

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA
CAMPUS SÃO JOSÉ

FELIPE DOS PASSOS CARDOSO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FRESADORA CNC PARA
CONFECÇÃO DE ANTENAS PLANARES**

SÃO JOSÉ

2025

Felipe dos Passos Cardoso

Desenvolvimento de uma fresadora CNC para confecção de antenas
planares

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Santa Catarina, para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Telecomunicações

Orientadora: Profa. Evanaska Maria Barbosa Nogueira, Dra.

São José

2025

Felipe dos Passos Cardoso

Desenvolvimento de uma fresadora CNC para confecção de antenas
planares

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Santa Catarina, para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

São José, 19 de dezembro de 2025.

Profa. Evanaska Maria Barbosa Nogueira, Dra.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Diego da Silva Medeiros, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Ramon Mayor Martins, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

RESUMO

Os dispositivos de comunicação sem fio exercem um papel fundamental na troca de informações e utilizam antenas como elementos essenciais para a transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas. Com a crescente demanda por equipamentos mais compactos e eficientes, intensificam-se as pesquisas envolvendo antenas planares, que se destacam pela facilidade de integração e baixo perfil. Entretanto, o desenvolvimento desse tipo de antena apresenta desafios na etapa de fabricação, especialmente no que se refere à precisão e ao custo dos equipamentos necessários, o que pode limitar sua aplicação em ambientes acadêmicos. Uma alternativa para essa problemática é a utilização de máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) para a confecção das antenas por meio do processo de fresamento. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma fresadora CNC de pequeno porte, utilizando componentes acessíveis, visando sua aplicação no ensino e na pesquisa. O projeto contemplou as etapas de concepção mecânica, integração eletrônica e implementação do sistema de controle. Os testes realizados permitiram validar o funcionamento do sistema de movimentação e do controle da máquina, bem como a execução de simulações completas de usinagem. Embora não tenha sido possível a fabricação física de uma antena planar devido a limitações no sistema de usinagem, os resultados obtidos demonstram a viabilidade da fresadora desenvolvida como uma plataforma funcional e passível de aprimoramentos futuros para aplicações acadêmicas.

Palavras-chave: Fresadora CNC. Antenas impressas. PCI. Prototipagem.

ABSTRACT

Wireless communication devices play a fundamental role in information exchange and rely on antennas as essential components for the transmission and reception of electromagnetic waves. With the increasing demand for more compact and efficient equipment, research on planar antennas has intensified due to their low profile and ease of integration. However, the development of this type of antenna presents challenges in the manufacturing stage, particularly regarding precision and the high cost of machining equipment, which may limit its use in academic environments. An alternative to this issue is the use of Computer Numerical Control (CNC) machines to manufacture antennas through the milling process. In this context, this work aimed to develop a small-scale CNC milling machine using readily available components, with a focus on applications in teaching and research. The project included the mechanical design, electronic integration, and implementation of the control system. The performed tests validated the operation of the motion system and machine control, as well as complete machining simulations. Although the physical fabrication of a planar antenna was not achieved due to limitations in the machining system, the obtained results demonstrate the feasibility of the developed CNC machine as a functional platform with potential for future improvements in academic applications.

Keywords: CNC milling machine. Printed antennas. PCB. Prototyping.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação de um fresadora CNC vertical	16
Figura 2 – Representação de um fresadora vertical de pórtico móvel	17
Figura 3 – Representação de um fresadora vertical de pórtico fixo	18
Figura 4 – Exemplo de perfil de alumínio estrutural	19
Figura 5 – Exemplo de placas de MDF	20
Figura 6 – Exemplo de placas ACM	20
Figura 7 – Exemplo de fuso trapezoidal	21
Figura 8 – Exemplo de correia dentada e polias	22
Figura 9 – Exemplo de eixos retificado e rolamentos lineares	22
Figura 10 – Placa controladora Arduino UNO	23
Figura 11 – Driver de acionamento A4988	23
Figura 12 – Exemplo de motor de passo	24
Figura 13 – Micro retífica Western	24
Figura 14 – Exemplos de fresas	25
Figura 15 – Perfil de alumínio definido para estrutura principal	30
Figura 16 – Exemplos de placas de <i>Nylon</i> com 15 mm de espessura	30
Figura 17 – Imagens ilustrativas do fuso trapezoidal e da castanha antifolga	31
Figura 18 – Imagens ilustrativas do eixo retificado e rolamento linear	31
Figura 19 – Imagens ilustrativas dos parafusos, porcas e arruelas	32
Figura 20 – Imagens ilustrativas dos tipos de cantoneiras	33
Figura 21 – Imagens ilustrativas dos suportes <i>KP08</i> e <i>SHF12</i> e do acoplador	33
Figura 22 – Imagens ilustrativas dos blocos de fixação (<i>pillow blocks</i>)	33
Figura 23 – Imagens ilustrativas do <i>Arduino Uno</i> e módulo <i>CNC Shield v3</i>	35
Figura 24 – Imagens ilustrativas do <i>driver A4988</i> e módulo relé	35
Figura 25 – Motor de passo <i>NEMA 17</i>	36
Figura 26 – Imagens ilustrativas do motor 775 e eixo de suporte <i>ER11</i>	36
Figura 27 – Imagens ilustrativas da pinça e fresas	37
Figura 28 – Imagem ilustrativa da fonte de alimentação utilizada na fresadora	37
Figura 29 – Vista frontal do modelo 3D da fresadora projetada	40
Figura 30 – Vista posterior do modelo 3D da fresadora projetada	41
Figura 31 – Imagens ilustrativas da estrutura principal da fresadora	42
Figura 32 – Conjunto <i>pillow blocks SC12UU</i> customizados para mesa do eixo X	43
Figura 33 – Imagens das mesas com fixação dos <i>pillow blocks</i>	43
Figura 34 – Imagens ilustrativas da fresadora com sistemas de deslocamento	44
Figura 35 – Imagens ilustrativas da fresadora com sistemas de tração	44

Figura 36 – Imagem ilustrativa da <i>CNC Shield</i> com <i>jumpers</i> (de cor azul)	46
Figura 37 – Imagem ilustrativa da <i>CNC Shield</i> conectada ao <i>Arduino uno</i>	46
Figura 38 – Imagem ilustrativa do conjunto <i>CNC Shield</i> e <i>drivers</i>	47
Figura 39 – Imagem ilustrativa do ajuste de (V_{ref}) do <i>driver A4988</i>	48
Figura 40 – Esquemático do circuito para conexão dos motores à <i>CNC Shield</i>	49
Figura 41 – Esquemático do circuito para conexão das chaves de fim de curso	50
Figura 42 – Imagem ilustrativa do conjunto <i>spindle</i> montado	50
Figura 43 – Esquemático do circuito do <i>spindle</i> com módulo <i>relé</i> e <i>CNC Shield</i>	51
Figura 44 – Imagem da vista frontal da fresadora CNC desenvolvida	57
Figura 45 – Imagem da vista posterior da fresadora CNC desenvolvida	58
Figura 46 – Dimensões do perfil e cantoneiras em milímetros (mm)	64
Figura 47 – Dimensões do parafuso e da porca tipo T em milímetros (mm)	65
Figura 48 – Dimensões do rolamento linear em milímetros (mm)	66
Figura 49 – Dimensões do fuso trapezoidal e castanha antifolga em milímetros (mm)	66
Figura 50 – Imagens ilustrativas dos <i>pillow blocks</i> para rolamento e castanha antifolga	66
Figura 51 – Imagens ilustrativas dos suportes e mancais	67
Figura 52 – Representações de diferentes vistas da fresadora CNC	71
Figura 53 – Vista frontal do modelo 3D da fresadora proposta	72
Figura 54 – Vista posterior do modelo 3D da fresadora proposta	72
Figura 55 – Vista direita do modelo 3D da fresadora proposta	73
Figura 56 – Vista esquerda do modelo 3D da fresadora proposta	73
Figura 57 – Vista acima do modelo 3D da fresadora proposta	74
Figura 58 – Definição do modelo da placa no <i>software Arduino IDE</i>	75
Figura 59 – Definição da porta da placa no <i>software Arduino IDE</i>	75
Figura 60 – Importação do código-fonte do <i>firmware Grbl</i> no <i>software Arduino IDE</i>	76
Figura 61 – Configuração para desabilitar o controle de velocidade do motor 775	76
Figura 62 – Configuração para inverter lógico do pino de acionamento do motor 775	76
Figura 63 – Compilando e carregando código para o <i>Arduino Uno</i>	76
Figura 64 – Configurando <i>Arduino Uno</i> no <i>software Universal Gcode Sender (UGS)</i>	77
Figura 65 – Informação de conexão com o <i>firmware</i> no console do <i>software UGS</i>	77
Figura 66 – Valores padrões de parâmetros do <i>firmware</i> apresentados no UGS	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Configurações de resolução de micropassos disponíveis para <i>driver A4988</i>	45
Quadro 2 – Componentes da estrutura principal	65
Quadro 3 – Mesas de trabalho e dos eixos	65
Quadro 4 – Lista de componentes dos mecanismos de deslocamento	67
Quadro 5 – Lista de componentes dos mecanismos de tração	68
Quadro 6 – Lista de componentes do sistema de tração	69
Quadro 7 – Lista de componentes do sistema de comando e controle	69
Quadro 8 – Lista de componentes do sistema de usinagem	70
Quadro 9 – Lista de componentes do sistema de alimentação	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos mecânicos da fresadora proposta	29
Tabela 2 – Componentes de hardware da fresadora proposta	34
Tabela 3 – Medidas e quantidades dos elementos mecânicos dimensionados	39
Tabela 4 – Descrição e valores das variáveis utilizadas no cálculo de <i>steps/mm</i>	53
Tabela 5 – Parâmetros ajustados no <i>firmware Grbl</i> para fresadora desenvolvida	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD *Computer-Aided Design.*

CAM *Computer-Aided Manufacturing.*

CNC Comando Numérico Computadorizado.

IDE *Integrated Development Environment.*

IFSC Instituto Federal de Santa Catarina.

MDF *Medium Density Fiberboard.*

PCI Placa de Circuito Impresso.

UGS *Universal Gcode Sender.*

USB *Universal Serial Bus.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo geral	14
1.2	Objetivos específicos	14
1.3	Organização do texto	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Máquinas CNC	16
2.1.1	Fresadora CNC	16
2.1.2	Tipos de Fresadoras CNC	17
2.2	Elementos de uma fresadora CNC vertical	18
2.2.1	Estrutura principal, mesas e componentes de fixação	18
2.2.2	Mecanismos de deslocamento e tração	21
2.2.3	Componentes eletrônicos e <i>firmware</i>	22
2.2.4	Ferramenta de corte	24
2.3	Placa de Circuito Impresso	25
2.4	Processos de modelagem e fabricação	26
2.4.1	Softwares CAD e CAM	26
2.5	Trabalhos relacionados	26
3	DESENVOLVIMENTO	28
3.1	Requisitos do projeto	28
3.2	Definição do tipo e dos elementos da fresadora proposta	28
3.2.1	Sistemas mecânicos	29
3.2.1.1	Estrutura principal e Mesas de trabalho e dos eixos	29
3.2.1.2	Mecanismos de tração e deslocamento	31
3.2.1.3	Elementos de fixação e suporte	32
3.2.2	Componentes de hardware	34
3.2.2.1	Sistema de comando e controle	34
3.2.2.2	Sistema de tração e deslocamento	35
3.2.2.3	Sistema de usinagem	36
3.2.2.4	Sistema de alimentação	37
3.3	Modelagem da fresadora	38
3.3.1	Definição da área útil	38
3.3.2	Dimensionamento dos elementos mecânicos	38
3.3.3	Disposição dos componentes da Fresadora	39

3.4	Montagem e configuração	40
3.4.1	Montagem da estrutura principal	41
3.4.2	Furação das placas de <i>Nylon</i>	42
3.4.3	Fabricação e instalação dos <i>pillow blocks</i>	42
3.4.4	Instalação dos componentes do sistema de deslocamento	43
3.4.5	Instalação dos componentes do sistema de tração	44
3.4.6	Sistema de comando e controle	45
3.4.6.1	Definição da resolução de micropassos para fresadora	45
3.4.6.2	Instalação da <i>CNC Shield</i> e <i>drivers A4988</i>	45
3.4.6.3	Cálculo e configuração do V_{ref} nos <i>drivers A4988</i>	46
3.4.6.4	Conexão dos motores <i>Nema 17</i> na <i>CNC Shield</i>	47
3.4.6.5	Instalação das chaves de fim de curso	47
3.4.7	Instalação dos componentes do sistema de usinagem	48
3.4.8	Instalação e configuração do <i>firmware Grbl</i>	49
3.4.8.1	Instalação do <i>firmware</i>	51
3.4.8.2	Parametrização do <i>firmware</i>	52
3.5	Elaboração do guia de operação	55
4	RESULTADOS	56
4.1	Análise das soluções e definição dos componentes	56
4.2	Modelagem, montagem e configuração	56
4.3	Testes de validação da CNC	56
4.3.1	Adaptação para mecanismo de fixação	57
4.3.2	Validações de comandos	57
4.3.3	Simulação do processo de fabricação	58
5	CONCLUSÕES	59
5.1	Trabalhos futuros	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICES	63
	APÊNDICE A – LISTA DE COMPONENTES UTILIZADOS	64
A.1	Componentes mecânicos	64
A.1.1	Estrutura principal	64
A.1.2	Mesas de trabalho e dos eixos	65
A.1.3	Mecanismos de tração e deslocamento	66
A.2	Componentes de hardware	68

A.2.1	Sistema de tração	68
A.2.2	Sistema de comando e controle	68
A.2.3	Sistema de usinagem	70
A.2.4	Sistema de alimentação	70
APÊNDICE B – VISTAS DO MODELO 3D DA FRESADORA . .		71
APÊNDICE C – INSTALAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DO <i>FIRMWARE</i> <i>GRBL</i>		75
APÊNDICE D – GUIA DE OPERAÇÃO DA FRESADORA CNC . .		79
D.1	Introdução	79
D.2	Cuidados de segurança	79
D.3	Preparação Mecânica Antes da Energização	79
D.3.1	Instalação da Fresa na Pinça ER11	79
D.3.2	Fixação da Peça de Trabalho	80
D.4	Ligação Inicial e Configuração	80
D.4.1	Homing dos Eixos	81
D.4.2	Definição do Ponto Zero da Peça	81
D.4.3	Ajuste da Altura da Ferramenta	81
D.5	Operação	81
D.5.1	Carregamento do Arquivo	81
D.5.2	Execução do Corte	81
D.6	Finalização	82
D.7	Manutenção Preventiva	82
D.8	Considerações Finais	82

1 INTRODUÇÃO

Dispositivos de comunicação sem fio são utilizados em diversos cenários, incluindo residências e setores industriais, desempenhando um papel essencial na troca de informações e conexões globais. Nesses equipamentos, as informações são transmitidas e recebidas por meio de ondas eletromagnéticas, o que torna as antenas um componente crucial na comunicação sem fio. Com os avanços tecnológicos contínuos, esses dispositivos estão se tornando mais complexos em termos de processamento e mais eficientes no consumo de energia, além dos tamanhos se tornarem cada vez mais compactos (PIRES; SILVA, 2017). Como resultado, a indústria está em busca de antenas menores e mais eficientes.

As antenas de microfita, incluindo *patch*, monopolo impresso e PIFA (*Planar Inverted-F Antenna*), são amplamente utilizadas em dispositivos de comunicações sem fio. As antenas do tipo *patch* possuem um elemento irradiante impresso sobre um substrato dielétrico, com um plano de terra oposto e se destacam pelo baixo custo, adaptabilidade a diferentes superfícies, capacidade de assumir vários formatos e tamanho compacto (OLIVEIRA, 2008). Isso possibilita sua integração em dispositivos móveis que compõem os sistemas de telecomunicações.

O desenvolvimento de antenas para dispositivos sem fio é resultado do aprofundamento em pesquisas e experimentações, especialmente aquelas envolvendo antenas impressas para as frequências de micro-ondas. Segundo Pires e Silva (2017), a diversidade de aplicações das antenas impressas, juntamente com questões como o acoplamento da linha de transmissão, diagrama de irradiação desejado, ganho necessário e polarização requerida, justifica amplamente a pesquisa e desenvolvimento contínuo dessas antenas. Isso tem como objetivo aprimorar as características e explorar novos cenários de utilização dessas antenas.

Projetar e fabricar antenas em substratos são atividades complexas que desafiam engenheiros e pesquisadores. A etapa de fabricação desempenha um papel crucial na produção de antenas impressas em substratos, mas a busca pela robustez e precisão resulta na utilização de equipamentos de alto custo. Esse custo elevado pode tornar inviável a utilização desses equipamentos em ambientes educacionais dentro de uma instituição. Uma solução promissora para essa etapa é a adoção de uma fresadora CNC de pequeno porte, uma máquina de usinagem que utiliza a tecnologia de Comando Numérico Computadorizado (CNC) para automatizar o processo de produção de peças, exigindo pouca intervenção do operador (POLASTRINI, 2016).

A usinagem abrange diversos processos de fabricação nos quais ocorre a remoção de material de forma controlada de um objeto original. Esses processos incluem o fresa-

mento, a furação e o torneamento, resultando na criação de peças com a forma desejada (CAVENAGHI; CAVENAGHI; GONZALEZ, 2022). Uma fresadora CNC fabrica a peça por meio do fresamento, processo no qual a ferramenta gira enquanto a mesa movimenta a peça nos eixos longitudinal e transversal. Essa característica única diferencia o fresamento de outros processos de usinagem, proporcionando à fresadora a capacidade de executar uma ampla variedade de trabalhos com precisão (COSTA, 2003).

No campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), o projeto de pesquisa e extensão intitulado **Estudo e desenvolvimento de antenas planares de baixo custo**¹ visou o aprofundamento dos estudos sobre antenas impressas e sua implementação em substratos de baixo custo. Buscando preencher, dessa forma, uma lacuna significativa no ensino e pesquisa na área de circuitos de radiofrequência na banda de micro-ondas. O projeto foi dividido em 2 eixos principais de atividades a serem executadas: 1) atividades para concepção e implementação das antenas e; 2) construção de uma máquina CNC para fabricação das antenas planejadas durante a execução do eixo 1.

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma fresadora CNC de pequeno porte e com baixo custo, integrando componentes de *hardware* e *software* abertos amplamente aceitos. A fresadora será voltada para a fabricação de antenas impressas, visando atender as necessidades do eixo 1 do projeto mencionando anteriormente. Além disso, a fresadora poderá ser utilizada na produção de outros circuitos impressos, auxiliando na modernização dos projetos integradores e enriquecendo o processo de aprendizagem nas disciplinas que envolvem eletrônica no campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e fabricar uma fresadora CNC de pequeno porte, possibilitando a confecção de antenas planares e outros circuitos impressos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Pesquisar soluções já implementadas de fresadoras CNC de pequeno porte;
2. Definir os elementos de *hardware* e *software* da fresadora proposta;
3. Modelar a estrutura e a disposição dos componentes da fresadora CNC;
4. Montar e configurar a fresadora;
5. Escrever guia de operação da fresadora CNC.

