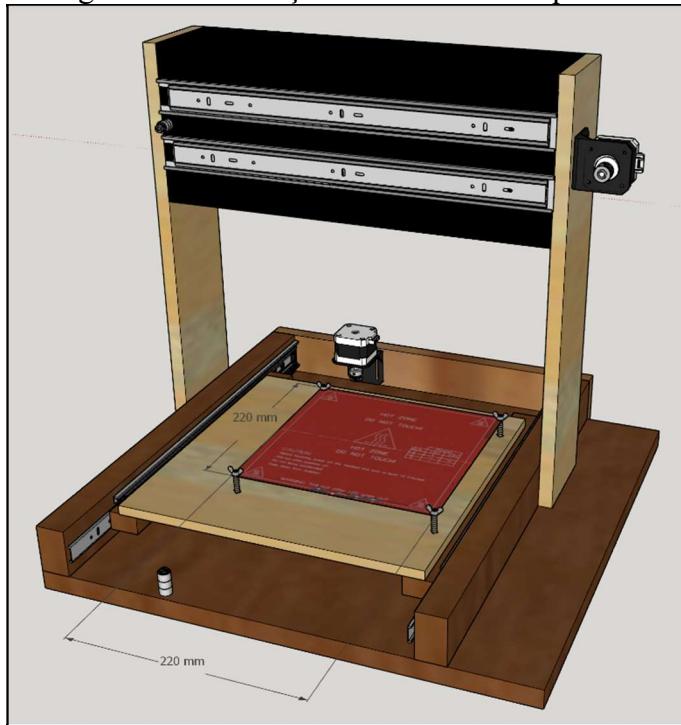
Figura 18 - Base e fixação da mesa aquecida do eixo Y



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A base da mesa aquecida consiste em uma madeira de 320 x 320 mm, em MDF de 10 mm, reutilizada do protótipo do roteador CNC e foram fixadas nas colunas laterais do eixo Y. Também na nessa base, foram feitos 4 furos com broca de 3 mm e colocados 4 parafusos padrão M3 de baixo para cima, com molas e porcas borboleta, para posteriormente receber a mesa aquecida, como se observa na Figura 18. A furação dos parafusos ocorreu através dos furos da mesa aquecida, que foi utilizada como gabarito de furação. Os parafusos padrão M3, molas, arruelas e porcas borboleta foram comprados na empresa Coremma localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina.

Figura 19 - Instalação física da mesa aquecida



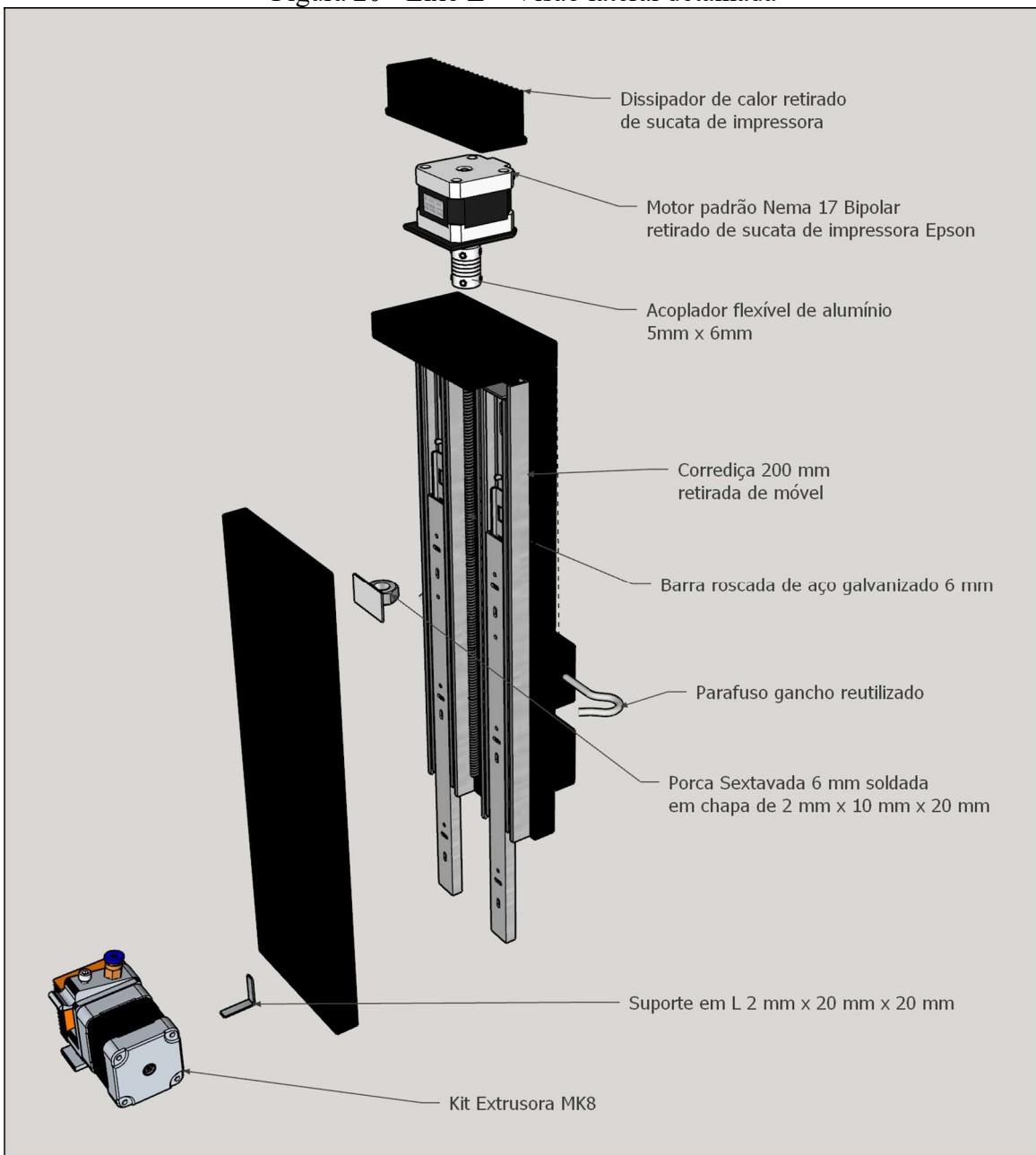
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Nessa etapa, a mesa aquecida foi apenas colocada em seu local, porém posteriormente foi retirada para instalação do sensor de temperatura e cabos de energia, como é ilustrado na Figura 19. Essa mesa aquecida quando entrará em operação, será sobreposta por um vidro de espessura de 2 mm nas medidas 200 x 200 mm, adquirido na Vidraçaria NM localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina.

### 3.3.1.3 Montagem do eixo Z

O eixo Z concentra a estrutura móvel mais complexa e devido a esse fato, foram feitos vários desenhos detalhados e conforme a Figura 20, seguem todas as peças utilizadas de forma detalhada. Uma questão importante a mencionar durante a montagem, é o alinhamento do motor do eixo Z com o acoplador e barra roscada que devem estar num ângulo exato de 90 graus, visto que se houver variação, o sistema em algum ponto do curso, irá trancar ou ficar pesado, prejudicando o desempenho ou até travando. O dissipador de calor instalado em cima do motor, ocorreu em virtude de aquecimento que posteriormente foi resolvido em partes com a redução de tensão no controlador do motor de passo. O sistema que oferece tração a parte móvel do eixo, foi aproveitado do projeto do CNC, que consiste em uma chapa de aço de 2 mm x 10 mm x 20 mm, com uma porca de 6 mm sextavada soldada em um ângulo de 90 graus.

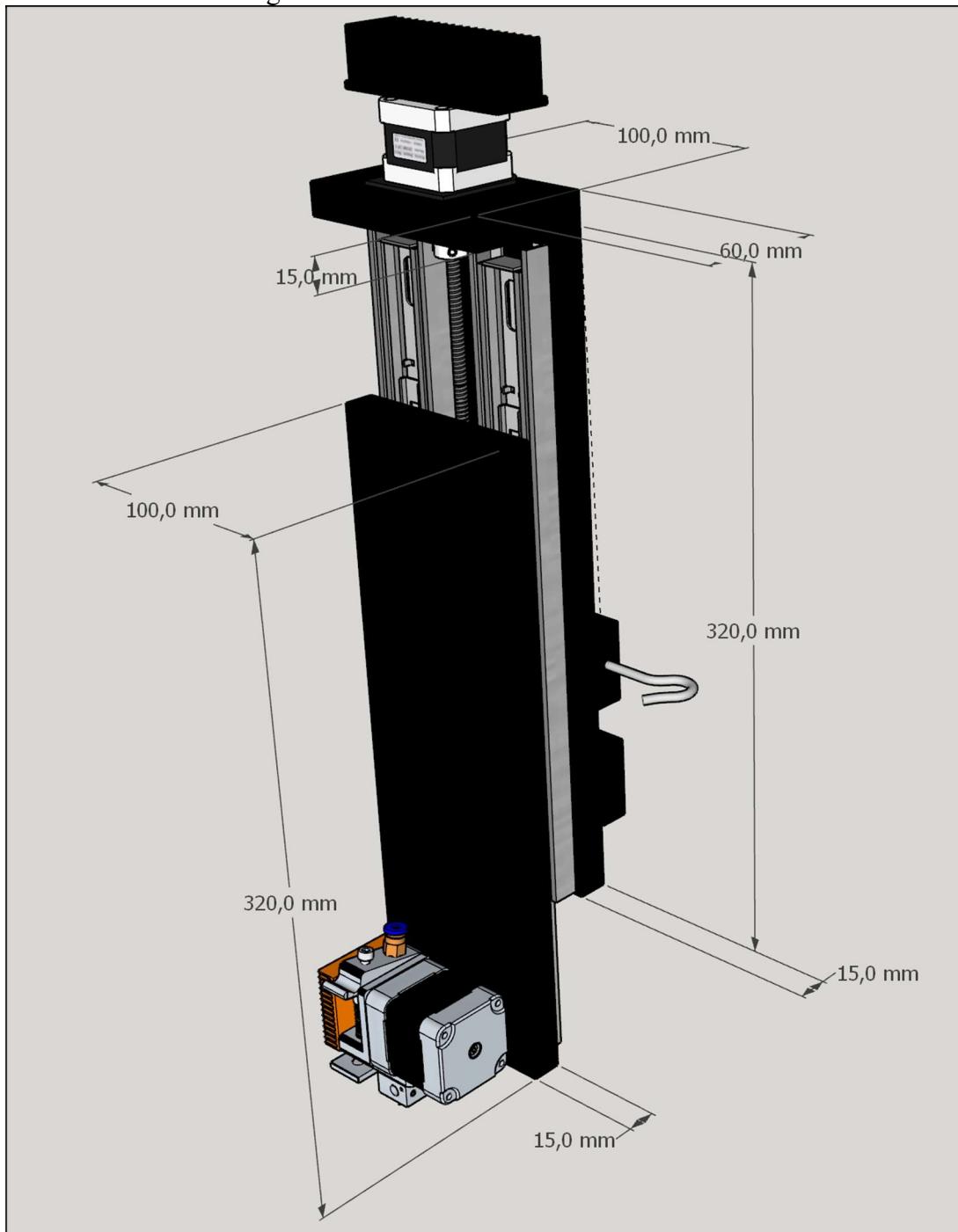
Figura 20 - Eixo Z – Visão lateral detalhada



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Um diferencial em relação aos trabalhos correlatos, é que essa concepção do eixo Z foi projetado para operar somente com um motor, visando simplicidade e redução de custos e peso. Usualmente o eixo Z possui dois motores, sendo dispostos um em cada extremidade de cada torre e devem trabalhar em sincronia, devido ao peso do conjunto. Usualmente ocorrem problemas de sincronismo entre os dois motores, devido a fatores como alinhamento da rosca dos motores, folgas nas porcas ou correias e sincronismo das barras rosadas.

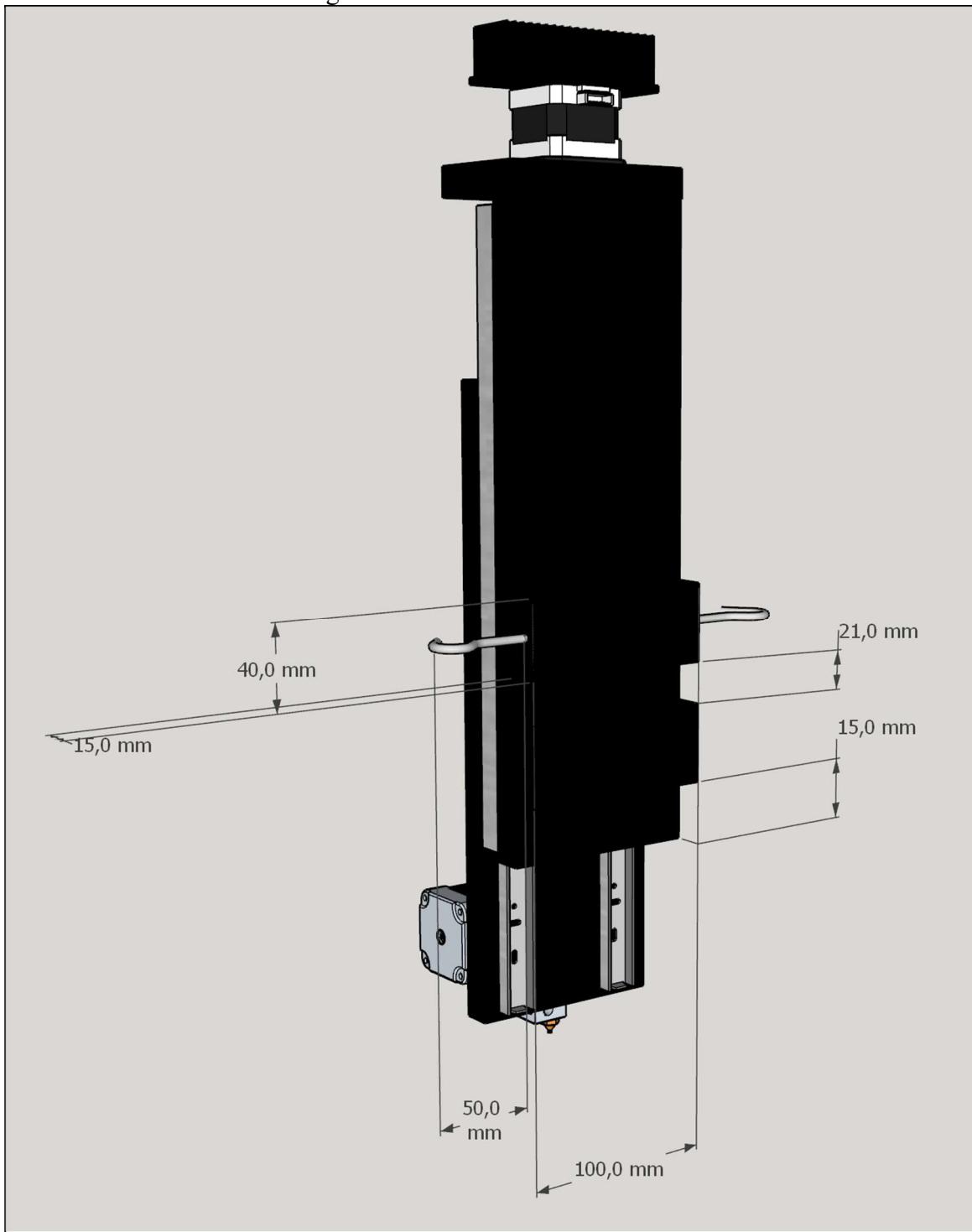
Figura 21 - Eixo Z – Visão lateral montado



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A estrutura do eixo Z, consiste em duas corrediças telescópicas de 200 mm, retiradas de um móvel antigo e as demais chapas de MDF foram reutilizadas do acervo pessoal do autor e cortadas pela empresa Compensados Keunecke, localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina, nas medidas descritas na Figura 21. A fixação foi realizada com parafusos soberbos de 3.5 x 25 mm e os ganchos que movimentam o eixo para a esquerda e a direita sobre o eixo X, são ganchos reutilizados de um antigo varal da residência do autor.

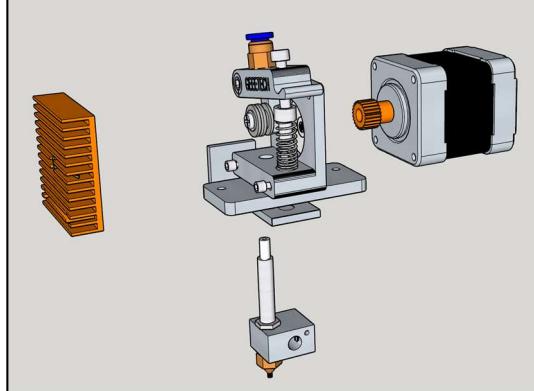
Figura 22 - Eixo Z – Visão traseira



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na parte traseira do eixo Z, conforme é ilustrado na Figura 22, se observa a visão do funcionamento do curso do eixo e o vão principal que irá passar a correia GT2 de 6 mm. Esse espaço foi projetado deixar um espaço mínimo de 5 milímetros em todos os lados para a correia GT2 operar sem ocorrer a possibilidade de raspar ou enroscar em alguma parte da estrutura móvel.

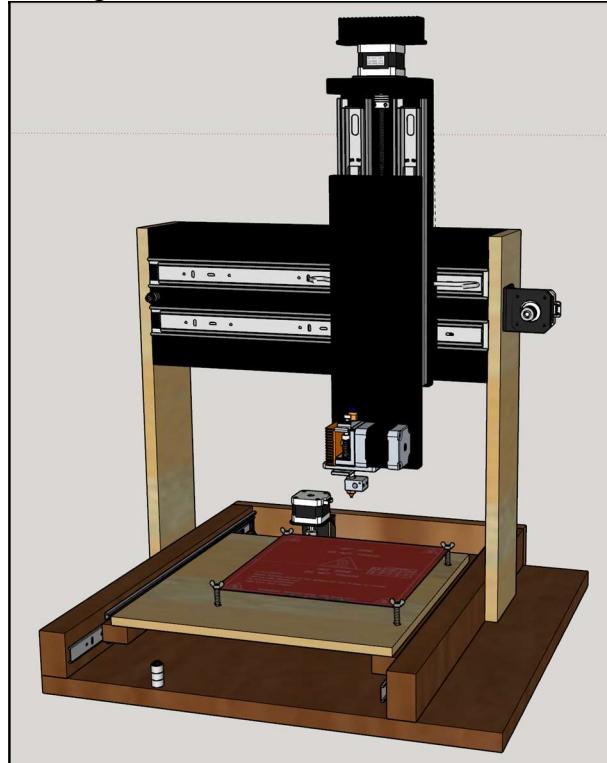
Figura 23 - Eixo Z – Extrusora detalhada



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A extrusora MK8 foi comprada manufaturada e sua estrutura está representada na Figura 23 apenas com objetivo didático. O filamento é tracionado pela parte central da extrusora que é tracionado pelo motor e é conduzido até a parte inferior, denominada HotEnd, que quando aquecido, derrete o filamento, nas coordenadas gerenciadas pelo firmware que opera o microcontrolador. O HotEnd utilizado nesse estudo é de 0.4 mm e conforme a velocidade que o motor da extrusora atua, o filamento sai mais fino ou mais grosso, podendo gerar um filamento de 0.1 mm até 0.4 mm. O dissipador de calor tem a função de resfriar o filamento, para que o mesmo derreta somente no HotEnd e não obstrua a passagem de filamento com o derretimento prematuro.

Figura 24 - Eixo Z montado no eixo X



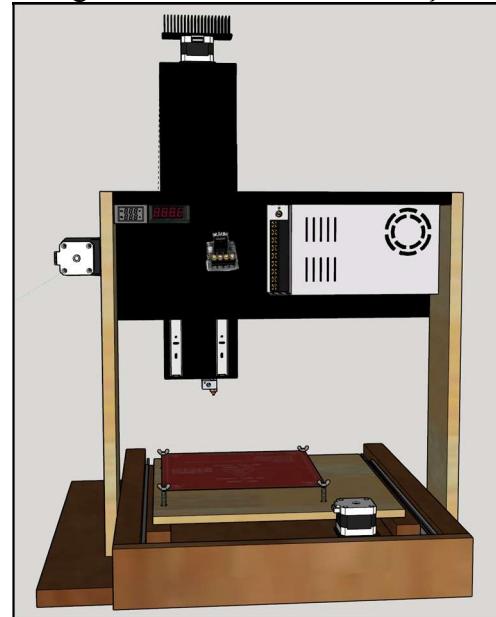
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Após finalização da montagem do eixo Z, a estrutura foi acoplada nas correias do eixo X da estrutura principal, como se observa na Figura 24.

### 3.3.1.4 Montagem dos componentes eletrônicos

Nesta etapa, todos os componentes eletrônicos foram instalados, incluindo a fonte de alimentação, placas Arduino (Arduino, 2024) e Ramps (RepRap Contributors, 2024), sensores de fim de curso, controladores dos motores de passo e visor de LCD, conforme Figura 25.

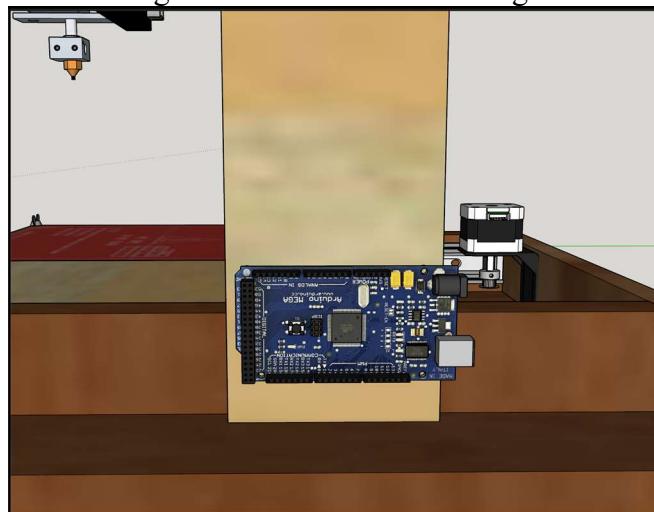
Figura 25 - Fonte de alimentação



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 25 conforme é ilustrado, se pode observar o posicionamento da fonte de alimentação de 12V de 30 amperes, do módulo de potência da mesa aquecida e dos medidores de corrente, amperagem e temperatura. Foram fixados com parafusos de 2.5 x 10 mm.

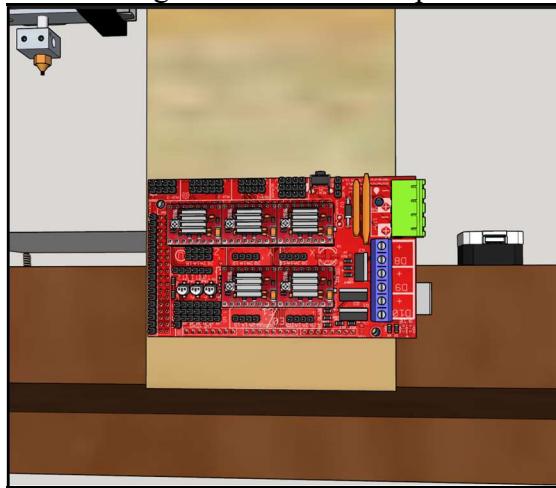
Figura 26 - Placa Arduino Mega



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A placa Arduino Mega 2560 (Arduino, 2024) foi fixada na base da coluna lateral direita, inicialmente fixado com parafusos isolados da placa, direto na madeira conforme é ilustrado na Figura 26.

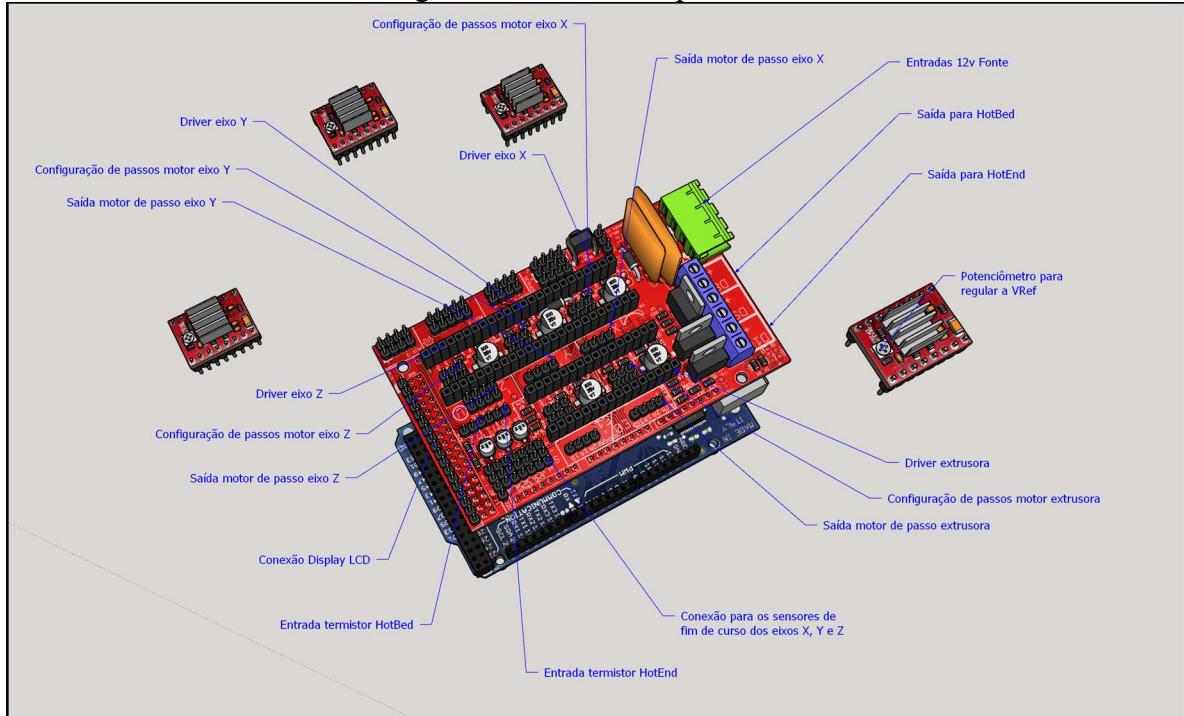
Figura 27 - Placa Ramps



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A placa Ramps (RepRap Contributors, 2024) versão 1.4 foi acoplada na placa Arduino Mega 2560 (Arduino, 2024), ficando sobreposta, como se ilustra na Figura 27.

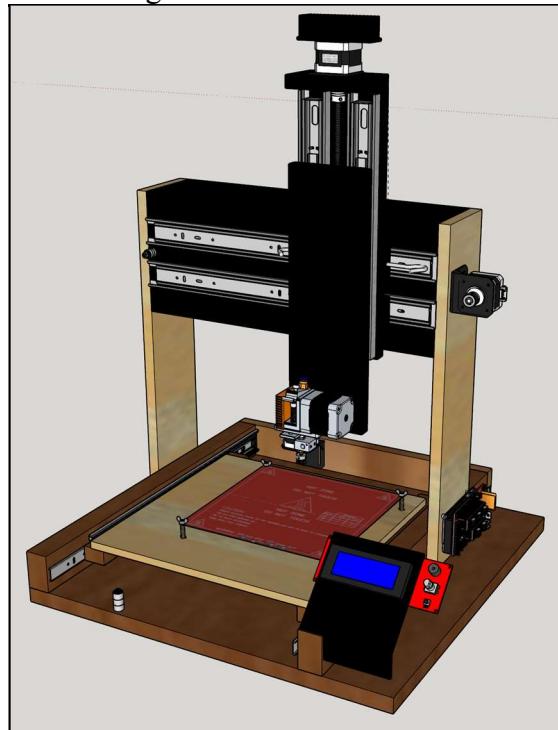
Figura 28 - Placa Ramps detalhe



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A descrição das principais conexões utilizadas no projeto é ilustrada na Figura 28, na qual a placa Ramps (RepRap Contributors, 2024) versão 1.4 é acoplada na placa do Arduino Mega 2560 e os controladores de motor de passo são acoplados na placa Ramps (RepRap Contributors, 2024).