¹ Chamada interna No. 51/2019/PROPPI do campus São José - IFSC

6. Testar a fresadora com a confecção de um protótipo de antena impressa;

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O restante do documento está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2 — Revisão bibliográfica:** apresenta os conceitos, tecnologias e fundamentos necessários para o desenvolvimento do projeto.
- **Capítulo 3 — Desenvolvimento:** descreve o processo completo de construção da fresadora, incluindo:
 - Requisitos do projeto;
 - Definição do tipo de fresadora e seus principais elementos;
 - Modelagem, dimensionamento e disposição dos componentes;
 - Etapas de montagem e configuração;
 - Elaboração do guia de operação.
- **Capítulo 4 — Resultados:** apresenta os resultados obtidos durante as etapas de desenvolvimento da fresadora CNC, bem como as limitações observadas nos testes.
- **Capítulo 5 — Conclusões:** discute as contribuições alcançadas pelo projeto, as lições aprendidas no processo de desenvolvimento e as possíveis melhorias e continuação do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma breve revisão bibliográfica destacando os conceitos e tecnologias utilizados durante o desenvolvimento das atividades. Além disso, apresenta trabalhos relacionados que serviram como base para a construção da fresadora CNC.

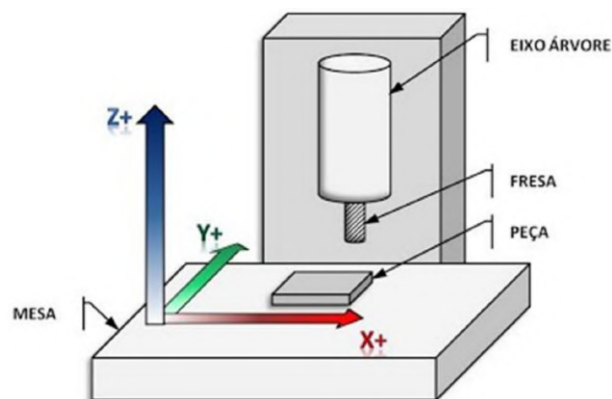
2.1 MÁQUINAS CNC

Uma máquina CNC pode ser entendida como sendo um equipamento que utiliza a tecnologia de **Comando Numérico Computadorizado (CNC)** para produção de peças em um processo automatizado com pouca interação de um operador (POLASTRINI, 2016). As características de uma máquina CNC são geralmente identificadas por sua estrutura física, apesar das semelhanças entre diferentes tipos. Cada máquina tem sua própria forma de funcionamento e aplicação, embora possam produzir o mesmo resultado final. Alguns tipos de máquinas CNCs são: impressoras 3D, tornos ou fresadoras CNC (AMORIM; FILHO; ROSA, 2019).

2.1.1 Fresadora CNC

Uma fresadora CNC possui em sua estrutura dois elementos principais: o eixo-árvore e a mesa de trabalho, conforme ilustrado na Figura 1. O eixo-árvore é o elemento principal da máquina, responsável por sustentar e acionar a ferramenta de corte (fresa). Essa ferramenta executa o processo de remoção do material de forma controlada da peça original (material bruto a ser usinado) até chegar ao objeto com a forma desejada (POLASTRINI, 2016).

Figura 1 – Representação de um fresadora CNC vertical



Fonte: (AZEVEDO, 2013)

A peça original é fixada sobre a mesa de trabalho, que pode movimentar-se nos eixos longitudinal (X) e transversal (Y). Em alguns modelos de fresadora CNC, a mesa pode permanecer estática, cabendo ao eixo-árvore (eixo Z) executar todos os deslocamentos necessários. Essa característica define o tipo de arquitetura da fresadora e está diretamente relacionada à sua capacidade de usinar diferentes materiais e geometrias com alta precisão (COSTA, 2003).

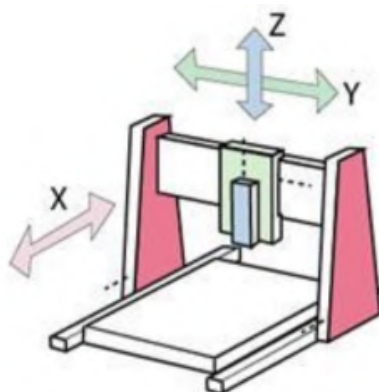
2.1.2 Tipos de Fresadoras CNC

Fresadoras CNC podem ser classificadas de acordo com o tipo de orientação do eixo-árvore em relação à mesa de trabalho. Uma fresadora vertical é aquela que tem o eixo-árvore perpendicular à mesa de trabalho, enquanto que na fresadora horizontal, o eixo principal e a mesa de trabalho estão alinhados paralelamente (SANCHES, 2009). De acordo com Sanches (2009), as fresadoras mais comuns são do tipo vertical e com sua estrutura composta por três eixos denominados X, Y e Z, que são interpretados semelhante ao espaço cartesiano (veja Figura 1). Esse tipo de fresadora CNC é formado por uma estrutura chamada de pórtico, representando o eixo X e o eixo Z (eixo-árvore), além da mesa de trabalho, onde fica o eixo Y. A fresadora vertical pode ser dividida em dois subtipos com relação à fixação do seu pórtico: móvel e fixo.

Pórtico móvel

Na fresadora CNC com pórtico móvel, a estrutura do pórtico desloca-se sobre as guias ou trilhos fixados na mesa de trabalho (veja Figura 2). Apesar de fornecer um projeto mais compacto, exige um maior nível de complexidade na construção e a precisão depende muito da sincronia e alinhamento entre os componentes (LEAL; RIBAS, 2015).

Figura 2 – Representação de um fresadora vertical de pórtico móvel

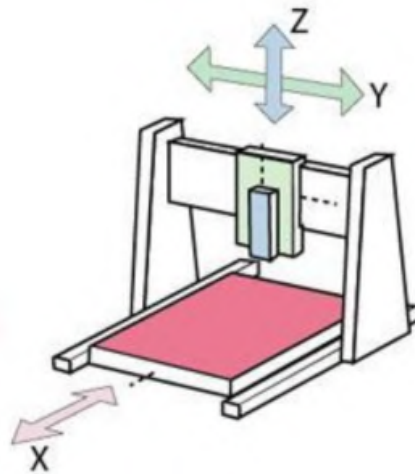


Fonte: Adaptado de (LEAL; RIBAS, 2015)

Pórtico fixo

A fresadora com pórtico fixo é construída com a mesa de trabalho móvel deslocando-se sobre guias ou trilhos e a estrutura do pórtico fixada sobre uma base (veja Figura 3). Uma vez que o pórtico é composto pela maior parte dos componentes de uma fresadora vertical, esse tipo de máquina possui um menor deslocamento de massa e uma maior facilidade na montagem (LEAL; RIBAS, 2015).

Figura 3 – Representação de um fresadora vertical de pórtico fixo



Fonte: Adaptado de (LEAL; RIBAS, 2015)

2.2 ELEMENTOS DE UMA FRESADORA CNC VERTICAL

Segundo Polastrini (2016), a arquitetura de uma fresadora CNC vertical pode ser dividida em:

- **Sistemas mecânicos** – tipo de material da estrutura principal, das mesas de trabalho e dos eixos, componentes de fixação e também os mecanismos utilizados para os sistemas de deslocamento e tração;
- **Componentes eletrônicos** – motores para sistema de tração, sensores de fim de curso, atuadores, placa controladora, *driver* de acionamento e fonte de alimentação;
- **Ferramenta de corte** – motor de usinagem (*spindle*), pinça de fixação e fresas (peças para remoção do material);
- **Sistema embarcado** – *firmware* da placa controladora.

2.2.1 Estrutura principal, mesas e componentes de fixação

A estrutura principal de uma fresadora CNC corresponde à base onde são fixadas as mesas dos eixos, a mesa de trabalho e os demais elementos. Essa estrutura deve

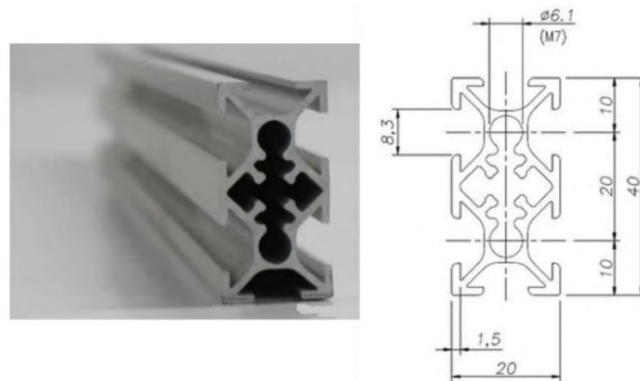
apresentar rigidez estática e dinâmica adequadas, estabilidade dimensional e térmica, além de facilidade de montagem. A escolha do tipo, formato e material da estrutura principal bem como das mesas e dos componentes de fixação influencia diretamente na precisão e qualidade final das peças usinadas (SANCHES, 2009).

Materiais para estrutura principal

Em projetos de baixo custo, a escolha do material para estrutura principal visa alcançar o equilíbrio entre resistência mecânica, peso e viabilidade econômica. Dentre as opções mais comuns, destacam-se os tubos de aço retangulares (CAVENAGHI; CAVENAGHI; GONZALEZ, 2022), os perfis de alumínio estruturais (POLASTRINI, 2016) e as chapas de madeira MDF (NARDI, 2020b).

Os tubos de aço oferecem rigidez alta e boa resistência a vibrações, sendo adequados para estrutura principal e para conexões maiores. Entretanto, a montagem exige uma maior complexidade e custo devido a necessidade de soldagem e usinagem (LEAL; RIBAS, 2015). Já os perfis de alumínio estrutural, conforme ilustrado na Figura 4, representam uma opção de material leve e com formato modular, permitindo montagem por encaixe e fixação com engates rápidos, sem necessidade de solda (POLASTRINI, 2016).

Figura 4 – Exemplo de perfil de alumínio estrutural



Fonte: (POLASTRINI, 2016)

As chapas de madeira MDF (veja Figura 5), por sua vez, são frequentemente utilizadas em versões experimentais e protótipos de baixo custo, devido ao fácil manuseio e baixo preço. Apesar disso, sua menor rigidez e facilidade de absorção de umidade limitam seu uso, como estrutura principal, a soluções temporárias ou em projetos didáticos sem necessidade de precisão maior das peças a serem fabricadas (NARDI, 2018b).

Materiais para mesas

Para as mesas de trabalho e dos eixos, materiais como placas de *nylon* têm se mostrado adequados, principalmente pela boa resistência ao desgaste e ao atrito, além

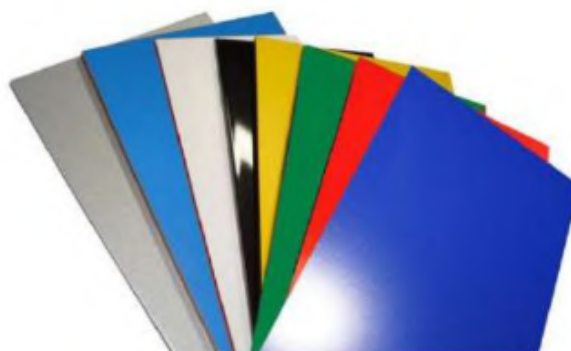
Figura 5 – Exemplo de placas de MDF



Fonte: Elaborada pelo autor.

de proporcionarem uma superfície estável para fixação das peças a serem usinadas e dos elementos que compõem os sistemas de tração e deslocamento. Em alguns projetos, o uso de chapas de MDF ou de *Aluminium Composite Material* (ACM)(Figura 6) também é adotado como alternativa de baixo custo e fácil substituição em casos de desgaste (POLASTRINI, 2016).

Figura 6 – Exemplo de placas ACM



Fonte: (POLASTRINI, 2016)

Componentes de fixação

Os componentes de fixação desempenham papel essencial na montagem e estabilidade da fresadora CNC, garantindo a união firme entre a estrutura principal, mesas e demais elementos. Em projetos acadêmicos e de baixo custo, é comum a utilização de engates rápidos, parafusos de aço, abraçadeiras e grampos metálicos, por proporcionarem montagem simplificada e facilidade de manutenção (POLASTRINI, 2016; NARDI, 2018b).

Em fresadoras que possuem estrutura principal formada por perfis de alumínio, esses componentes permitem ajustes modulares e reposicionamento sem a necessidade de soldagem. Já nos modelos que utilizam tubos de aço, a fixação geralmente envolve uniões rosqueadas ou soldadas, o que aumenta a rigidez estrutural, mas reduz a flexibilidade para modificações (LEAL; RIBAS, 2015).

2.2.2 Mecanismos de deslocamento e tração

Em fresadoras CNC, a movimentação linear das mesas sobre os eixos é obtida por sistemas de deslocamento e de tração, que podem incluir parafusos de potência, correias dentadas e rolamentos lineares (LEAL; RIBAS, 2015; SANCHES, 2009).

Mecanismos de tração

Os parafusos de potência são elementos mecânicos responsáveis por converter o movimento rotacional do motor em deslocamento linear, sendo essenciais para o posicionamento preciso dos eixos de uma máquina CNC. Entre os modelos existentes, o fuso de rosca trapezoidal (veja exemplo na Figura 7) destaca-se pelo baixo custo e facilidade de fabricação, além de oferecer boa capacidade de carga e operação bidirecional (LEAL; RIBAS, 2015).

Figura 7 – Exemplo de fuso trapezoidal



Fonte: (POLASTRINI, 2016)

Em fresadoras CNC de pequeno porte, fusos trapezoidais são amplamente utilizados por sua resistência, simplicidade construtiva e boa capacidade de carga. Modelos com passo de 8 mm suportam aproximadamente 5 kg no eixo Z, enquanto versões de maior diâmetro, como o TR45, podem sustentar até 26 kg, valores que atendem plenamente às exigências dessas máquinas. Para aprimorar a precisão do sistema, é comum o uso de castanhas ou porcas anti-folga, que mantêm contato constante com o filete do fuso e reduzem o jogo axial, garantindo maior estabilidade e precisão na reversão dos movimentos (CAVENAGHI; CAVENAGHI; GONZALEZ, 2022).

A aplicação dos fusos está diretamente relacionada ao sistema de tração adotado em cada eixo da máquina. Nos eixos X e Y, caracterizados por maiores deslocamentos, é comum a utilização de correias dentadas com polias (veja Figura 8), pois permitem velocidades mais elevadas e baixo custo de implementação. Já no eixo Z, sujeito à força da gravidade, os fusos são preferidos por garantirem melhor sustentação de carga e maior precisão de posicionamento (POLASTRINI, 2016).

Figura 8 – Exemplo de correia dentada e polias



Fonte: Elaborada pelo autor.

Mecanismos de deslocamento

O sistema de deslocamento é responsável por assegurar a precisão dos movimentos e a estabilidade das mesas (POLASTRINI, 2016). Em máquinas CNC de pequeno porte, o conjunto formado por trilhos (guias) e rolamentos lineares mostra-se adequado por combinar baixo custo, fácil montagem e boa precisão. Nesse tipo de sistema, utilizam-se eixos de aço retificados e rolamentos lineares de esferas (veja Figura 9), garantindo movimento suave e com baixo atrito (SANCHES, 2009).

Figura 9 – Exemplo de eixos retificado e rolamentos lineares



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.3 Componentes eletrônicos e *firmware*

Os componentes eletrônicos, juntamente com o *firmware*, constituem o núcleo de controle e acionamento da fresadora CNC, convertendo comandos em movimentos precisos dos eixos e da ferramenta de usinagem (POLASTRINI, 2016). Entre os principais elementos destacam-se os motores de passo, os sensores de fim de curso, a placa controladora, os drivers de acionamento, a fonte de alimentação e o *firmware*.

A **fonte de alimentação** fornece energia aos componentes e deve ser dimensionada conforme o consumo dos motores. Fontes ATX de 12 V são comuns em versões simples, enquanto modelos de 24 V e 20 A oferecem maior estabilidade e desempenho (LEAL; RIBAS, 2015).

Figura 10 – Placa controladora Arduino UNO



Fonte: (POLASTRINI, 2016)

A **placa controladora** interpreta comandos G-code e coordena os motores. O Arduino UNO (veja exemplo na Figura 10), baseado no microcontrolador ATmega328p, é amplamente adotado por sua simplicidade e suporte comunitário. Em projetos mais complexos, o Arduino Mega 2560 é utilizado por disponibilizar mais portas de entrada e saída (POLASTRINI, 2016).

Os **drivers de acionamento** amplificam os pulsos de controle da placa controladora, fornecendo corrente e tensão adequadas aos motores. O A4988 (veja Figura 11) é o modelo mais popular, permitindo controle por micropassos e suporte a correntes de até 2 A. Alternativamente, módulos com L297 e L298 podem ser empregados, associando controle lógico e potência (CAVENAGHI; CAVENAGHI; GONZALEZ, 2022).

Figura 11 – Driver de acionamento A4988



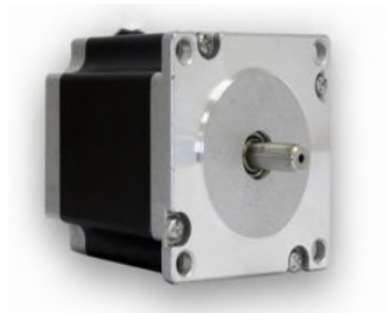
Fonte: (POLASTRINI, 2016)

Os **motores de passo** (veja exemplo na Figura 12), como os modelos *Nema 17* e *Nema 23*, são amplamente utilizados em projetos de CNC por aliarem precisão, baixo custo e fácil controle. Operam em malha aberta e transformam pulsos elétricos em incrementos de rotação, dispensando sistemas de realimentação. O uso de micropassos aumenta a resolução de movimento, embora reduza o torque disponível (LEAL; RIBAS, 2015).

Os **sensores de fim de curso** delimitam o deslocamento dos eixos e auxiliam na referência de posição. Em projetos acadêmicos, são comuns sensores mecânicos simples, que oferecem boa durabilidade e integração direta com o *firmware* (LEAL; RIBAS, 2015).

Por fim, o ***firmware embarcado*** na placa controladora integra todos os com-

Figura 12 – Exemplo de motor de passo



Fonte: (LEAL; RIBAS, 2015)

ponentes e executa o controle de baixo nível da máquina. Implementações como *Grbl* e *Marlin* são amplamente utilizadas, permitindo ajustar parâmetros de movimentação, aceleração e limites de curso. A comunicação é realizada via serial com a linguagem G-code (RS-274D), que define a trajetória, velocidade e rotação do eixo-árvore (POLASTRINI, 2016).

2.2.4 Ferramenta de corte

Em uma fresadora CNC, a ferramenta de corte é responsável pela remoção controlada de material, processo conhecido como usinagem. A ferramenta é sustentada e acionada pelo eixo-árvore (*spindle*), composto por um motor de alta rotação contínua. Em projetos de baixo custo, podem ser utilizadas micro retíficas comerciais, como a *Western*, acopladas ao eixo Z da máquina (POLASTRINI, 2016).

Figura 13 – Micro retífica Western



Fonte: (POLASTRINI, 2016)

A fresa é a peça rotativa com arestas cortantes, fixada ao eixo-árvore por pinça ou, de forma mais versátil, mandril, permitindo o uso de ferramentas de diferentes diâmetros. O mandril é a solução mais recomendada por sua facilidade de aquisição e versatilidade (LEAL; RIBAS, 2015).

A grande versatilidade do fresamento decorre das diversas geometrias de fresas, projetadas para operações de desbaste, furação, acabamento ou gravação (veja exemplos

na Figura 12). Em usinagem de placas de circuito impresso (PCI), são comuns fresas com ângulo agudo (10° a 20°), que proporcionam maior resolução (POLASTRINI, 2016).

Figura 14 – Exemplos de fresas



Fonte: (POLASTRINI, 2016)

2.3 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

As Placa de Circuito Impressos (PCIs) são componentes essenciais em toda a indústria eletrônica. Elas consistem em placas onde com trilhas condutoras de cobre que podem ser impressas ou depositadas. Enquanto a placa atua como um isolante dielétrico, as trilhas têm a importante função de estabelecer conexões elétricas entre os diversos componentes e as suas respectivas funções dentro do circuito (SOUSA et al., 2001).