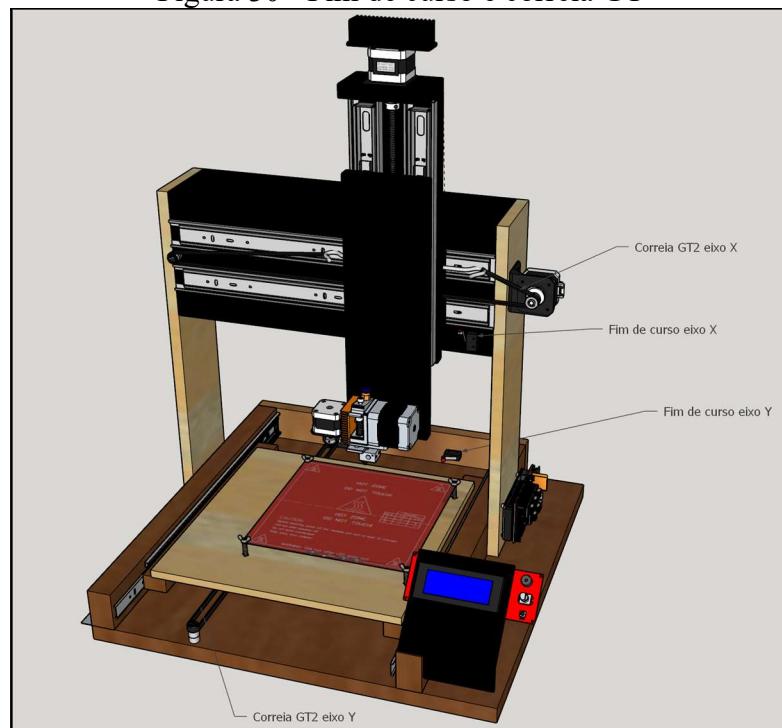
Figura 29 – Visor de LCD



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A montagem da estrutura do visor de LCD não demandou complexidade e foi fixado na madeira com parafusos, de acordo com ilustração na Figura 29. A placa do visor de LCD foi conectada na capa do visor com parafusos de gabinete de computadores antigos, devido a espessura reduzida e padrão de rosca ser específico para componentes eletrônicos.

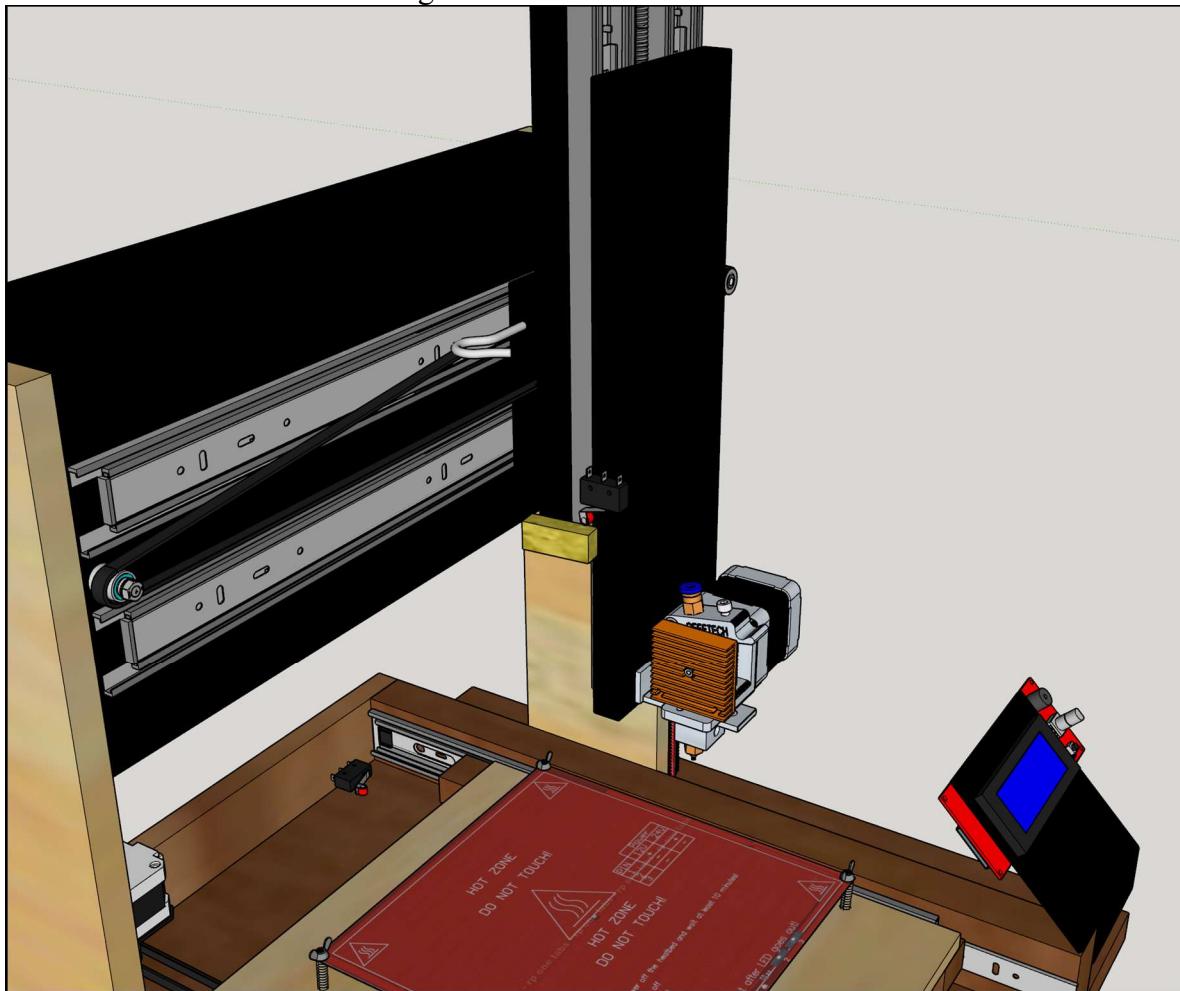
Figura 30 - Fim de curso e correia GT



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Os controles de fim de curso dos eixos X e Y, foram acoplados cada um em seu eixo, conforme é ilustrado na Figura 30. Foram fixados nas partes fixas da estrutura e tem como objetivo, serem acionados quando ocorre o fim de curso de um eixo. Foram fixados com parafusos e para atingir a altura, foram instalados espaçadores de plástico de 10 mm cada. As correias GT, foram tensionadas e fixadas com cinta plástica de nylon.

Figura 31 - Fim de curso eixo Z

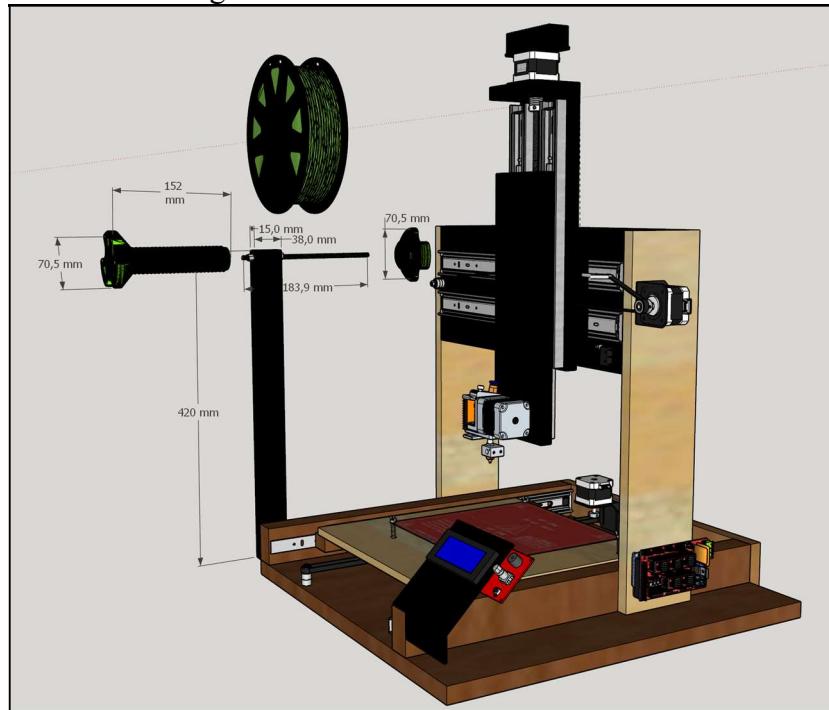


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O sensor de fim de curso do eixo Z é o mais complexo do sistema, pois realiza além da parada do eixo Z, deve estar regulado para parar o eixo aproximadamente a 0.75 mm do vidro que sobrepõe a mesa aquecida, como se observa na Figura 31. Ele difere dos demais, pois foi fixado em uma parte móvel, enquanto os outros estão posicionados em uma parte fixa. O padrão de 0.75 mm de espaço em relação ao bico da extrusora e o vidro são necessários para a correta aderência do filamento derretido no momento da impressão de alguma peça em 3D, em conjunto com o nivelamento dos quatro cantos da mesa aquecida, que ocorre através da regulagem através dos parafusos borboleta.

### 3.3.1.5 Montagem do alimentador de filamento

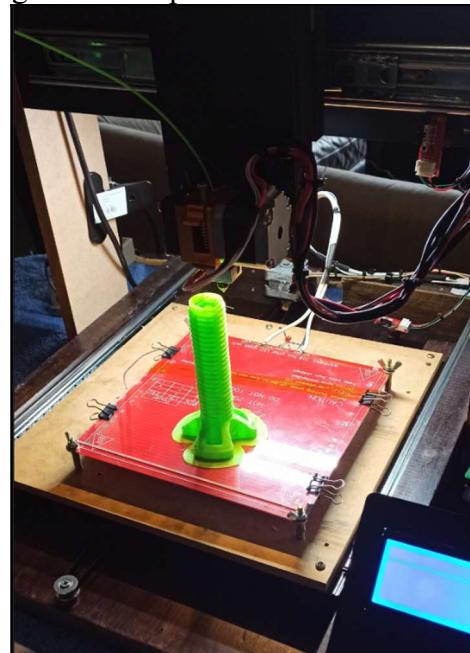
Figura 32 - Alimentador de filamento



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O alimentador de filamento foi acoplado a base de madeira para que o filamento seja disponibilizado para a impressora, sem ocorrer a formação de nós ou travamentos do rolo, conforme ilustração na Figura 32. Foi construído utilizando pedaços de cortes de MDF e com restos das barras rosadas utilizadas na construção do eixo Z.

Figura 33 - Suporte do rolo de filamento



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

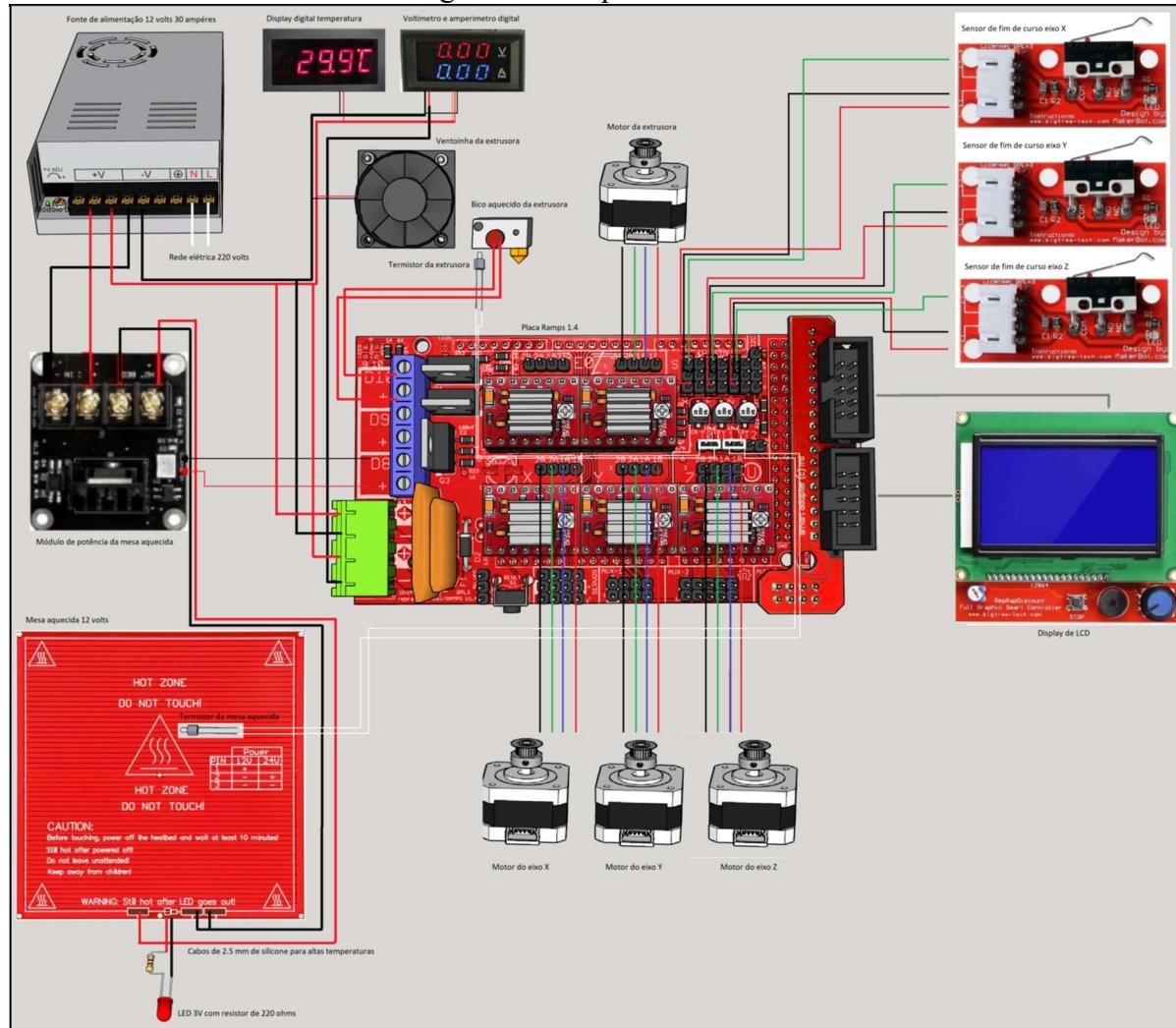
O suporte do rolo de filamento foi impresso pela própria impressora com o tipo de filamento PLA (Poliácido Láctico, 2024) na espessura de 1.75 milímetros. A escolha do material PLA se deu pelo fato desse tipo de filamento ser compatível com a temperatura da mesa e extrusora que o protótipo possui capacidade de imprimir. Essa peça garante que o rolo consiga operar sem travamentos e possui uma rosca invertida que possibilita fácil manutenção, conforme Figura 33.

Por fim, a estrutura física e mecânica da impressora é finalizada e próximo passo é a configuração inicial do firmware e ligação dos componentes eletrônicos com objetivo de deixar o protótipo operacional.

### 3.3.2 Técnicas e ferramentas utilizadas

O esquema elétrico de ligação da impressora, está disposto na Figura 34, na qual se pode destacar toda ligação dos componentes eletrônicos dos sensores, atuadores e fonte de energia.

Figura 34 - Esquema elétrico



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

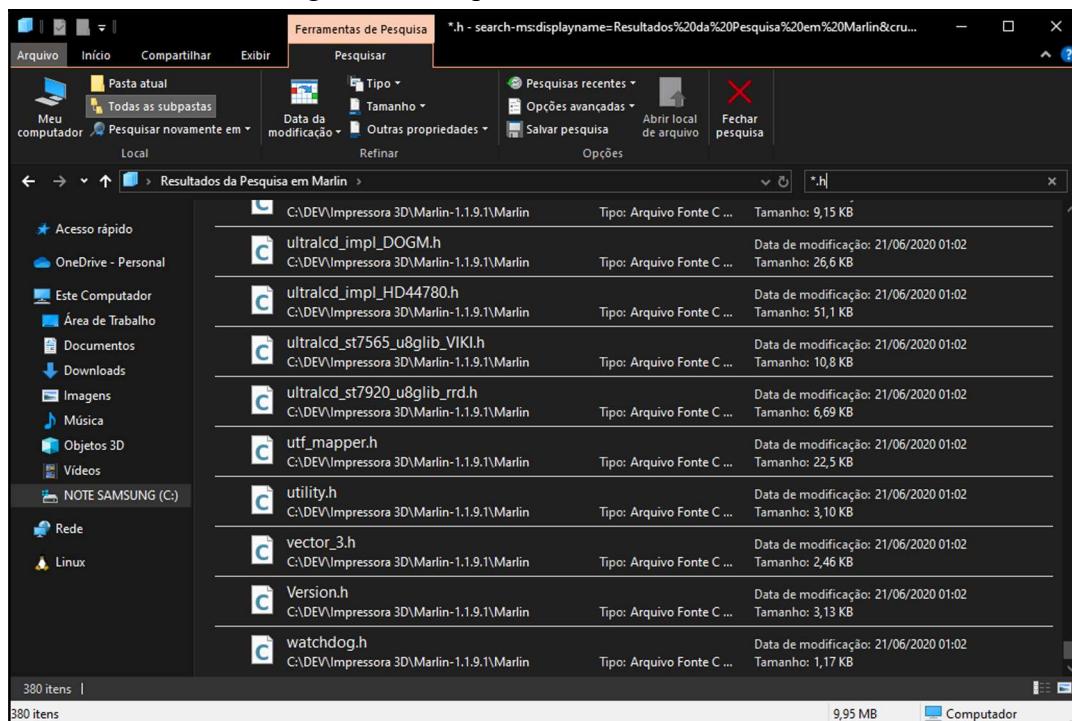
Os componentes foram conectados conforme o esquema de ligação e os cabos de energia tiveram suas pontas soldadas com estanho e na sequência foi realizado o acoplamento de terminais de ligação, para facilitar a instalação e manutenção. Durante essa etapa, o autor sugere não fixar os cabos com presilhas plásticas, pois durante os testes, serão necessários vários ajustes e reposicionamento dos cabos.

### 3.3.3 Instalação e configuração do firmware

O sistema foi montado em partes de forma incremental, sendo que a primeira parte consiste na configuração do firmware *Marlin* (Zalm, 2011) com as placas Arduino Mega 2560 (Arduino, 2024), Ramps (RepRap Contributors, 2024) versão 1.4 e visor de LCD. A placa Arduino Mega 2560 foi ligada direto na porta USB do computador para configuração.

Realizado o download do firmware *Marlin* (Marlin, 2020) versão 1.1.9.1 e do aplicativo da IDE Arduino (Arduino, 2021), versão 1.8.19. O arquivo com o código fonte do firmware utilizado nesse estudo foi descompactado na pasta C:\DEV\Impressora 3D\Marlin-1.1.9\Marlin. O Firmware *Marlin* possui vários arquivos em seu código fonte, totalizando 380 arquivos, conforme é ilustrado na Figura 35.

Figura 35 - Arquivos do firmware Marlin

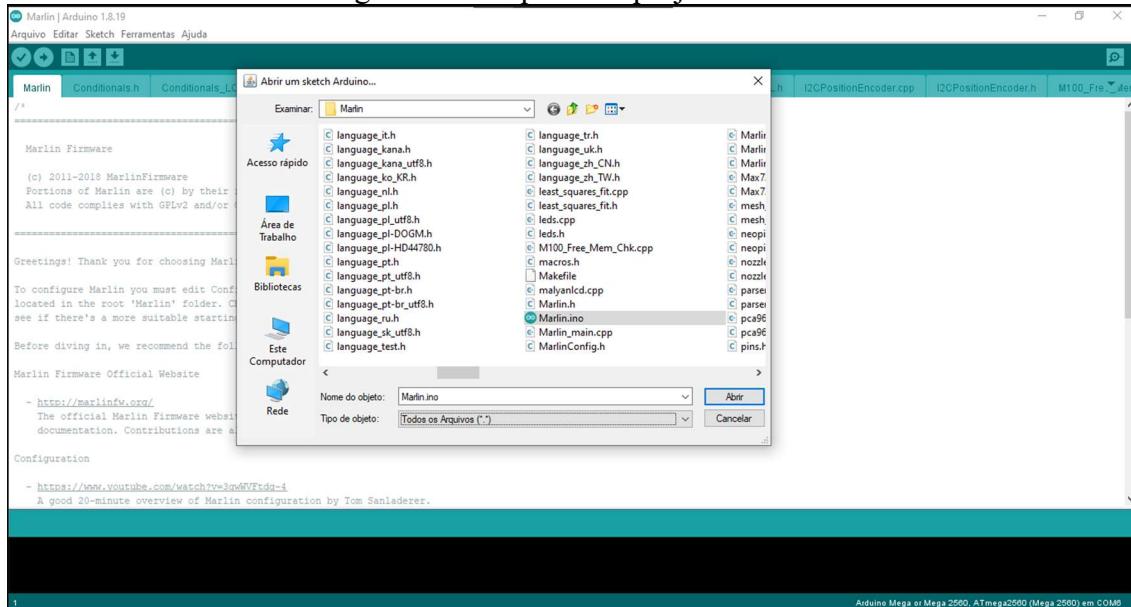


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A instalação do ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do Arduino versão 1.8.19 (Arduino, 2021) ocorreu de forma simples sem a necessidade de configurações específicas. O autor optou por uma versão anterior a atual, em virtude da versão 2.3.2 ser muito lenta no

computador que foi realizado o estudo. Após a conclusão da instalação do ambiente de desenvolvimento, foi aberto o arquivo principal do projeto do Firmware *Marlin*, denominado *Marlin.ino*, conforme é ilustrado na Figura 36.

Figura 36 - Arquivo do projeto Marlin



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O código fonte de todo firmware *Marlin* está escrito na linguagem C e escopo das alterações desse estudo foram realizados nos arquivos *configuration.h*, *\_bootscreen.h* e *configuration\_adv.h*. Os parâmetros principais de funcionamento estão no arquivo *configuration.h* e foram modificados conforme o Quadro 3. As alterações são compostas pela alteração de valores de variáveis e constantes no código fonte.

Quadro 3 - Configuração dos parâmetros do Firmware Marlin - *configuration.h*

Parâmetro	Valor	Descrição
#define STRING_CONFIG_H_AUTHOR	"(Jonas Fernando Schuh, 2024)"	Autor da configuração do firmware
#define SHOW_CUSTOM_BOOTSCREEN	descomentar	Habilita para mostrar o bitmap na tela de inicialização
#define BAUDRATE	115200	Esse parâmetro determina a velocidade de comunicação do computador com a impressora
#define CUSTOM_MACHINE_NAME	"Jonas F Schuh v1.5"	Parâmetro opcional para customizar o visor de LCD. Utilizado para versão de ajustes

#define MOTHERBOARD	BOARD_RAMPS_14_EFB	Define qual o tipo da placa eletrônica utilizada, no caso o modelo RAMPS 1.4 com saídas de alimentação para hotend, ventilador de exaustão e cama aquecida respectivamente
#define DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA	1.75	Configuração do diâmetro do filamento para cálculos volumétricos
#define TEMP_SENSOR_0	1 // 1: 100k thermistor - best choice for EPCOS 100k (4.7k pullup)	Define qual o tipo de termistor que será utilizado na extrusora E0
#define TEMP_SENSOR_BED	75 // 75: 100k Generic Silicon Heat Pad with NTC 100K MGB18-104F39050L32 thermistor	Define qual o tipo de termistor será utilizado no hotbed
//Ultimaker #define DEFAULT_Kp	25.32	Define o valor do controlador proporcional de ganho para Hotend. Observação: Valor gerado pelo auto tune
//Ultimaker #define DEFAULT_Ki	2.13	Define o valor do controlador integral para Hotend. Observação: Valor gerado pelo auto tune
//Ultimaker #define DEFAULT_Kd	75.18	Define o valor do controlador derivativo para Hotend. Observação: Valor gerado pelo auto tune
#define PIDTEMPBED	descomentar	Habilita o PID para Hotbed
#define MAX_BED_POWER	250	Limita o ciclo de trabalho da cama aquecida. 255 indica corrente total.
#define DEFAULT_bedKp	372.09	Define o valor do controlador proporcional de ganho para Hotbed. Observação: Valor gerado pelo auto tune
#define DEFAULT_bedKi	53.43	Define o valor do controlador integral para Hotbed. Observação: Valor gerado pelo auto tune
#define DEFAULT_bedKd	547.75	Define o valor do controlador derivativo para Hotbed. Observação: Valor gerado pelo auto tune

#define ENDSTOPPULLUPS	comentar	Desativa o pullup para todos os fins de curso para evitar um estado flutuante
#define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING	TRUE	Habilita para inverter a lógica da chave de fim de curso para a posição mínima em X
#define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING	TRUE	Habilita para inverter a lógica da chave de fim de curso para a posição mínima em Y
#define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING	TRUE	Habilita para inverter a lógica da chave de fim de curso para a posição mínima em Z
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT	{80, 80, 5100, 185.20}	Número de passos necessários em mm para respectivamente, X, Y, Z, E0
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE	{300, 300, 5, 25}	Define a velocidade máxima em mm/s para respectivamente X, Y, Z, E0
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION	{1000, 1000, 5, 10000}	Define a aceleração máxima em mm/s para respectivamente X, Y, Z, E0
#define DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION	300	Define a velocidade de aceleração dos eixos para viagem
#define Z_MIN_PROBE_USES_Z_MIN_ENDSTOP_PIN	comentado	Esta opção desabilita opção de sonda conectada ao pino de fim de curso Z Min
#define PROBE_MANUALLY	descomentado	Essa opção habilita o nivelamento de mesa manual
#define INVERT_X_DIR	TRUE	Inverte o sentido de rotação do motor de passo no eixo X
#define INVERT_Y_DIR	FALSE	Inverte o sentido de rotação do motor de passo no eixo Y
#define INVERT_Z_DIR	TRUE	Inverte o sentido de rotação do motor de passo no eixo Z
#define X_BED_SIZE	175	Define o tamanho da cama de impressão no eixo X
#define Y_BED_SIZE	175	Define o tamanho da cama de impressão no eixo Y
#define MESH_BED_LEVELING	descomentado	Habilita o nivelamento manual da mesa de impressão em formato de grade

#define GRID_MAX_POINTS_X	2	Define o número de pontos que serão testados no nivelamento da mesa para o eixo X
#define LCD_BED_LEVELING	descomentado	Habilita o nivelamento de mesa pelo visor de LCD através de menu
#define EEPROM_SETTINGS	descomentado	Habilita alterar parâmetros do firmware direto no visor de LCD e gravar na EEPROM do microcontrolador
#define PREHEAT_1_TEMP_BED	60	Valor de temperatura padrão da mesa para PLA
#define PREHEAT_1_FAN_SPEED	0	Velocidade padrão do ventilador para PLA. Nesse caso está zero porque o ventilador foi ligado direto na fonte de alimentação para ficar sempre ligado.
#define PREHEAT_2_TEMP_HOTEND	210	Valor da temperatura padrão do hotend para ABS
#define PREHEAT_2_TEMP_BED	78	Valor da temperatura padrão da hotbed para ABS. Original seria 110, mas essa configuração de mesa não consegue atingir esse valor.
#define PREHEAT_2_FAN_SPEED	0	Velocidade padrão do ventilador para ABS. Nesse caso está zero porque o ventilador foi ligado direto na fonte de alimentação para ficar sempre ligado.
#define PRINTCOUNTER	descomentado	Parâmetro opcional, exibe estatísticas de quantas impressões foram realizadas na impressora.
#define LCD_LANGUAGE	pt-br	Define o idioma a ser apresentado no visor de LCD
#define SDSUPPORT	descomentado	Habilita o suporte a leitura de cartão SD direto no visor de LCD
#define REPRAP_DISCOUNT_FULL_GRAPHIC_SMART_CONTROLLER	descomentado	Seleciona o controlador gráfico do visor de LCD

Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O arquivo do código fonte do arquivo configuration\_adv.h contém as configurações avançadas e mais específicas do firmware. Durante o desenvolvimento do protótipo, foram

realizadas várias configurações, porém a versão final após os testes e ajustes resultou em apenas uma alteração que está disposta no Quadro 4.

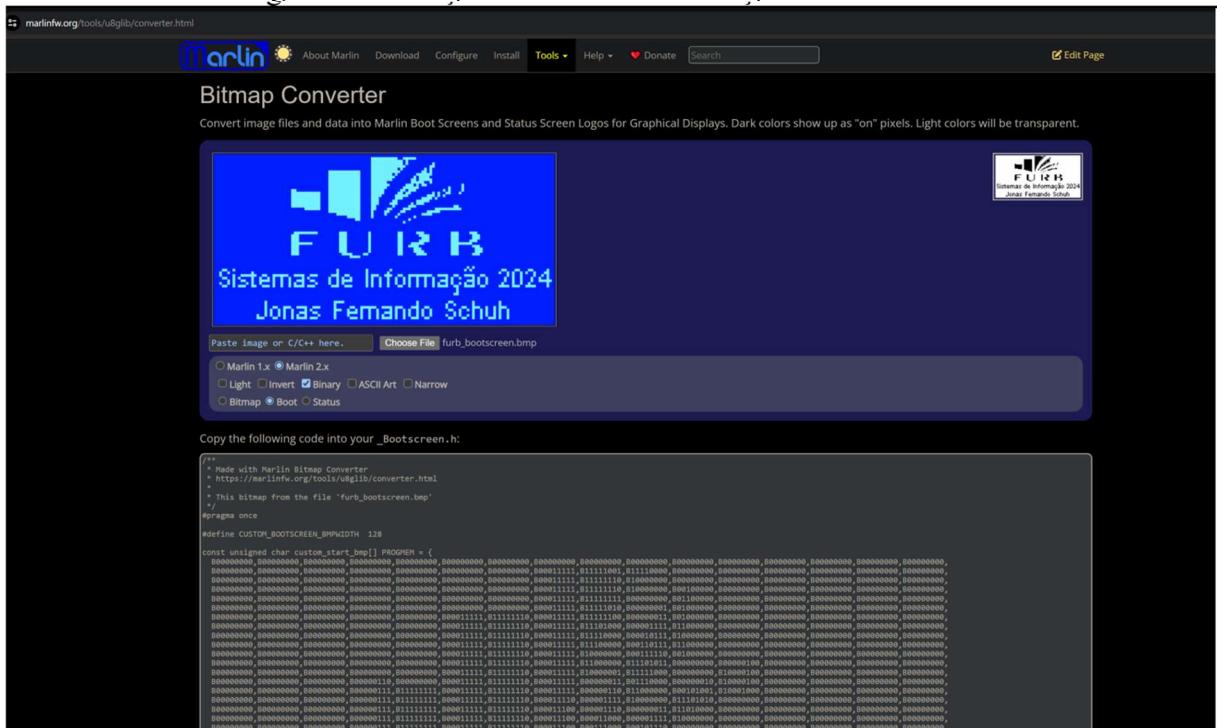
Quadro 4 - Configuração do parâmetro do Firmware Marlin – configuration\_adv.h

Parâmetro	Valor	Descrição
#define THERMAL_PROTECTION_BED_HYSTeresis	4	Parâmetro da proteção térmica por software. Se houver variação de 4 graus Célsius, o software para automaticamente

Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Entre as funcionalidades do firmware, está a customização da tela de inicialização no visor de LCD e acontece pela inclusão do arquivo `_Bootscreen.h` na pasta principal do firmware *Marlin*, no caso desse estudo, foi incluído na pasta `C:\DEV\Impressora 3D\Marlin-1.1.9\Marlin`.

Figura 37 - Criação de tela de inicialização do visor LCD

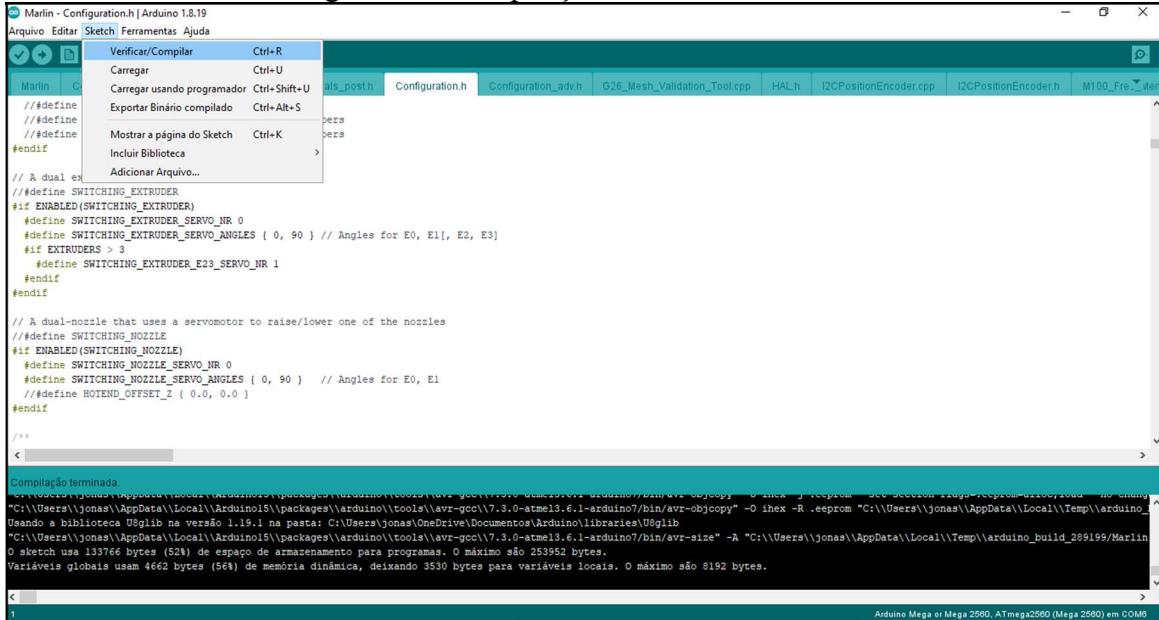


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Esse arquivo é gerado automaticamente, quando se acessa a página do firmware *Marlin* (Zalm, 2011), opção Tools > Bitmap Converter, conforme Figura 37 , onde é selecionado um arquivo bitmap em preto e branco no formato de 128 x 64 pixels e após carregar o arquivo, a página gera um arquivo para download com o nome *\_Bootscreen.h*. Esse arquivo deve ser incluído na pasta na qual estão os arquivos de código fonte do firmware *Marlin*.

Após todos os arquivos alterados, se torna necessário realizar a compilação do firmware, através da opção Sketch > Verificar/Compilar, conforme é ilustrado na Figura 38.

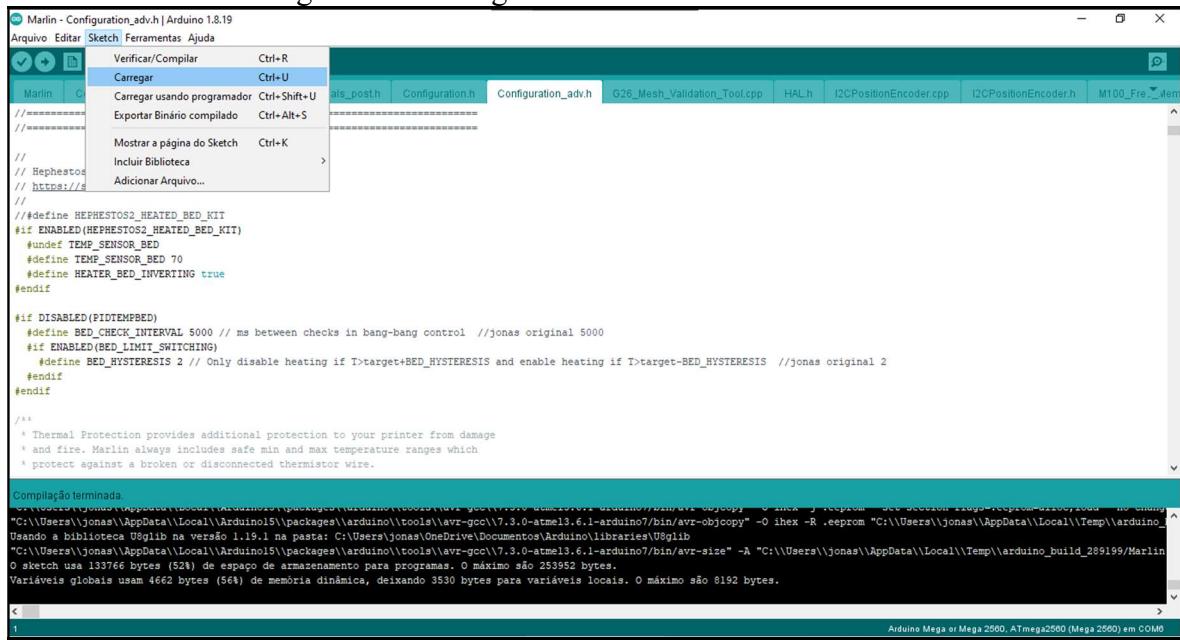
Figura 38 - Compilação do Firmware Marlin



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Por fim, após todo código fonte do firmware estar compilado, foi realizado o carregamento do firmware na memória do microcontrolador da placa Arduino Mega 2560, através da opção Sketch > Carregar, conforme é ilustrado na Figura 39.

Figura 39 - Carregamento do firmware no Arduino



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Após o carregamento do firmware no microcontrolador, o mesmo é reiniciado de forma automática e uma tela de inicialização é apresentada toda vez que o microcontrolador é reiniciado, onde é exibida por aproximadamente 3 segundos, como se observa na Figura 40.

Figura 40 - Tela de inicialização no visor de LCD



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

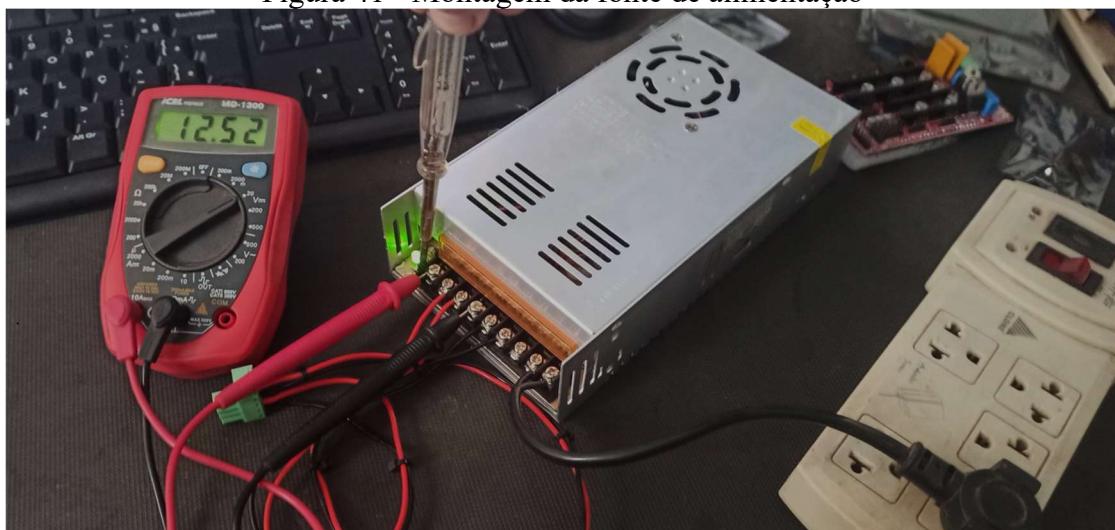
Após a placa Arduino e o visor LCD estarem funcionais, próximo passo é a configuração da fonte de alimentação de todo sistema.

### 3.3.4 Configuração da fonte de alimentação e controladores dos motores de passo

O primeiro passo para configuração da fonte de alimentação, conforme é ilustrado na Figura 41, é a verificação de seleção de voltagem da fonte, que se encontra na lateral da estrutura da fonte e deve estar selecionada na posição 220 volts.

Os cabos de energia para rede 220 volts, foram utilizados na espessura de 1.5 mm, conectado nos terminais L e N que respectivamente apresentam Fase e Neutro. A conexão de aterramento não foi utilizada, em virtude que no local onde foi montado o protótipo, não existe fiação de aterramento, mas o autor recomenda a instalação.

Figura 41 - Montagem da fonte de alimentação

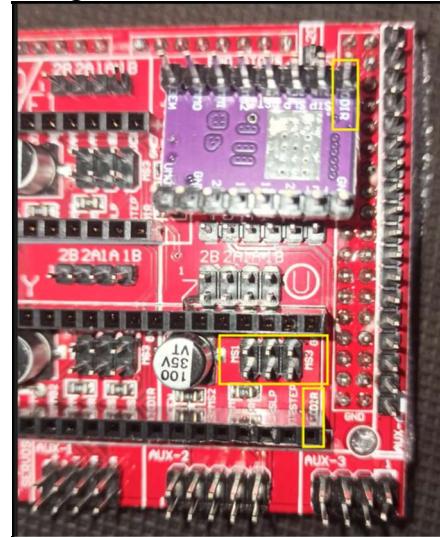


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Os cabos de saída 12 volts que vão para a placa Ramps (RepRap Contributors, 2024), foram utilizados na cor padrão vermelho para o polo positivo e preto para o polo negativo, na espessura 1.5 mm, como se observa na Figura 41. A regulagem da voltagem de saída da fonte

foi configurada em aproximadamente 12.5 volts através de regulagem de um pequeno seletor e ocorreu por meio de uma chave de fenda pequena.

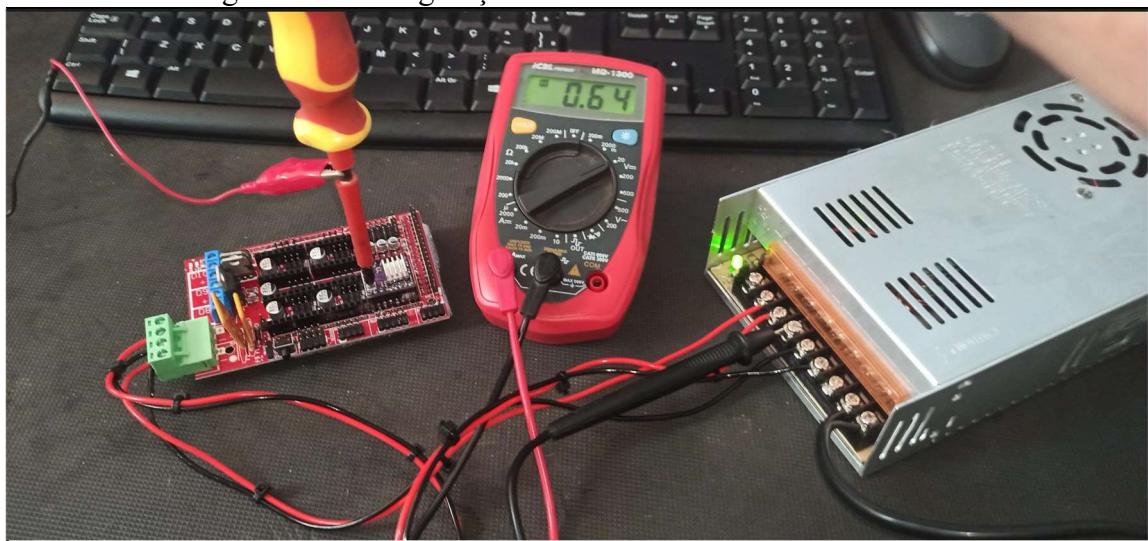
Figura 42 - Montagem dos controladores de motores de passo



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O encaixe dos controladores dos motores de passo exige atenção na correta colocação da posição em relação a placa Ramps. Conforme é ilustrado na Figura 42, se pode observar que na parte inferior do controlador está escrito o pino “DIR” e na placa Ramps também existe essa inscrição, onde deve ser fixado dessa forma.

Figura 43 - Configuração valor de referência no controlador



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Após encaixe do controlador de motor de passo, se tornou necessário a configuração do valor da voltagem de referência (VREF) para cada eixo de acordo com a especificação de cada motor de passo utilizado. O valor de referência é uma regulagem que limita a corrente de energia que o controlador irá liberar para o motor de passo.

A configuração do VREF se ocorre através de uma pequena regulagem que se encontra sobre o controlador de motor de passo de cada eixo e pode ser acessado com uma chave Philips, de preferência com isolamento emborrachado, em destaque na Figura 43.

Para medir a tensão atual do VREF, se deve utilizar um multímetro regulado para tensão de corrente contínua. A ponta de teste negativa do multímetro deve ser conectada no terminal negativo da fonte e o ponta de teste positiva do multímetro deve ser conectada direto no potenciômetro do controlador de motor de passo. Se recomenda utilizar garras de jacaré para conectar a ponta de teste na chave Philips para ficar mais prático e seguro. A ponta da chave Philips por ser de metal, porém não pode encostar em nenhum dos terminais do controlador do motor de passo porque pode ocasionar um curto-circuito, resultado em danos no componente e nas demais placas.

Após essa conexão realizada, a fonte de alimentação é ligada e se realiza a medição e ajuste da tensão que está sendo fornecida para o controlador do motor de passo.

Os motores utilizados no protótipo são reciclados e retirados de impressoras de sucata da marca EPSON. Após pesquisa na internet, não foi possível encontrar esquema eletrônico específico desses motores, apenas poucas informações genéricas, como voltagem de operação que varia de 6 a 42V e a informação mais importante, quantos amperes opera o motor. A etiqueta do motor do eixo Z, contém escrito somente Epson EM-257, sem especificação de modelo específico.

Os motores do eixo X e Y, contém apenas a inscrição Epson EM-267, porém não se encontrou nenhum esquema eletrônico na internet. Se utilizou o padrão recomendado para motores NEMA 17 (Motion King, 2024), com esquema elétrico do fabricante MotionKing que possui corrente por fase de 1.7 A. O motor da extrusora se trata do motor NEMA 17 modelo HS4401, do fabricante MotionKing que seguiu o mesmo padrão de configuração dos eixos X e Y.

O controlador de motor de passo utilizado no projeto é o A4988 (Allegro, [2014?]), que em sua especificação técnica, pode controlar motores de até 35V e 2A por bobina. Diante desse cenário, se optou pela configuração inicial para metade da amperagem máxima que cada motor suporta, em virtude de prolongar a vida útil do motor e evitar aquecimento, considerando que a impressora 3D não irá precisar utilizar todo torque disponível do motor.

O motor do eixo Z, teve seu VREF configurado em 0.30 A e os motores dos eixos X, Y e extrusora, configurados com 0.45 A. Nos primeiros testes, se utilizou a tensão padrão que vem setada no driver que é de 0.75 A, porém durante os primeiros testes, se constatou que os

motores aqueceram demais, e no caso do eixo Z, teve a queima de vários controladores de motor de passo, até chegar nesse valor de operação de 0.30 A que se tornou a configuração estável.

Outra questão muito importante é a configuração dos passos que controlador irá operar, representado em cada eixo pelos pinos MS1 a MS3, destacados na Figura 44.

Figura 44 - Resolução de Micro passo driver A4988

Resolução Micro-passo	MS3	MS2	MS1
Passo completo	0	0	0
meio passo	0	0	1
1/4 passo	0	1	0
1/8 passo	0	1	1
1/16 passo	1	1	1

Fonte: Murta (2022).

Os controladores de motor de passo mais populares para placas Ramps (RepRap Contributors, 2024) são os modelos A4988 e DRV8825. Cada um possui tabelas de resolução de micro passos específica. Aqui nessa seção, será abortado apenas a configuração do modelo A4988. Essa configuração de micro passos amplia a resolução da impressora, por exemplo, se o ângulo de passo para um motor é 1.8 graus a cada passo e total passos para provocar uma revolução é de 200 passos, então se o driver estiver configurado para 1/16 passo, significa que para o motor mover 1.8 graus, terá que efetuar 16 passos.

Outro ponto a se observar, se trata da questão que conforme maior o número de passos, menor o torque do motor e no caso desse estudo, como a impressora 3D exige precisão e não força essa é a configuração mais adequada. A configuração ocorreu através de combinação de jumpers, ilustrados na Figura 42 e foram todos configurados na resolução máxima do controlador que é 1/16 passo. Conforme ilustrado na Figura 44, o número 0 representa aberto e o número 1 representa fechado, ou seja, com o jumper inserido, representa 1. Os pinos MS1, MS2 e MS3 ilustrados na Figura 44, receberam a adição de jumpers de conexão. Essa configuração foi adotada para os motores dos eixos X, Y, Z e extrusora.

### 3.3.5 Configuração da mesa aquecida

A montagem da mesa aquecida se divide em duas partes, a parte frontal e traseira. A parte frontal consiste na configuração de voltagem que a placa irá operar, conforme imagem da Figura 45, que deverá ser compatível com a fonte de 12 volts do protótipo. O cabo positivo de energia foi soldado no pino 1 da mesa e o cabo negativo nos pinos 2 e 3. Também foi soldado um LED na mesa, ligado a um resistor de 220 ohms para operar em 12 volts.

Figura 45 - Montagem da mesa aquecida – parte frontal



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Os cabos de energia da mesa devem suportar altas temperaturas, já que a mesa desse projeto pode chegar até 80 graus. A especificação do cabo utilizado é de silicone para até 220 graus célsius, na espessura de 2.5 mm, em virtude de a mesa utilizar até 11 A para aquecer. O jumper do pino 2 e 3 do polo positivo deverá ser também da espessura de 2.5 mm.

Figura 46 - Montagem da mesa aquecida – parte traseira

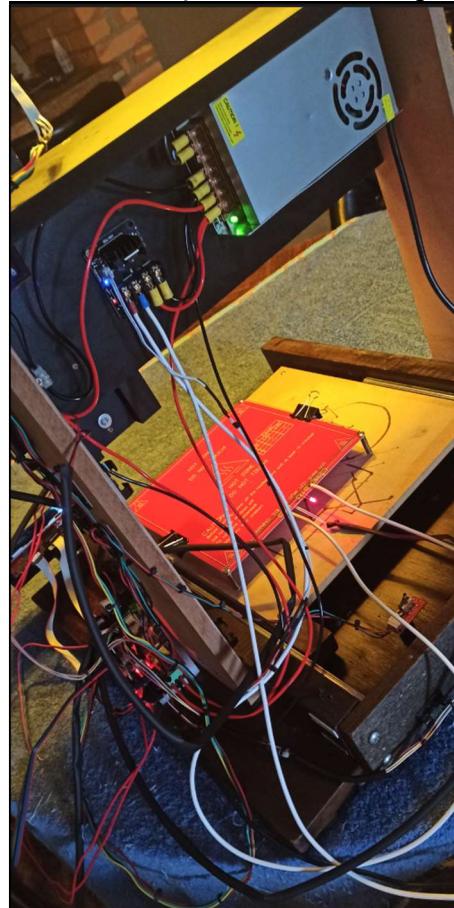


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A parte de traseira da mesa aquecida consiste apenas na instalação do sensor de temperatura conforme se observa na Figura 46. Na primeira instalação, se optou pelo menor custo, utilizando silicone acético para altas temperaturas, encontrado facilmente em lojas de ferragens, porém não se demonstrou eficaz. Se optou então pelo uso de fita Kapton, uma fita

especial composta de poliamida para altas temperaturas acima de 180 graus, onde a fixação do sensor foi rápida em bem-sucedida.

Figura 47 - Instalação do módulo de potência



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Todos os cabos de alimentação de energia do projeto foram soldados e em suas pontas, utilizado terminais de conexão, conforme Figura 47.

Figura 48 - Detalhe do módulo de potência



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A escolha da utilização de um módulo de potência separado da placa Ramps (RepRap Contributors, 2024) ocorreu em virtude de relatos em blogs, que a placa esquenta demais devido à alta corrente consumida pela mesa aquecida e pelo fato de a qualidade dos componentes ser superior. O componente Mosfet utilizado é o modelo 210A HA210N06 suporta corrente máxima de 25A e tensão de 12 a 24 volts, ou seja, mais que suficiente para a demanda de 11A e 12 volts da mesa aquecida do protótipo.

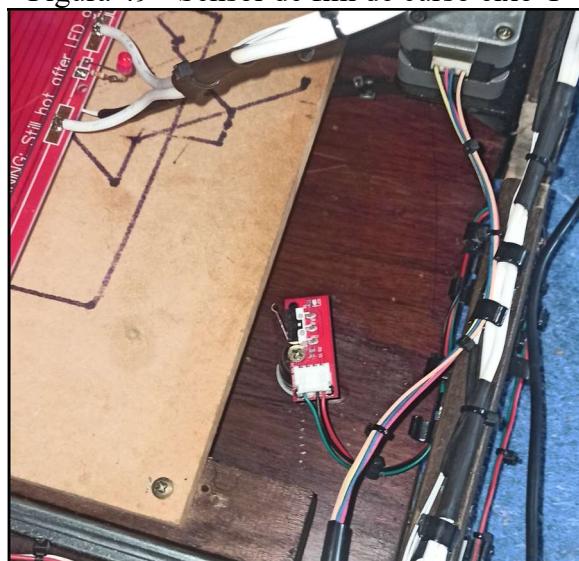
Na Figura 48, se pode observar a ligação do módulo de potência, que na entrada recebe o cabo positivo e negativo da fonte de 12 volts na espessura de 2.5 mm e na saída cabos de silicone de 2.5 mm que vão para a mesa aquecida, e por fim, o cabo do acionador, que está conectado a saída D8 da placa Ramps (RepRap Contributors, 2024), que é a saída para a mesa aquecida, que nessa configuração, serve apenas para acionamento de uma fonte de potência auxiliar.

Esse módulo de potência já vem com dissipador de calor ativo que evita o superaquecimento do componente, devido ao longo tempo de trabalho de uma impressão 3D que pode levar várias horas.

### 3.3.6 Configuração dos sensores de fim de curso

Os sensores de fim de curso são fundamentais para a impressora fazer o homming, ou seja, quando recebe o comando para ir para a origem, se torna necessário o uso de sensores em cada eixo para o firmware identificar os pontos de iniciais. Os sensores de fim de curso, conforme Figura 49, servem para esse propósito e nesse projeto cada eixo teve seu sensor instalado em pontos estratégicos.

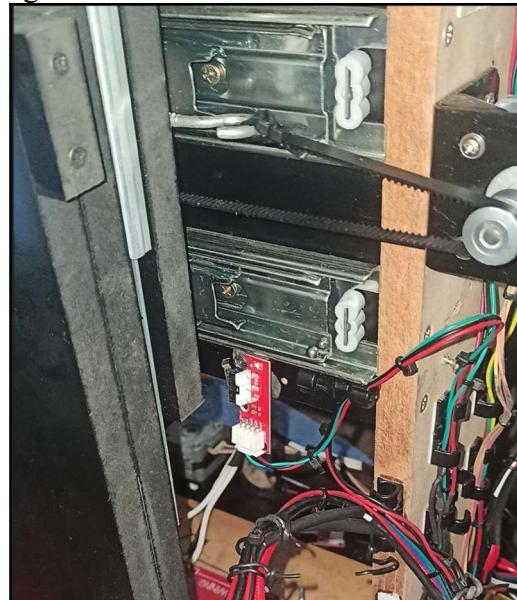
Figura 49 - Sensor de fim de curso eixo Y



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 49, se observa o sensor de fim de curso do eixo Y, que foi fixado direto na base da impressora com espaçadores para ficar na altura da base da mesa aquecida.

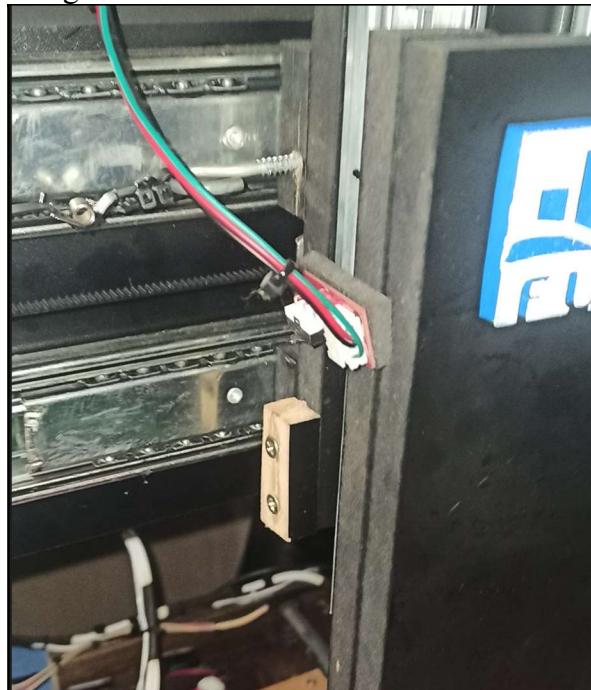
Figura 50 - Sensor de fim de curso eixo X



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O sensor de fim de curso do eixo X, conforme ilustrado na Figura 50, foi instalado próximo as correias e é acionado com o carro de impressão do eixo Z. Os cabos lógicos desse sensor tiveram que ser condicionados para não receber interferência por meio de indução dos cabos de energia.