Segundo Rodrigues et al. (2019), o processo de confecção de Placa de Circuito Impresso (PCI) envolve várias etapas. Primeiramente, é necessário projetar o *layout* do circuito usando *software* de modelagem específico. Em seguida, o *layout* é transferido para uma placa. Isso é feito por meio de técnicas com processos químicos ou fresagem CNC, para a criação das trilhas condutoras.

No processo com método químico fotográfico, o *layout* do circuito é transferido para uma placa em branco, geralmente feita de um material isolante, como fibra de vidro ou cerâmica. Em seguida, uma máscara de proteção é aplicada na placa, expondo apenas as áreas onde as trilhas condutoras devem ser formadas. A placa é então imersa em uma solução corrosiva, como ácido férrico ou perclórico, que remove o cobre não protegido, resultando nos circuitos impressos na placa (LIU et al., 2014).

Outro método empregado é o processo que utiliza uma fresadora CNC. Neste método, a CNC é utilizada para eliminar o cobre indesejado de uma placa, deixando somente as trilhas de acordo com o *layout* do circuito. A fresadora CNC proporciona maior precisão e flexibilidade na criação de PCIs, permitindo a fabricação de circuitos complexos com boa definição das trilhas condutoras (LEAL; RIBAS, 2015).

2.4 PROCESSOS DE MODELAGEM E FABRICAÇÃO

O processo de modelagem desempenha um papel essencial no desenvolvimento de produtos, especialmente em projetos que envolvem a fabricação de peças complexas. Esses processos podem ser auxiliados por computadores por meio dos chamados sistemas de processos assistidos por computador, como por exemplo os *softwares* CAD e CAM (CAVENAGHI; CAVENAGHI; GONZALEZ, 2022). Um dos principais benefícios desses sistemas é possibilitar que a concepção dos projetos aconteça de forma totalmente digital, permitindo depois que sua fabricação ocorra por meio de processos automatizados de usinagem (LEAL; RIBAS, 2015). Essas etapas permitem que os envolvidos no projeto se concentrem mais na parte criativa do desenvolvimento, reduzindo o tempo que levaria na manufatura. Isso contribui diretamente para o aprendizado prático, permitindo que o foco seja direcionado ao desenvolvimento do projeto em si (POLASTRINI, 2016).

2.4.1 Softwares CAD e CAM

O *software* do tipo *Computer-Aided Design* (CAD) são utilizados na etapa de concepção da peça, permitindo criar modelos bidimensionais ou tridimensionais que descrevem dimensões como largura, altura, espessura e elementos geométricos como furos ou rebaixos. Além de facilitar a visualização e ajustes do projeto em tempo real, esses sistemas reduzem custos com protótipos físicos e proporcionam maior precisão desde as etapas iniciais (CAVENAGHI; CAVENAGHI; GONZALEZ, 2022).

Após o desenvolvimento do modelo no ambiente CAD, este é exportado para o *software* do tipo *Computer-Aided Manufacturing* (CAM), que interpreta as geometrias criadas e gera os percursos que a ferramenta de usinagem deve seguir. Alguns sistemas CAM também oferecem ambientes de simulação, permitindo configurar parâmetros como dimensões da máquina, ferramenta de corte e tipo de fixação, além de prever colisões antes da execução física (POLASTRINI, 2016). Ao final desse processo, o *software* converte os dados em código de linguagem padrão para comandos de máquinas CNC.

A integração entre esses dois tipos de *softwares* permite maior agilidade e precisão na fabricação: modificações realizadas no projeto CAD podem ser rapidamente refletidas no CAM, resultando em novos percursos de usinagem sem necessidade de reprogramação manual. Essa sinergia entre os sistemas é um dos fatores que viabilizam a automação acessível na fabricação de peças com boa qualidade e baixo custo (LEAL; RIBAS, 2015).

2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos projetos de fresadoras CNC de pequeno porte têm sido desenvolvidos por entusiastas, educadores e pesquisadores, visando disponibilizar alternativas acessíveis

para processos de usinagem automatizada. Essas iniciativas exploram componentes de fácil aquisição no mercado e utilizam plataformas abertas de *hardware* e *software*, como *Arduino* e *Grbl*, favorecendo a adaptação conforme os objetivos de cada aplicação.

Entre as experiências levantadas, destacam-se os tutoriais elaborados por Marlon Nardi, que documentam diferentes versões de fresadoras CNC caseiras. No vídeo referente à versão 2.1 (NARDI, 2018a), são apresentadas instruções completas de montagem de uma máquina baseada em Arduino UNO, *drivers A4988* e motores de passo *NEMA 17*, abrangendo tanto a estrutura mecânica quanto a configuração do *firmware*. Na versão 3.0 (NARDI, 2018b), o autor propõe avanços na robustez da estrutura e na movimentação dos eixos, resultando em um sistema mais estável e adequado para trabalhos que demandam usinagem de peças maiores.

Na área acadêmica, encontram-se registros de iniciativas com foco educacional. O trabalho de (POLASTRINI, 2016) descreve o desenvolvimento de uma fresadora CNC construída com materiais de baixo custo, direcionada para aplicações em laboratórios de ensino técnico. Complementarmente, (COSTA, 2003) e (CAVENAGHI; CAVENAGHI; GONZALEZ, 2022) oferecem contribuições teóricas relevantes sobre processos de usinagem e operação de fresadoras, fornecendo fundamentos essenciais para o correto dimensionamento e funcionamento dessas máquinas.

Em resumo, os trabalhos analisados evidenciam o potencial educacional das fresadoras CNC de baixo custo, bem como a viabilidade de sua construção a partir de componentes acessíveis e plataformas abertas. Essas iniciativas forneceram a base teórica e prática que orientou o desenvolvimento deste trabalho. O projeto desenvolvido foi inspirado no modelo de baixo custo descrito por (POLASTRINI, 2016) e nas versões incrementais propostas por Marlon Nardi, o qual, além dos vídeos mencionados anteriormente, documentou detalhadamente o processo de desenvolvimento em blogs (NARDI, 2020a; NARDI, 2020b). Esses registros serviram como referência direta para a modelagem e fabricação da fresadora CNC desenvolvida neste trabalho.

3 DESENVOLVIMENTO

Este trabalho tem como objetivo principal modelar e construir uma fresadora CNC de pequeno porte, utilizando componentes de *hardware* e *software* abertos e que são amplamente aceitos. A fresadora será destinada à fabricação de antenas impressas em substratos de baixo custo, bem como à produção de outros circuitos e protótipos eletrônicos, contribuindo para o aprimoramento do ensino e da pesquisa em dispositivos de telecomunicações em disciplinas da área de eletrônica no câmpus São José do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

Este capítulo descreve as atividades executadas, incluindo definição dos requisitos para o projeto, escolha dos componentes da fresadora, modelagem, montagem e configuração da máquina, elaboração do guia de utilização da CNC e, por fim, testes funcionais da fresadora.

3.1 REQUISITOS DO PROJETO

Nesta primeira etapa, foram analisados os objetivos do projeto¹ e definidos os seguintes requisitos esperados para fresadora CNC:

R1: Precisão, estabilidade e robustez para confecção de antenas e circuitos impressos;

R2: Baixo custo para permanecer dentro do orçamento disponibilizado pelo projeto;

R3: Facilidade na montagem, utilização e manutenção;

R4: Utilização de componentes de *hardware* disponíveis comercialmente;

R5: Utilização de *software* e *firmware* de código aberto.

3.2 DEFINIÇÃO DO TIPO E DOS ELEMENTOS DA FRESADORA PROPOSTA

Considerando os requisitos do projeto (veja [seção 3.1](#)), identificou-se que a fresadora do tipo vertical e com pórtico fixo seria a mais adequada, uma vez que as peças a serem usinadas são placas de substrato e não possuem uma massa elevada. De acordo com (LEAL; RIBAS, 2015), esse tipo de fresadora apresenta estrutura mais robusta, construção

¹ Estudo e desenvolvimento de antenas planares de baixo custo - chamada interna No. 51/2019/PROPI do câmpus São José - IFSC

simplificada e menor deslocamento de massa durante a operação, pois apenas a mesa de trabalho se move. Essa característica garante maior estabilidade e precisão nos movimentos, o que torna o modelo de fresadora escolhido adequado para fabricação de antenas impressas em substratos.

A revisão bibliográfica e análise das soluções implementadas nos trabalhos relacionados, juntamente com uma pesquisa de mercado realizada para identificar as opções disponíveis, forneceu um panorama dos principais elementos, componentes e tecnologias mais utilizados em fresadoras CNC de pequeno porte e possibilitou a escolha dos elementos e componentes mais adequados às necessidades do projeto. Os principais elementos são detalhados nas subseções a seguir e uma lista completa com a quantidade e custo de todos os componentes utilizados está disponível no [Apêndice A](#).

3.2.1 Sistemas mecânicos

Após a escolha do tipo da fresadora, definiu-se os elementos mecânicos, tais como mecanismos de deslocamento e tração, componentes de fixação e os tipos de materiais para estrutura principal e para as mesas de trabalho e dos eixos. Na [Tabela 1](#) são descritos os elementos, seus tipos e materiais escolhidos e os requisitos que foram atendidos.

Tabela 1 – Elementos mecânicos da fresadora proposta

Elemento	Tipo/Material escolhido	Requisito(s) atendido(s)
Estrutura principal	Perfil de alumínio estrutural	R1, R3 e R4
Mesas de trabalho e dos eixos	Placa de nylon	R1, R3 e R4
Mecanismo de tração	Fusos trapezoidais	R1, R2 e R4
Mecanismo de deslocamento	Eixos retificados com rolamentos lineares	R1, R2 e R4
Elementos de fixação	Parafusos de aço e cantoneiras de alumínio	R1, R2, R3 e R4

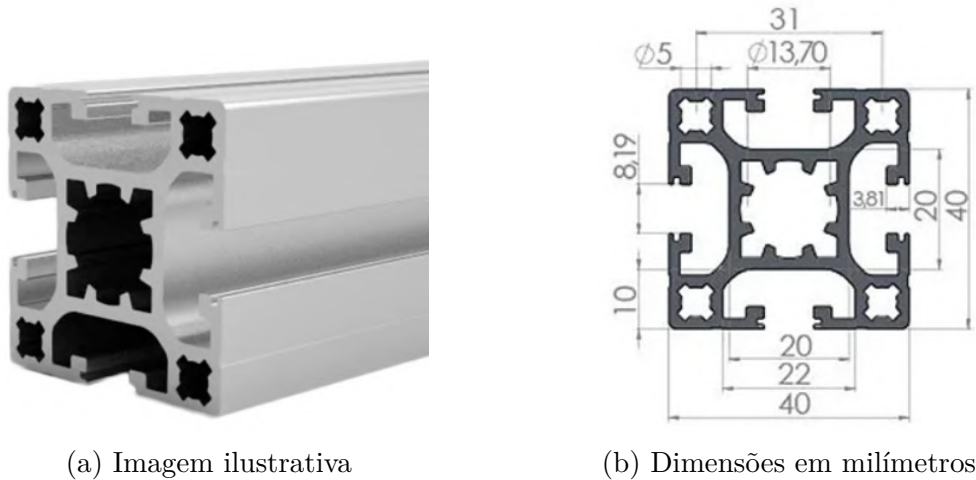
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.1.1 Estrutura principal e Mesas de trabalho e dos eixos

O perfil de alumínio estrutural com formato e dimensões ilustrados na [Figura 15](#) foi escolhido para estrutura principal da fresadora, por se tratar de um material que oferece uma boa resistência mecânica e praticidade na montagem. Além disso, os perfis de alumínio são amplamente comercializados com as medidas de comprimentos desejadas, o que facilita sua aquisição e adaptação ao projeto. A montagem com esse tipo de material é simplificada, dispensando processos complexos como soldagem e eliminando necessidade de ferramentas para corte ([POLASTRINI, 2016](#)).

Outros materiais foram considerados para estrutura principal, como placas de *Medium Density Fiberboard* (MDF) e chapas ou tubos de aço. No entanto, o MDF foi

Figura 15 – Perfil de alumínio definido para estrutura principal



(a) Imagem ilustrativa

(b) Dimensões em milímetros

Fonte: Elaborada pelo autor.

descartado devido à sua baixa resistência à umidade e possibilidade de deformações ao longo do tempo, o que comprometeria a estabilidade da estrutura e não atenderia ao requisito R1 do projeto. Já os tubos ou chapas de aço foram desconsiderados pela maior dificuldade de corte e soldagem, o que impactaria negativamente na viabilidade da construção com os recursos disponíveis e não atenderia ao requisito R3, apesar de terem um custo mais baixo.

Para as mesas de trabalho e dos eixos, foram escolhidas placas de *Nylon 6* (poliamida 6 - PA6) com 15 mm de espessura, conforme ilustrado na Figura 16. Esse material apresenta boa rigidez mecânica, facilidade de usinagem (perfuração e corte) e estabilidade para a fixação da peça a ser usinada e dos demais elementos da máquina CNC. Além disso, as placas de *Nylon* são comercialmente disponíveis em formatos e dimensões customizados, o que facilita sua adaptação a diferentes projetos.

Figura 16 – Exemplos de placas de *Nylon* com 15 mm de espessura



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.1.2 Mecanismos de tração e deslocamento

Para o mecanismo de tração, foram adotados fusos trapezoidais de 8 mm de diâmetro (*tr8*) que podem ser acoplados diretamente aos motores de passo. Além disso, o valor da distância percorrida (*mm*) pelo fuso em cada revolução (360°) do fuso (*pitch* do fuso) é $D_{\text{mm/rev}} = 8$. Essas características proporcionam maior precisão e estabilidade nos movimentos, principalmente no eixo Z, onde a sustentação e deslocamento do sistema de usinagem é mais crítica. Para eliminar folgas durante os deslocamentos, utilizou-se castanhas antifolga de cobre, compostas por duas metades ajustáveis com mola, que exercem pressão constante sobre o fuso e compensam automaticamente a folga axial. A Figura 17 ilustra o conjunto de fuso e castanha definido para a fresadora proposta.

Figura 17 – Imagens ilustrativas do fuso trapezoidal e da castanha antifolga



O mecanismo de deslocamento, responsável por guiar as mesas nas direções cartesianas, foram definidos com a utilização de eixos retificados de 12 mm de diâmetro com rolamentos lineares modelo *LMUU12*. A Figura 18 ilustra o conjunto definido para o projeto que, segundo (LEAL; RIBAS, 2015), reduz o atrito durante a operação e assegura ações de repetição no posicionamento da ferramenta. A utilização de rolamentos lineares também minimiza folgas e irregularidades ao longo dos eixos, evitando vibrações e imperfeições na peça usinada.

Figura 18 – Imagens ilustrativas do eixo retificado e rolamento linear

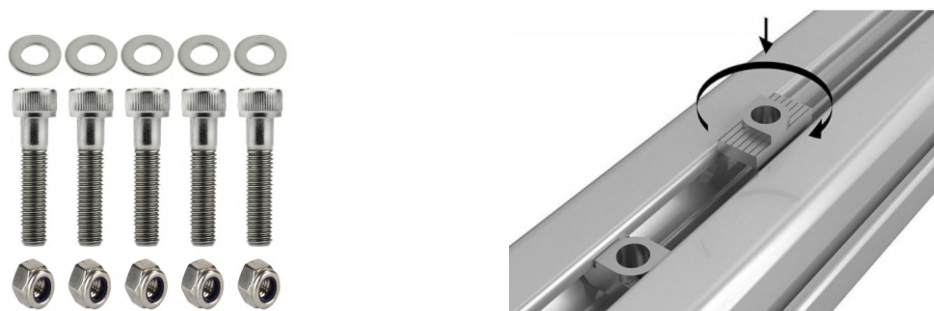


3.2.1.3 Elementos de fixação e suporte

Para a fixação da estrutura principal e dos demais elementos optou-se pela utilização de parafusos de aço, cantoneiras de alumínio e suportes específicos para acoplamento dos componentes mecânicos e dos eixos. A escolha desses elementos teve como objetivo garantir uma montagem modular, permitindo ajustes, desmontagens e manutenções com ferramentas simples. Essa abordagem contribui para a praticidade na construção e para o atendimento do requisito R3, visando uma montagem facilitada e de baixo custo.

Para fixação geral dos elementos da fresadora, tanto na estrutura de perfis de alumínio quanto nos suportes mecânicos, definiu-se a utilização de parafusos do tipo *Allen*, em conjunto com porcas e arruelas lisas, conforme ilustrado na Figura 19a. No caso específico da fixação dos componentes na estrutura principal, optou-se pelas porcas tipo T, compatíveis com os canais de 8 mm presentes nos perfis de alumínio. Essas porcas, também conhecidas como porcas martelo, encaixam-se nos canais dos perfis e garantem uma fixação firme e ajustável (veja Figura 19b). Essa solução oferece flexibilidade de montagem, possibilitando o reposicionamento e ajustes dos componentes sem a necessidade de furações ou substituição de estrutura.

Figura 19 – Imagens ilustrativas dos parafusos, porcas e arruelas



(a) Parafusos, porcas e arruelas para fixação geral

(b) Porca do tipo T para fixação em perfil de alumínio

Fonte: Elaborada pelo autor.

As cantoneiras de alumínio de 90° (ver Figura 20) foram escolhidas para a união dos perfis estruturais, assegurando o alinhamento e a rigidez da estrutura principal da fresadora. Esse tipo de fixação oferece boa resistência mecânica e facilidade de montagem, permitindo que as conexões sejam reforçadas ou ajustadas conforme necessário.

Além desses elementos, foram utilizados suportes específicos para a fixação dos eixos retificados e dos fusos trapezoidais, garantindo o correto posicionamento e o alinhamento dos sistemas de tração e deslocamento. Definiram-se: o mancal *KP08* com rolamento, destinado ao apoio dos fusos trapezoidais (Figura 21a); e o suporte *SHF* para os eixos retificados de 12 mm (Figura 21b). Também foram escolhidos acopladores flexíveis (veja Figura 21c), responsáveis por conectar os fusos trapezoidais aos eixos dos motores de passo,

Figura 20 – Imagens ilustrativas dos tipos de cantoneiras



(a) Cantoneira simples de alumínio

(b) Cantoneira reforçada de alumínio

Fonte: Elaborada pelo autor.

permitindo pequenas compensações de desalinhamento e reduzindo esforços mecânicos indesejados.

Figura 21 – Imagens ilustrativas dos suportes *KP08* e *SHF12* e do acoplador



(a) Suporte *KP08*



(b) Suporte *SHF12*

Fonte: Próprio autor



(c) Acoplador (5x8) mm

Por fim, para a fixação dos rolamentos lineares e da castanha antifolga nas mesas de trabalho e dos eixos, definiu-se os blocos de fixação (também chamados de *pillow blocks*), conforme modelos ilustrados na Figura 22. Esses suportes oferecem boa estabilidade e facilidade de instalação, além de contribuírem para a redução de vibrações e ruídos durante a operação.

Figura 22 – Imagens ilustrativas dos blocos de fixação (*pillow blocks*)



(a) Bloco para castanha *tr8*



(b) Bloco para rolamento linear

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2 Componentes de hardware

Os componentes de *hardware* podem ser definidos como o conjunto de elementos eletrônicos e eletromecânicos responsáveis pelo comando, controle e operação dos elementos mecânicos da fresadora CNC. Esses elementos realizam funções de interpretação dos comandos de usinagem, acionamento dos motores de passo, controle da ferramenta de corte e gerenciamento da alimentação de todo o sistema.

A escolha desses componentes foi feita com base em critérios como compatibilidade entre os elementos, facilidade de encontrar as peças no mercado, baixo custo e simplicidade na montagem e configuração. A Tabela 2 apresenta a lista dos principais componentes definidos, indicando também quais requisitos do projeto cada um atende e a qual parte do sistema pertence.