Figura 51 - Sensor de fim de curso eixo Z

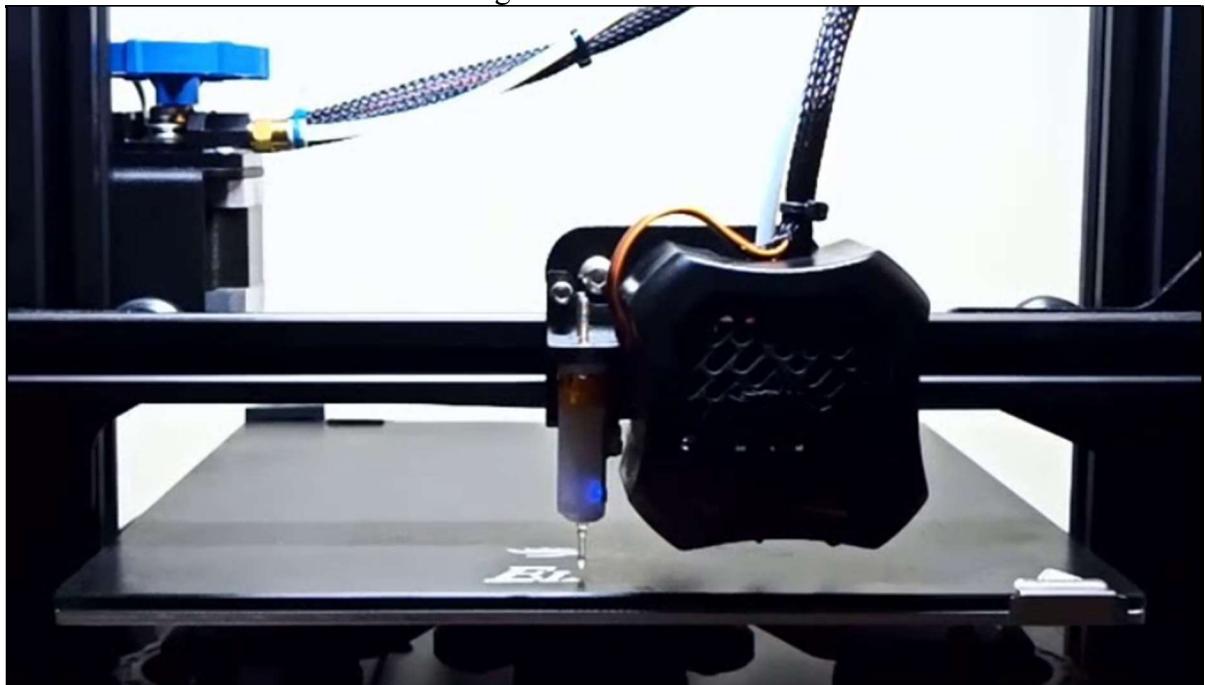


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O sensor de fim de curso do eixo Z é o sensor mais complexo e mais importante do protótipo. Como se observa na Figura 51, foi fixado na parte móvel do eixo e seu acionamento ocorre quando a cabeça de impressão está totalmente alinhada com a mesa aquecida. Possui regulagem para ficar aproximadamente 0.75 mm do vidro da mesa aquecida e é muito importante, para toda vez que a impressora é preparada para a impressão, a mesma inicie na posição correta para a extrusão do filamento aderir efetivamente na superfície da cama aquecida.

O autor entende como uma inovação o posicionamento do sensor nesse local, pois existem acessórios de nivelamento automático no mercado que servem exatamente para esse fim, como exemplo o dispositivo BLTouch, ilustrado na Figura 52.

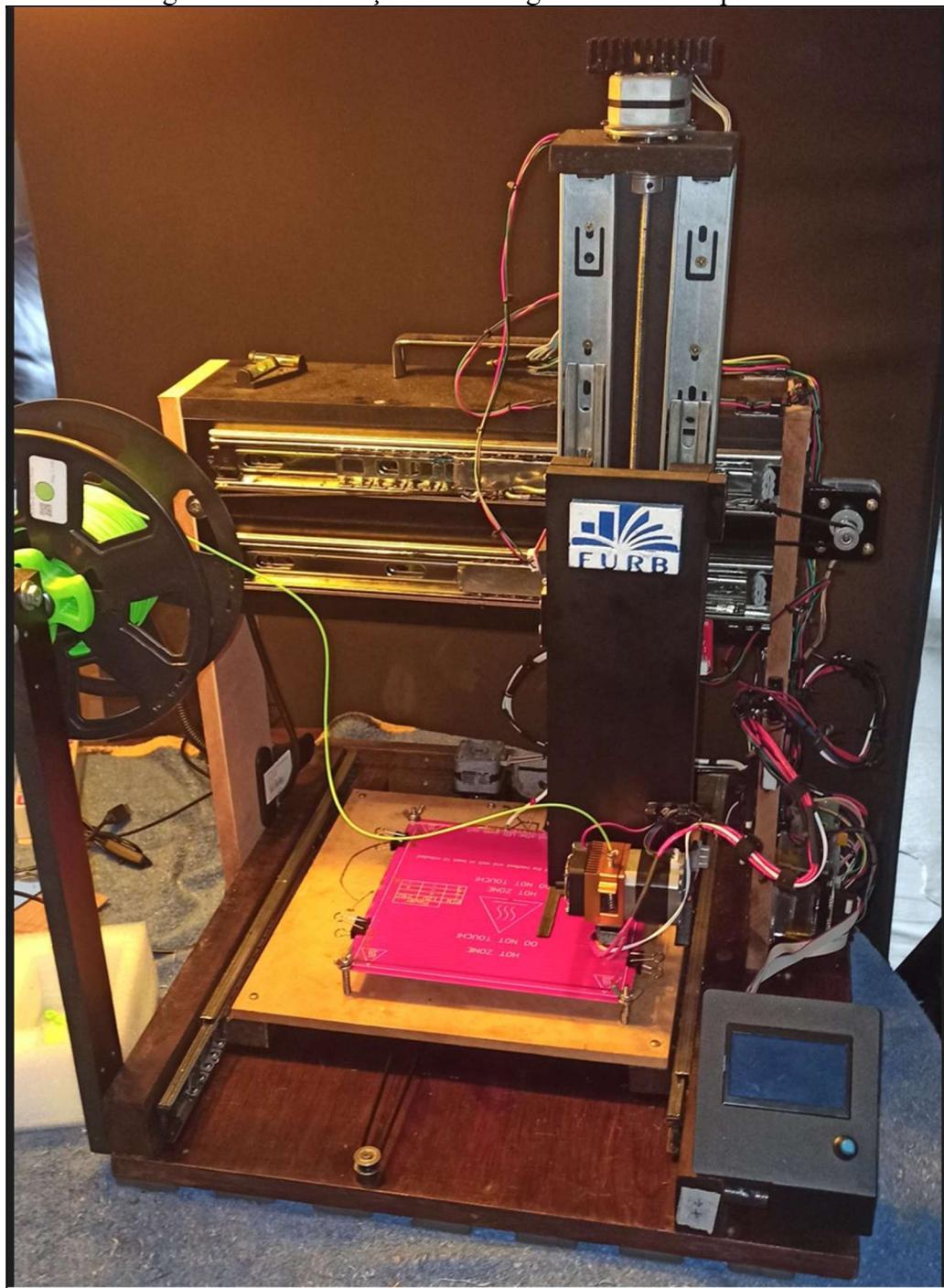
Figura 52 - BLTouch



Fonte: Risco-Castillo (2023).

Esse sensor é composto por um servo motor, que no momento do alinhamento da mesa, é acionado para medir a distância e a inclinação do bico de impressão em relação a mesa aquecida, em vários pontos da mesa, com objetivo de auxiliar o nivelamento. Uma informação importante, é que a utilização desses sensores, não deixa opcional o nivelamento manual da mesa aquecida. Essa funcionalidade se pode entender como uma facilidade que ocorre no momento de realizar o homming, que se entende como um comando para os eixos X, Y e Z retornarem ao seu ponto inicial de origem.

Figura 53 - Finalização da montagem física da impressora



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Por fim, na Figura 53 se pode visualizar a finalização da montagem da impressora com todas as peças instaladas e conectadas. A próxima fase, será a etapa de testes com configuração via software e calibração dos componentes.

Os comandos de movimentação dos eixos e pré-aquecimento da mesa aquecida e extrusora podem ser feitos via visor LCD ou via software. Nessa etapa, foram utilizadas as opções do próprio firmware via visor de LCD pela facilidade de operação durante os testes repetitivos.

### 3.3.7 Calibração do eixo Z

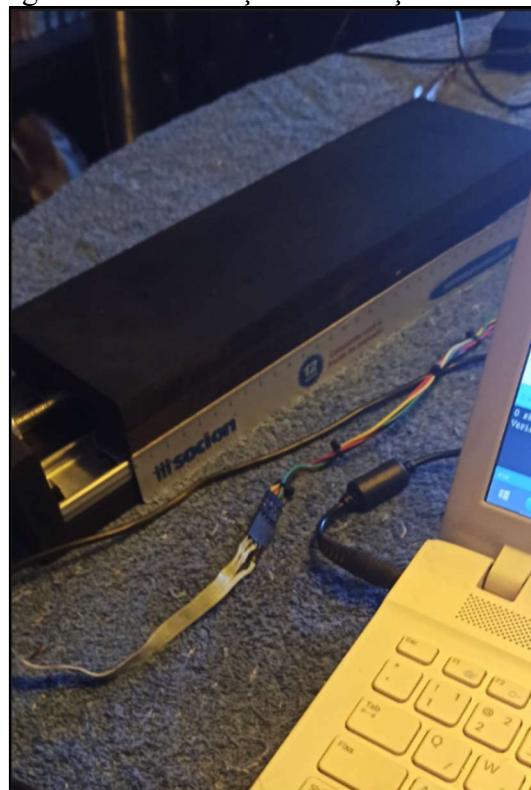
Figura 54 - Calibração do motor do eixo Z



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Os componentes da impressora tiveram que ser montados e desmontados várias vezes em virtude de manutenção e ajustes. Um exemplo dessa situação pode ser observado na Figura 54, com a calibração e ajustes do avanço do eixo Z que é o mais complexo do sistema. Com o firmware em estado operacional, nessa etapa se realizou os ajustes do avanço do curso do motor, teste de início de fim de curso com objetivo de evitar travamentos da barra roscada em virtude do ângulo de operação.

Figura 55 - Calibração de avanço do eixo Z



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Nessa etapa também se ajustou a movimentação do curso do motor através das opções do visor LCD. A técnica consiste em emitir comando para o eixo andar 10 mm e o resultado é comparado com uma régua, com objetivo de alinhar os valores, conforme se observa na Figura 55. Quando houver diferença de valores entre o software e o hardware, o parâmetro `DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT` é ajustado no código fonte e o firmware deve ser recompilado e recarregado no microcontrolador. Por exemplo, o parâmetro vem com uma configuração inicial `{80, 80, 80, 80}` e define o número de passos necessários em milímetros para respectivamente os eixos X, Y, Z e E0 (Extrusora). Após a emissão de comando de movimentação via software, o resultado de movimentação é comparado de maneira física e o parâmetro vai sendo ajustado através da regra de três proporcional. Um exemplo é testar se com valor 80 andou 0.2 mm, é alterado o valor para 400 e realizado nova rodada, até o chegar no ponto que ao executar comando via software para o eixo andar 10 mm, fisicamente o eixo ande 10 mm.

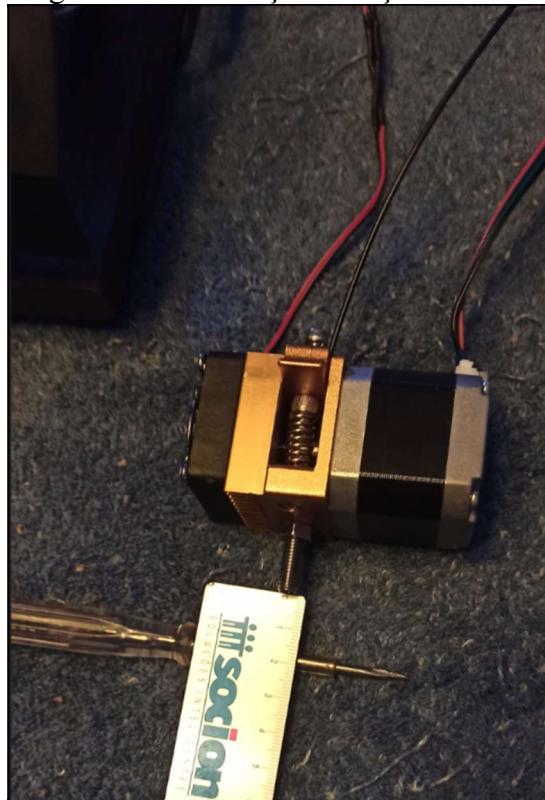
Após esse alinhamento, se recomenda testar com variações maiores, como 50 ou 70 mm, em virtude da precisão e arredondamento. O comando para 10 mm pode estar correto e alinhado, mas pode ocorrer variação em tamanhos maiores e ajuste é necessário em todos os eixos, porque garante que se via software se mandar imprimir um objeto de 20 mm x 20 mm x 20 mm, será com essa dimensão que a impressora irá gerar a peça de forma física. Essa técnica se aplica apenas nos eixos X, Y e Z. A calibração da extrusora é abordada com uma técnica diferente.

### 3.3.8 Calibração da extrusora e eixos X, Y e Z

A calibração de passos do motor da extrusora, tem por objetivo controlar o fluxo de filamento que será tracionado durante a impressão. É obrigatório para o correto funcionamento, que se o software enviar 10 mm de filamento, a extrusora tem que tracionar exatamente essa quantidade. Se tracionar menos ou mais filamento que o previsto, poderá ocorrer deformações na peça de vários tipos, como vazamento de filamento derretido, entupimento de bico de impressão entre outras situações.

A técnica é similar a dos eixos X, Y e Z, porém a extrusora deverá ser desmontada, retirando o Hotend e bico de impressão, para medir o fluxo com o filamento sem resistência. Após estar desmontada, conforme Figura 56, é enviado via software um comando de tracionamento de 10 mm e o resultado deverá ser analisado e se necessário efetuar o ajuste no parâmetro `DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT` até chegar no alinhamento desejado.

Figura 56 - Calibração avanço extrusora



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Após esse primeiro ajuste, se deve realizar um novo comando de 50 a 70 mm para analisar o resultado até chegar no alinhamento desejado.

### 3.3.9 Calibração do aquecimento da extrusora e mesa aquecida

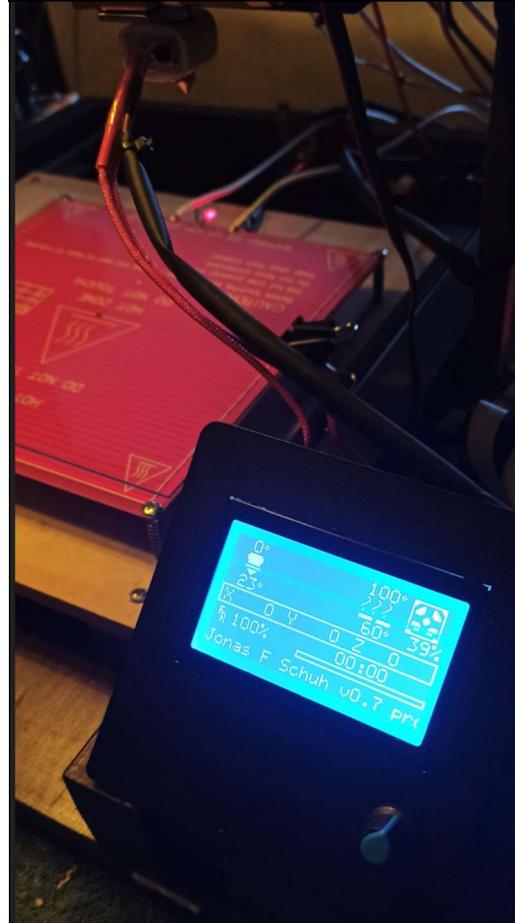
A mesa aquecida (Hotbed) tem por objetivo manter a peça que está sendo impressa fixada através de calor em uma superfície plana. A mesa utilizada nesse protótipo é uma mesa MK2, composta de fenolite e basicamente é uma resistência que quando recebe energia, começa aquecer devido ao fluxo de corrente que circula em suas trilhas.

O controle de temperatura é feito por meio de um sensor de temperatura instalado embaixo da placa que controla a temperatura de maneira similar a um termostato. Por exemplo, se no plano de impressão, está configurado para mesa operar a 60 graus, a resistência será ativada até atingir 60 graus e depois será desligada, em um processo cíclico.

Quando o sensor de temperatura efetuar a leitura que está em 59 graus, o firmware torna a ligar a resistência até efetuar outra leitura e chegar novamente em 60 graus. Um ponto importante a observar é que o firmware teve o parâmetro THERMAL\_PROTECTION\_BED\_HYSTESIS alterado de 2 para 4 graus de variação em virtude de não acionar a proteção térmica quando houver variação térmica de apenas 2 graus. Esse controle de proteção térmica é acionado quando houver variação maior que o limite estabelecido, por

exemplo, deixar a impressora operando por horas e um sensor parar de operar, ocasionando a perda de controle e como consequência deixar a resistência acionada de forma interrupta e causar um incêndio. Outra questão relevante é o fato de as mesas aquecidas serem compostas para refratar o calor e são muito sensíveis ao ambiente externo, como correntes de vento, ar-condicionado ou variações climáticas bruscas no ambiente. Durante os testes, conforme Figura 57, um simples assopro já causa a variação de 2 graus em sua base.

Figura 57 - Teste aquecimento da mesa



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

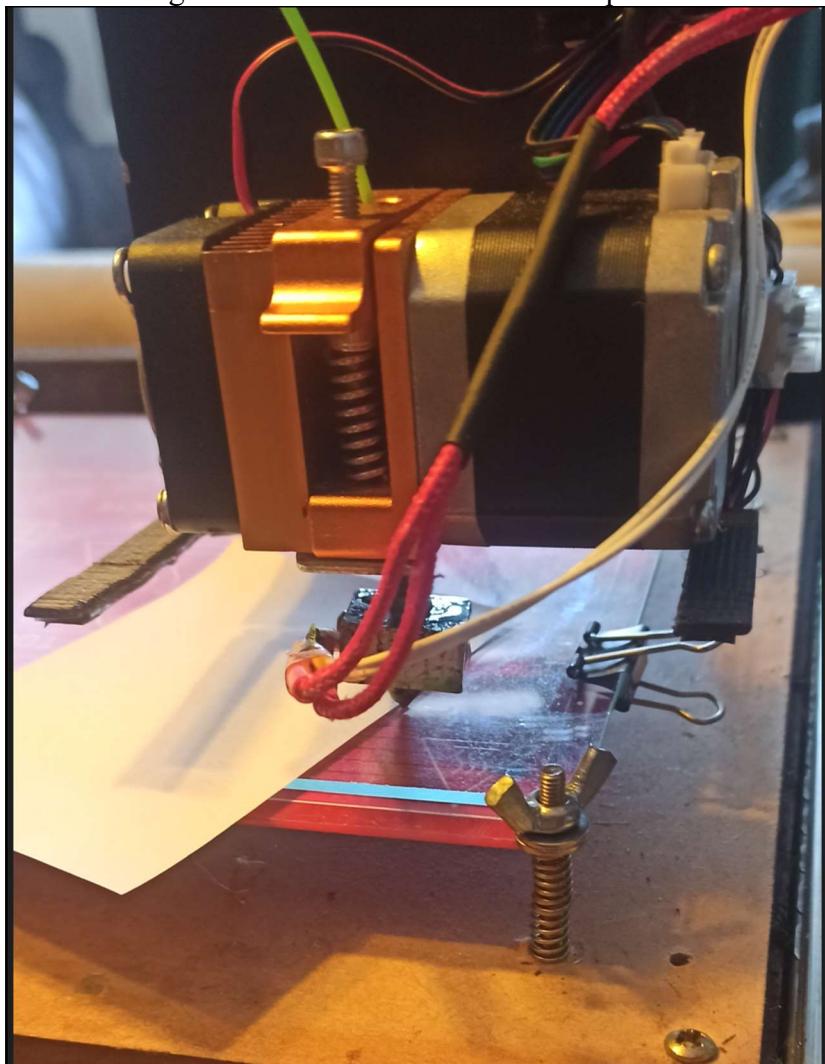
Após essas configurações, foi acionado a rotina de pré-aquecimento da mesa para PLA, que tem como valor padrão da mesa 60 graus, conforme é ilustrado na Figura 57, via visor LCD. O teste de aquecimento da extrusora foi realizado com a mesma técnica e ocorreu sem maiores problemas.

### 3.3.10 Nivelamento da base da mesa aquecida

Esse procedimento consiste no nivelamento de mesa que deve estar num ângulo perfeito de 180 graus em todas as extremidades do eixo X e Y. A técnica de nivelamento da mesa consiste na medição da distância entre o vidro que está sobre a mesa aquecida e o bico de

impressão. O instrumento utilizado para realizar essa aferição é uma folha de papel A4 com gramatura de 0.75 mm, e após ajuste, o papel deve passar raspando entre o bico de impressão e a base da mesa. Quando o papel passa facilmente entre o bico e a base sem raspar, se torna necessário o aperto dos parafusos de nivelamento, conforme se observa na Figura 58.

Figura 58 – Nivelamento da mesa aquecida



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

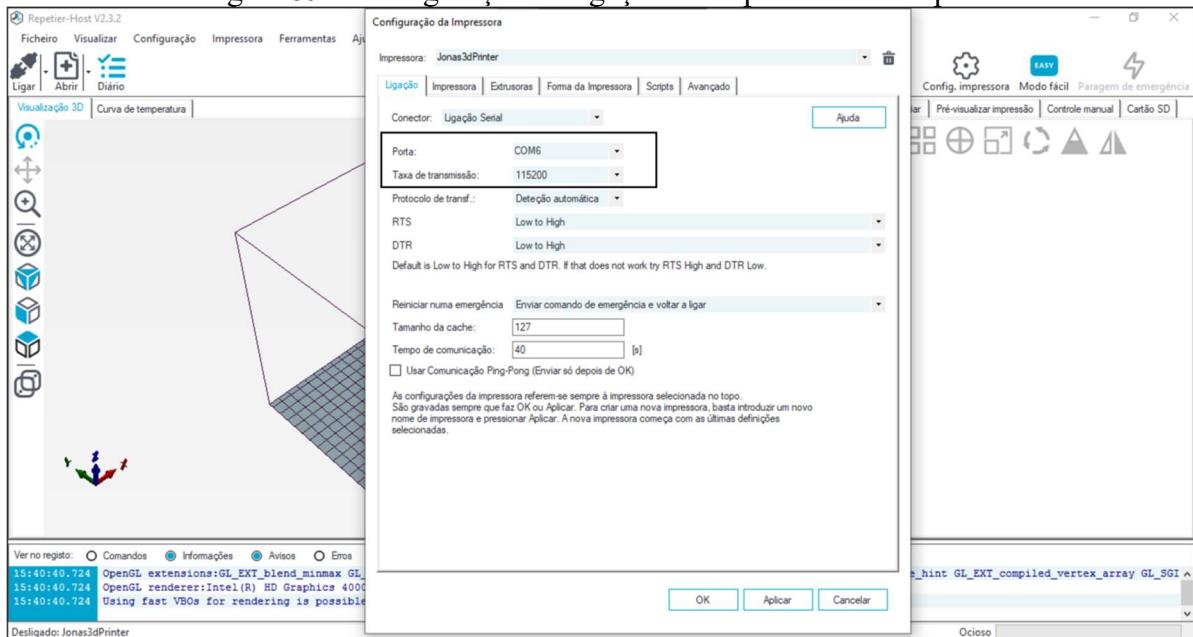
Esse procedimento é realizado nos 4 cantos da mesa de impressão e é fundamental para o correto funcionamento da impressão e para o filamento conseguir aderir perfeitamente ao vidro que está sob a cama aquecida. Se tiver folga demais, o filamento irá descolar e se estiver apertado demais, a cabeça de impressão irá raspar e deformar a impressão, em virtude de o bico aquecido derreter uma camada já impressa. Esse procedimento é necessário antes do início de toda impressão.

Também se recomenda antes de cada impressão, a retirada do vidro para limpeza com água e sabão neutro e a secagem deve ser realizada com guardanapo sem tocar diretamente com os dedos no vidro, com objetivo de evitar gordura e outras impurezas.

### 3.3.11 Configuração do software fatiador

O software gerenciador de impressão 3D utilizado nesse estudo foi o Repetier Host (Repetier, 2024), versão 2.3.2, pelo motivo de ser um software livre e pela simplicidade de operação. A instalação ocorreu no sistema operacional Windows versão 10 de forma clara e intuitiva, conforme é ilustrado na Figura 59, sem necessidade de configurações específicas.

Figura 59 - Configuração de ligação da impressora no Repetier



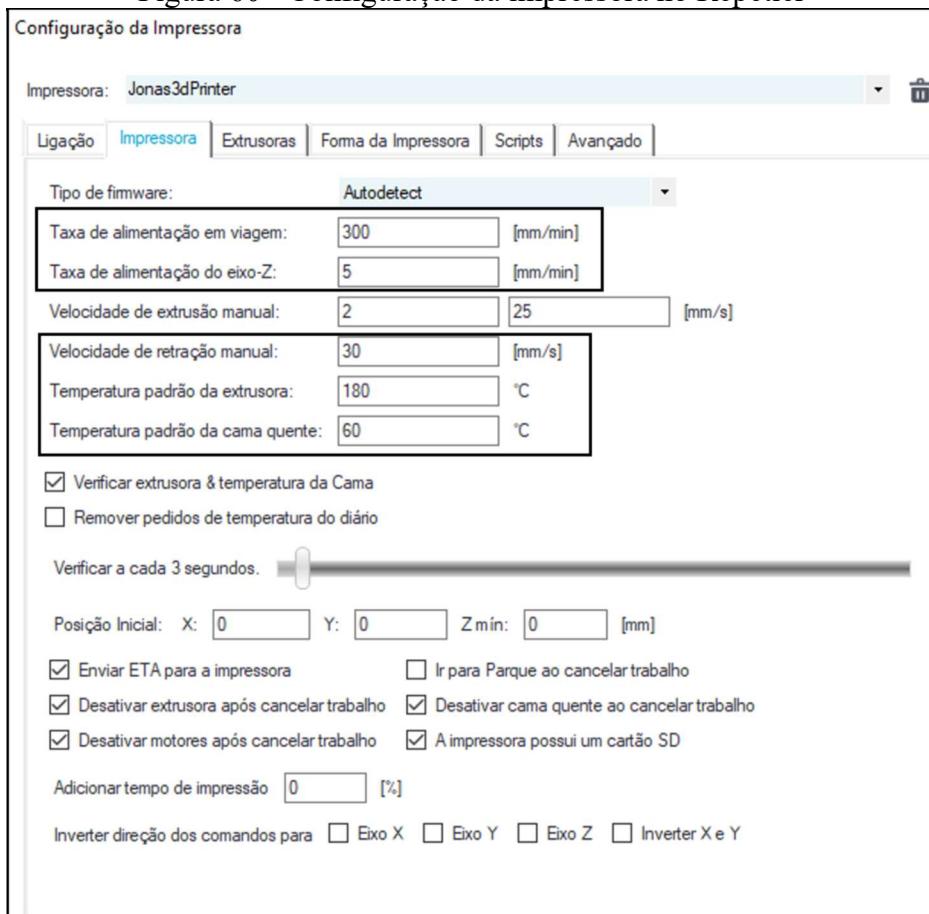
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Após o software estar instalado e ser executado, o primeiro ponto a ser destacado é a configuração da velocidade da porta de ligação serial do microcontrolador da placa Arduino Mega 2560 e essa opção é acessada através do menu Configuração > Configuração da Impressora.