Tabela 2 – Componentes de hardware da fresadora proposta

Sistema	Componente(s) escolhido(s)	Requisito(s) atendido(s)
Comando e controle	<i>Arduino Uno</i> + <i>CNC Shield</i>	R2, R4 e R5
	<i>Drivers</i> para motor de passo	R2 e R4
	Módulo <i>relé</i>	R2 e R4
	Chaves de fim de curso	R2 e R4, R3
Tração e deslocamento	Motores de passo para os eixos	R1 e R4
Usinagem	Motor 775 para ferramenta de usinagem	R4
	Eixo suporte <i>ER11</i> e pinça	R3
	Ferramentas de usinagem (fresas)	R1, R2 e R4
Alimentação	Fonte chaveada para sistema de comando e controle e sistema de tração	R1, R4
	Fonte para motor de usinagem	R1, R4

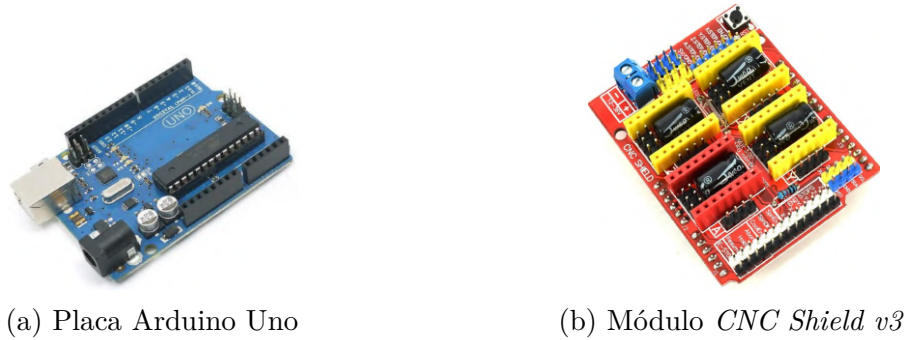
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2.1 Sistema de comando e controle

O sistema de comando e controle é responsável pela interpretação dos comandos de usinagem e pela coordenação dos movimentos dos eixos. Para a fresadora proposta, adotou-se a placa controladora *Arduino Uno* em conjunto com o módulo *CNC Shield v3*, conforme ilustrado na Figura 23. Essa combinação foi escolhida por oferecer uma solução acessível, amplamente documentada e compatível com o *firmware Grbl*, escolhido para realizar o controle preciso dos eixos da máquina CNC por meio de comandos *G-code*.

A utilização do *Arduino Uno* também facilita a integração com outros módulos eletrônicos, como sensores e relés, por meio de sua arquitetura aberta e número adequado de pinos digitais e analógicos. A placa *CNC Shield v3* atua como uma interface entre o

Figura 23 – Imagens ilustrativas do *Arduino Uno* e módulo *CNC Shield v3*

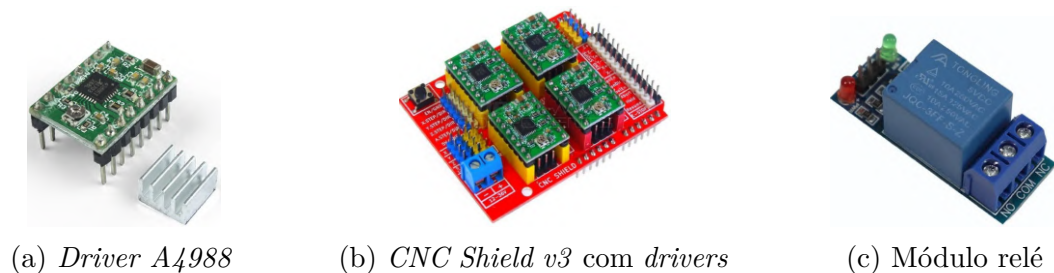


Fonte: Elaborada pelo autor.

microcontrolador e os *drivers* dos motores de passo, simplificando as conexões e permitindo ajustes individuais de corrente e micropassos.

Para o acionamento dos motores de passo, foram definidos *drivers* do modelo *A4988*, conforme ilustrado na Figura 24a, adequados para motores bipolares de até 2 A por fase, que permitem controle por micropassos e ajuste de corrente. Esses drivers são facilmente acoplados ao *CNC Shield v3* (veja Figura 24b), tornando a montagem mais organizada e segura. Além disso, foi adicionado um módulo *relé* de um canal (veja Figura 24c), utilizado para o controle do motor de usinagem (*spindle*), possibilitando o acionamento e desligamento automático por comando.

Figura 24 – Imagens ilustrativas do *driver A4988* e módulo relé



Fonte: Próprio autor

Por fim, foram definidos para o sistema as chaves de fim de curso (também conhecidas como *limit switches*) para serem instaladas nas extremidades dos eixos X, Y e Z. Essas chaves têm a função de definir as posições de referência e proteger o sistema contra colisões, interrompendo o movimento caso os limites sejam atingidos.

3.2.2.2 Sistema de tração e deslocamento

Os movimentos dos eixos X, Y e Z são realizados por motores de passo, que transformam os pulsos elétricos enviados pelo controlador em deslocamentos lineares precisos. Foram definidos motores de passo do tipo *NEMA 17*, amplamente utilizados em

aplicações CNC e impressoras 3D, devido ao seu bom equilíbrio entre torque, tamanho e custo. A Figura 25 ilustra o modelo adotado.

Os motores *NEMA 17* utilizados possuem torque nominal de aproximadamente 4,2kgf por cm e quantidade de passos por revolução $N_{\text{steps/rev}} = 200$, o que é suficiente para movimentar as mesas de trabalho e dos eixos com estabilidade. Sua escolha também se justificou a escolha dos drivers *A4988* e pela facilidade de montagem com acopladores flexíveis, que conectam o eixo do motor aos fusos trapezoidais descritos na seção subseção 3.2.1.3.

Figura 25 – Motor de passo *NEMA 17*



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2.3 Sistema de usinagem

O sistema de usinagem é composto pelo motor responsável pelo giro da ferramenta de corte, eixo de suporte e pelas ferramentas de corte (fresas). Para o motor de usinagem, foi adotado o modelo 775, mostrado na Figura 26a, devido à sua ampla disponibilidade e custo reduzido. Esse motor é de corrente contínua (DC) e apresenta boa rotação (entre 10.000 e 15.000 rpm), adequada para a usinagem de materiais como acrílico, madeira e placas de fenolite, que são compatíveis com o objetivo da fresadora proposta.

Figura 26 – Imagens ilustrativas do motor 775 e eixo de suporte *ER11*



(a) Motor 775



(b) Eixo de suporte *ER11*



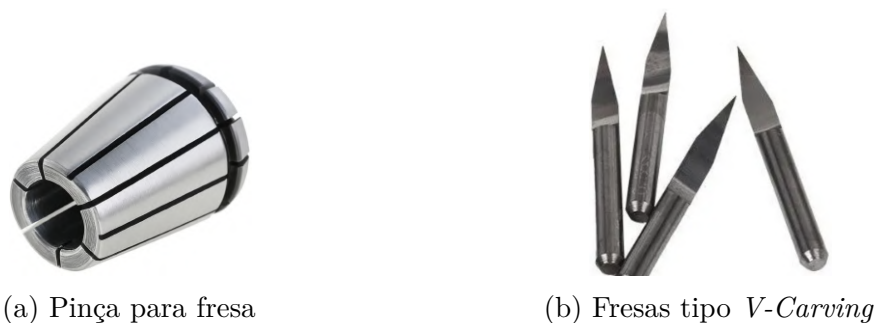
(c) Motor 775 e eixo *ER11*

Fonte: Próprio autor

Para o acoplamento da ferramenta de corte ao motor foi definido um eixo de suporte tipo *ER11*, com diâmetro interno compatível com o eixo de 5 mm do motor 775, conforme ilustrado nas Figuras 26b e 26c. Esse suporte permite o uso de pinças intercambiáveis (veja Figura 27a), garantindo melhor centragem e redução de vibrações durante a usinagem.

As ferramentas de cortes definidas são fresas específicas para usinagem de antenas planares e Placa de Circuito Impressos (PCIs), do tipo *V-Carving* com eixo de 3,175 mm, fabricadas em metal duro (*V-Bit*), conforme ilustrado na Figura 27b. Esse tipo de fresa possibilita realizar operações de gravação e desbaste de material superficial com boa precisão e bom acabamento, sendo adequada para o trabalho de isolamento de trilhas e desbastes de cobre em placas de fenolite.

Figura 27 – Imagens ilustrativas da pinça e fresas



(a) Pinça para fresa

(b) Fresas tipo *V-Carving*

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2.4 Sistema de alimentação

O sistema de alimentação é responsável por fornecer energia elétrica aos circuitos de comando, motores e demais dispositivos eletrônicos da fresadora. Foram escolhidas duas fontes chaveadas, conforme modelo apresentado na Figura 28: uma com saída de 12 V e 10 A destinada aos motores de passo e ao *Arduino*; e outra com saída de 12 V e 15 A dedicada ao motor de usinagem (775 DC). As fontes foram escolhidas por sua confiabilidade, disponibilidade comercial e eficiência energética, além de possuírem proteção contra sobrecorrente e sobretensão.

Figura 28 – Imagem ilustrativa da fonte de alimentação utilizada na fresadora



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 MODELAGEM DA FRESADORA

Com o tipo da fresadora e os elementos a serem utilizados definidos, a próxima etapa consistiu na modelagem tridimensional da fresadora utilizando o *software* CAD *SketchUp*², versão gratuita para estudantes, da empresa *Trimble*. Esta etapa teve como objetivo planejar o dimensionamento da estrutura e a disposição dos componentes de forma virtual, permitindo realizar ajustes, verificar interferências e validar o projeto antes da montagem física.

3.3.1 Definição da área útil

O ponto de partida para o desenvolvimento da modelagem foi a definição da área útil de usinagem para a fresadora proposta, ou seja, o espaço efetivo da mesa de trabalho disponível para movimentação da ferramenta de corte sobre a peça a ser usinada.

Na definição da área útil, considerou-se inicialmente o tamanho comum das antenas planares impressas para operação em faixas de micro-ondas. Devido a frequência de operação, essas antenas possuem dimensões físicas reduzidas. Também foram analisados os tamanhos padrões das placas de fenolite utilizadas na fabricação de *Placa de Circuito Impressos (PCIs)*, geralmente comercializadas com dimensões de área inferiores a 10x10 cm. Assim, definiu-se uma área útil de 15x15 cm, suficiente para a fabricação de antenas planares e PCI.

3.3.2 Dimensionamento dos elementos mecânicos

O *SketchUp*, além de ser uma ferramenta *Computer-Aided Design (CAD)* de fácil utilização, permite a inclusão de modelos tridimensionais fornecidos por fabricantes ou comunidades de usuários, disponíveis em repositórios como o *Thingiverse*³ e *3D Warehouse*⁴. Esses modelos apresentam medidas e geometrias compatíveis com os componentes reais, assegurando maior precisão no dimensionamento e na modelagem da disposição dos elementos da fresadora proposta.

A partir da área útil de usinagem definida (15x15 cm) e do tipo de fresadora adotado (pórtico fixo), foi possível determinar as dimensões dos elementos que compõem o sistema mecânico, cujos materiais e tipos foram previamente definidos na [subseção 3.2.1](#). Nessas condições, a mesa de trabalho foi dimensionada com 20x20 cm, de modo a cobrir integralmente a área útil e permitir a fixação segura das placas de fenolite durante o processo de usinagem.

² <https://sketchup.trimble.com>

³ <https://www.thingiverse.com/>

⁴ <https://3dwarehouse.sketchup.com/>

Com base nas dimensões da mesa de trabalho e nos modelos 3D dos componentes importados no *SketchUp*, foram definidas as medidas dos cursos para os eixos X e Y, garantindo que a máquina consiga deslocar-se por toda a área útil de usinagem. Além disso, foi possível definir também as medidas para o curso do eixo Z para realização do movimento vertical necessário para ajustar a posição da ferramenta de corte.

A partir da definição das medidas desses cursos, foram determinados os comprimentos dos eixos retificados lineares e dos fusos trapezoidais, assegurando o deslocamento total desejado e o alinhamento dos elementos móveis. A partir desses valores, também foram definidos os comprimentos para os perfis de alumínio da estrutura principal, buscando um conjunto rígido e estável, mas sem adicionar peso excessivo.

As medidas das placas de *Nylon* utilizadas como mesas dos eixos foram definidas conforme a área necessária para fixação dos suportes (*pillow blocks*) dos rolamentos lineares e das castanhas antifolgas em cada eixo. As medidas e quantidades dos principais elementos do sistema mecânico dimensionados estão apresentadas na [Tabela 3](#). A lista completa de todos os componentes definidos, com suas respectivas dimensões e características, encontra-se detalhada no [Apêndice A](#).

Tabela 3 – Medidas e quantidades dos elementos mecânicos dimensionados

Tipo/Material	Elementos (Medidas)	Qtd
Perfil de alumínio	Base direção eixo Y (comprimento = 395 mm)	2
	Base direção eixo X (comprimento = 400 mm)	2
	Pórtico direção eixo Z (comprimento = 300 mm)	2
	Pórtico direção eixo X (comprimento = 400 mm)	1
Eixo retificado 12 mm	Eixo Y (comprimento = 450 mm)	2
	Eixo X (comprimento = 320 mm)	2
	Eixo Z (comprimento = 170 mm)	2
Fuso trapezoidal 8 mm	Eixo Y (comprimento = 400 mm)	1
	Eixo X (comprimento = 360 mm)	1
	Eixo Z (comprimento = 155 mm)	1
Placa de Nylon 15 mm	Mesa de trabalho eixo Y (área = 200 mm x 200 mm)	1
	Mesa eixo X - rolamentos (área = 120 mm x 165 mm)	1
	Mesa eixo X - castanha (área = 90 mm x 50 mm)	1
	Mesa eixo Z (área = 120 mm x 55 mm)	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.3 Disposição dos componentes da Fresadora

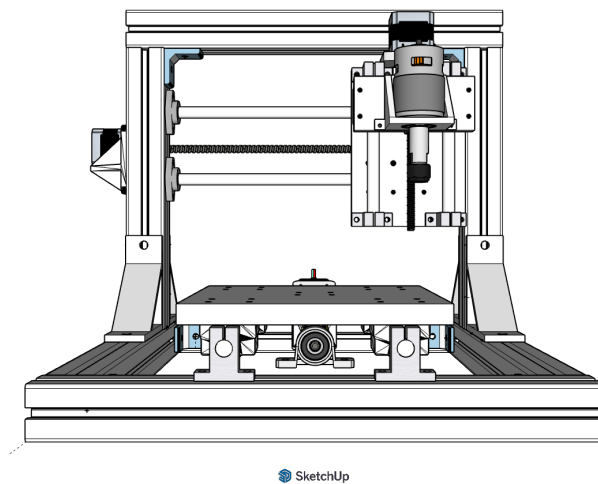
Após a definição das dimensões dos elementos mecânicos e considerando que os componentes de dimensões padronizadas, como motores, acoplamentos, mancais e suportes

de eixos, foram utilizados de acordo com as medidas fornecidas pelos fabricantes ou obtidas em bibliotecas de modelos 3D, foi possível determinar também a quantidade e as medidas dos elementos de fixação necessários para montagem completa da fresadora.

Além dos componentes padronizados, foram modelados suportes customizados para os motores de passo e para o motor 775 (ferramenta de corte), desenvolvidos especificamente com base na disposição dos elementos implementada no modelo tridimensional do *SketchUp*. Esses suportes garantem a montagem adequada, contribuindo para a precisão dos movimentos e a estabilidade durante a usinagem.

As Figuras 29 e 30 ilustram as vistas frontal e posterior da fresadora CNC modelada no *SketchUp*. O Apêndice B reúne outras vistas da modelagem apresentando outros detalhes para construção.

Figura 29 – Vista frontal do modelo 3D da fresadora projetada



Fonte: Elaborada pelo autor.

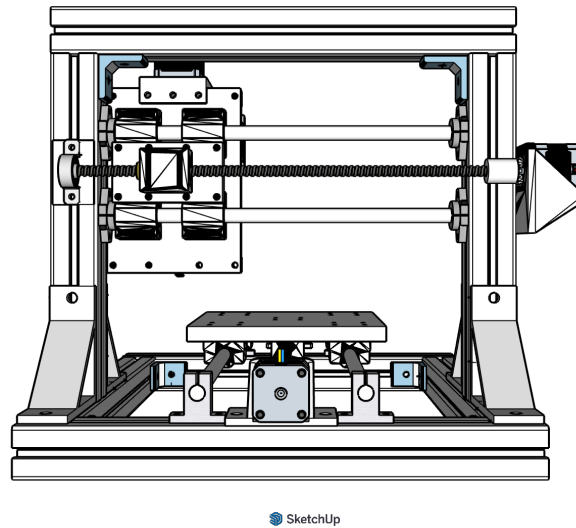
Os arquivos fonte do projeto, incluindo o modelo tridimensional completo da fresadora e os modelos individuais dos componentes customizados e padronizados, estão disponíveis publicamente no repositório *cnc-ifsc-sj*⁵, hospedado no *GitHub*, possibilitando a reprodução ou modificação do projeto por outros pesquisadores e entusiastas.

3.4 MONTAGEM E CONFIGURAÇÃO

A construção da fresadora CNC envolveu a integração de elementos mecânicos, eletrônicos e de *software*. Antes da montagem física, os componentes listados nos quadros do Apêndice A foram adquiridos em lojas especializadas em equipamentos para CNC.

⁵ <https://github.com/fpcardoso/cnc-ifsc-sj>

Figura 30 – Vista posterior do modelo 3D da fresadora projetada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Alguns itens, entretanto, como suportes de motores, *pillow blocks* e o gabinete eletrônico, foram modelados e fabricados pelo próprio autor utilizando uma impressora 3D.

Não é objetivo deste trabalho detalhar o processo de fabricação com impressora 3D ou fluxo completo de desenvolvimento dos modelos tridimensionais no *SketchUp*. Dessa forma, nas subseções que houver citação da fabricação de componentes, será informado apenas o nome do arquivo do respectivo modelo 3D utilizado.

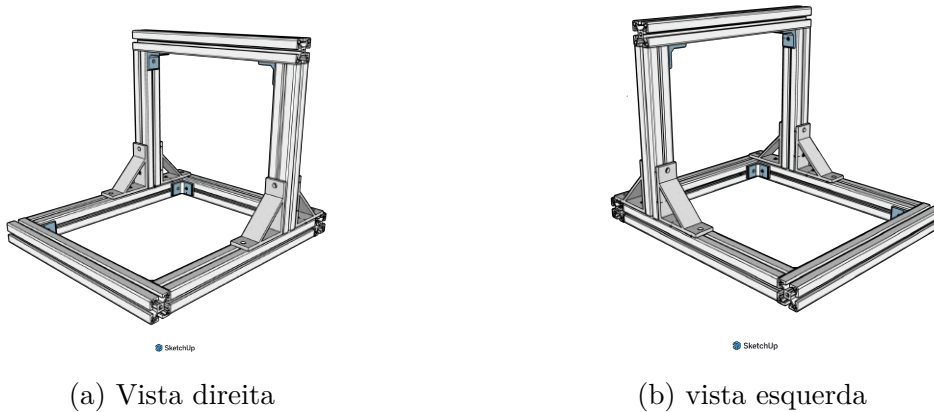
A montagem mecânica, a configuração eletrônica e os ajustes do *firmware* foram realizados de forma sequencial, garantindo precisão geométrica e o funcionamento correto dos elementos. Esta seção apresenta as etapas de montagem e calibração da fresadora desenvolvida. Para fins de organização, os arquivos referenciados correspondem aos modelos do *SketchUp* e aos códigos do *firmware* disponíveis no repositório *cnc-ifsc-sj*⁵.

Como ferramentas, utilizaram-se: conjunto de chaves *Allen*, furadeira de bancada, brocas nos diâmetros dos parafusos especificados, alicate cortador e descascador de fios, fita isolante ou espaguete termoretrátil e conjunto de chaves estrela para as porcas sextavadas.

3.4.1 Montagem da estrutura principal

A estrutura principal foi montada a partir da junção dos perfis de alumínio estrutural utilizando as cantoneiras e demais elementos de fixação apresentados nas seções anteriores e detalhados na subseção A.1.1. Nessa etapa, não foi necessário realizar cortes ou perfurações adicionais. A Figura 31 ilustra o resultado da montagem da estrutura principal.

Figura 31 – Imagens ilustrativas da estrutura principal da fresadora



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.2 Furação das placas de *Nylon*

Para permitir a fixação dos componentes mecânicos, foram realizados furos nas placas de *Nylon* que compõem as mesas dos eixos, conforme descrito no [Quadro 3](#) do [Apêndice A](#). Os furos foram executados em uma furadeira de bancada utilizando brocas adequadas para polímeros, seguindo os diâmetros compatíveis com os parafusos especificados nas listas de componentes. As posições dos furos podem ser verificadas no arquivo de modelagem **CNC-completa.skp**.

3.4.3 Fabricação e instalação dos *pillow blocks*

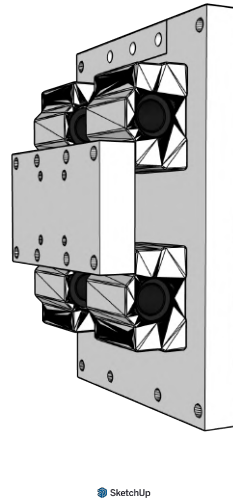
Para os mecanismos de deslocamento, foram fabricadas, em impressora 3D, seis unidades de *pillow blocks* compatíveis com o modelo *SC12UU* para os eixos Y e Z. Para o eixo X, foram produzidas quatro unidades de *pillow blocks SC12UU* customizados (arquivo **pillow-block_SC12UU_M5-customizado**), contendo furos M5 em um dos lados, permitindo a fixação entre duas placas de *Nylon* conforme a modelagem adotada para esse eixo, ilustrado na [Figura 32](#).

Para os mecanismos de tração, foram fabricadas três unidades de *pillow blocks* simples destinados às castanhas antifolga, conforme o modelo disponível no arquivo **pillow-block_castanha-antifolga.skp**.

Após a fabricação, iniciou-se a etapa de instalação dos conjuntos. Cada rolamento linear *LM12UU* foi encaixado em seu respectivo *pillow block* (incluindo os customizados), totalizando 12 conjuntos para deslocamento linear. As três castanhas antifolga foram montadas em seus respectivos *pillow blocks* para tração.

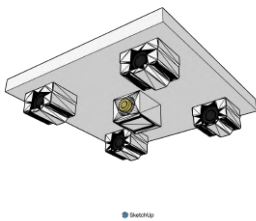
Em seguida, esses conjuntos foram fixados nas mesas dos eixos utilizando os parafusos, porcas e arruelas especificados no [Quadro 4](#) e [Quadro 5](#) do [Apêndice A](#). A [Figura 33](#) apresenta as mesas dos eixos X, Y e Z com os respectivos conjuntos instalados.

Figura 32 – Conjunto *pillow blocks* SC12UU customizados para mesa do eixo X

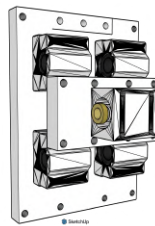


Fonte: Elaborada pelo autor.

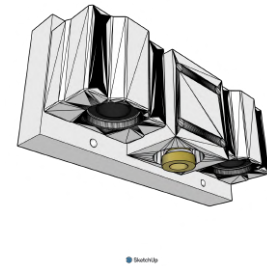
Figura 33 – Imagens das mesas com fixação dos *pillow blocks*



(a) Mesa eixo Y



(b) Mesa eixo X



(c) Mesa eixo Z

Fonte: Próprio autor

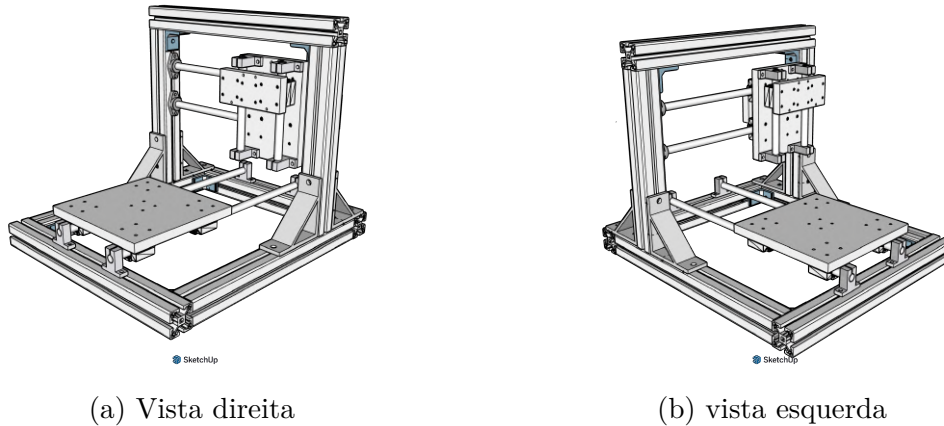
3.4.4 Instalação dos componentes do sistema de deslocamento

Com os *pillow blocks* montados nas mesas montadas, iniciou-se a instalação dos sistemas de deslocamento de cada eixo. Cada sistema é composto por um par de eixos retificados, que são encaixados nos *pillow blocks* de rolamentos fixados nas mesas. Posteriormente, cada ponta dos pares de eixos foi fixado em sua respectiva estrutura utilizando parafusos, arruelas, porcas e suportes conforme detalhado lista do [Quadro 4](#) e descrito a seguir:

- pares do eixo X, fixado com quatro suportes *SHF12* nos perfis da base;
- pares do eixo Y, fixado com quatro suportes *SK12* nos perfis do pórtico;
- pares do eixo Z, fixado com quatro suportes *SK12* na mesa do eixo Y.

A [Figura 34](#) apresenta as vistas do modelo 3D contendo apenas os sistemas de deslocamento montados.

Figura 34 – Imagens ilustrativas da fresadora com sistemas de deslocamento



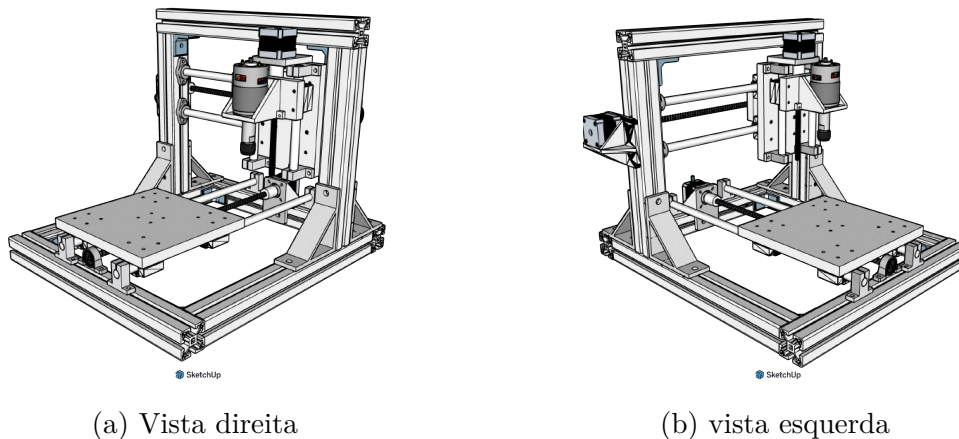
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.5 Instalação dos componentes do sistema de tração

A etapa de montagem dos sistemas de tração de cada eixo iniciou com o encaixe dos fusos trapezoidais *Tr8* nas castanhas antifolga previamente instaladas nos *pillow blocks* simples de cada mesa. Em seguida, uma das extremidades de cada fuso foi encaixada em um acoplador flexível, que posteriormente foi fixado ao eixo do motor *NEMA 17*. Nos eixos X e Y, as extremidades opostas dos fusos foram fixadas nas estruturas correspondentes por meio de mancais do tipo *KP08*, utilizando parafusos, porcas e arruelas conforme especificado no [Quadro 5](#).

A montagem dos motores *NEMA 17* foi realizada com a utilização de suportes fabricados em impressora 3D, disponíveis nos arquivos **suporte-nema_eixo-X.skp**, **suporte-nema_eixo-Y.skp** e **suporte-nema_eixo-Z.skp**. A fixação dos motores aos suportes e dos suportes às estruturas (mesas ou perfis de alumínio) foi realizada com parafusos, arruelas e porcas detalhados no [Quadro 6](#). A [Figura 35](#) apresenta as vistas do modelo tridimensional da fresadora com todos os sistemas de tração instalados.

Figura 35 – Imagens ilustrativas da fresadora com sistemas de tração



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.6 Sistema de comando e controle

Para a montagem do sistema de comando e controle da fresadora, foi fabricado um gabinete impresso em 3D, com tampa de proteção, para fixação do conjunto principal composto pelo *Arduino Uno*, pela placa *CNC Shield v3* e pelos *drivers A4988*. Além disso, foi instalado o módulo *relé* e organizado todos os componentes eletrônicos e fiação dos circuitos necessários para o sistema.

O processo de montagem dos componentes que compõem o sistema de comando e controle utilizou a lista apresentada no [Quadro 7](#) e envolveu etapas como instalação, conexão elétrica e cálculos necessários para a definição das configurações dos componentes, as quais são detalhadas nas subseções a seguir.

3.4.6.1 Definição da resolução de micropassos para fresadora

Segundo ([NARDI, 2020a](#)), a definição do valor de passos por milímetro adotado por uma fresadora *CNC* depende de sua finalidade e está diretamente relacionada às características do fuso, dos *drivers* e dos motores utilizados em cada eixo. No caso da fresadora proposta, foi definida a resolução de micropassos de 1/4 para todos os eixos, ou seja, $N_{\text{microsteps}} = 4$. Essa resolução é suficiente para garantir uma boa precisão na fabricação de antenas e outros circuitos impressos.

Para essa configuração, os pinos M0, M1 e M2 de cada *driver A4988* na *CNC Shield* devem ser ajustados conforme indicado na linha 3 do [Quadro 1](#). O ajuste foi realizado com o encaixe de *jumpers* (de cor azul) nos pinos que devem receber nível lógico alto, conforme mostrado na [Figura 36](#).

Quadro 1 – Configurações de resolução de micropassos disponíveis para *driver A4988*

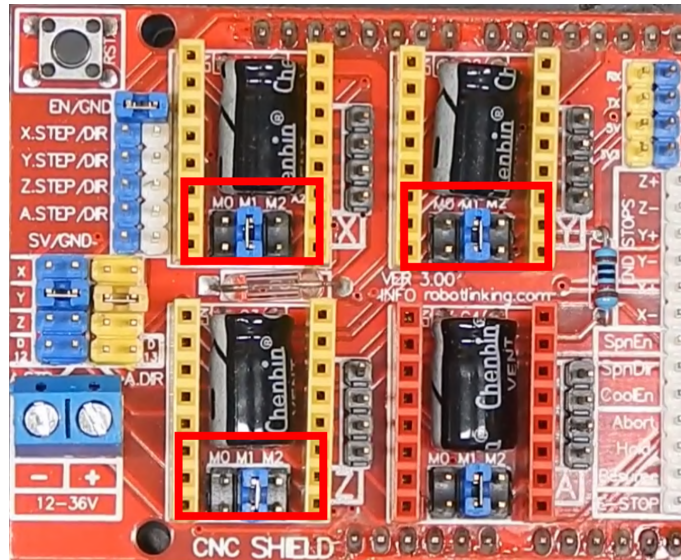
Nº	MS0	MS1	MS2	Resolução	$N_{\text{microsteps}}$
1	Low	Low	Low	1	1
2	High	Low	Low	1/2	2
3	Low	High	Low	1/4	4
4	High	High	Low	1/8	8
5	High	High	High	1/16	16

Fonte: Adaptado de ([MICROSYSTEMS, 2015](#))

3.4.6.2 Instalação da *CNC Shield* e *drivers A4988*

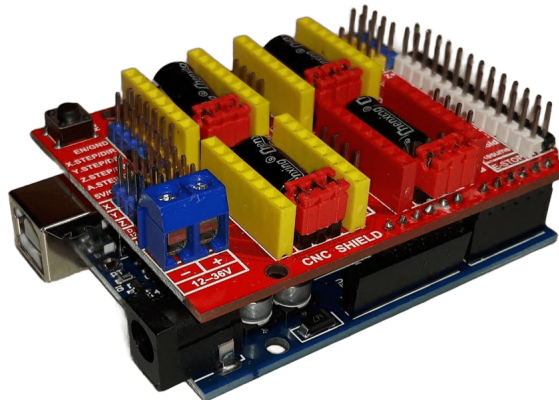
A montagem principal iniciou-se com o encaixe da *CNC Shield* sobre o *Arduino Uno*, utilizando os pinos padronizados que garantem o alinhamento correto das conexões, conforme apresentado na [Figura 37](#).

Figura 36 – Imagem ilustrativa da *CNC Shield* com *jumpers* (de cor azul)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 – Imagem ilustrativa da *CNC Shield* conectada ao *Arduino uno*



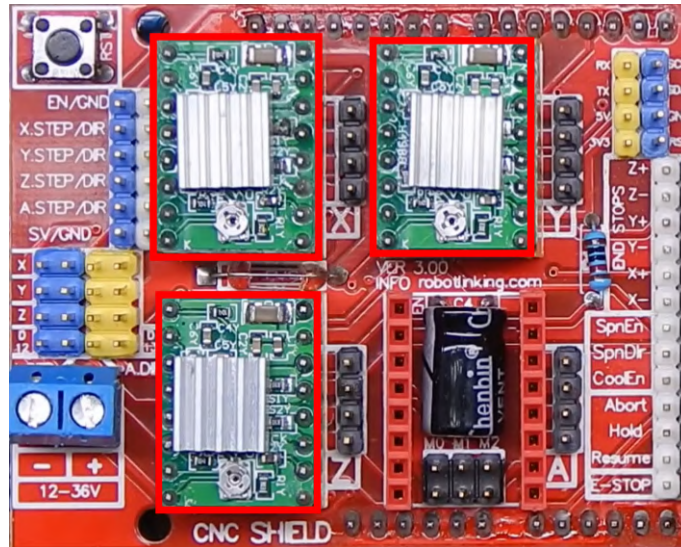
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, os *drivers A4988* foram instalados nos respectivos encaixes da *CNC Shield*. Antes da instalação, cada *driver* recebeu a colagem de um dissipador de calor, resultando no conjunto final ilustrado na Figura 38.

3.4.6.3 Cálculo e configuração do V_{ref} nos *drivers A4988*

Para que a resolução de micropassos definida seja executada corretamente, cada *driver* deve fornecer ao motor *Nema 17* a corrente adequada. Assim, foi necessário calcular e ajustar a tensão de referência (V_{ref}) de cada *driver*. Conforme o *datasheet* do *A4988* (MICROSYSTEMS, 2015), o cálculo é realizado pela Equação 3.1.

Figura 38 – Imagem ilustrativa do conjunto *CNC Shield* e *drivers*



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$V_{ref} = 8I_{max}R_s \quad (3.1)$$

Em que I_{max} é a corrente máxima por bobina do motor e R_s é a resistência do resistor do sensor do driver. Para o motor *Nema 17* utilizado, tem-se $I_{max} = 1$ A, e para o *driver A4988*, o resistor R100 corresponde a $R_s = 0,1 \Omega$. Substituindo na equação, obtém-se $V_{ref} = 0,8$ V (ou 800 mV).

Cada *driver* possui um *trimpot* para ajuste do V_{ref} . Para a configuração, energizou-se o conjunto (*Arduino* + *CNC Shield* + *drivers*) via *Universal Serial Bus* (USB) conectado à um computador. Com um multímetro em escala de medida de tensão para corrente contínua (DC), posicionou-se a ponteira negativa no GND da *CNC Shield* e a ponteira positiva sobre o *trimpot* do *driver* (veja Figura 39). Assim, foi possível ajustar o valor com uma chave até atingir a tensão calculada (800 mV).

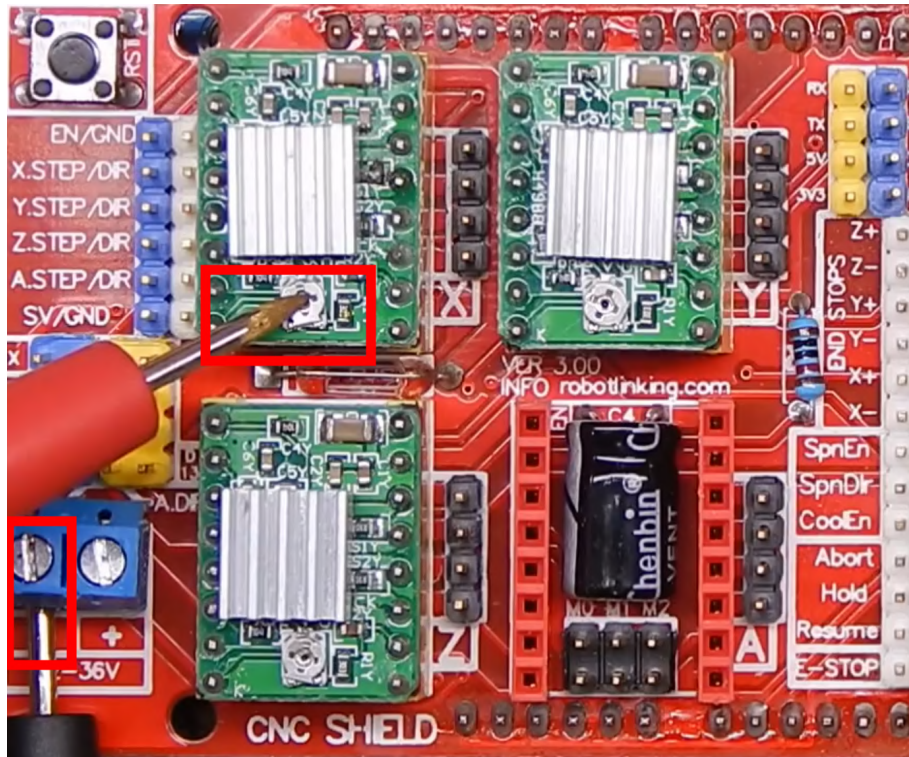
3.4.6.4 Conexão dos motores *Nema 17* na *CNC Shield*

Para a conexão dos motores, foram utilizados cabos flat de 4 vias, com bitola de $0,5 \text{ mm}^2$, dimensionados para alcançar o gabinete do *Arduino* a partir de cada eixo. A passagem dos cabos foi organizada nos canais dos perfis de alumínio, garantindo proteção e melhor acabamento. O esquema de ligação entre cada motor e seus respectivos pinos dos *drivers* na *CNC Shield* está ilustrado na Figura 40.

3.4.6.5 Instalação das chaves de fim de curso

Com base nas dimensões dos cursos totais de cada eixo definidos na subseção 3.3.2, foram escolhidas as posições para a instalação dos pares de chaves de fim de curso. A

Figura 39 – Imagem ilustrativa do ajuste de (V_{ref}) do *driver A4988*



Fonte: Elaborada pelo autor.