A configuração da placa Arduino é realizada de forma automática pelo sistema operacional Windows ao conectar a placa através da porta USB. Geralmente é alocado nas portas de comunicação COM3, COM4, COM5 ou COM6. A configuração da porta de comunicação do software deve ser a mesma porta que a placa Arduino foi detectada e está configurada no sistema operacional, conforme Figura 59.

Outro parâmetro a ser configurado é a taxa de transmissão que no caso desse estudo, foi configurado para operar na velocidade de 115200 bps. Existem opções para velocidades maiores, porém nos testes executados, ocorreram problemas de transmissão que resultaram em erros de comunicação. Um ponto importante a destacar é que nas configurações do firmware também está configurado para operar nessa taxa de transmissão 115200, por meio do parâmetro BAUDRATE, descrito no Quadro 3.

Figura 60 - Configuração da impressora no Repetier



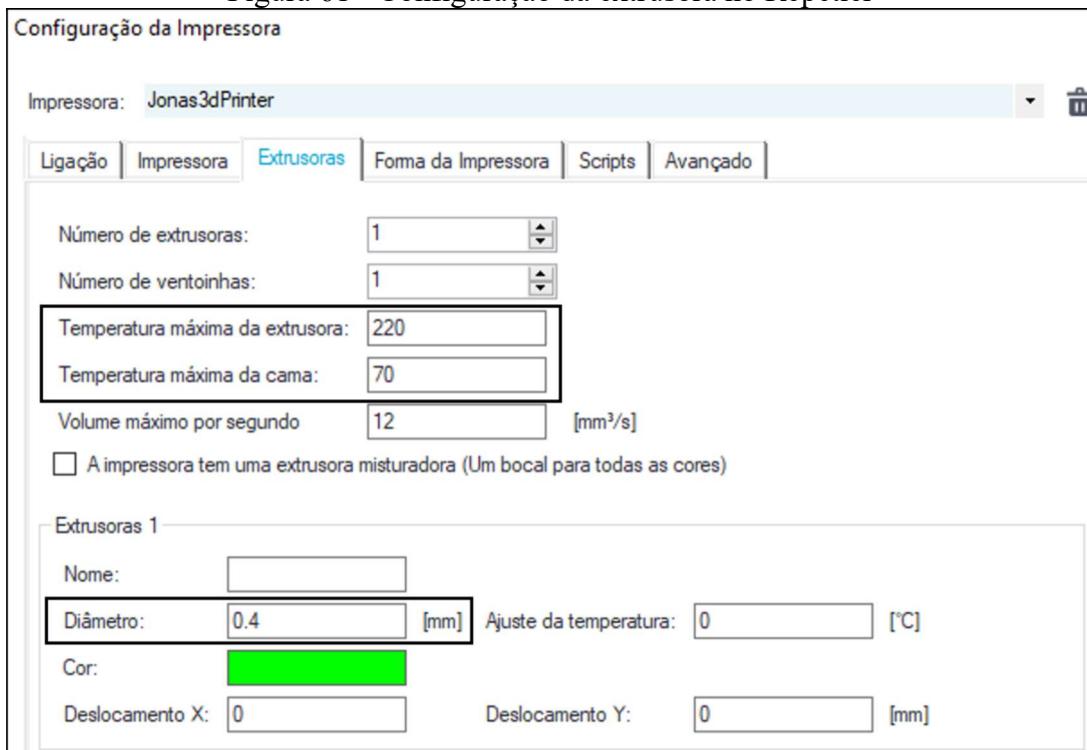
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A segunda configuração, conforme Figura 60, está na definição do tipo de firmware, que foi mantido o valor padrão, porém ocorreu alteração do parâmetro da taxa de viagem da impressora, que foi alterada de 3000 mm/min para 300 mm/min. Isso se tornou necessário para evitar o travamento dos motores em alta velocidade de viagem. A taxa de viagem, se entende como o período que a impressora não está imprimindo, mas os eixos estão em transitando em viagem, ou seja, quando acessados pela função de homming, que consiste no retorno dos eixos para a posição inicial.

A velocidade de retração manual padrão foi alterada para 30 mm/s como padrão. A retração será abordada posteriormente nos testes de impressão de objetos orgânicos, mas como breve explicação, se entende quando o bico de impressão está no ar e retrai o filamento até chegar em outro ponto de impressão para efetuar novamente a extrusão.

A temperatura padrão da extrusora foi configurada para 180 graus célsius, que é o padrão recomendado pelo modelo de filamento PLA utilizado no estudo, mas varia conforme o fabricante. Essa mesma situação serve para o próximo parâmetro que é a temperatura padrão da cama quente foi alterada para 60 graus célsius. Os demais parâmetros dessa aba não foram alterados.

Figura 61 - Configuração da extrusora no Repetier



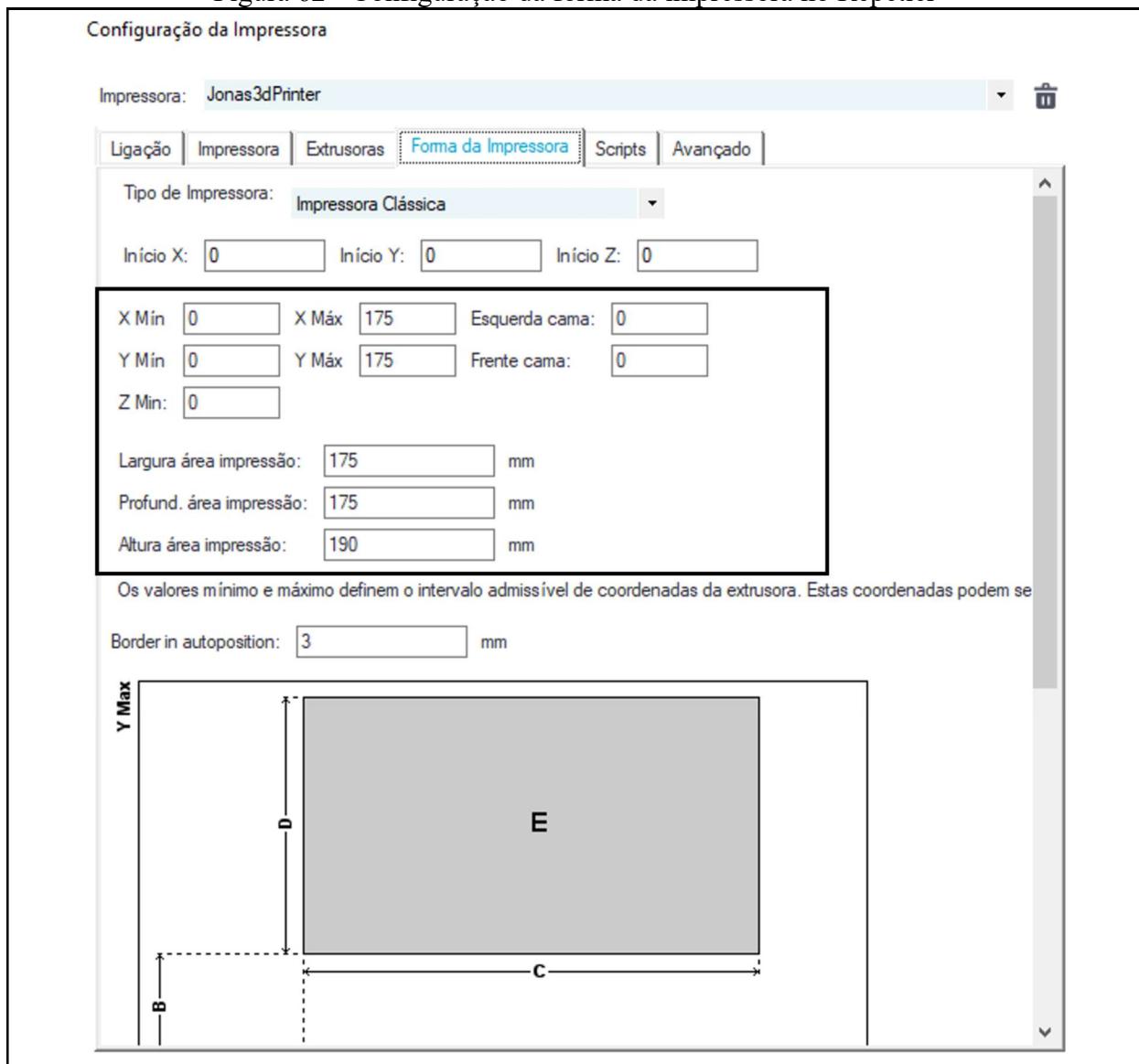
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A aba Extrusoras contém as configurações básicas da extrusora e no caso desse protótipo contém apenas uma extrusora. Na Figura 61, se observa a configuração do parâmetro de temperatura máxima da extrusora, que tem por objetivo efetuar o controle de temperatura através do software e foi configurado no valor de 220 graus célsius. Essa configuração viabiliza a extrusora operar via software com os filamentos PLA e ABS que possui temperatura de fusão superior ao PLA.

A temperatura máxima da cama limitada pelo aplicativo foi configurada para o valor de 70 graus célsius. Fisicamente o hardware pode chegar até 78 graus célsius conforme a temperatura do ambiente, porém usualmente ocorre alguma falha ou travamento. O valor ideal para esse parâmetro deveria ser 120 graus, para acompanhar a temperatura da extrusora que foi configurada para operar com os tipos de filamento ABS e PLA, no entanto com o padrão de arquitetura e especificação dos componentes, essa temperatura não é possível de ser atingida e demandaria alterações de design do protótipo para possuir isolamento térmico na área de impressão além de componentes mais potentes.

Por fim, o último parâmetro configurado foi o diâmetro do bico de impressão instalado na extrusora e foi ajustado para o valor de 0.4 mm que é a espessura do bico que veio no kit Ramps. Esse parâmetro é muito importante, porque influencia diretamente nas camadas e alturas de fatiamento e impressão da peça.

Figura 62 - Configuração da forma da impressora no Repetier



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Complementando a configuração, na aba “Forma da Impressora” se tornou necessário informar ao software fatiador as formas da impressora. O tamanho físico da mesa de impressão é de 200 x 200 mm, mas por questões de aquecimento e temperatura do vidro, foi limitada no software fatiador em 175 mm para os eixos X e Y, conforme se observa na Figura 62. Existem as porcas do tipo borboleta que auxiliam no nivelamento que também consomem espaço da mesa, porém facilitam muito o nivelamento manual. A altura da área de impressão ficou limitada em 190 mm.

### 3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho. Os resultados são demonstrados através da impressão de objetos em 3D. Na subseção 3.4.1 são

apresentados os testes de impressão e análise dos resultados. Na subseção 3.4.2, será apresentada a operacionalidade da implementação. A Subseção 3.4.3 mostra os principais problemas e suas soluções. Por fim, na subseção 3.4.4 se compara esse trabalho com os correlatos.

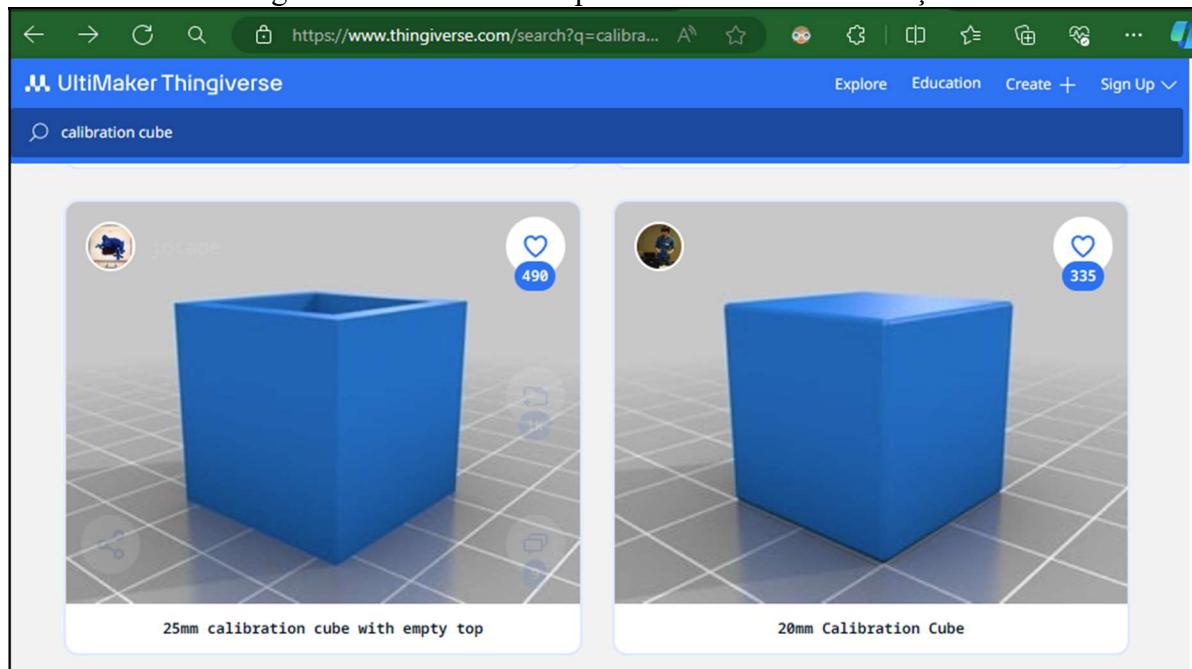
### 3.4.1 Testes e análise dos resultados

Nessa seção serão realizados vários testes com vários modelos de objetos em 3D.

#### 3.4.1.1 Cubo de calibração de 20 mm

Após a configuração básica da impressora no software fatiador, se torna necessário escolher um arquivo em formato 3D compatível para impressão. O modelo 3D a ser impresso foi baixado do site Thingiverse (Thingiverse, 2024), que é um repositório de modelos 3D para impressão. O modelo selecionado para os testes iniciais foi o cubo de calibração, pesquisado por “calibration cube” e selecionado a opção “20 mm Calibration Cube” conforme Figura 63.

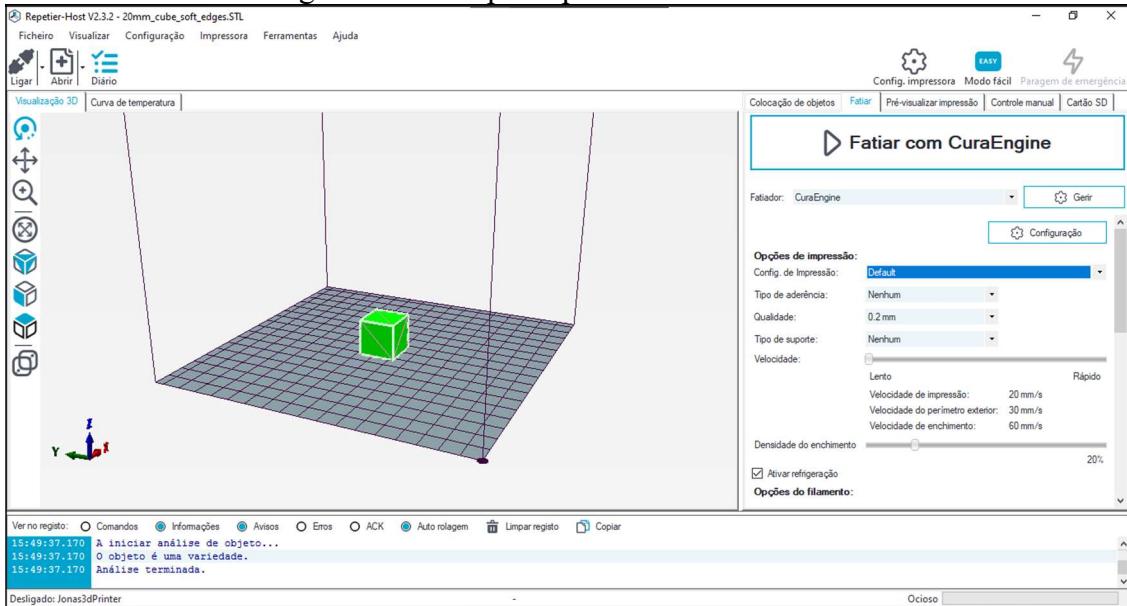
Figura 63 - Modelo de impressão do cubo de calibração



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Após o arquivo ser baixado e descompactado, foi aberto no software Repetier Host (Repetier, 2024). O primeiro teste se deu com as configurações padrão de impressão do software. Na Figura 64 se pode observar a tela principal do software com o arquivo já carregado.

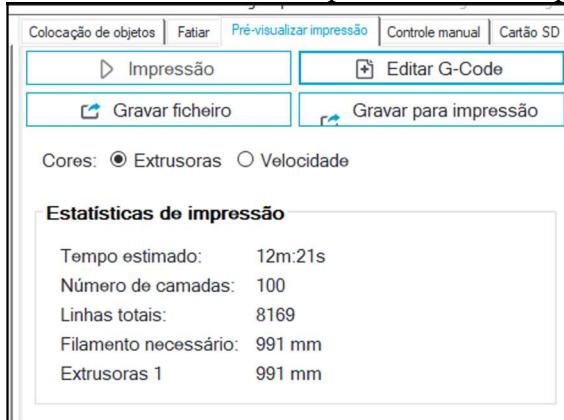
Figura 64 - Tela principal do software fatiador



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O arquivo foi carregado através da opção de menu `Abrir` e depois foi acessada a aba `Fatiar`. O primeiro teste foi realizado com as configurações padrão do software. Um ponto importante a destacar é qualidade de impressão que se realizou na espessura de 0.2 mm cada camada. O objeto em 3D aparece no centro com uma previsão do que será impresso. O processo de fatiamento se inicia ao pressionar o botão `Fatiar` com o `CuraEngine`.

Figura 65 - Estatísticas de impressão 3D no Repetier



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Após o fatiamento, o sistema passa para a próxima aba de forma automática, onde se observa a aba de pré-visualização de impressão. Nessa aba, é informado o número de camadas que o objeto 3D foi fatiado, nesse caso em 100 camadas de 0.2 mm e filamento necessário para impressão ficou em 991 mm, conforme se observa na Figura 65.

O processo de fatiamento consiste na leitura de um objeto 3D e na geração de código GCode, conforme Figura 66, que é um script com instruções em forma de código que o firmware *Marlin* interpreta os comandos para o microcontrolador executar.

Figura 66 - Exemplo do GCode gerado pelo fatiador

```

1 ;Generated with Cura_SteamEngine 15.01
2 ; Default start code
3 M107 ; Turn off fan
4 G90 ; Absolute positioning
5 M82 ; Extruder in absolute mode
6 M190 S60
7 ; Activate all used extruder
8 M104 T0 S180
9 G92 E0 ; Reset extruder position
10 ; Wait for all used extruders to reach temperature
11 M109 T0 S180
12 ;Layer count: 100
13 ;LAYER:0
14 M107
15 G0 F9000 X75.184 Y75.116 Z0.300
16 ;TYPE:SKIRT
17 G1 F1200 X75.876 Y74.597 E0.04316
18 G1 X76.423 Y74.310 E0.07397

```

**Visualização** | Sintaxe G-Code | Procurar

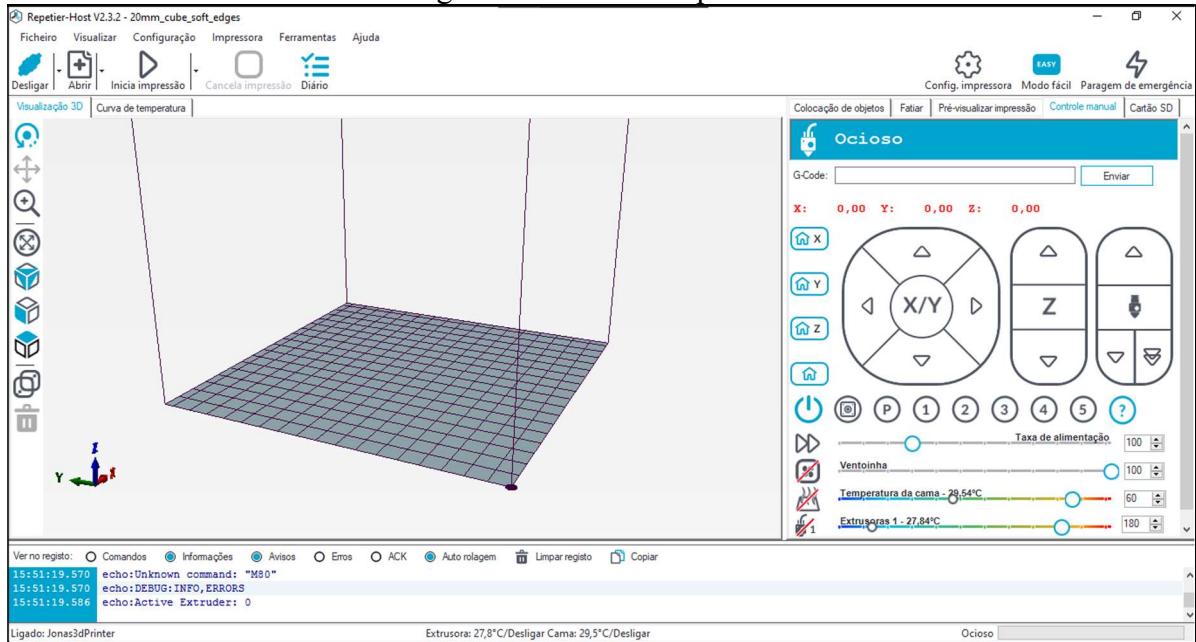
- Mostrar código completo
- Mostrar camada única
- Mostrar o intervalo da camada

R1 C1 Inserir Camada 0 Extrusora 0 Tempo de impressão:12m:21s

Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O fatiamento do modelo 3D desse teste, gerou um arquivo de 8169 linhas conforme é ilustrado na Figura 65 e se pode observar um fragmento de código do script gerado. O software permite edição desse arquivo que é totalmente customizável, mas não será abordado nesse contexto. Na Figura 66 é ilustrada a sequência do arquivo que o firmware irá interpretar, como na linha 3, desligar a ventilação da extrusora, na sequência ativar todas extrusoras configuradas, depois iniciar o aquecimento da mesa, na sequência ativar a extrusora e por fim iniciar o trabalho de impressão. Na linha 17 estão as coordenadas para imprimir a saia do objeto. A saia do objeto é um tipo de suporte que a impressora imprime ao redor do objeto com objetivo de melhorar a fixação na mesa aquecida. Existem vários tipos de suporte de objeto que nesse momento não serão abordados.

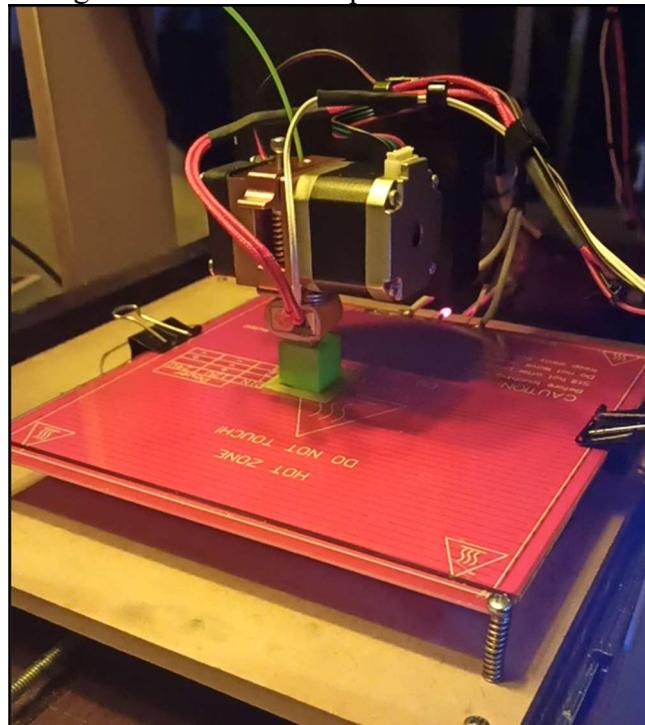
Figura 67 - Tela de impressão



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Nessa etapa o modelo do objeto 3D se encontra apto para impressão após estar fatiado pelo software e se deve ativar a conexão com a impressora, por meio do botão Ligar/Desligar. Ao pressionar o botão é emitido um comando no software que conecta a impressora com o firmware *Marlin* e exibe o log de operação dos trabalhos em tempo real na parte inferior, como conforme é ilustrado na Figura 67. A aba de controle manual dessa imagem, exibe informações do status dos sensores de temperatura.

Figura 68 - Primeira impressão com sucesso



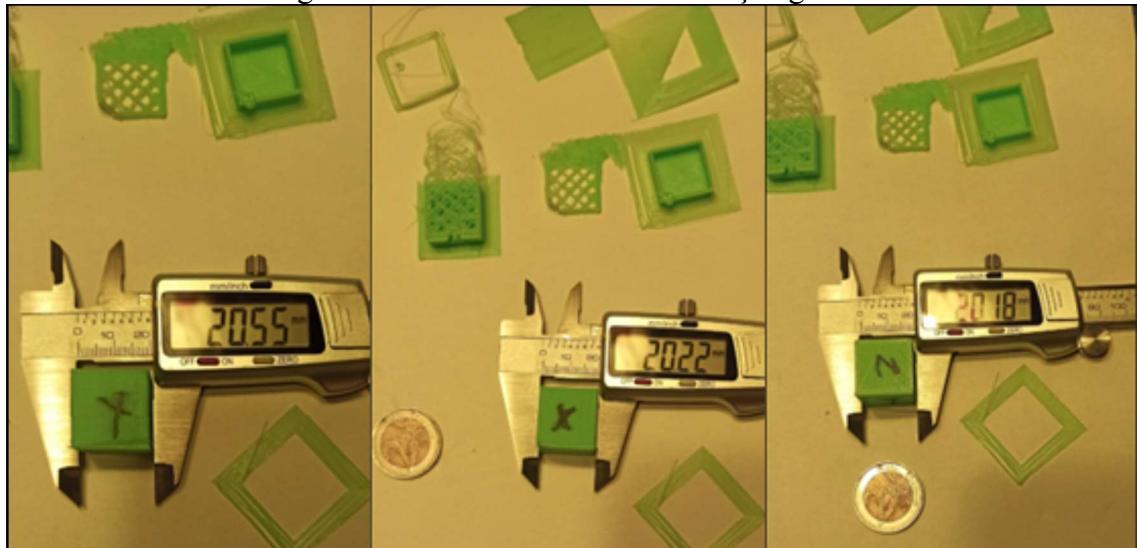
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Conforme a impressão das camadas avançam, seu progresso é exibido em tempo real na tela central do software. Essa tela de controle manual, também permite movimentar os eixos da impressora e chamar o comando homming de cada eixo ou de toda impressora.

Na Figura 68, se exibe a primeira impressão bem-sucedida que ocorreu após aproximadamente vinte tentativas. Durante as tentativas, ocorreram ajustes de micro alinhamento da mesa, velocidade da primeira camada, aperto nas correias, ajuste no ângulo dos motores e demais ajustes. Esse procedimento é normal nas primeiras impressões, pelo fato de a impressora trabalhar com componentes aquecidos e ser do tipo aberta, porque ocorre interação com o ambiente, como temperatura do ambiente, vento e umidade do filamento.

Após finalizar a impressão, conforme na Figura 69, se observa o resultado do primeiro cubo de calibração gerado pela impressora.

Figura 69 - Primeiro cubo de calibração gerado



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O objetivo da impressão do primeiro cubo, foi para testar, ajustar o funcionamento básico da impressora e aferir a calibração dos eixos X, Y, Z e Extrusora. Como o cubo de calibração possui 20 mm, se entende que a calibração está correta, ocorrendo pequena variação de arredondamento após a vírgula entre cada eixo, mas somente com esse resultado, o objetivo principal do estudo já foi atingido, conforme é ilustrado na Figura 70. O filamento utilizado nesse teste foi o PLA Basic do fabricante brasileiro 3D Fila, espessura de 1.75 milímetros e com especificação de mesa aquecida em 60 graus célsius e extrusora a 180 graus célsius. A velocidade de impressão e demais parâmetros seguiram o padrão do software Repetier Host (Repetier, 2024), com resolução de 0.2 mm e temperatura ambiente de aproximadamente 28 graus célsius durante o teste. Um fator que também influenciou esse teste, foi o fato que todos os bicos de impressão estarem limpos, ou seja, sem detritos de impressões anteriores e com

poucas horas de impressão. O filamento recém havia sido retirado da embalagem a vácuo e os índices de umidade estavam no padrão de fábrica. Nesse teste não foi utilizado nenhum produto colante para auxiliar na fixação da peça a ser impressa.

Figura 70 - Cubo gerado após ajustes



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Após os ajustes iniciais, foram gerados vários cubos e se passou a explorar modelos mais complexos, como outro modelo de cubo de calibração denominado XYZ 20mm Calibration Cube, que já contém letras e ranhuras mais específicas. A impressão chegou quase na perfeição em duas casas após a vírgula, conforme Figura 70.

Um ponto a destacar é que esse resultado foi alcançado com componentes que não foram projetados para esse fim, com exemplo, corrediças de gavetas que não tem a mesma precisão de barras guiadas lineares, específicas para esse tipo de operação de precisão.

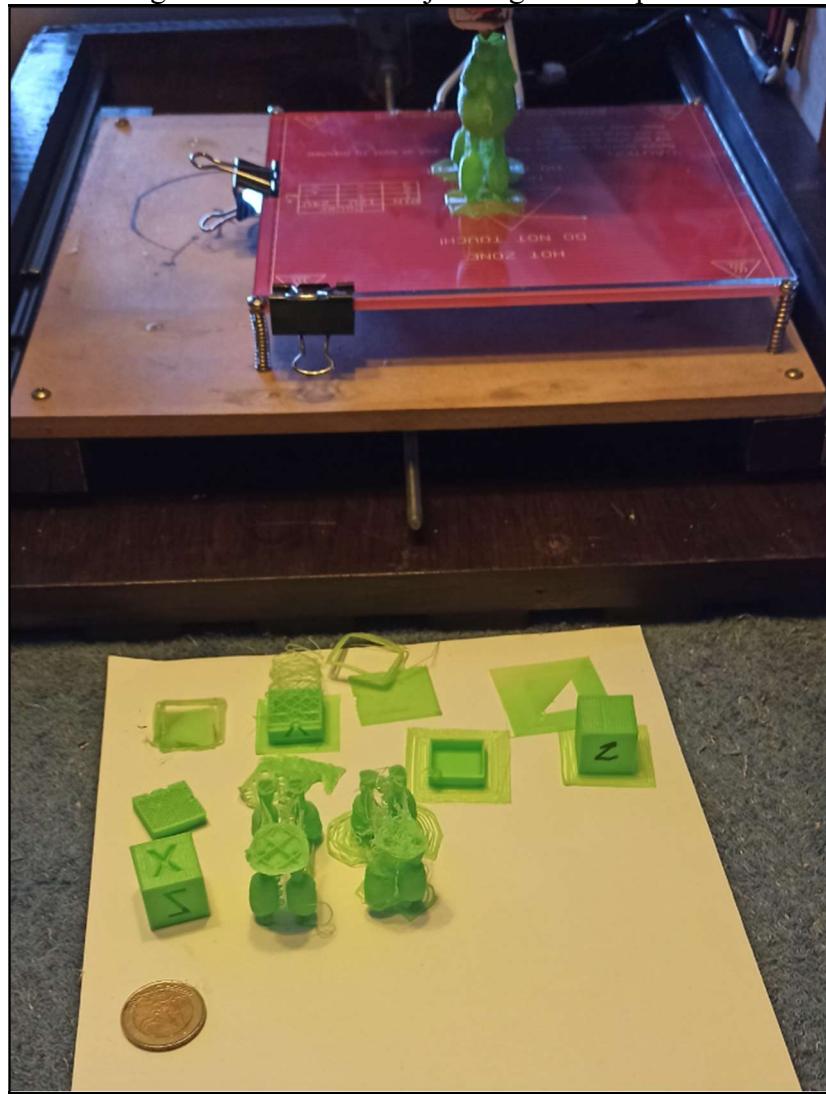
No início do projeto, existiam muitas dúvidas em relação a trepidação dos eixos quando a impressora mudasse bruscamente de uma coordenada cartesiana de X para Y por exemplo ou realizasse uma curva muito acentuada de 90 graus, como foi o caso da impressão desse cubo. As dobradiças possuem folgas que são naturais de sua estrutura e todas essas dúvidas foram resolvidas com esse teste que prova que é possível utilizar esses objetos para uma impressão de qualidade. Esse cubo de calibração entre outros objetos, são utilizados mundialmente para aferir

e regular qualquer impressora 3D, pois mede formas geométricas e dimensões pré-determinadas.

#### 3.4.1.2 Impressão de objeto orgânico com PLA

Com objetivo de explorar ainda mais as capacidades de impressão do protótipo, se escolheu um objeto 3D mais complexo, com formas orgânicas que exigem mais desempenho da impressora. O objeto escolhido foi um animal que possui mais detalhes e podem ser observados na Figura 71.

Figura 71 - Primeiro objeto orgânico impresso

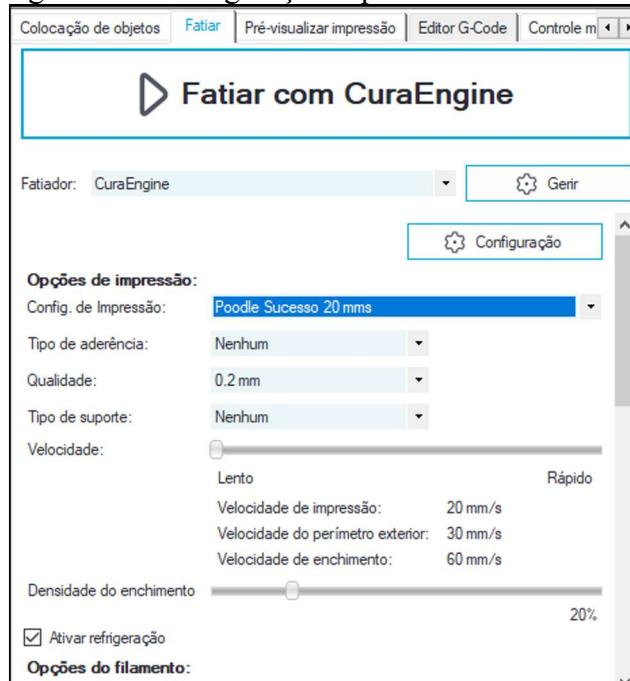


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A impressão de objetos orgânicos, demandou mais ajustes na impressora. Surgiram novos tipos de folgas e problemas relacionados a fixação do objeto devido ao maior período de impressão, ocasionando descolamento da peça em alguns testes. Também se pode notar o fenômeno da retração, que ocorreu nesse teste, ao imprimir a primeira pata do animal em uma

situação que o bico aquecido saiu de um ponto e criou uma espécie de teia até a área de impressão da outra pata do animal. Outra questão que se notou, foi em ângulos negativos, como o rabo e a cabeça, demandaram uma configuração de estrutura de suportes no fatiamento.

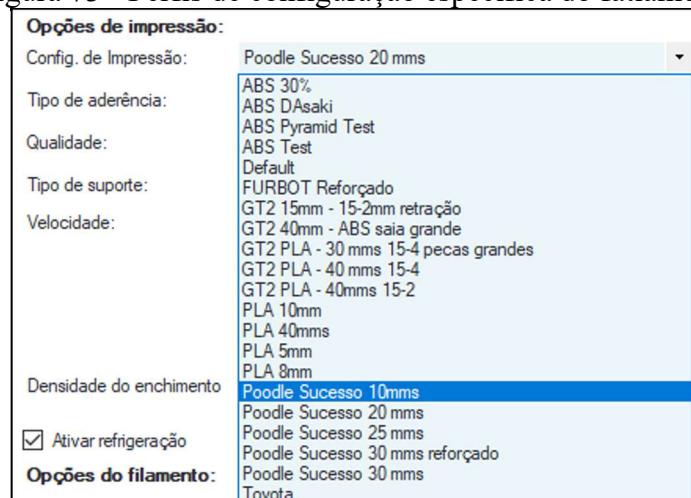
Figura 72 - Configuração específica de fatiamento



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Para resolver as particularidades de impressão nos testes de um objeto orgânico, se tornou necessário uma configuração mais específica no momento do fatiamento. Na Figura 72 se pode observar algumas opções como qualidade, que pode ser de 0.1 mm, que é mais lenta, porém mais precisa, até 0.3 mm ou 0.4 que é mais rápida, porém com menos resolução, onde as camadas ficam mais aparentes, em formas de escadas. A velocidade de impressão influencia na qualidade do objeto a ser impresso, além dos vários tipos de aderência e suporte.

Figura 73 - Perfis de configuração específica do fatiamento

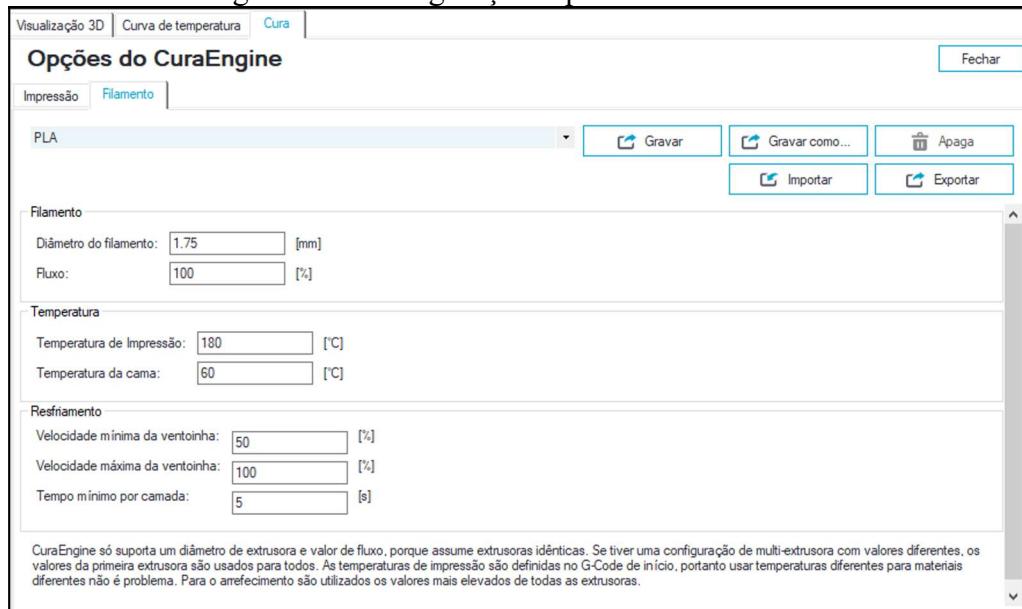


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O software escolhido para esses testes foi o Repetier Host (Repetier, 2024) por ser mais simples, mas softwares profissionais como Ultimaker Cura oferecem dezenas de opções e configurações.

Conforme os testes do objeto foram sendo realizados, cada configuração de impressão foi salva em um perfil diferente com diferentes combinações de variáveis, conforme se pode observar na Figura 73.

Figura 74 - Configuração específica de filamento



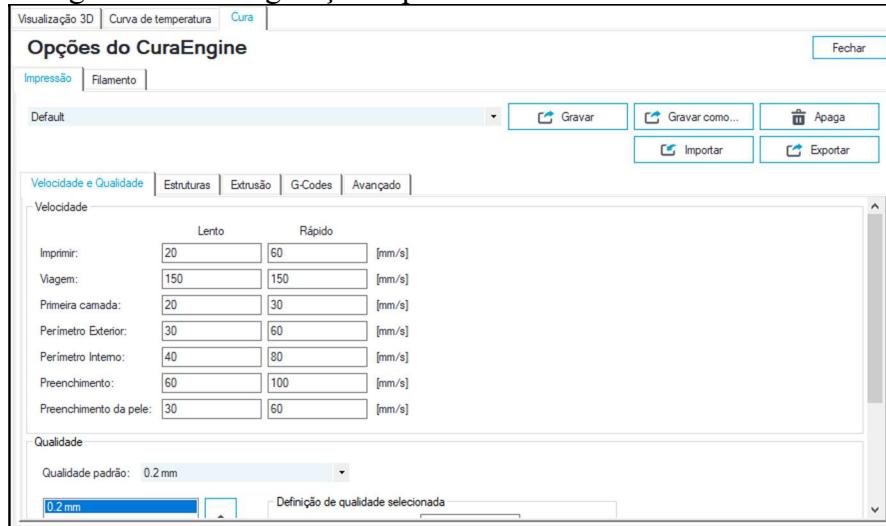
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A aba de fatiamento da configuração específica contempla questões relacionadas ao filamento, como diâmetro, fluxo, temperatura de impressão e temperatura de cama, conforme Figura 74. O PLA é um filamento muito fácil de operar e não demanda muitas configurações nesse sentido, porém o filamento ABS por exemplo, demanda além de altas temperaturas para extrusão e fixação, devido as suas características de não poder esfriar rapidamente, demanda de configurações específicas como o controle de velocidade de ventoinha até da extrusora e tem influência direta na qualidade da peça.

Também existe casos de filamentos de baixa qualidade, de qualquer tipo ou material, que mesmo utilizando a temperatura recomendada pelo fabricante, o ambiente externo pode influenciar, deixando muito mole ou muito duro, provocando escorramento, que também necessitam configuração. Essas não configurações não serão abordadas nesse estudo.

Na aba de impressão, existe uma configuração de velocidade para cada operação da impressora que também influenciam no resultado da impressão, conforme Figura 75. Durante os testes, se optou por atingir a qualidade em velocidades baixas, como exemplo 10 mm/s e depois ir aumentando a velocidade, conforme o êxito obtido da impressão anterior.

Figura 75 - Configuração específica de fatiamento - Velocidade

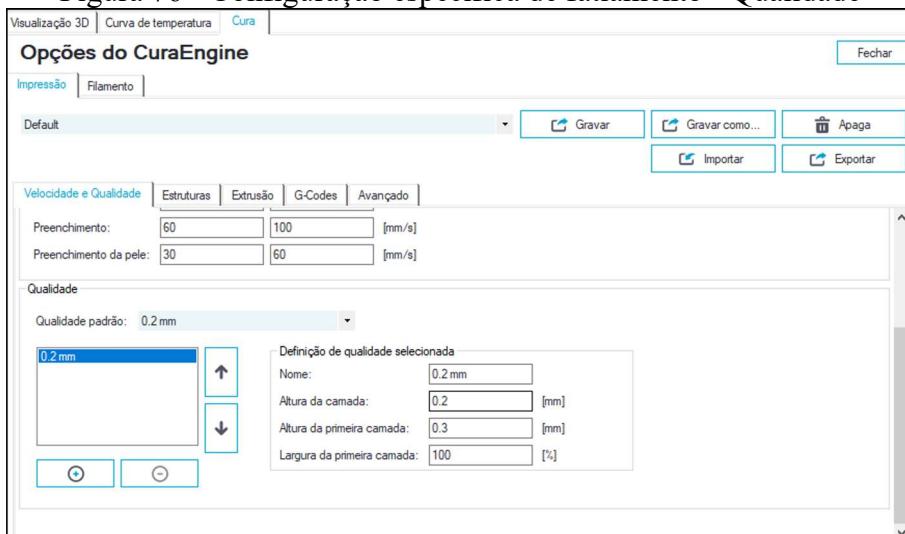


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A velocidade da primeira camada é uma das velocidades mais importantes durante o processo de impressão, pois influencia diretamente na fixação da peça. Na especificação do filamento o fabricante recomenda que essa velocidade não pode ser alta, em virtude que nessa velocidade, está ocorrendo a fixação do filamento na base de impressão, no caso o vidro que estará quente. Também não pode ser muito lenta, senão irá causar bolhas de filamento não extrudido. Nesse estudo, se seguiu a recomendação do fabricante, de utilizar velocidade máxima de até 25 mm/s na primeira camada.

O objetivo de toda configuração de velocidade é alcançar a maior qualidade na menor faixa de tempo. Como exemplo desse teste de impressão de um objeto orgânico, considerando o total de 329 camadas, a 0.2 mm por camada, em um total de 658 mm de altura, a impressão levou em torno de 3 horas na velocidade média de 30 mm/s.

Figura 76 - Configuração específica de fatiamento - Qualidade

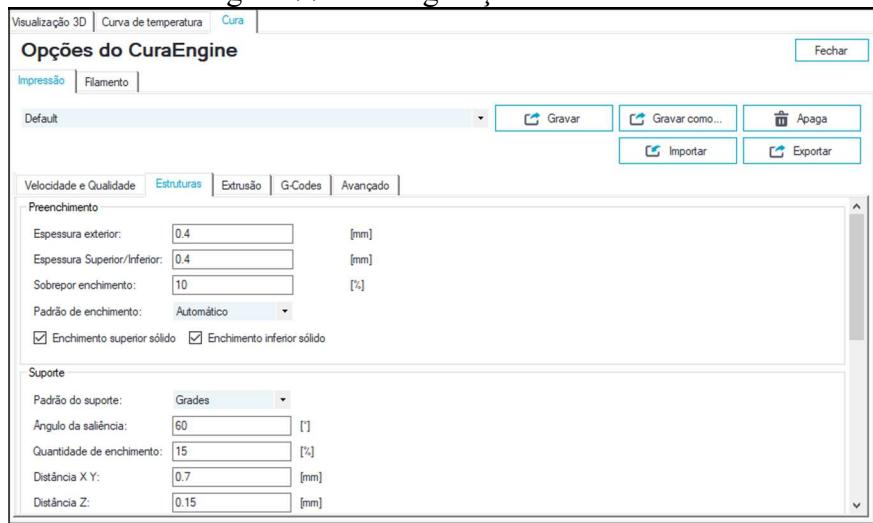


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Durante os testes, em grande maioria, se optou por operar com 0.2 mm em todas as camadas, por ser uma qualidade boa e sem variação de espessura da primeira para as demais camadas. Na Figura 76, está a configuração de um teste realizado com primeira camada de 0.3 mm e demais camadas com 0.2 mm. O objetivo era criar uma base mais reforçada em relação ao alinhamento da cabeça de impressão com o vidro com distância de 0.75 mm.

O resultado desse teste não foi muito bem-sucedido, pois se constatou que surgiram novos problemas e se optou por seguir os testes somente com uma camada única de 0.2 mm.

Figura 77 - Configuração da extrusora



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A configuração da extrusora implica diretamente na velocidade de impressão, pelo fato de determinar quantas vezes uma camada irá passar no mesmo local. Na Figura 77, se observa os primeiros parâmetros que são espessura exterior, espessura superior/inferior e padrão de enchimento.

A espessura exterior, se entende como a configuração da parte exterior do objeto a ser impresso, neste caso, estando configurado a 0.4 mm, a impressora com um bico de 0.4 mm irá efetuar uma passada para compor essa parede. O padrão de qualidade aceitável é de 0.8 mm, ou seja, irá demandar duas passadas, mas foram executados casos de configuração de 1.2 mm que irá demandar três passadas no mesmo local. Uma sugestão é sempre utilizar valores múltiplos da espessura do bico que está sendo utilizado na impressora, para evitar o aumento no tempo de impressão, em decorrência do bico de impressão trabalhar com fluxo reduzido para atingir a resolução configurada.

A espessura superior e inferior, segue a mesma lógica e implica na parte superior e inferior da peça impressa. Por exemplo, nesse teste do objeto orgânico, se pode citar o rabo do animal, que tem parte superior e inferior, mas não é a parte mais alta do objeto e nesse caso, seria a cabeça ou orelhas.

O terceiro parâmetro importante é a sobreposição de enchimento, que delimita o percentual que uma camada irá sobrepor a outra, com objetivo de fundir as duas linhas da camada impressa, tornando o objeto mais rígido. No caso da Figura 77, esse valor está bem baixo. Uma impressão de qualidade utiliza em média de 20 a 30 por cento de sobreposição.

As demais configurações, são de suporte, que são utilizadas para impressões de objetos como o Cristo Redentor, que tem os braços abertos e o software fatiador cria uma espécie de suporte temporário durante a impressão, que torna possível configurar a folga entre a peça final e o suporte após a impressão estar concluída. No caso do teste com o objeto orgânico, o suporte foi utilizado para a parte do rabo e da cabeça do animal que são impressas em um vão.

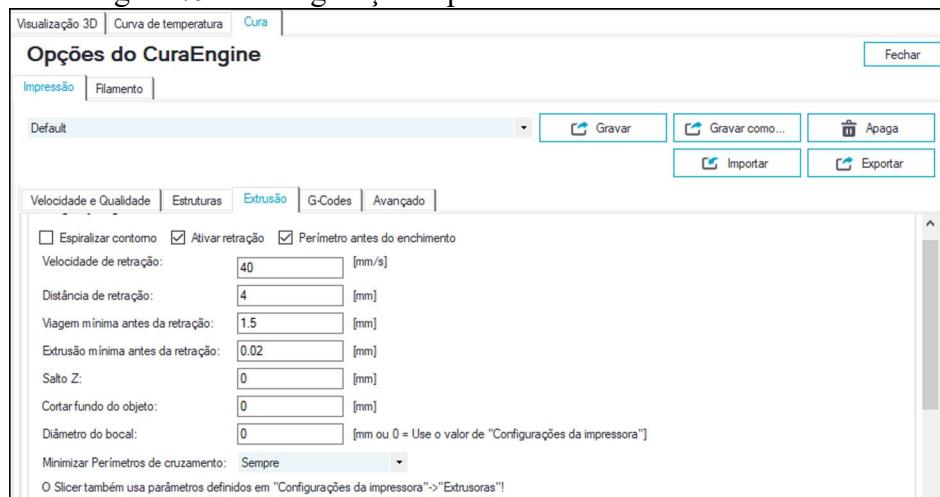
**Figura 78 - Configuração específica de fatiamento – Saia e Aba**



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

As configurações de Saia e Aba, são reforços que o software fatiador cria, para fixar melhor a peça. No caso do objeto orgânico se tratar de um modelo de um animal, se tornou necessário criar uma saia em cada pata, para fixar a peça durante todo processo de impressão e as configurações podem ser observadas na Figura 78. Existe também o padrão de Jangada, que não será abordado nesse teste.

**Figura 79 - Configuração específica de fatiamento - Extrusão**



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A configuração de extrusão para o caso do teste desse objeto orgânico se tornou necessária para minimizar o efeito de retração do objeto impresso. Nesse caso, quando é impressa a camada da primeira pata do animal, a cabeça de impressão está quente e com filamento em seu interior e ao mover a extrusora, é formado uma espécie de teia de aranha entre as regiões de impressão. Essas configurações, visualizadas na Figura 79, variam conforme a velocidade de impressão configurada e a distância de retração. Usualmente ocorrem no momento que acaba a impressão de uma região, onde a extrusora recolhe o filamento com objetivo de minimizar o escorramento e quando chega na próxima região a ser impressa, retorna o filamento na posição anterior.

Esse parâmetro também varia muito conforme qualidade do filamento, temperatura, velocidade entre outros fatores. Valores muito altos, podem retrair demais o filamento e trancar o sistema de extrusão com filamento derretido nos tubos. Valores muito baixos, se tornam ineficientes para minimizar o efeito de retração, conforme Figura 80. A regra é testes e mais testes, para cada objeto, até atingir um resultado considerável.

Figura 80 - Exemplo do fenômeno de retração e de saia



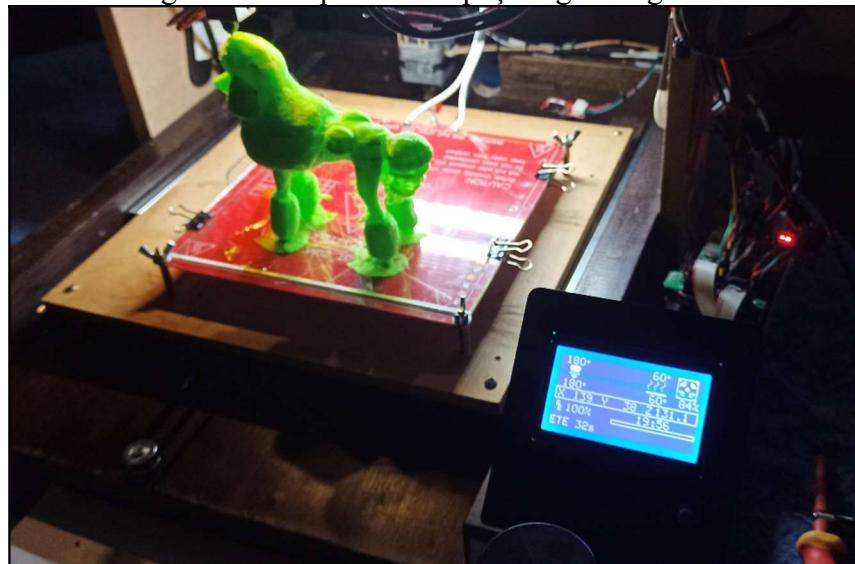
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Como conclusão desse teste, se pode afirmar que o protótipo conseguiu atingir o objetivo de impressão de um objeto orgânico com sucesso mediante extensa configuração e combinação de parâmetros. A impressão 3D diferente de uma impressora tradicional em 2D, pois demanda de uma alta configuração e não existe uma configuração padrão que é aderente a todos os tipos de objetos. Cada caso é um caso específico e demanda muito tempo e dedicação até atingir o resultado esperado.

### 3.4.1.3 Impressão de objeto orgânico grande com PLA

O próximo grupo de testes do protótipo tem por objetivo a impressão de peças grandes, complexas para testar a resistência de todas as peças e da estrutura do protótipo. Esse objeto orgânico teve sua escala aumentada em 100%, com altura de 125 mm, totalizando aproximadamente 625 camadas de 0.2 mm, com configuração otimizada, conforme Figura 81.

Figura 81 - Impressão de peça orgânica grande



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O trabalho de impressão levou aproximadamente 20 horas, sem maiores problemas. Único problema relatado no período foi a formação de nós no alimentador de filamento, que foi resolvido posteriormente com um suporte especial para o rolo, documentado nesse projeto. Se pode observar na Figura 81, na parte inferior do visor, o tempo exato de impressão de 19 horas e 56 minutos.

Figura 82 - Evidência da impressão de peça orgânica grande



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Conforme é ilustrado na Figura 82, se pode observar evidência da peça impressa com altura próxima de 125 milímetros.

#### 3.4.1.4 Teste de aderência de tinta no PLA

Com objetivo de teste de aderência de tinta sobre o material PLA, foi impresso um logotipo em baixo relevo, conforme Figura 83, para posteriormente submeter a peça a pintura utilizando uma primeira camada com catalisador e na sequência a realização de pintura em duas cores. Essa pintura foi realizada por um profissional em pinturas de etiquetas da empresa CCL localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina.

Figura 83 - Impressão de objetos em baixo relevo



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Como se pode observar na Figura 84, mesmo com a tinta seca, ocorreu o escorramento da tinta azul da peça, mesmo com catalisador e também a tinta branca da parte superior não aderiu perfeitamente a peça.

Figura 84 - Evidência de pintura de objeto com PLA



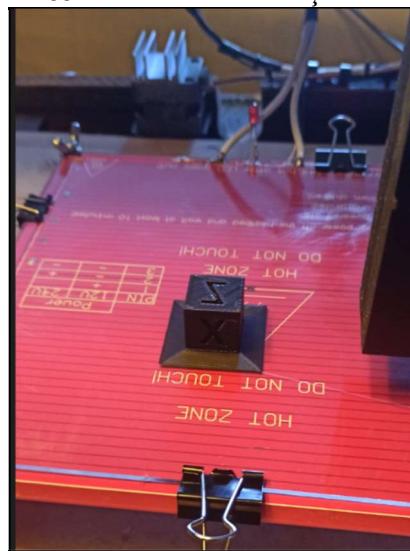
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Nessa seção foram relatados apenas uma amostra dos testes mais relevantes com o material PLA. Na próxima sessão, serão abortados testes que estão fora do escopo desse projeto, porém foram realizados com objetivo de analisar o comportamento do material ABS, em uma impressora aberta, ou seja, sem isolamento térmico em sua estrutura de impressão.

#### 3.4.1.5 Teste de cubo de calibração com material ABS

O primeiro teste a ser executado com o material ABS foi um cubo de calibração de 20 milímetros, já utilizado no teste anterior, porém com material e temperaturas diferentes, como se observa na Figura 85. A temperatura de extrusão para esse material foi ajustada em 220 graus célsius e a cama aquecida configurada em 78 graus célsius.