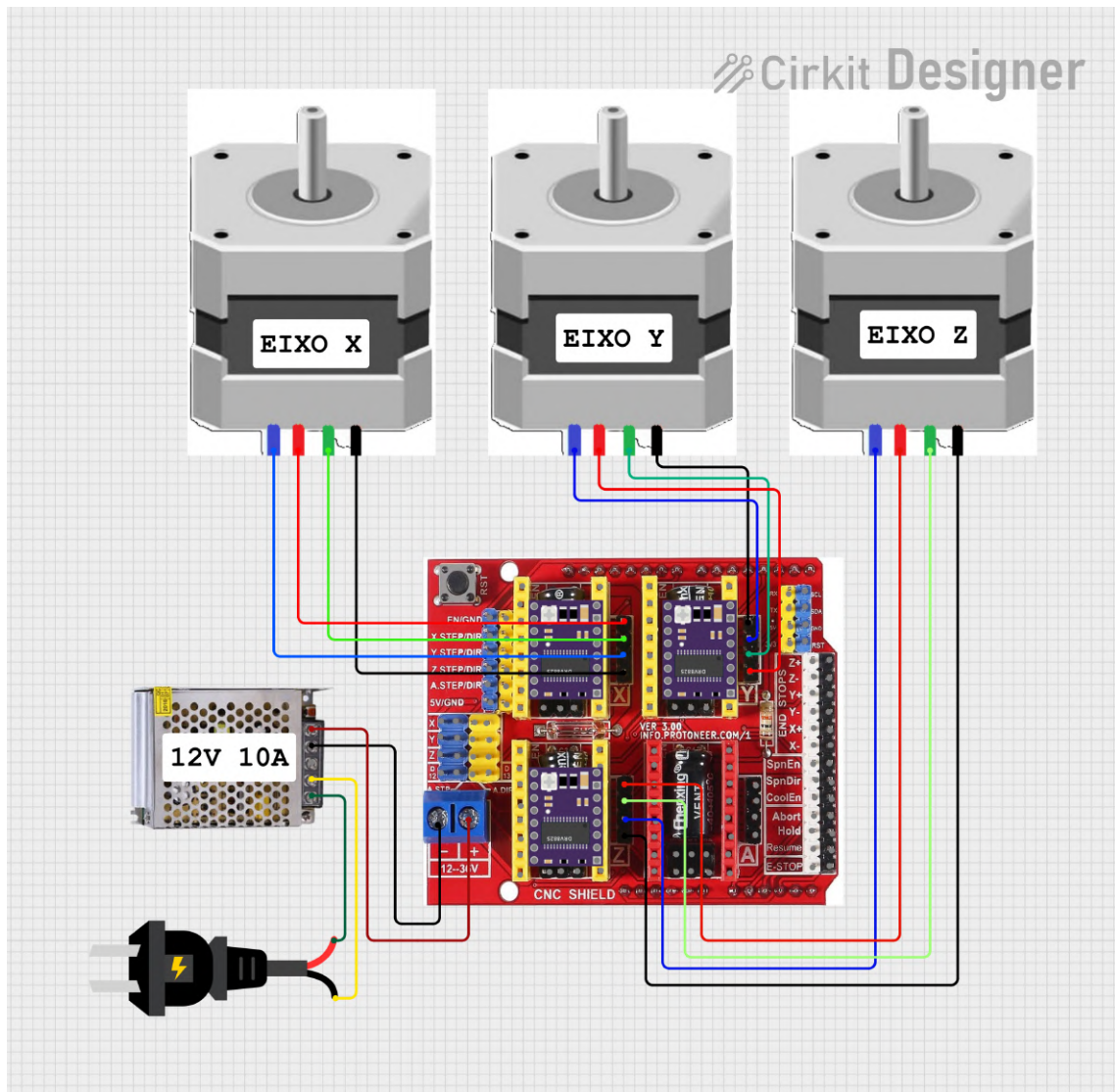
fixação foi realizada de forma que as extremidades das mesas, ao atingir o limite do movimento, acionassem as chaves correspondentes. Em seguida, as conexões elétricas entre as chaves e a *CNC Shield* foram realizadas conforme o esquemático apresentado na Figura 41. O padrão escolhido para o tipo das conexões foi considerando as chaves em normalmente fechadas (NC) para caso um dos fios se rompa, o *firmware* identifique e pare a execução para evitar danificar algum componente. Note que a figura é ilustrativa e apresenta as conexões diretamente no *Arduino*, porém as conexões reais foram feitas nos respectivos pinos da *CNC Shield*, uma vez que os pinos são replicados do *Arduino* para *CNC Shield*.

3.4.7 Instalação dos componentes do sistema de usinagem

A instalação dos componentes do sistema de usinagem seguiu a relação de materiais apresentada no Quadro 8 e envolveu três etapas principais: montagem do conjunto *spindle*, fixação do conjunto na mesa do eixo Z e realização das conexões elétricas entre o módulo relé, a *CNC Shield* e o motor 775.

A montagem do conjunto *spindle* foi iniciada pelo acoplamento e fixação do suporte de pinça *ER11* ao eixo do motor 775, conforme ilustrado na Figura 42. Em seguida, o conjunto foi instalado na mesa do eixo Z utilizando um suporte customizado, fabricado por impressão 3D e disponibilizado no arquivo **suporte-775.stl**.

Figura 40 – Esquemático do circuito para conexão dos motores à *CNC Shield*



Fonte: Elaborada pelo autor.

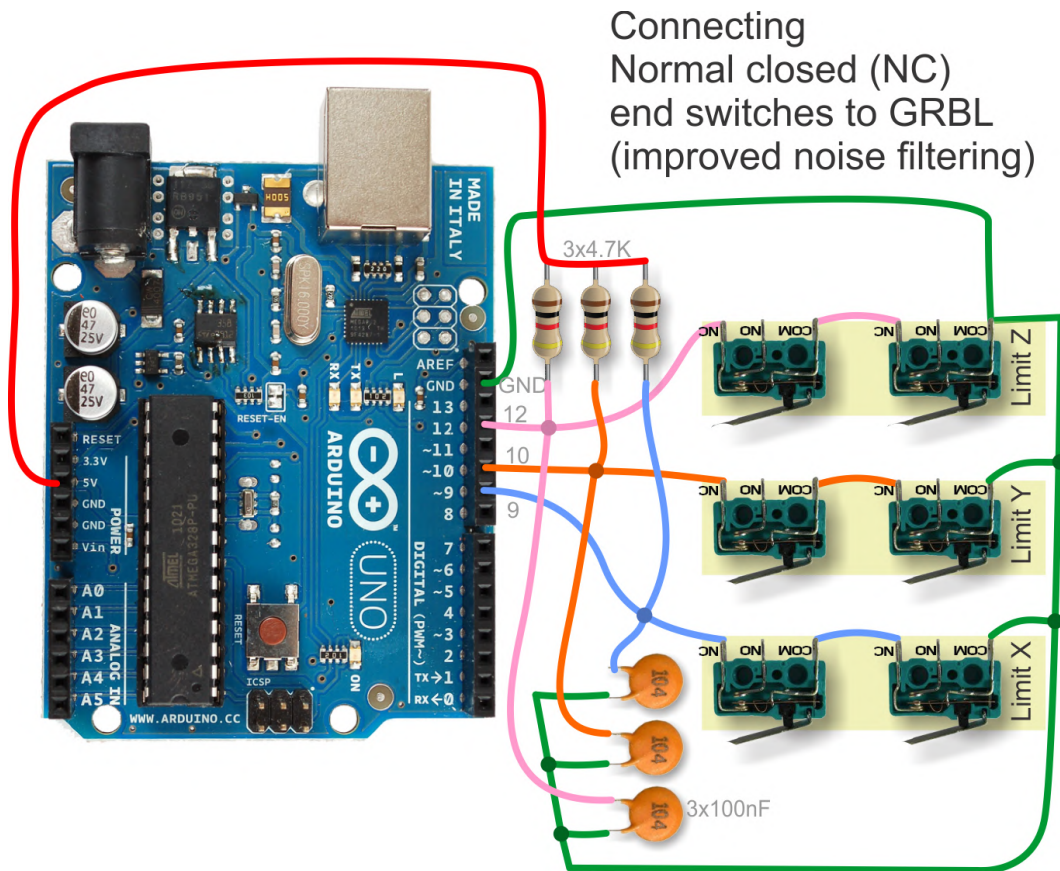
Após a fixação mecânica, procedeu-se à instalação elétrica do *spindle*. Os terminais positivo e negativo do motor 775 foram conectados ao módulo de *relé*, o qual, por sua vez, foi ligado à *CNC Shield* e à fonte de alimentação. Esse arranjo permite o acionamento do motor a partir dos comandos enviados pelo *firmware* da máquina. O esquemático completo desse circuito é apresentado na Figura 43.

3.4.8 Instalação e configuração do *firmware Grbl*

Após a instalação completa dos sistemas mecânicos e dos componentes de *hardware*, iniciaram-se as etapas finais do processo de montagem e configuração: a instalação e a parametrização do *firmware Grbl*⁶ na placa controladora *Arduino Uno*. Este *firmware*

⁶ <https://github.com/gnea/grbl>

Figura 41 – Esquemático do circuito para conexão das chaves de fim de curso



Fonte: <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Wiring-Limit-Switches>, acessado em 12/10/2025.

Figura 42 – Imagem ilustrativa do conjunto *spindle* montado

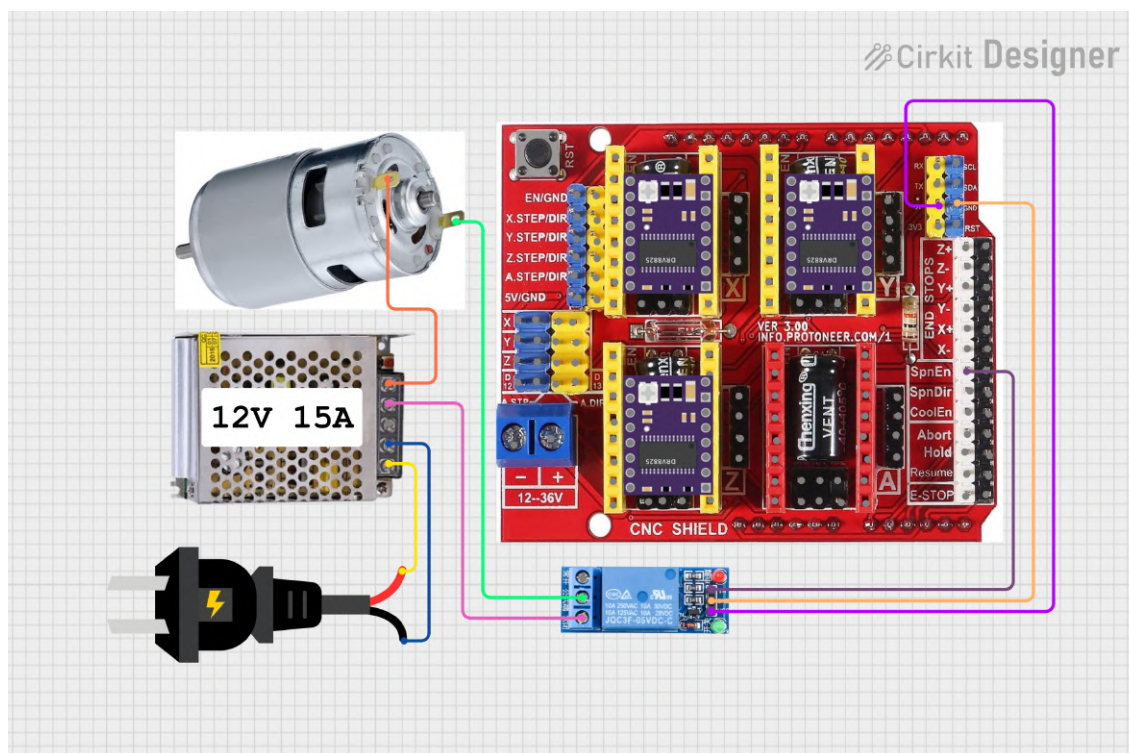


Fonte: Elaborada pelo autor.

é responsável por receber códigos G-Code enviados pela porta serial e traduzi-los em comandos elétricos para os motores por meio da *CNC Shield*.

As etapas de instalação e a parametrização do *firmware* são descritas a seguir e foram executadas a partir de um computador conectado ao *Arduino Uno* via porta **USB**, utilizando o sistema operacional *Ubuntu Linux 22.04*. As seções seguintes detalham os procedimentos realizados, assim como o **Apêndice C** que apresenta o passo a passo com

Figura 43 – Esquemático do circuito do *spindle* com módulo *relé* e *CNC Shield*



Fonte: Elaborada pelo autor.

capturas de tela.

3.4.8.1 Instalação do *firmware*

Para a instalação do *firmware*, foi inicialmente configurado no computador o *software Arduino IDE*⁷, versão 2.3.6, utilizado para compilar e carregar o código do *Grbl* no microcontrolador. A configuração da placa *Arduino Uno* conectada ao computador foi realizada na *IDE* executando os seguintes passos:

- **Passo 1** — Menu *Tools* > *Board* > *Arduino AVR Boards* > *Arduino Uno*;
- **Passo 2** — Menu *Tools* > *Port* > */dev/ttyACM0 (Arduino Uno)*.

A versão do *firmware* adotada no projeto foi a **Grbl v1.1h**⁸. O arquivo compactado contendo o código-fonte foi utilizado e está disponível no repositório *Github* deste projeto¹, com o nome **grbl-v1.1h.zip**. Após a extração, o código-fonte foi importado para *IDE* do *Arduino* acessando o menu *File* > *Open* e selecionando o arquivo **grbl.ino** localizado em "**grbl-v1.1h/grbl/**".

Antes da compilação e do carregamento do *firmware*, foram realizadas duas alterações no código-fonte, necessárias para adaptar configurações estáticas do *Grbl* às

⁷ <https://www.arduino.cc/en/software/>

⁸ <https://github.com/gnea/grbl/releases/tag/v1.1h.20190825>

características específicas da fresadora CNC desenvolvida. As modificações realizadas ajustam as seguintes características:

- Desabilitar o controle de velocidade do conjunto *spindle* (motor 775 + suporte *ER11*), uma vez que essa característica está habilitada por padrão no *firmware*, mas o projeto não utiliza um *driver* eletrônico dedicado para variação de rotação;
- Inverter a lógica do pino de acionamento do *spindle*, pois o módulo *relé* utilizado na fresadora desenvolvida foi configurado modo “normalmente aberto”, que é diferente da configuração padrão do *Grbl*.

Esses ajustes foram feitos no arquivo **config.h**, conforme apresentado no **Código 3.1**. Finalizadas as modificações, o código foi compilado e carregado na placa *Arduino Uno*, concluindo a etapa de instalação do *firmware*.

Código 3.1 – Configurações padrão do *Grbl* ajustadas para o projeto

```
1 // #define VARIABLE_SPINDLE // Default enabled. Comment to disable.
2 #define INVERT_SPINDLE_ENABLE_PIN // Default disabled. Uncomment to enable.
```

3.4.8.2 Parametrização do *firmware*

A etapa de parametrização do *firmware Grbl* tem como objetivo ajustar as características específicas da fresadora CNC desenvolvida, como as dimensões físicas dos cursos dos eixos, o comportamento elétrico dos motores e demais particularidades do projeto. Diferentemente das configurações estáticas alteradas diretamente no arquivo **config.h** (veja subseção 3.4.8.1), os parâmetros de operação são definidos dinamicamente, utilizando comandos próprios do *Grbl* enviados via comunicação serial.

Para esse processo, foi utilizado o *software Universal Gcode Sender* (UGS), versão 2.1.17. O *Universal Gcode Sender* (UGS) é uma ferramenta amplamente empregada para controle de máquinas CNC, suportando diversos *firmwares*, incluindo o *Grbl*. A versão utilizada neste projeto inclui uma interface gráfica com funcionalidades como: envio de comandos manuais, carregamento de arquivos G-code, visualização de trajetórias e ferramentas de importação e conversão de arquivos nos formatos *SVG/DXF/PNG/JPG*. O pacote *built-in*, contendo todas as dependências necessárias, está disponível para *download* no próprio site⁹ do projeto e também foi incluído no repositório *Github* deste trabalho¹ com o nome **linux-x64-ugs-v2.1.17.zip**.

Ao abrir o **UGS** com o *Arduino Uno* conectado ao computador via porta **USB**, realizou-se a configuração inicial da comunicação. Foram selecionados o tipo de *firmware*

⁹ <https://universalgcodesender.com/>

(GRBL), a porta serial (ttyACM0) correspondente ao *Arduino* e a taxa de transmissão - *baud rate* (115200). Após as configurações, foi possível executar a conexão e confirmar no console do *software* UGS a comunicação estabelecida com sucesso.

Embora os parâmetros do *firmware Grbl* possam ser modificados diretamente através de comandos digitados no console, a versão do UGS utilizada oferece uma interface mais prática para alteração desses valores. Essa funcionalidade pode ser acessada no *software* através do menu *Machine > Firmware Settings*, onde é exibida uma tabela contendo todos os parâmetros configuráveis. A tabela exibida pelo UGS é composta por três colunas:

- **Setting** — identificador do parâmetro, composto pelo símbolo ‘\$’ seguido de um número;
- **Value** — valor atual aplicado à configuração do parâmetro;
- **Description** — descrição da função correspondente no *firmware*.

Para a fresadora CNC desenvolvida neste projeto, alguns parâmetros precisaram ser ajustados em relação aos valores padrões, de forma a representar corretamente as características mecânicas e geométricas da máquina. Entre esses parâmetros, destaca-se o valor de *steps/mm*, que define quantos passos o motor deve executar para produzir um deslocamento linear de 1 mm em determinado eixo.

Conforme indicado na documentação¹⁰ do próprio *firmware*, o valor de *steps/mm* pode ser calculado pela Equação 3.2. As variáveis envolvidas nesse cálculo, bem como os valores utilizados na fresadora deste trabalho, estão apresentadas na Tabela 4.

$$V_{\text{steps/mm}} = \frac{N_{\text{steps/rev}} \times N_{\text{microsteps}}}{D_{\text{mm/rev}}} \quad (3.2)$$

Tabela 4 – Descrição e valores das variáveis utilizadas no cálculo de *steps/mm*

Variável	Descrição	Valor
$N_{\text{steps/rev}}$	Número de passos completos por revolução do motor de passo. Obtido da especificação do motor <i>Nema 17</i> (veja subseção 3.2.2.2).	200
$N_{\text{microsteps}}$	Número de <i>microsteps</i> configurados no <i>driver</i> (veja subseção 3.4.6.1).	4
$D_{\text{mm/rev}}$	Distância percorrida (mm) a cada revolução do fuso. Obtido da especificação do fuso (veja subseção 3.2.1.2).	8
$V_{\text{steps/mm}}$	Resultado do cálculo de passos por milímetro, obtido pela aplicação da Equação 3.2 com os valores indicados nesta tabela.	100

Fonte: Elaborada pelo autor.

¹⁰ <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Grbl-v1.1-Configuration>

Além do parâmetro descrito anteriormente, os ajustes apresentados na [Tabela 5](#) reúnem as configurações essenciais para o funcionamento da fresadora CNC desenvolvida. Esses ajustes incluem inversões de direção para adequação ao arranjo mecânico final, definição de velocidades e acelerações, determinados experimentalmente para garantir movimentos estáveis, e os limites de curso dos eixos que estabelecem a área útil de trabalho. Todos os valores foram configurados conforme as características da estrutura mecânica e dos componentes utilizado, compondo a lista final de parametrizações alteradas do padrão presente no *firmware Grbl*.