Figura 85 - Cubo de calibração em ABS



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A temperatura recomendada pelo fabricante do material ABS é de 110 graus célsius, mas devido às limitações técnicas do projeto, foi utilizado a temperatura máxima que a impressora consegue manter sem travar e entrar em modo de proteção térmica. Essa proteção é acionada quando está configurada uma temperatura alvo e fica estável sem aumentar ou diminuir por tempo pré-determinado.

Após vários testes de impressão com o material, se constatou algumas não conformidades, entre elas, foi o caso de a cama aquecida não estar operando na temperatura recomendada e o descolamento da peça da base de impressão durante algumas impressões. A solução paliativa para essa situação, foi a utilização de adesivo líquido para impressão 3D, que funcionou de forma satisfatória. Também se utilizou fita Kapton para fixar a peça, em combinação com base do tipo Jangada gerada pelo fatiador, que consiste na impressão de uma base sólida similar a uma jangada em todo espaço de impressão com várias camadas, para

depois começar a impressão da peça. O resultado da fita Kapton com a jangada se mostrou satisfatório em alguns casos, mas é um processo muito trabalhoso.

A solução mais eficiente foi a utilização de spray de cabelo extraforte, aplicado diretamente no vidro em uma camada bem generosa. Uma questão a mencionar, é que em toda impressão, o vidro deve ser retirado da cama aquecida, limpo com água e sabão neutro e na sequência secado com guardanapo e evitar contato direto com os dedos. Após o vidro seco, se deve aplicar o fixador e esperar cerca de 5 minutos para então aquecer a mesa.

Outro efeito que aconteceu com o material ABS foi a geração de deformações entre camadas, como empenamentos da peça. Essa solução foi resolvida parcialmente com a reconfiguração do sistema de aquecimento da mesa, que foi alterado do modo Bang-Bang para PID Tuning. A configuração do auto tune não será abordada neste trabalho, porém existe amplo detalhamento do procedimento de configuração na internet em páginas e redes sociais como Youtube.

O sistema de aquecimento Bang-Bang tanto da mesa aquecida, como da extrusora, consiste no aquecimento da resistência com potência máxima até atingir a temperatura estabelecida, onde o sistema é desligado e ele é novamente acionado até atingir novamente a temperatura alvo, atuando de forma similar a um termostato.

O sistema de PID Tuning (PID) é um processo mais complexo e mais eficiente, onde durante o ajuste realizado pelo firmware, é executado uma quantidade configurável de aquecimento tanto da extrusora quanto da mesa aquecida e estabelecido parâmetros de controle, que mantém o sistema sempre acionado de forma intermitente, resultando numa redução da variação de temperatura durante o processo de impressão e assim fornecendo uma melhor qualidade na peça gerada.

Figura 86 - Evidência cubo de calibração em ABS



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Após os ajustes de fixação e regulagem do PID, o resultado da impressão foi surpreendente. O cubo de calibração foi impresso em 13 minutos, sem deformações, com temperatura ambiente em 29 graus célsius, extrusora a 240 graus célsius, mesa aquecida a 78 graus célsius e utilização de fixador extraforte.

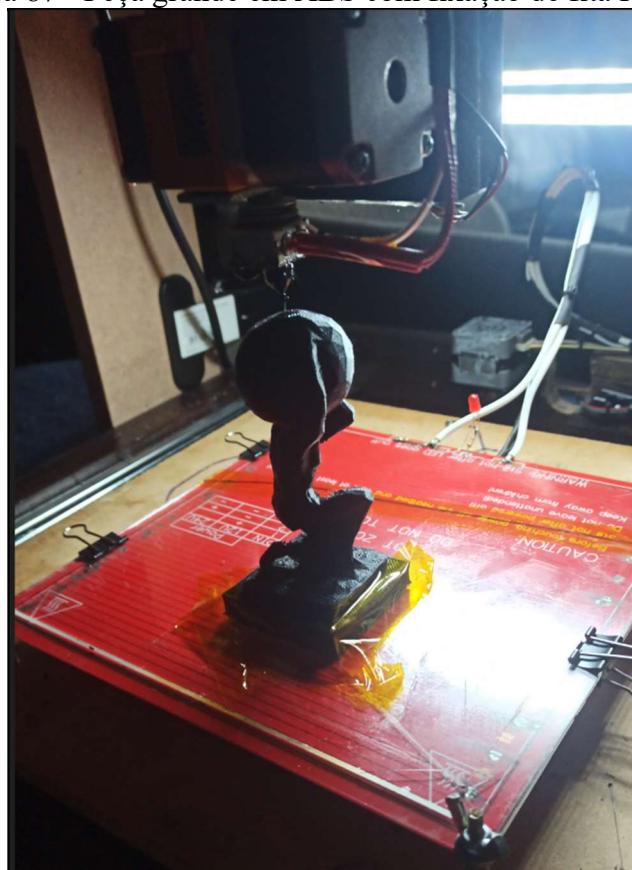
Conforme é ilustrado na Figura 86, a qualidade de impressão foi superior ao material PLA e a precisão da impressão também. O cubo atingiu a perfeição dos 20 milímetros, com duas casas após a vírgula, aferido com paquímetro digital. Os parâmetros de configuração dos motores não foram alterados em relação ao teste com o material PLA.

Outro ponto a destacar, é que o material ABS se pode operar em velocidades superiores a velocidade do PLA, mantendo a qualidade, porém é um material muito sensível a alterações de condições climáticas, como vento, frio, umidade etc.

#### 3.4.1.6 Teste de peça grande em ABS com fixação auxiliar

Esse teste tem por objetivo o a impressão de uma peça grande no material ABS, conforme Figura 87, com utilização de fixação auxiliar, em impressora aberta, não seguindo a especificação do fabricante, para avaliar o resultado.

Figura 87 - Peça grande em ABS com fixação de fita Kapton



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 87, se pode observar a impressão de um objeto grande, com combinação de fita Kapton, mesa aquecida no limite de 78 graus célsius e uso de fixador de cabelo extraforte aplicado ao vidro.

Figura 88 - Evidência de teste de peça grande em ABS



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A evidência do teste da impressão da peça é ilustrada na Figura 88, com resolução em 0.2 mm por camada. A base da peça, por conter formas sólidas, surgiu um pequeno empenamento, que foi minimizado pelo uso do fixador e da fita Kapton. Compete mencionar que a qualidade de impressão do ABS em algumas peças é surpreendente.

#### 3.4.1.7 Teste de peça grande em ABS com suporte

O objetivo desse teste é gerar uma peça maior com o material ABS, utilizando a funcionalidade de suporte do fatiador e avaliar os resultados, conforme Figura 89.

Figura 89 - Peça grande em ABS com suporte



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 89, se pode observar a utilização da opção de geração de suportes durante o fatiamento. Os suportes auxiliam na correta impressão de partes onde não tem contato direto com uma base, como nesse exemplo, as mãos, o queixo, entre outras partes. Para se ter êxito, o suporte pode ser configurado para ser gerado com uma distância de 0.3 mm em relação a peça principal para facilitar sua remoção após o término da impressão.

Figura 90 - Evidência de peça grande em ABS com suporte



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 90 se pode observar a peça finalizada, sem os suportes e com raspagem dos restos de filamento decorrentes de retração. Se pode mencionar que o filamento ABS por ser mais duro e secar mais rápido, gera menos retração que o material PLA.

#### 3.4.1.8 Teste de resolução e estresse da impressão em ABS com modelo 3D Benchy

O próximo teste realizado foi com a utilização do modelo 3D Benchy, conforme Figura 91, que é amplamente utilizado para executar de forma conjunta vários parâmetros e capacidades de uma impressora 3D tanto em simetria, empenamento, resolução e saliência. É tido como um teste para estressar todo sistema com ângulos difíceis e avaliar a qualidade do equipamento de forma geral.

Figura 91 - Evidência 3D Benchy



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

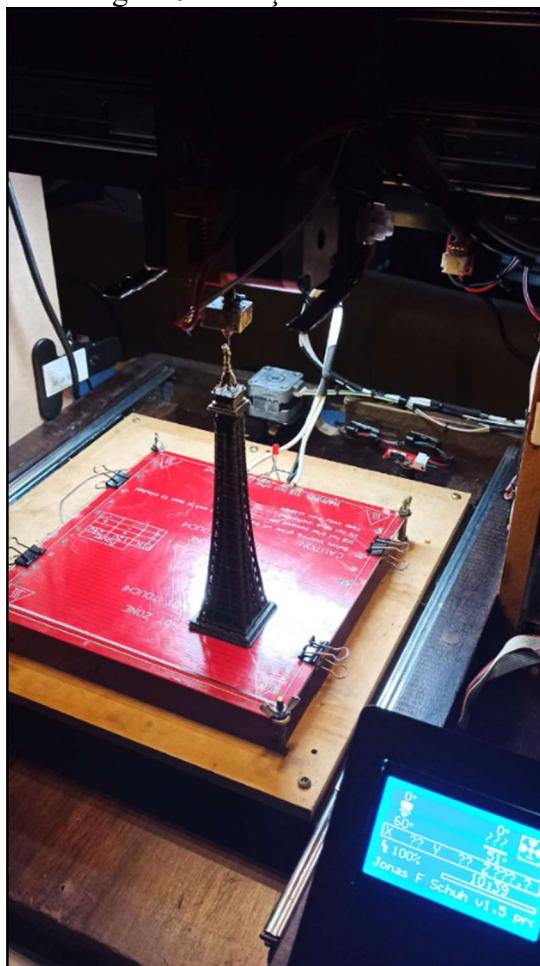
Na Figura 91 se pode observar a evidência da peça impressa, sem nenhum desbaste, lixamento ou ajuste de acabamento.

#### 3.4.1.9 Teste de objeto grande em ABS

O último teste a ser realizado com o material ABS é um objeto grande e detalhado. O exemplo utilizado é um modelo em 3D da torre Eiffel. Esse modelo é dividido em duas peças, totalizando 30 centímetros de altura.

A impressão das duas partes ocorreu de forma tranquila. Na Figura 92 se observa a impressão da parte A, totalizando 16 centímetros de altura, impressa em ABS e teve duração de 10 horas e 39 minutos.

Figura 92 - Peça alta em ABS

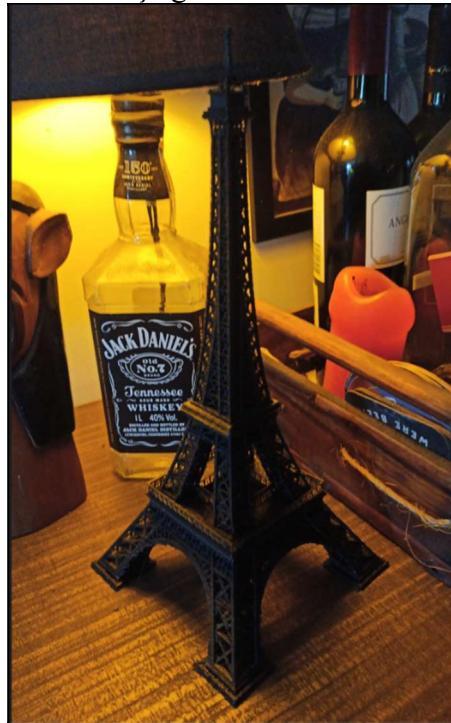


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 93 se observa a peça montada, totalizando 30 centímetros, onde as partes A e B foram fixadas com cola quente no material ABS que aderiu muito bem. A duração total da impressão das duas peças totalizou aproximadamente 40 horas de impressão. A base da torre tem 14 centímetros.

Esse teste teve como objetivo avaliar vários comportamentos e se pode concluir que a impressão de peças grandes com o material ABS demonstrou um resultado excelente. A questão de duração de toda estrutura da impressão, que operou por 40 horas seguidas, sem nenhum problema técnico, tanto de aquecimento, trepidação e por fim, testes de estresse de movimentação dos eixos pelo fato da área de impressão da base ser grande.

Figura 93 - Peça grande em ABS finalizada



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

A parte A do modelo testou a impressão na questão de altura e movimentação do eixo Z, enquanto a base da torre de 14 centímetros ou 140 milímetros, testou a capacidade de movimentação dos eixos X e Y, utilizando quase toda capacidade da mesa de impressão.

#### 3.4.1.10 Finalização dos testes

Os testes desenvolvidos nessa seção totalizaram mais de 200 horas e a execução ocorreu com diferentes combinações de técnicas, materiais, condições climáticas e ferramentas. No total foram impressos mais de 50 modelos em 3D, conforme Figura 94 se observa evidência dos objetos impressos.

Durante os testes foram utilizados um rolo de um quilograma do material ABS Premium (sem marca) na cor preta, onde foi utilizado cerca de 80 por cento de sua capacidade e quinhentos gramas do material PLA Basic da empresa 3D Fila, que foi utilizado 90 por cento de sua totalidade. Nessa seção foram expostos e comentados apenas os casos mais relevantes.

O escopo dos testes de impressão em sua totalidade contém imagens de personagens, objetos orgânicos, suportes de peças para mecatrônica, imagens de pontos turísticos e logotipos.

Figura 94 - Finalização dos testes



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

O material PLA é muito mais fácil de trabalhar na impressão 3D do que o material ABS. Na questão de resultados obtidos com o protótipo, os dois materiais superaram expectativas.

Os testes demonstraram extrema versatilidade do material PLA tanto em qualidade como operação e os resultados obtidos com o material ABS, considerando que mesmo utilizado em uma impressora aberta, sem atingir a temperatura ideal de aquecimento de mesa recomendada pelo fabricante, também superou as expectativas. Os únicos testes que o ABS não é recomendado nesse cenário são os casos de impressão de formas geométricas rígidas, como exemplo, um retângulo ou qualquer outra forma que necessite enorme fixação com a base, que a partir de algumas camadas, começa a empinar a base impressa e torcer a peça.

### 3.4.2 Operacionalidade da implementação

Nessa seção será apresentado o funcionamento da implementação através de um estudo de caso. O estudo de caso selecionado para demonstrar a utilização da solução é a estrutura principal do projeto Furbot (FURB, 2024).

Os requisitos para atingir essa demanda são:

- a) criação de uma estrutura capaz de suportar a estrutura do Furbot em sua base inferior que seja leve o suficiente para não prejudicar o desempenho;
- b) as dimensões da base do Furbot medem 25 centímetros de largura, 25 centímetros de profundidade e 29 centímetros de altura;
- c) em virtude de a área de impressão ser menor que o tamanho pretendido de uma peça única, se tornou necessário criar várias chapas interconectadas para construir a estrutura;
- d) a estrutura deve ser de baixo custo;
- e) os recursos utilizados, preferencialmente deverão utilizar mão de obra dos bolsistas alocados no projeto Furbot.

Para atender esses requisitos, se optou pelo início da impressão de placas com modelos prontos, através de pesquisas de modelos no site Thingiverse que é um repositório de modelos 3D (Thingiverse, 2024).

Na Figura 95 se pode observar o resultado do primeiro experimento, com placas de 10 x 10 centímetros e suas conexões impressas com o material ABS.

Figura 95 - Placas feitas em ABS com modelo 3D



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Os resultados obtidos desse experimento não foram satisfatórios, pelo motivo que a estrutura não atingiu a rigidez desejada, além da estrutura ser impressa com o material ABS não estar perfeitamente alinhada em relação a base, devido ao empengamento do material. Essa abordagem foi descartada.

Após analisar os resultados, se decidiu junto com o bolsista, criar um modelo 3D próprio para testar a solução.

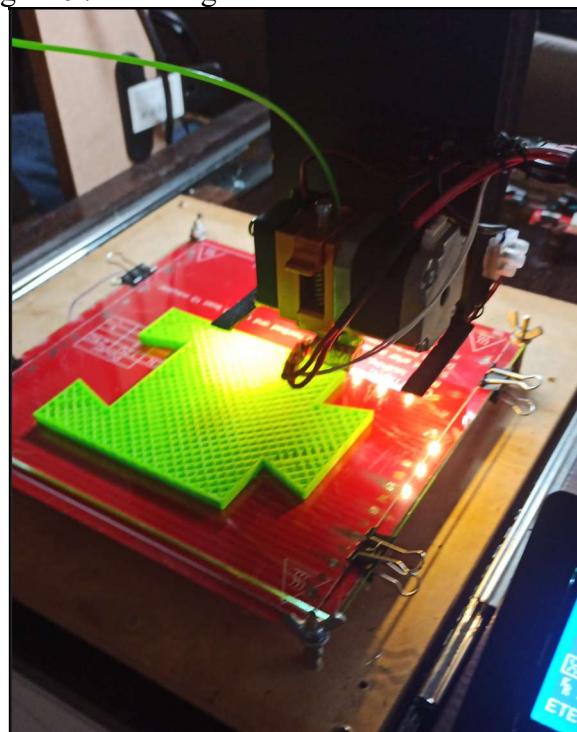
Figura 96 - Placas feitas em PLA com modelo 3D próprio



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 96, se pode observar que essa solução se tornou mais eficiente, devido ao aumento espessura das placas, viabilizadas pelo material PLA que foi criado com alinhamento perfeito a base. As novas placas geradas no protótipo, conforme Figura 97, nas medidas de 10 centímetros de largura, 5 centímetros de profundidade e 1 centímetro de altura, resolveram o problema de rigidez e da conexão entre as placas. Para atingir a conexão perfeita entre placas, se tornou necessário ajustes do modelo 3D no encaixe macho e fêmea, reduzindo em 0.2 mm o encaixe macho. Após esse objetivo atingido, próximo objetivo foi gerar placas maiores.

Figura 97 - Placa grande em PLA com modelo 3D



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Os protótipos das placas grandes foram impressos nas dimensões de 10 centímetros de largura por 15 centímetros de profundidade e 1 centímetro de altura. O processo de impressão de cada peça levou aproximadamente 4 horas. Na Figura 97 se pode observar como é a estrutura de reforço interna em formato de grade.

Figura 98 - Evidência da placa grande gerada



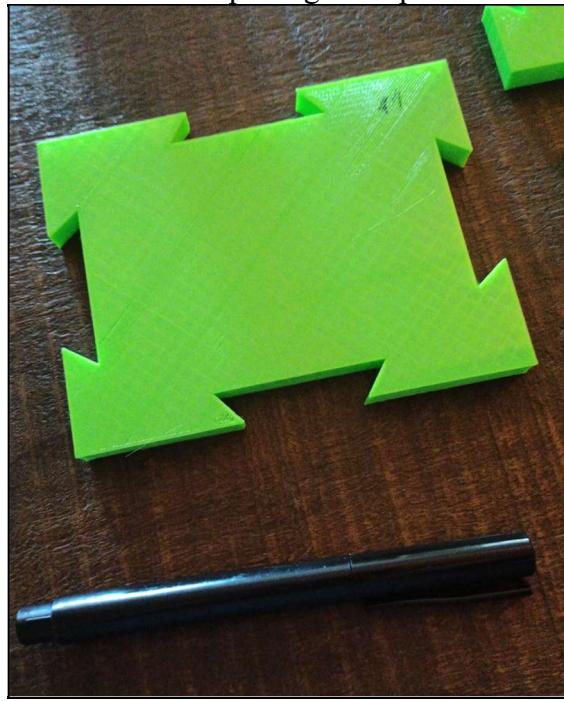
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 98, se pode observar a placa grande em comparação com as placas pequenas. Essa etapa demonstra que as questões de tamanho de placa e de conexões se entendeu como atingidas.

Durante o processo de criação, se observou que para montar toda estrutura da fuselagem do Furbot, iria ser necessário a criação de tipos de peças diferentes de encaixe, no caso para os cantos e partes superiores. A estrutura de 25 centímetros de largura e profundidade, será composta por duas placas de 13 centímetros, considerando 0.5 centímetros de espaço para conexão dos cantos. A altura de 29 centímetros do protótipo será composta por três camadas de placas interligadas, que totalizará 30 centímetros de altura e com essa solução, irá utilizar um único modelo de placa com conexões em todos os lados.

Diante desse objetivo, foram gerados três novos modelos modelo 3D com esses requisitos, sendo o primeiro uma placa grande com conexões em todos os lados e mais dois modelos de conexão, um no formato ângulo reto e outro em forma de canto.

Figura 99 - Evidência da placa grande padrão com conexões

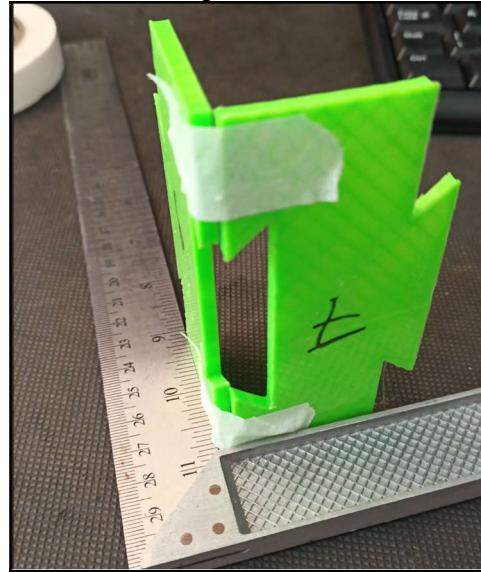


Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 99 é ilustrada a versão final da placa grande padrão com as medidas de 13 centímetros de largura, 10 centímetros de profundidade e 1 centímetro de altura. Esse modelo foi gerado com o material PLA e levou aproximadamente cinco horas para ser gerado.

O próximo objetivo a ser atingido é a conexão dos cantos de conexão entre peças, conforme é ilustrado na Figura 100, se observa um esboço da demanda em relação ao esquadro.

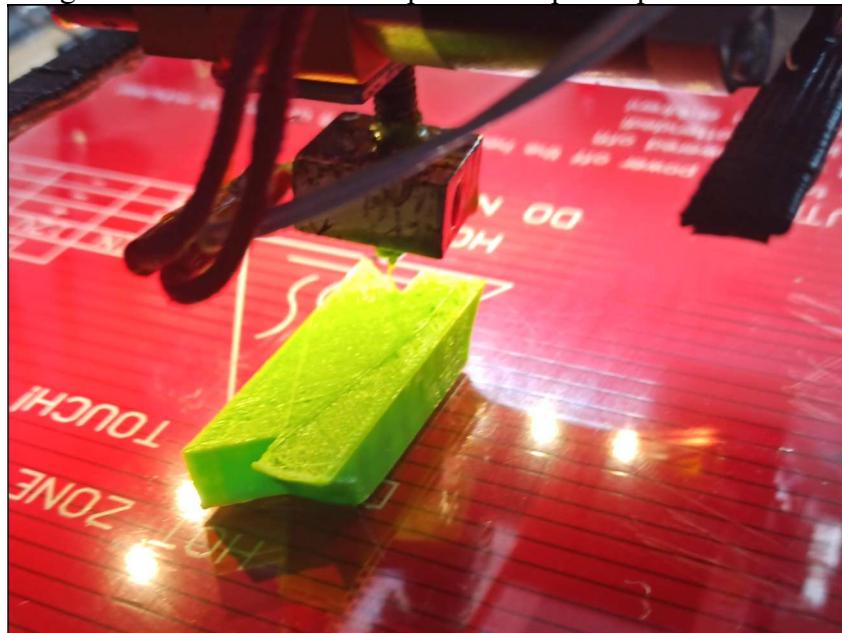
Figura 100 - Protótipo de conexão entre cantos



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Foram impressos os dois modelos 3D concebidos para esse fim, para posteriormente efetuar o teste de conexão e finalização dessa etapa, conforme Figura 101.

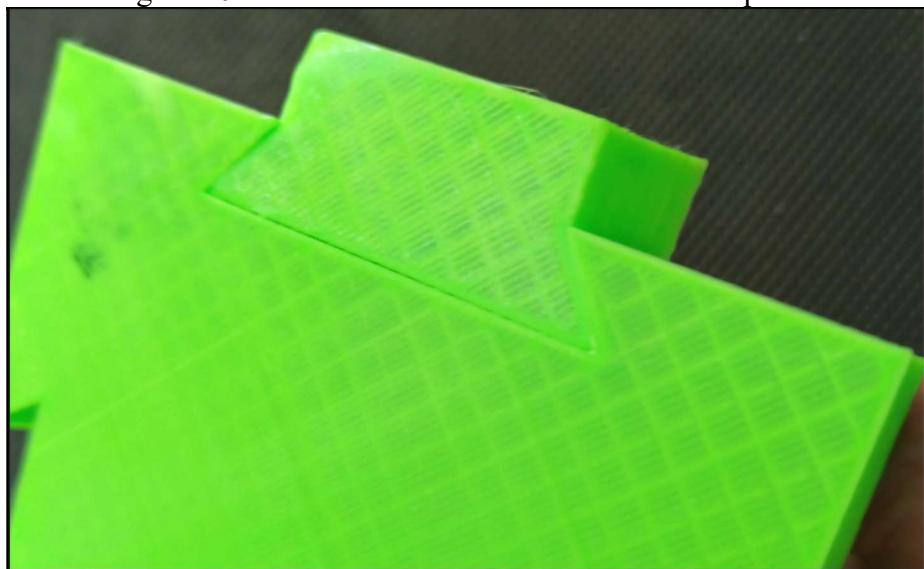
Figura 101 - Evidência de impressão do protótipo de conexão



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

As impressões dos dois tipos de conexão ocorreram de forma tranquila e rápida. A duração da impressão levou em torno de 30 minutos cada peça, conforme é ilustrado na Figura 101. Após todas as peças do protótipo estarem finalizadas, se realizou o teste de encaixe entre peças que foram bem-sucedidos na primeira tentativa, conforme Figura 102.

Figura 102 - Evidência do teste de conexão entre placas



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 102 se pode observar a evidência do teste de conexão entre placas com a peça de conexão entre cantos, que viabiliza a criação de toda estrutura da fuselagem do Furbot com apenas três modelos de peças padronizadas. O tempo total utilizado durante esse estudo de prototipagem dos modelos de peças foram de aproximadamente 40 horas.

### 3.4.3 Principais problemas e soluções

Nessa sessão serão abordadas as principais lições aprendidas durante toda implementação, testes e ajustes ocorridos da construção do protótipo.

**Problema com pallets:** na fase de projeto desse protótipo, com objetivo de reduzir o custo, se optou pela utilização de pallets para criação da estrutura física da impressora. No entanto no início da montagem, se constatou que os pallets em geral, são criados com madeiras irregulares em termos de esquadro e que não permitem um ângulo de encaixe perfeito e necessário para o correto funcionamento da impressora 3D que demanda precisão. Todos os encaixes das madeiras devem ser em exatos 90 ou 180 graus. Diante dessa situação, se optou por trocar o material pelo MDF de 15 milímetros, também de reaproveitamento e os cortes de precisão foram feitos por uma empresa terceirizada.

**Cabos de sinal dos sensores de fim de curso:** durante os testes, se identificou problemas de indução nos cabos de controle de fim de curso que ocasionaram travamento dos motores, em especial do eixo X. Os cabos receberam interferência por estarem condicionados próximo aos cabos de energia do protótipo. Para solucionar essa questão, os cabos dos sensores foram condicionados em outra posição com objetivo de evitar proximidade dos cabos de energia.

**Problema no visor de LCD:** durante os testes, o visor de LCD parou de funcionar em virtude da queima do regulador de voltagem da placa Arduino. O visor parou de exibir caracteres de forma legível e em alguns casos operava corretamente por alguns segundos.

Como solução paliativa, se realizou testes com um circuito integrado 7805 com objetivo de regular a voltagem do circuito, porém não se demonstrou eficaz em todos os casos. A solução para essa situação foi ligar a placa Arduino direto na porta USB. A placa Ramps (RepRap Contributors, 2024) versão 1.4, por ser um hardware de código aberto, contém vários problemas e falhas crônicas que provavelmente estão resolvidos em versões posteriores. Atualmente a placa Ramps (RepRap Contributors, 2024) está na versão 1.6, porém com um custo muito superior a placa versão 1.4.

**Motores X e Y operando de forma conjunta:** Durante a configuração do firmware, ao emitir comando para movimentar o motor X, o motor Y girava no sentido inverso. Durante essa etapa foram realizados testes com os controladores de motor de passo A4899 e DRV8825 com objeto de identificar o problema. Também foram trocados motores e realizadas outras tentativas, até que se descobriu que o problema estava na configuração de operação do firmware, que estava configurada para operar no sistema COREXY. Essa opção se encontra no

arquivo Configuration.h do firmware *Marlin*, na seção Mechanical Settings, onde se deve comentar a linha com a opção `define COREXY`.

Problemas de movimentação no eixo Y: se constatou que o eixo Y estava com problemas de movimentação decorrentes do excesso de peso no eixo. A estrutura estava forçando demais o motor que teve que ter seu VREF ajustado para 0.75 A. A solução dessa situação foi a troca e alinhamento da corrediça para fluir de maneira suave e sem travamentos. O VREF do controlador do motor de passo foi novamente configurado para tensão de 0.50 ampere, em virtude que o VREF alto provocou aquecimento do motor.

Montagem do eixo Z: Durante a calibração de distância e torque do motor do eixo Z, foram realizados vários ajustes na configuração do controlador do motor de passo. Se pode citar a combinação da configuração de torque, com a redução de 1/16 passo para 1/8 passo com objetivo de aumentar o torque do motor. Essa configuração de 1/16 para 1/8 passo não prejudicou a resolução em virtude que esse eixo utiliza barra rosada, porém se constatou que não resolveu o problema em sua totalidade. Também se realizou testes de geometria, troca de corrediças com mais rolamentos, testes com óleo e com graxa azul para melhorar o fluxo das corrediças.

Durante esses ajustes, no momento de regulagem de VREF do controlador do motor de passo, a placa Ramps (RepRap Contributors, 2024) queimou, em virtude de o autor encostar a ponta da chave Philips em um dos pinos do driver do motor de passo. Após a reposição da placa Ramps (RepRap Contributors, 2024), placa controladora do motor de passo e finalização dos ajustes no motor eixo Z, a solução para o problema foi encontrada e estava no alinhamento do motor em relação ao eixo que corre a barra rosada, que demandou ajuste fino para estar em um ângulo perfeito de 180 graus em todo curso de operação do eixo.

Montagem da mesa aquecida: Durante a instalação da mesa aquecida, surgiu a necessidade de fixar o sensor de temperatura no orifício específico para esse fim, com objetivo de realizar a correta medição de temperatura. Com objetivo de reduzir o custo, inicialmente foi utilizado silicone para altas temperaturas, utilizado em blocos de motores automotivos, que segundo o fabricante, suporta temperaturas superiores a 240 graus célsius. A cura desse produto ocorre em 24 horas e após esperar o tempo determinado pelo fabricante, se constatou que o sensor não estava totalmente fixo na mesa. Se realizou nova aplicação do produto e após 72 horas novos testes foram realizados, porém sem sucesso.

Diante dessa situação, se buscou uma alternativa para esse fim, onde foi adquirido um rolo de fita Kapton, que é uma fita desenvolvida com poliamida, um material que tem por

destaque a capacidade isolante e de resistência a temperaturas entre -269 até 400 graus célsius. A fixação com a fita Kapton resolveu o problema de fixação.

Durante o teste de aquecimento da mesa, se tornou necessária a substituição dos cabos de energia da mesa, de cabos de 1.5 para cabos de 2.5 milímetros de silicone, projetados para suportar segundo o fabricante, até 180 graus célsius. Essa troca foi necessária em virtude do aquecimento devido ao alta demanda de fluxo de corrente.

Durante os testes de aquecimento da cama quente, se constatou que a temperatura chega rápido até os 60 graus, porém o software trava quando chega nas temperaturas que variam entre 78 e 85 graus conforme a situação climática realizada durante os testes. Devido a essa questão, o firmware foi reconfigurado para operar dentro dos limites da placa e teve sua temperatura máxima de operação configurada para 78 graus célsius, que é suficiente para o material PLA, porém insuficiente para o material ABS.

Ajustes na extrusora: durante os testes de tração de filamento, onde o processo consiste em enviar via software uma tração de 10 milímetros de filamento e comparar com uma régua de forma física a quantidade de filamento tracionado. O processo de ajuste deve ser repetitivo, por meio de regra de três até atingir a calibração desejada. Durante essa etapa, se realizou ajuste fino na VREF do controlador de motor de passo da extrusora, que inicialmente estava configurado em 0.40 ampere e foi alterado para 0.75 ampere para averiguar se o problema de tração era questão de torque no motor. Após testes, se constatou que o problema não era torque e sim a fixação do filamento que durante os testes ficou viciado por estar sempre sendo utilizado o mesmo pedaço de filamento. Com a substituição por um trecho novo de filamento, o fluxo de tração de filamento foi resolvido.

Aumento de capacidade de aquecimento da mesa aquecida: com objetivo de aumentar a capacidade de aquecimento da mesa, se realizou teste com a desobstrução de trilhas da placa aquecida com objetivo de reduzir a resistência elétrica da placa e aumentar a circulação de corrente elétrica para resultar em um aumento de temperatura. A técnica utilizada para esse fim resultou na junção de algumas trilhas, demonstrado na Figura 103.

A composição da placa da mesa aquecida consiste em uma estrutura de longas trilhas que se encontram de uma extremidade a outra da placa. A técnica utilizada foi o encurtamento do caminho dessas trilhas para reduzir a resistência elétrica que originalmente foi aferida em aproximadamente 1 ohm e após esse ajuste estava medindo 0.75 ohms. O resultado desse ajuste resultou em um aumento da capacidade de aquecimento da placa para até 92 graus célsius, porém resultou em vários problemas, como problemas no alinhamento do vidro em relação a placa, em virtude das soldas, além de forçar demais a fonte de energia de 12 volts e ocasionar

problemas no controlador de motor de passo no eixo X, no regulador de voltagem da placa Arduino e no visor de LCD.

Figura 103 - Evidência de solda nas trilhas da mesa aquecida



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Esse teste não foi bem-sucedido e os ajustes das trilhas da placa foram retirados. Após as características da mesa aquecida retornarem o formato original se levou um tempo até ajustar novamente a impressora. Se realizou testes com outra fonte de 12 volts, troca de controlador de motor de passo que estavam avariados.

Aquecimento de motores durante testes: durante os testes iniciais com os motores de passo se constatou superaquecimento dos motores. A solução paliativa foi a instalação de um dissipador de calor unido com pasta térmica com objetivo de dissipar o calor gerado pelo casco do motor. Essa situação foi resolvida com o reposicionamento das corrediças, lubrificação e nova regulagem do VREF dos motores. Após vários testes, o VREF foi configurando na mínima tensão sem prejudicar o torque e velocidade. Os valores finais e estáveis para eixo ficaram em aproximadamente 0.40 amperes para os eixos X, Y e extrusora e 0.30 amperes para o motor do eixo Z.

Proteção térmica via software: durante os primeiros testes de impressão se constatou que a temperatura da mesa aquecida oscila facilmente com a temperatura ambiente. Uma simples corrente de vento é suficiente para a placa da mesa aquecida oscilar 2 graus e o software travar por falha térmica, identificado através da mensagem Thermal runaway protection. A

resolução dessa situação se deu com a reconfiguração do firmware no arquivo configuration\_adv.h na seção Thermal settings com a alteração do parâmetro THERMAL\_PROTECTION\_HYSTESIS de 2 para 4 graus com objetivo de aumentar a tolerância de oscilação de temperatura.

Testes de impressão 3D das primeiras peças: no início das primeiras impressões ocorreram muitos problemas de descolamento da peça no vidro, resultado na deformação da peça além de sujar toda cabeça de impressão com filamento derretido. Essa situação foi resolvida com ajustes finos de velocidade de impressão na primeira camada via software e com o alinhamento e balanceamento da mesa de impressão de maneira manual.

Correias GT: o projeto original da impressora concebia a operação com barras roscadas nos eixos X, Y e Z devido ao baixo custo. Foi montada com as barras roscadas e funcionou de forma satisfatória, porém se constatou que os motores superaqueciam em virtude do excesso de movimentação demandado para avançarem nos eixos. Para se movimentarem 10 milímetros eram necessários aproximadamente 5000 passos no motor. A questão da manutenção dos eixos também foi um fator a ser levado em conta, pois demandava movimentação manual dos eixos através das engrenagens se houvesse necessidade de algum ajuste ou manutenção. Em alguns casos toda estrutura tinha que ser desmontada e remontada. O fator mais importante constatado foi a performance no trabalho de impressão que era bem lento, atingindo velocidade máxima de 3 milímetros por segundo.

A substituição pelo kit de correia GT e polias aumentaram a velocidade de impressão em até 10 vezes em virtude de os motores necessitarem girar menos para atingir o mesmo objetivo. Em uma comparação de avanço de 10 milímetros com barra roscada foram necessárias 5000 voltas e com a correia GT oscilou entre 80 e 160 voltas conforme a configuração de micro passos do controlador do motor. A manutenção ficou muito mais simples pois os motores quando não estão energizados permitem a livre movimentação dos eixos. O único fator negativo dessa solução é a manutenção de tensionamento das correias que se torna necessário em média a cada 20 horas de impressão, devido ao desgaste natural da correia que possui em sua composição borracha.

Configuração do PID AUTO TUNE: a configuração do firmware tem como padrão o sistema de aquecimento denominado Bang-Bang que consiste em um sistema de aquecimento que liga as resistências da mesa e da extrusora até atingir a temperatura estipulada pelo sensor e desliga. Esse processo ocorre de forma cíclica com objetivo de manter a temperatura configurada. Durante os testes esse sistema demonstrou deficiências porque ocorre uma

oscilação de temperatura entre o acionamento das resistências, resultando em pequenas deformações na peça impressa.

Para resolver essa situação o firmware teve seu sistema de aquecimento configurado para utilizar a funcionalidade PID Auto tune que não será abordado em detalhes nesse trabalho, porém existem vários tutoriais na internet sobre o tema. O processo consiste em executar um número pré-determinado e configurável de tentativas de aquecimento e na sequência o firmware retorna no console os valores ideais para o PID que devem ser configurados.

Após esse ajuste se observou uma significativa melhora na qualidade das impressões, principalmente durante os testes com o material ABS que corrigiu vários tipos de deformações decorrentes de pequenas oscilações de temperatura.

Problemas com retração de filamento: durante os testes se constatou vários problemas decorrentes ao vazamento de filamento derretido pelas roscas do bico e topo da cabeça de impressão e se observou a criação de nódulos durante a impressão da peça. Esses problemas foram minimizados com a configuração da retração no software de fatiamento, porém se pode afirmar que não existe uma fórmula que atende todos os casos. Cada formato de objeto, temperatura da extrusora, qualidade de filamento e velocidade de impressão podem causar esse efeito e nos casos testados, foram minimizados através de tentativa e ajustes. O valor mais aceitável obtido durante os testes foi a configuração da retração fixa em 4 milímetros.

Problema de travamento e formação de nós no rolo de filamento: essa situação se constatou em trabalhos longos de impressão superiores a duas horas. Se percebeu que em alguns casos a impressão foi perdida devido a formação de nós no rolo de filamento decorrentes das características do filamento PLA testado. Para resolver essa situação foi impresso um suporte de filamento em 3D para controlar o fluxo de filamento e evitar esse tipo de situação.

#### 3.4.4 Comparação com trabalhos correlatos

O Quadro 5 apresenta um comparativo entre as características deste trabalho e dos trabalhos correlatos. As características em comum entre todos os trabalhos são a utilização de hardware e software de código aberto e peças reutilizadas para o desenvolvimento visando a construção de uma solução de impressão 3D de baixo custo.

Em relação aos objetivos, o trabalho mais parecido com o proposto é o de Zucca e Machado (2019). Ambos utilizaram as placas Arduino Mega 2560 e Ramps (RepRap Contributors, 2024) versão 1.4 com o firmware *Marlin*. A diferença é que o trabalho de Zucca e Machado (2019) possui foco na criação de protótipos do meio agrícola e o trabalho proposto

possui foco na questão da montagem detalhada da estrutura da impressora, baixo custo e reutilização de componentes.

Os quatro trabalhos avaliados utilizaram firmwares de código aberto. O trabalho de Batista (2021) utiliza o firmware *Teacup*, enquanto a obra de Level *et al.* (2022) utilizou o firmware GRBL e os demais utilizaram o firmware *Marlin*. Os firmwares *Teacup* e GRBL são firmwares mais limitados, porém compatíveis com o Arduino Uno que é mais simples e possui menos pinos em relação ao Arduino Mega 2560, no entanto oferecem menos vantagens e funcionalidades.

Quadro 5 - Comparativo deste trabalho com os correlatos

Características	Level <i>et al.</i> (2022)	Zucca e Machado (2019)	Batista (2021)	Trabalho desenvolvido
Quantidades motores eixo Z	2	2	2	1
Firmware	GRBL	Marlin	Teacup	Marlin
Placas	Arduino Uno	Arduino Mega 2560 e Ramps 1.4	Arduino UNO e CNC Shield	Arduino Mega 2560 e Ramps 1.4
Movimentação eixos X e Y	Barra de aço e guia linear	Barra de inox e guia linear	Barra de aço e guia linear	Corrediças telescópicas
Reutilização de peças de outros dispositivos	Não	Sim	Sim	Sim
Estrutura física	Montado	Comprado	Montado	Montado
Controle de fim de curso	Não	Sim	Não	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O trabalho desenvolvido em relação aos outros, utiliza apenas um motor para movimentar o eixo Z, porém consegue realizar as mesmas tarefas em comparação aos demais trabalhos comparados, viabilizando redução de custo, peso, manutenção e complexidade no protótipo. Uma questão importante a se comentar é que para operar com dois motores existe a demanda de ambos os eixos operarem em sincronia de movimentação. Mesmo com os motores

conectados na mesma saída do eixo Z existem questões de sincronismo de movimentação que podem demandar folgas ou pequenas diferenças de rotação entre outros fatores.

Todos os trabalhos efetuaram a reutilização de componentes de outros dispositivos, como exemplo a retirada de motores de passos de impressoras antigas, no entanto a obra de Level *et al.* (2022) não conseguiu utilizá-los e teve que realizar a aquisição de novos motores para prosseguir com o protótipo. Uma questão importante na reutilização de componentes de outros dispositivos é a falta de documentação devido ao fato de usualmente serem de propriedade intelectual do fabricante, que não tem interesse em divulgar informações tecnológicas de seus produtos devido a questões competitivas de mercado.

Com exceção do trabalho desenvolvido, que utilizou corrediças telescópicas de gavetas para movimentar os eixos X, Y e Z, todos os demais trabalhos utilizaram barras e guias lineares em seus projetos. A corrediça é um material mais barato e não tem por objetivo ser utilizada em soluções que demandam precisão, porém o trabalho proposto conseguiu atingir seus objetivos mesmo com um componente de custo inferior. As guias lineares são barras, em geral de aço e possuem rolamentos específicos para utilização em situações que demandam precisão, usualmente utilizados em todo tipo de máquina possui essa demanda, porém o custo é muito mais elevado em relação a soluções mais simples.

Na questão da estrutura física dos trabalhos desenvolvidos, apenas o trabalho Zucca e Machado (2019) realizou a compra da estrutura em madeira pré-fabricada e realizou apenas a montagem. Todos os demais trabalhos realizaram o corte das madeiras em diferentes formatos e variações e realizaram a montagem de forma mais artesanal.

Os trabalhos de Level *et al.* (2022) e Batista (2021) utilizarem firmwares mais simples que não ofereceram a funcionalidade de controle de fim de curso, enquanto os demais trabalhos possuem essa funcionalidade implementada. Os controles de fim de curso são úteis para que todos os eixos efetuam o retorno para sua origem de forma automática no início de cada impressão.

Batista (2021) enfatiza que um dos maiores problemas enfrentados durante a realização do trabalho foi o excesso de folga entre as buchas plásticas e as guias lineares que dificultaram muito o alcance da precisão necessária. Inicialmente a ideia era utilizar apenas uma barra linear para cada eixo, mas se percebeu não ser possível, pois qualquer sinuosidade da barra por menor que fosse, provocaria uma perda inadmissível na precisão do movimento (Batista, 2021). Como solução, Batista (2021) utilizou duas guias lineares paralelas por eixo para resolver o problema.

#### 4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a construção de uma impressora 3D de baixo custo. Para esse objetivo, foi realizado a montagem das partes estrutural, mecânica e eletrônica. Foram utilizadas peças recicláveis, placa Arduino Mega 2560, kit eletrônico Ramps versão 1.4, demais periféricos e um conjunto de firmware e softwares com as funcionalidades necessárias para viabilizar o projeto.

As ferramentas e equipamentos necessários utilizados atenderam as necessidades do projeto, tornando a impressora 3D funcional e capaz de executar todas as funcionalidades propostas com excelente qualidade. O hardware e os softwares utilizados, desde o ambiente de desenvolvimento até a homologação demonstraram que é possível o desenvolvimento de uma impressora 3D funcionar perfeitamente com componentes de baixo custo e usar apenas softwares de código aberto. O uso da placa Arduino Mega em conjunto com a placa Ramps versão 1.4 além de seu baixo custo permitirá ao projeto uma modularidade e customização de futuras melhorias. Se pode entender como uma grande vantagem em relação a impressoras comerciais do mesmo segmento que nessa questão são muito limitadas devido a tecnologia proprietária. O microcontrolador ATMega2560 utilizado na placa Arduino demonstrou uma excelente capacidade de orquestração de vários periféricos e realizou sincronismo perfeito após extensa configuração e ajustes. Esse sincronismo envolveu quatro motores de passo, três sensores de fim de curso, dois sensores de temperatura, duas resistências, além de atualização em tempo real do visor gráfico de LCD e software de impressão 3D, entre outras funcionalidades.

A construção de uma impressora 3D envolve várias áreas de conhecimento, entre elas, conhecimentos de marcenaria, robótica, engenharia mecânica e elétrica, prototipação e modelagem de objetos em três dimensões e eletrônica. Para atingir os resultados esperados são necessários muita disciplina, paciência e dedicação, devido a necessidade de realizar montagem e desmontagem de componentes nas fases de ajustes e alinhamento de impressão.

A montagem e ajustes da parte mecânica foi a mais desafiadora durante todo projeto. A estrutura de madeira foi montada e desmontada três vezes até atingir um nível aceitável de qualidade de impressão. Durante o projeto ocorreram vários ajustes na questão de movimentação dos eixos, como travamentos, folgas nas correrias e problemas de aquecimento que demandaram de ajustes para sua completa resolução.

Também se pretende com esse trabalho evidenciar que a operação de uma impressora 3D é muito diferente de uma impressora 2D tradicional. As impressoras 2D tradicionais

comerciais, atualmente estão em um nível elevado de abstração para realizar a impressão. Para executar a operação basta selecionar a impressora e pressionar o botão imprimir que a impressão é realizada e finalizada de forma simples. Em comparação, uma impressora 3D demanda vários ajustes finos, antes, durante e após a impressão. Também se pode afirmar que cada modelo 3D a ser impresso demanda uma configuração específica para aquele objeto, de acordo com a sua forma, rigidez, filamento utilizado, temperatura ambiente, entre outras variáveis. Não existe uma configuração padrão que seja compatível com todos os modelos de impressão.

Esse trabalho foi relevante por mostrar a possibilidade de construir uma impressora 3D com componentes de baixo custo, hardware e software de código aberto. Também se espera que irá contribuir e estimular estudantes e entusiastas a utilizarem essa tecnologia para aplicar em estudos mais específicos, como prototipagem rápida para outras áreas, entre elas, arquitetura, medicina, engenharia e eletrônica. Os testes realizados com o protótipo apresentaram resultados excelentes e se pode concluir que todos os objetivos propostos foram alcançados superando as expectativas do início do projeto.

As principais vantagens observadas no trabalho são:

- a) baixo custo;
- b) excelente custo-benefício;
- c) fácil manutenção;
- d) baixo acoplamento por utilizar hardware e software de código aberto;
- e) facilidade de customização por não usar hardware proprietário;
- f) utiliza apenas um motor no eixo Z, que reduz custo, peso e complexidade do projeto.

Entre as principais limitações do trabalho está a questão que devido ao protótipo ser aberto e de baixo custo, não é capaz de operar corretamente com material ABS, pois seria necessário readequar todo conjunto para atingir esse objetivo. Também se pode citar a questão da parte estética devido aos cabos e engrenagens estarem visíveis e por fim o protótipo poderia ser mais leve e compacto.

A questão de o protótipo ser aberto, se entende que não foi projetado para ter um isolamento térmico, necessário para o correto funcionamento e operação com o material ABS. Para tornar isso possível, toda área de impressão deverá ser envolvida por um ambiente isolado e com temperatura controlada com objetivo de evitar deformação do material. Também a mesa aquecida terá que ser mais potente, devido a elevadas temperaturas que são necessárias para manter a aderência do material a base de impressão. A estrutura de engrenagens e cabos, deverão ser capazes de operar em um ambiente com temperaturas iguais a temperatura da mesa aquecida e deverão estar isolados do ambiente externo. As placas eletrônicas, motores e demais

componentes deverão estar isolados do ambiente interno de impressão para evitar superaquecimento. Todo esquema elétrico deverá ser refeito e ser compatível com essa demanda de potência e tolerância térmica.

Se acredita que a impressão 3D tem muito a evoluir e se observa que atualmente as impressoras 3D mais modernas do segmento realizam a impressão com até quatro cores de filamento. Esse pensamento remete a fase da chegada das impressoras matriciais na década de 90 no país, onde realizavam impressão com fitas de apenas uma cor e com a evolução surgiram novas tecnologias acessíveis ao público, como a impressora matricial com fita de duas cores, depois quatro cores. Na sequência, surgiu impressora de jato de tinta e após a impressão a laser. Também se acredita na evolução de scanners que realizam a captura de imagens e objetos em formato 3D que também podem contribuir para esse ecossistema.

#### 4.1 EXTENSÕES

Para melhorar as funcionalidades deste trabalho ou acrescentar novas, as seguintes extensões são sugeridas:

- a) desenvolver uma versão de uma impressora 3D fechada com sistema de célula de aquecimento com temperatura controlada para operar corretamente com o material ABS;
- b) realização de estudo dessa tecnologia para construção civil: com projeto de criação de uma extrusora de argamassa e posteriormente uma impressora 3D em grande escala com objetivo de gerar uma casa com essa tecnologia;
- c) realização de estudo de exploração dessa solução de impressora 3D de baixo custo, para criação de próteses em 3D para auxiliar áreas da saúde e da comunidade;
- d) realização de estudo dessa tecnologia para disseminar o ensino sobre impressão 3D para fins diversos de prototipação rápida de peças para projetos ou programas sociais;
- e) criação de estrutura para gerar filamento de impressão 3D com a reciclagem de garrafas PET e realizar ajustes necessários na impressora para utilização desse tipo de filamento que é ecologicamente amigável;
- f) desenvolver um protótipo de mesa aquecida baseado em resistências de baixo custo com objetivo de atingir 120 graus de forma estável para utilização e aprimoramento desse protótipo.

## REFERÊNCIAS

- ALLEGRO. DMOS microstepping driver with translator and overcurrent protection.** [2014?] Disponível em:  
[https://www.pololu.com/file/0J450/a4988\\_DMOS\\_microstepping\\_driver\\_with\\_translator.pdf](https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf). Acesso em: 12 abr. 2024.
- ARDUINO. Arduino IDE 1.8.19**, 2021. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software>. Acesso em: 15 maio 2024.
- ARDUINO. Arduino® MEGA 2560 Rev3**, 2024. Disponível em:  
<https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.
- BATISTA, Ivanildo. Construção de uma impressora 3d de baixo custo com materiais alternativos.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário Internacional Uninter, Cascavel, 2021. Disponível em:  
<https://repositorio.uninter.com/handle/1/1273?show=full>. Acesso em: 5 set. 2023.
- CELERINO, Gleydson Galvão et al. Construção de uma impressora 3d de baixo custo utilizando hardware e software de código aberto.** 2022. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em:  
<https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/867>. Acesso em: 5 set. 2023.
- EVANS, Brian. Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing.** New York: Apress, 2012.
- FREECAD TEAM. [FreeCAD].** 2024. Disponível em: <https://www.freecad.org/>. Acesso em: 15 maio 2024.
- FURB. FURBOT.** Blumenau, 2024. Disponível em: <https://furbotldtt.wixsite.com/my-site-1>. Acesso em: 16 maio 2024.
- HORNE, Richard; HAUSMAN, Kalani Kirk. 3D Printing for Dummies.** 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc; Hoboken, 2017.
- LEVEL, Jaimakson Rafael de Melo et al.** A Filosofia DIY: reaproveitamento de sucata eletrônica para a construção de impressora 3d de baixo custo. **Revista Novafisio**, [s. l.], v. 26, n. 109, 28 abr., 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.6502998>. Acesso em: 13 set. 2023.
- MARLIN. [Marlin Firmware 1.1.9].** 2020. Disponível em:  
<https://github.com/MarlinFirmware/Configurations/tree/release-1.1.9>. Acesso em: 15 maio 2024.
- MOTION KING. 17HS Stepper Motor - 42mm (1.8 degree).** [2006-2024] Disponível em:  
[https://www.motionking.com/products/Hybrid\\_Stepper\\_Motors/17HS\\_Stepper\\_Motor\\_42mm\\_1.8degree.htm](https://www.motionking.com/products/Hybrid_Stepper_Motors/17HS_Stepper_Motor_42mm_1.8degree.htm). Acesso em: 15 maio 2024.
- MURTA, José Gustavo Abreu. Tudo Sobre DRIVER A4988 e Motor de Passo.** 2022. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/driver-a4988-motor-de-passo-usando-o-arduino/>. Acesso em: 11 abr. 2024.
- POLIÁCIDO LÁCTICO.** In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2024. Disponível em:  
[https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Poli%C3%A1cido\\_1%C3%A1ctico&oldid=67795277](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Poli%C3%A1cido_1%C3%A1ctico&oldid=67795277). Acesso em: 15 maio 2024.

PRUSA, Josef; STRITESKY, Ondrej; BACH, Martin. **Basics of 3D Printing with Josef Prusa**. Praga: Prusa Research, 2020.

QUEIROZ, Leonardo de Jesus *et al.* **Construção de uma impressora 3D: Projetos abertos de baixo custo e possibilidades da aplicação na educação**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fundação Parque Tecnológico Itaipu, Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em: <https://repositorio.uninter.com/handle/1/1273>. Acesso em: 5 set. 2023.

REPETIER. [Repetier-host]. 2024. Disponível em: <https://www.repetier.com>. Acesso em: 12 abr. 2024.

REPRAP CONTRIBUTORS. **RAMPS 1.4 Assembly Guide**. 2024. Disponível em: [https://www.reprap.org/mediawiki/images/0/06/RAMPS\\_dossier.pdf](https://www.reprap.org/mediawiki/images/0/06/RAMPS_dossier.pdf). Acesso em: 15 maio 2024.

RISCO-CASTILLO, Miguel. **3D BLTouch**. 2023. Disponível em: <https://github.com/mriscoc/Ender3V2S1/wiki/3D-BLTouch>. Acesso em: 11 abr. 2024.

SILVA, Cesar Ricardo Câmara da. **Curriculum do sistema currículo Lattes**. [Brasília], 29 set. 2017. Disponível em: Disponível em: <http://lattes.cnpq.br/3767853300683676>. Acesso em: 15 maio 2024.

SILVA, Gabriel Beires; SILVA, Luis Henrique Pereira da. **Prototipagem de uma impressora 3d de baixo custo**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Faceg, Goianésia, 2023.

THINGIVERSE. [Biblioteca de formas do relevo]. 2024. Disponível em: <https://www.thingiverse.com>. Acesso em: 15 maio 2024.

TRIMBLE INC. [3DWarehouse]. 2024. Disponível em: <https://3dwarehouse.sketchup.com/>. Acesso em: 15 maio 2024.

TRIMBLE INC. [SketchUP]. 2023. Disponível em: <https://www.sketchup.com/pt-br>. Acesso em: 15 maio 2024.

WISINTAINER, Miguel Alexandre. **Curriculum do sistema currículo Lattes**. [Brasília], 18 jul. 2014. Disponível em: <http://lattes.cnpq.br/0989671167867867>. Acesso em: 15 maio 2024.

ZALM, Erik Van Der *et al.* **Marlin Firmware**. 2023. Disponível em: <https://marlinfw.org/>. Acesso em: 9 set. 2023.

ZUCCA, Rafael; MACHADO, Carlos Alberto Chuba. **Desenvolvimento de impressora 3D de baixo custo para prototipagem de peças para o meio rural**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/943>. Acesso em: 5 set. 2023.