Tabela 5 – Parâmetros ajustados no *firmware Grbl* para fresadora desenvolvida

Parâmetro	Valor	Descrição
\$5	1	Inverte a lógica dos pinos das chaves de limite. Requer chaves instaladas.
\$21	1	Ativa os limites de <i>hardware (hard limits)</i> . Requer chaves de fim de curso instaladas e operacionais.
\$22	1	Ativa o ciclo de <i>homing</i> . Requer chaves de fim de curso e \$21 habilitado.
\$23	3	Inverte a direção de busca do <i>homing</i> para eixos com chaves instaladas no sentido negativo.
\$100	100	Número de passos por milímetro (<i>steps/mm</i>) do eixo X. Definido pelas características mecânicas e pelo motor.
\$101	100	Número de passos por milímetro (<i>steps/mm</i>) do eixo Y. Definido pelas características mecânicas e pelo motor.
\$102	100	Número de passos por milímetro (<i>steps/mm</i>) do eixo Z. Definido pelas características mecânicas e pelo motor.
\$130	150	Curso máximo do eixo X, em milímetros. Corresponde à área útil definida na subseção 3.3.1 .
\$131	150	Curso máximo do eixo Y, em milímetros. Corresponde à área útil definida na subseção 3.3.1 .
\$132	50	Curso máximo do eixo Z, em milímetros. Definido após a montagem do conjunto mecânico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a definição de todos os valores no *software UGS*, as configurações são gravadas na memória não volátil do *Arduino Uno*. Isso garante que os parâmetros permaneçam armazenados mesmo após o desligamento da máquina, sendo substituídos apenas caso novos ajustes sejam realizados ou o *firmware* seja recarregado.

Com esse procedimento concluído, a parametrização do *firmware Grbl* foi finalizada, deixando a fresadora CNC operacional. A partir desse ponto, a máquina CNC pode ser utilizada para a fabricação de protótipos de antenas planares ou PCIs, conforme os procedimentos de operação apresentados na próxima seção.

3.5 ELABORAÇÃO DO GUIA DE OPERAÇÃO

Considerando que a fresadora será utilizada em atividades de ensino e pesquisa, elaborou-se um guia de operação, estruturado com as seguintes orientações:

- cuidados de segurança durante a operação;
- procedimentos de inicialização e desligamento da máquina;
- fixação do substrato na mesa de trabalho;
- carregamento e execução de arquivos G-code com o *software* UGS;
- calibração e ajuste dos eixos;
- manutenção preventiva (limpeza, lubrificação dos eixos e substituição de ferramentas).

Esse guia tem como propósito garantir que estudantes e pesquisadores utilizem a fresadora de forma segura, além de contribuir para a durabilidade e confiabilidade da máquina. O guia completo encontra-se disponível no [Apêndice D](#), permitindo consulta detalhada sempre que necessário.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com o desenvolvimento da fresadora CNC proposta neste trabalho. A máquina foi integralmente montada, configurada e validada quanto à sua estrutura mecânica, sistemas eletrônicos e de controle, porém algumas limitações foram identificadas durante os testes finais de operação, as quais são descritas nas próximas seções.

4.1 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES E DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES

A análise das três soluções apresentadas nos trabalhos relacionados (ver seção 2.5) resultou no levantamento de boas práticas de projeto, configurações mecânicas e estratégias de montagem amplamente utilizadas em máquinas CNC de pequeno porte. Esse estudo comparativo também permitiu a definição dos requisitos a serem seguidos na construção da fresadora. A partir dessa análise, foram selecionados os componentes mecânicos, eletrônicos e o *firmware* de controle, todos facilmente encontrados no mercado.

4.2 MODELAGEM, MONTAGEM E CONFIGURAÇÃO

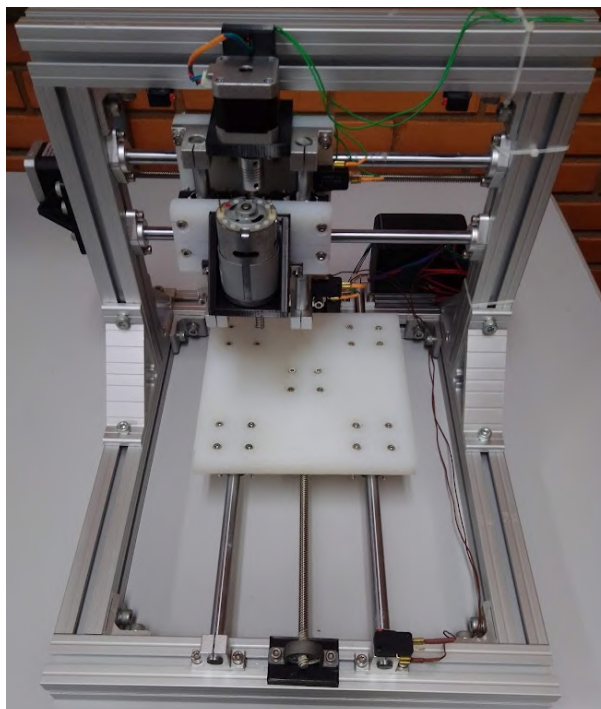
As figuras 44 e 45 apresentam imagens da fresadora CNC construída a partir dos componentes definidos, seguindo o modelo 3D desenvolvido na etapa de modelagem (veja seção 3.3). A montagem resultou em uma estrutura final com rigidez adequada, bom alinhamento entre os eixos e precisão compatível com CNCs para fins acadêmicos.

O *firmware Grbl* foi instalado e configurado corretamente, incluindo parametrizações de velocidade, aceleração, *steps/mm*, lógica das chaves de fim de curso e limites de deslocamento. com as parametrizações, foi possível verificar uma comunicação estável entre o *Arduino Uno* e o software *Universal Gcode Sender (UGS)*, permitindo controle completo da máquina.

4.3 TESTES DE VALIDAÇÃO DA CNC

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos durante os testes de validação da fresadora CNC. Esses testes permitiram verificar o desempenho mecânico e eletrônico da máquina, bem como os ajustes ainda necessários para a conclusão da etapa de fabricação real.

Figura 44 – Imagem da vista frontal da fresadora CNC desenvolvida



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.1 Adaptação para mecanismo de fixação

Durante a preparação para os testes, foi identificado que a modelagem do sistema mecânico inicial não previa um mecanismo para fixação das placas de fenolite ou outros substratos. Para possibilitar a operação, utilizou-se uma solução temporária baseada na instalação de uma mesa de sacrifício.

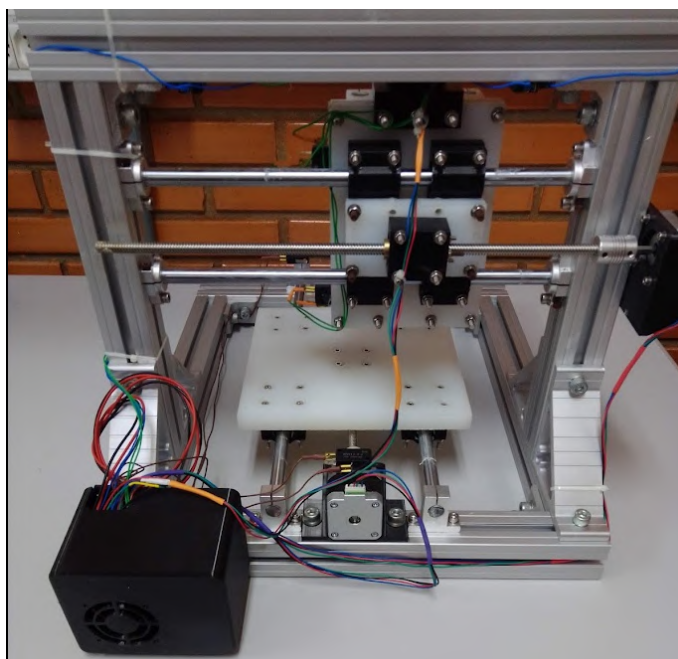
Foi utilizada uma placa de *MDF* de 9 mm de espessura, com as mesmas dimensões da mesa de trabalho, parafusada sobre a placa de *Nylon*. Essa base permitiu a fixação segura das placas de fenolite com parafusos e arruelas, sem risco de danificar a mesa principal.

4.3.2 Validações de comandos

Antes da execução de um teste de fabricação real, foram realizados ensaios de deslocamento, *homing*, zeramento de coordenadas e execução de comandos de G-code. Durante essa etapa, verificou-se um problema significativo no conjunto *spindle* formado pelo motor 775 e o suporte *ER11*.

Ao acionar o motor, ocorreram vibrações excessivas que geravam falsos acionamentos nas chaves de fim de curso, levando o *firmware* a executar o bloqueio de segurança. A análise revelou que o suporte *ER11* apresentava desalinhamento em relação ao eixo do motor, possivelmente devido a deformação de fabricação ou erro na montagem. Esse

Figura 45 – Imagem da vista posterior da fresadora CNC desenvolvida



Fonte: Elaborada pelo autor.

problema impossibilitava a continuação dos testes de validação de comandos e de fabricação de um protótipo de antena, deixando um dos objetivos específicos sem ser atingido.

Como medida provisória para continuidade das validações de comandos, o conjunto *spindle* foi removido e desativado na configuração do *firmware*. Com isso, os testes de movimentação, *homing* e execução de trajetórias puderam ser concluídos sem falhas, validando o sistema mecânico e o controle eletrônico.

4.3.3 Simulação do processo de fabricação

Apesar da impossibilidade de realizar a usinagem real de protótipos de antenas ou de *PCIs* devido ao problema no suporte *ER11*, foi realizada a simulação completa do processo de fabricação. Um arquivo G-code de teste foi carregado no *software* *UGS* e executado sem acionamento do motor de usinagem.

A fresadora realizou todos os deslocamentos previstos, respeitando as trajetórias e velocidades definidas sem interrupções. Essa validação confirmou que a máquina *CNC* encontra-se mecânica e eletronicamente funcional e preparada para o processo de fabricação, restando apenas a substituição do suporte *ER11* para permitir a etapa final de usinagem real.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma fresadora CNC de pequeno porte destinada à fabricação de antenas planares e Placa de Circuito Impressos (PCIs) para fins didáticos e de pesquisa no câmpus São José do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). O desenvolvimento incluiu etapas como: análise de soluções semelhantes e definição de componentes, modelagem tridimensional em *software CAD*, montagem física, configuração de *firmware* e validação dos sistemas da fresadora. Foram envolvidos conhecimentos multidisciplinares das áreas de eletrônica, mecânica, automação e telecomunicações.

A análise de soluções existentes e o estudo de trabalhos relacionados permitiram identificar boas práticas e requisitos relevantes para máquinas CNC de pequeno porte alinhados aos objetivos do projeto, fornecendo um conhecimento sólido para a definição dos componentes e das estratégias de montagem.

A adoção do *software CAD Sketchup* para a modelagem tridimensional mostrou-se essencial para o sucesso do projeto. A etapa de modelagem permitiu ajustar dimensões, definir disposição física dos elementos, verificar interferências entre componentes, avaliar o percurso dos eixos e antecipar problemas de montagem. Esse processo reduziu retrabalhos, otimizou o uso dos materiais e contribuiu para uma execução organizada de todas as fases subsequentes.

Os resultados apresentados no [Capítulo 4](#) mostram que a máquina foi projetada, montada e configurada adequadamente, atendendo a todos os requisitos estruturais, eletrônicos e de controle previstos. O *firmware Grbl* foi instalado e parametrizado com sucesso, e a comunicação com o *software Universal Gcode Sender (UGS)* demonstrou estabilidade e precisão na interpretação dos comandos.

Na etapa final de testes, foi identificado um desalinhamento no sistema de usinagem baseado no motor 775 e suporte ER11, o que impediu a fabricação real de um protótipo de antena. Ainda assim, as validações mecânica, eletrônica e de controle foram concluídas com sucesso. As simulações completas de G-code demonstraram que a CNC executa corretamente as trajetórias programadas, estando pronta para operar após a substituição do suporte *ER11*.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram que a fresadora CNC desenvolvida atende aos objetivos e requisitos do projeto, representando uma contribuição significativa para o desenvolvimento de pesquisas e atividades didáticas nas áreas de telecomunicações do câmpus São José do IFSC. Sua utilização possibilitará a fabricação de protótipos de antenas e PCIs em projetos de ensino, pesquisa e extensão.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste trabalho, diversas melhorias e extensões podem ser consideradas visando o aprimoramento do desempenho, da precisão e da usabilidade da fresadora. Entre as principais indicações de trabalhos futuros, destacam-se:

- Substituição do suporte *ER11* para viabilizar a fabricação real de protótipos de antenas e outros circuitos impressos;
- Implementação de um mecanismo definitivo para fixação das peças na mesa de trabalho;
- Implementação de um sistema de parada de emergência para desligamento imediato da fresadora CNC;
- Desenvolvimento de um gabinete de proteção para a fresadora, visando maior segurança do operador e contenção de resíduos;
- Integração de um sistema de controle de velocidade do *spindle*, possibilitando ajustes mais adequados ao tipo de material e à ferramenta utilizada;
- Desenvolvimento de uma interface dedicada de controle, permitindo a operação da CNC sem a necessidade de um computador externo.

Essas melhorias ampliam a robustez, segurança e usabilidade da fresadora, consolidando seu uso em atividades de pesquisa, ensino e prototipagem nas disciplinas de telecomunicações no câmpus São José do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

REFERÊNCIAS

AMORIM, E. A. P.; FILHO, J. F. V. R.; ROSA, M. V. D. O. G. *Desenvolvimento de uma máquina CNC sem estrutura de apoio fixa com estrutura do eixo X acoplável e estrutura do eixo Y extensível*. 88 f. Monografia (Bacharel em Engenharia da Computação) — Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019. 16

AZEVEDO, D. F. O. *Linguagem de programação*. 2013. Disponível em: <<https://www.domingosdeazevedo.com/cam/ling5>>. Acesso em: 13 dez 2023. 16

CAVENAGHI, B. A. de G.; CAVENAGHI, C. A. de G.; GONZALEZ, J. F. P. Desenvolvimento de uma máquina fresadora CNC multifunção de baixo custo. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, GN1 Sistemas e Publicacoes Ltd., v. 22, n. 1, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.5935/rmec.v22n1p197-224>>. 14, 19, 21, 23, 26, 27

COSTA, A. R. *Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Insertos Intercambiáveis*. 106 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2003. 14, 17, 27

LEAL, J. F.; RIBAS, M. T. *Fresadora CNC microcontroladora para confecção de placas de circuito impresso*. 69 f. Monografia (Tecnólogo em Mecatrônica Industrial) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 31

LIU, J. et al. Future paper based printed circuit boards for green electronics: fabrication and life cycle assessment. *Energy Environ. Sci.*, v. 7, p. 3674–3682, 2014. ISSN 1754-5692. 25

MICROSYSTEMS, A. *A4988 DMOS Microstepping Driver with Translator and Over-current Protection — Datasheet*. Worcester, MA, USA, 2015. Available at: <<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/338780/ALLEGRO/A4988.html>> (accessed 2025-11-22). 45, 46

NARDI, M. *Construa sua Própria CNC 2.0*. 2018. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.youtube.com/playlist?list=PLFaCm8C4CKG9-HOPIHiShViihmY6uEM3v>>. 27

NARDI, M. *Construa sua própria CNC 3.0*. 2018. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.youtube.com/playlist?list=PLFaCm8C4CKG90CCVCxJjJ7HpFf0Ofelhz>>. 19, 20, 27

NARDI, M. *Construa sua própria CNC 2.1 com Arduino*. 2020. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://marlonnardi.com/2020/06/15/como-fazer-sua-propria-cnc-caseira-com-arduino-cnc-2-1-marlon-nardi/>>. 27, 45

NARDI, M. *Construa sua própria CNC 3.0 com Arduino*. 2020. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://marlonnardi.com/2020/06/16/construa-sua-propria-cnc-3-0-com-arduino/>>. 19, 27

OLIVEIRA, E. E. C. de. *Antenas de Microfita com Patch Quase-fractal para Aplicações em Redes WPAN/WLAN*. 125 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/15213/1/ElderECO.pdf>>. 13

PIRES, D. A.; SILVA, H. J. D. Desenvolvimento de antenas impressas em substrato de fenolite. In: . [S.l.: s.n.], 2017. 13

POLASTRINI, F. H. *Desenvolvimento de uma Máquina CNC de Baixo Custo com Software e Hardware Abertos*. 100 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal de Minas Gerais Câmpus Formiga, Formiga, 2016. 13, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29

RODRIGUES, L. et al. Fabricação de placa de circuito impresso (pci) usando método fotográfico e redução significativa de soluções químicas. *Notas Técnicas*, v. 9, p. 26–33, 4 2019. ISSN 22367640. 25

SANCHES, J. M. *Desenvolvimento de uma fresadora CNC de baixo custo para fins didáticos*. 119 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. 17, 19, 21, 22

SOUSA, P. R. D. et al. Placas de circuito impresso: Mercado atual e perspectivas. *BNDES Setorial*, v. 14, n. 1, 2001. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/13440>>. 25

Apêndices

APÊNDICE A – LISTA DE COMPONENTES UTILIZADOS

Este apêndice apresenta a lista completa dos componentes utilizados na construção da fresadora CNC proposta, organizada em duas seções principais: **componentes mecânicos** e **componentes de hardware**. Além da relação dos itens com suas respectivas quantidades, observações e custos, incluem-se imagens ilustrativas contendo as dimensões dos principais elementos mecânicos.

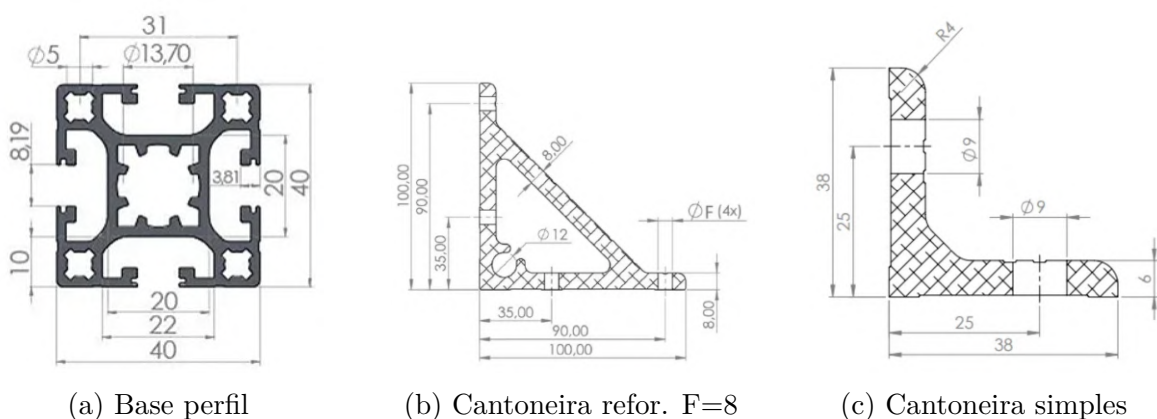
A.1 COMPONENTES MECÂNICOS

Os componentes mecânicos foram agrupados conforme sua função na fresadora: estrutura principal, mesas de trabalho e dos eixos e mecanismos de tração e deslocamento.

A.1.1 Estrutura principal

A estrutura principal da fresadora foi construída com perfis de alumínio estrutural, conectados por cantoneiras simples e reforçadas. As dimensões da base do perfil e das cantoneiras são apresentadas na [Figura 46](#).

Figura 46 – Dimensões do perfil e cantoneiras em milímetros (mm)



(a) Base perfil

(b) Cantoneira refor. F=8

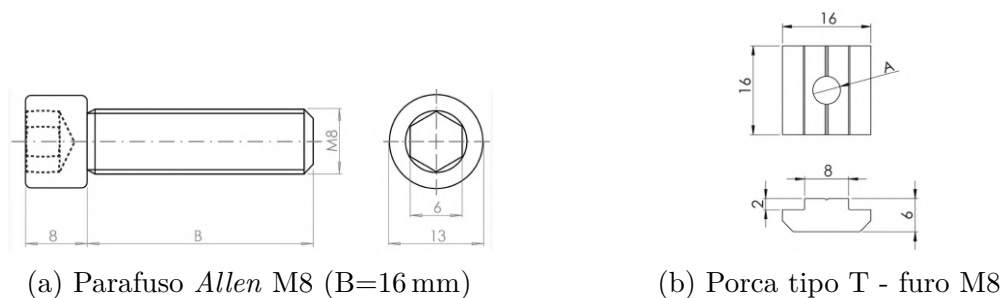
(c) Cantoneira simples

Fonte: Elaborada pelo autor.

A fixação entre os perfis e as cantoneiras foi realizada com parafusos do tipo *Allen*, arruelas lisas e porcas tipo T compatíveis com o canal dos perfis estruturais, todas com furo no padrão M8. As dimensões desses elementos estão apresentadas na [Figura 47](#).

O [Quadro 2](#) apresenta a lista completa dos itens utilizados na estrutura principal.

Figura 47 – Dimensões do parafuso e da porca tipo T em milímetros (mm)



(a) Parafuso Allen M8 (B=16 mm)

(b) Porca tipo T - furo M8

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 2 – Componentes da estrutura principal

Componente	Observação	Qtd	Custo (R\$)
Perfil de Alumínio (40x40x395) mm	Base direção eixo Y	2	67,15
Perfil de Alumínio (40x40x400) mm	Base direção eixo X	2	68,00
Perfil de Alumínio (40x40x400) mm	Pórtico direção eixo X	1	34,00
Perfil de Alumínio (40x40x300) mm	Pórtico direção eixo Z	2	51,00
Cantoneira simples 90° (38x38) mm	Conexão dos perfis	6	18,00
Cantoneira reforçada 90° (100x100) mm	Conexão dos perfis	4	62,00
Parafuso Allen M8 - 16 mm	Fixação da estrutura	28	28,00
Porca T reforçada Canal 8 - M8	Fixação da estrutura	28	42,00
Arruela lisa - M8	Fixação da estrutura	28	7,00
		Total	377,15

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.1.2 Mesas de trabalho e dos eixos

As mesas de trabalho e dos eixos foram confeccionadas em placas de *Nylon 6* (PA6) com 15 mm de espessura. Cada placa foi fixada aos *pillow blocks* dos mecanismos de tração e deslocamento, utilizando parafusos e porcas listados na [subseção A.1.3](#). As dimensões desses elementos encontram-se no [Quadro 3](#).

Quadro 3 – Mesas de trabalho e dos eixos

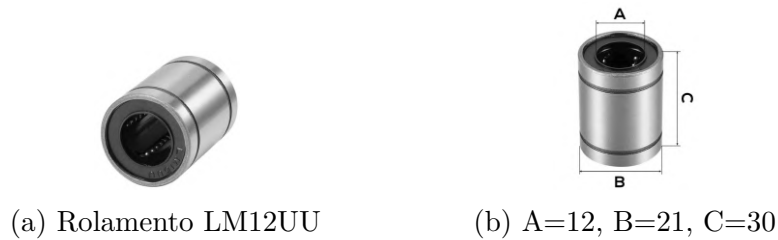
Componente	Observação	Qtd	Custo (R\$)
Placa de nylon (200x200x15) mm	Mesa de trabalho - eixo Y	1	49,46
Placa de nylon (120x165x15) mm	Mesa eixo X - base para rolamentos	1	28,72
Placa de nylon (95x50x15) mm	Mesa eixo X - base para castanha	1	13,00
Placa de nylon (120x55x15) mm	Mesa eixo Z	1	15,00
		Total	106,18

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.1.3 Mecanismos de tração e deslocamento

Para o deslocamento das mesas foram utilizados eixos retificados de 12 mm de diâmetro, guiados por rolamentos lineares *LM12UU*. Suas dimensões encontram-se ilustradas na Figura 48.

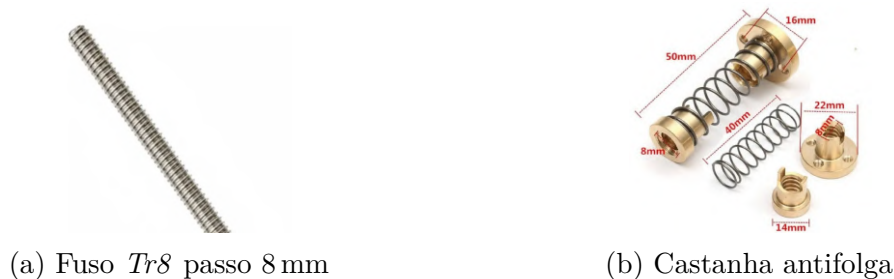
Figura 48 – Dimensões do rolamento linear em milímetros (mm)



Fonte: Elaborada pelo autor.

No mecanismo de tração utilizou-se fusos trapezoidais *Tr8* com passo de 8 mm, combinados com castanhas antifolga cujas dimensões são mostradas na Figura 49.

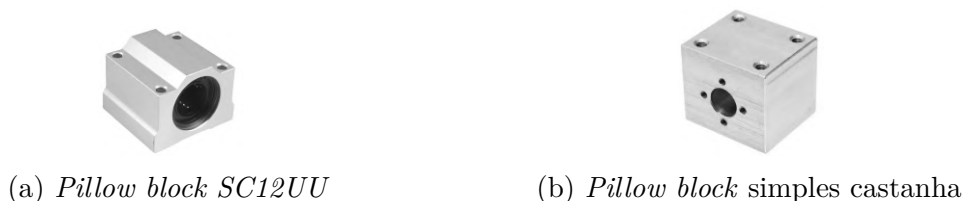
Figura 49 – Dimensões do fuso trapezoidal e castanha antifolga em milímetros (mm)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A junção das mesas aos mecanismos de tração e deslocamento foi realizada por meio de *pillow blocks* específicos para rolamentos e castanhas, conforme modelos ilustrados na Figura 50.

Figura 50 – Imagens ilustrativas dos *pillow blocks* para rolamento e castanha antifolga



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para este projeto, foi necessário criar dois modelos customizados de *pillow blocks*, derivados do modelo *SC12UU* (veja Figura 50a), com furos M5 em um dos lados para permitir a fixação adequada da mesa do eixo Y aos eixos lineares. Os arquivos CAD

completos, incluindo a modelagem 3D da fresadora, modelos originais e peças customizadas, estão disponíveis no repositório público *cnc-ifsc-sj*¹, no *GitHub*.

Os suportes e mancais responsáveis pela fixação dos eixos e fusos na estrutura estão apresentados na [Figura 51](#).

Figura 51 – Imagens ilustrativas dos suportes e mancais



(a) Suporte *SK12*

(b) Suporte *SHF12*

(c) Mancal *MKP08*

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os quadros 4 e 5 apresentam, respectivamente, todos os componentes utilizados nos mecanismos de deslocamento e tração.

Quadro 4 – Lista de componentes dos mecanismos de deslocamento

Componente	Observação	Qtd	Custo (R\$)
Eixo retificado H7 1045 (12x320) mm	Deslocamento eixo X	2	26,88
Eixo retificado H7 1045 (12x450) mm	Deslocamento eixo Y	2	37,80
Eixo retificado H7 1045 (12x170) mm	Deslocamento eixo Z	2	14,28
Rolamento <i>LM12UU</i>	Deslocamento linear dos eixos	10	125,00
<i>Pillow block SC12UU</i>	Fabricado em impressora 3D	6	0,00
<i>Pillow block SC12UU</i> - M5 Lado A	Fabricado em impressora 3D	2	0,00
<i>Pillow block SC12UU</i> - M5 Lado B	Fabricado em impressora 3D	2	0,00
Parafuso Allen M4 - 45 mm	Fixação dos <i>pillow blocks</i>	32	16,00
Porca simples - M4	Fixação dos <i>pillow blocks</i>	32	4,80
Arruela lisa - M4	Fixação dos <i>pillow blocks</i>	32	3,20
Parafuso Allen M5 - 60 mm	Fixação <i>pillow blocks</i> Lado A e B	8	19,76
Porca simples - M5	Fixação <i>pillow blocks</i> Lado A e B	8	1,20
Arruela lisa - M5	Fixação dos parafusos M5	32	3,20
Suporte para eixo - <i>SK12</i>	Fixação do eixo no perfil e na mesa	8	108,00
Suporte para eixo - <i>SHF12</i>	Fixação do eixo no perfil	4	44,00
Parafuso Allen M5 - 16 mm	Fixação suportes <i>SK12</i> e <i>SHF12</i>	16	16,00
Porca T reforçada Canal 8 - M5	Fixação suportes <i>SK12</i> e <i>SHF12</i>	16	24,00
Parafuso Allen M5 - 20 mm	Fixação dos suportes <i>SK12</i> na mesa	8	2,40
Porca tipo T Canal 8 - M5	Fixação dos suportes <i>SK12</i> na mesa	8	14,00
		Total	460,52

Fonte: Elaborada pelo autor.

¹ <https://github.com/fpcardoso/cnc-ifsc-sj>

Quadro 5 – Lista de componentes dos mecanismos de tração

Componente	Observação	Qtd	Custo (R\$)
Fuso TR8 400 mm + castanha	Tração eixo X	1	74,32
Fuso TR8 360 mm + castanha	Tração eixo Y	1	66,89
Fuso TR8 155 mm + castanha	Tração eixo Z	1	28,79
<i>Pillow block</i> para castanha	Fabricado em impressora 3D	3	0,00
Parafuso Allen M4 - 45 mm	Fixação dos <i>pillow blocks</i>	12	6,00
Porca simples - M4	Fixação dos <i>pillow blocks</i>	12	1,80
Arruela lisa - M4	Fixação dos <i>pillow blocks</i>	12	1,20
Parafuso Allen M3 - 30 mm	Fixação das castanhas nos <i>pillow blocks</i>	12	4,20
Porca simples - M3	Fixação das castanhas nos <i>pillow blocks</i>	12	1,20
Arruela lisa - M3	Fixação das castanhas nos <i>pillow blocks</i>	12	0,60
Mancal <i>KP08</i> com rolamento	Fixação do fuso no perfil	2	31,00
Parafuso Allen M5 - 20 mm	Fixação dos mancais <i>KP08</i>	4	3,00
Porca T reforçada Canal 8 - M5	Fixação dos mancais <i>KP08</i>	4	7,00
Arruela lisa - M5	Fixação dos mancais <i>KP08</i>	4	0,40
Acoplamento flexível (5x8) mm	Conexão motor <i>NEMA 17</i> fuso	3	37,50
		Total	264,90

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2 COMPONENTES DE HARDWARE

Os componentes de *hardware* foram agrupados conforme o sistema da fresadora ao qual pertencem: sistema de tração, sistemas de comando e controle, usinagem e alimentação.

A.2.1 Sistema de tração

Para os componentes de *hardware* do sistema de tração foram escolhidos motores de passo *NEMA 17*, com torque nominal de 4,2 kgf.cm, adequados para movimentos precisos e compatíveis com o *driver A4988*. Os suportes para os motores também foram projetados e os arquivos de código fonte para fabricação está disponíveis no repositório do projeto. O [Quadro 6](#) apresenta a relação de componentes empregados no sistema de tração.

A.2.2 Sistema de comando e controle

Para o sistema de comando e controle foi utilizado a combinação entre o componentes *Arduino Uno*, a *CNC Shield v3* e os *drivers A4988* que são amplamente adotados em máquinas *CNC* de pequeno porte. Além disso, foram utilizados chaves de fim de curso para limitar os deslocamentos dos eixos e o módulo relé para controlar a alimentação da ferramenta de corte.

Quadro 6 – Lista de componentes do sistema de tração

Componente	Observação	Qtd	Custo (R\$)
Motor de passo <i>NEMA 17</i> - 4,2 kgf.cm	Acionamento dos eixos X, Y e Z	3	179,70
Suportes para motores do eixo X, Y e Z	Fabricado em impressora 3D	3	0,00
Parafuso Allen M8 - 16 mm	Fixação suporte p/ motores X e Y	7	7,00
Porca tipo T Canal 8 - M8	Fixação suporte p/ motores X e Y	7	10,50
Arruela lisa - M8	Fixação suporte p/ motores X e Y	7	1,75
Parafuso Allen M5 - 35 mm	Fixação suporte p/ motor Z	3	1,95
Porca simples - M5	Fixação suporte p/ motor Z	3	0,45
Arruela lisa - M5	Fixação suporte p/ motor Z	3	0,30
Parafuso Allen M3 - 12 mm	Fixação dos motores nos suportes	12	1,80
Arruela lisa - M3	Fixação dos motores nos suportes	12	0,60
		Total	204,05

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para acomodar o *Arduino Uno*, a *CNC Shield v3*, os *drivers A4988* e demais componentes eletrônicos, foi projetado um gabinete dedicado, permitindo organização, fixação e acesso fácil à manutenção. Esse gabinete também foi modelado em 3D, e seus arquivos fonte estão disponíveis no repositório *cnc-ifsc-sj*¹ no *GitHub*. O **Quadro 7** apresenta os componentes utilizados neste sistema.

Quadro 7 – Lista de componentes do sistema de comando e controle

Componente	Observação	Qtd	Custo (R\$)
<i>Arduino Uno</i>	Controladora principal	1	52,90
<i>CNC Shield v3</i>	Interface entre <i>drivers</i> e <i>Arduino</i>	1	19,50
<i>Driver A4988</i>	Acionamento dos motores de passo	3	40,50
Módulo relé	Controle da ferramenta de usinagem	1	9,90
Chaves de fim de curso	Detecção de limites dos eixos	6	16,50
Resistor 4,7 kΩ	Circuito das chaves de fim de curso	3	0,00
Capacitor cerâmico 100 nF	Circuito das chaves de fim de curso	3	0,00
Cabo flat 0,5 mm (4 vias)	Conexão dos circuitos	3	12,24
Gabinete para <i>Arduino</i>	Fabricado em impressora 3D	1	0,00
Parafuso <i>Allen</i> M5 - 16 mm	Fixação do gabinete no perfil	2	1,50
Porca tipo T Canal 8 - M5	Fixação do gabinete no perfil	2	1,50
Arruela lisa M5	Fixação do gabinete no perfil	2	0,20
Parafuso <i>Philips</i> M2 - 5 mm	Fixação dos componentes no gabinete	6	0,00
		Total	154,74

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2.3 Sistema de usinagem

Os componentes para o sistema de usinagem compreendem o motor 775, o conjunto *ER11* (suporte e pinça) e fresas de 3,175 mm, padrão para usinagem de PCI. Também foi projetado o suporte para o motor 775 e o arquivo encontra-se no repositório do projeto. Os componentes utilizados neste sistema são apresentados no [Quadro 8](#).

Quadro 8 – Lista de componentes do sistema de usinagem

Componente	Observação	Qtd	Custo (R\$)
Motor 775 eixo 5 mm	Motor de usinagem	1	59,00
Suporte para pinça <i>ER11</i> eixo 5 mm	Acoplamento motor-pinça	1	99,90
Pinça <i>ER11</i> - 3,175 mm (1/8")	Fixação das fresas	1	31,91
Kit com 4 fresas 0,1 mm	Ferramentas de corte	1	15,90
Suporte para motor 775	Fabricado em impressora 3D	1	0,00
Parafuso <i>Allen</i> M4 - 20 mm	Fixação do suporte do motor	4	1,20
Porca simples - M4	Fixação do suporte do motor	4	0,60
Arruela lisa - M4	Fixação do suporte do motor	4	0,40
Parafuso <i>Allen</i> M4 - 14 mm	Fixação do motor no suporte	2	0,50
Arruela lisa - M4	Fixação do motor no suporte	2	0,20
		Total	209,61

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2.4 Sistema de alimentação

No sistema de alimentação utilizou-se duas fontes chaveadas: uma com saída de 12 V e 10 A destinada aos motores de passo *NEMA 17* e ao *Arduino Uno*; e outra com saída de 12 V e 15 A dedicada ao motor de usinagem (775 DC). O [Quadro 9](#) apresenta os componentes correspondentes utilizados nesse sistema.

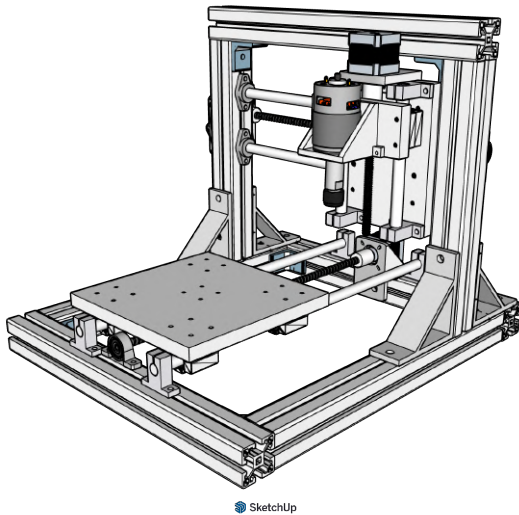
Quadro 9 – Lista de componentes do sistema de alimentação

Componente	Observação	Qtd	Custo (R\$)
Fonte chaveada 12 V - 10 A	Alimentação dos sistemas de controle e tração	1	45,99
Fonte chaveada 12 V - 15 A	Alimentação do motor 775 (cedida pelo autor)	1	0,00
		Total	45,99

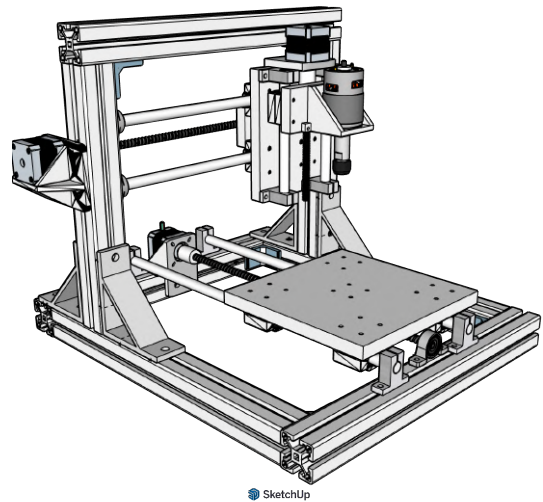
Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – VISTAS DO MODELO 3D DA FRESADORA

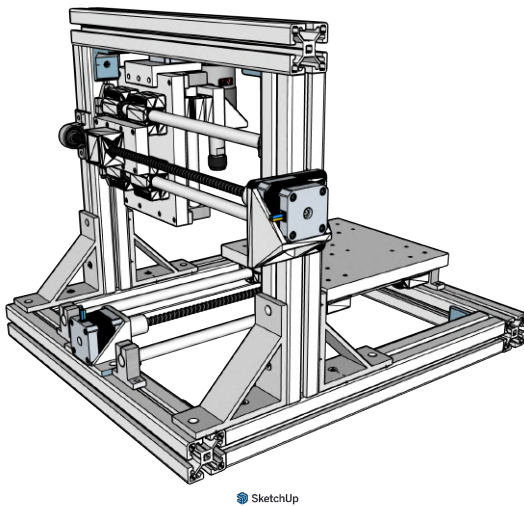
Figura 52 – Representações de diferentes vistas da fresadora CNC



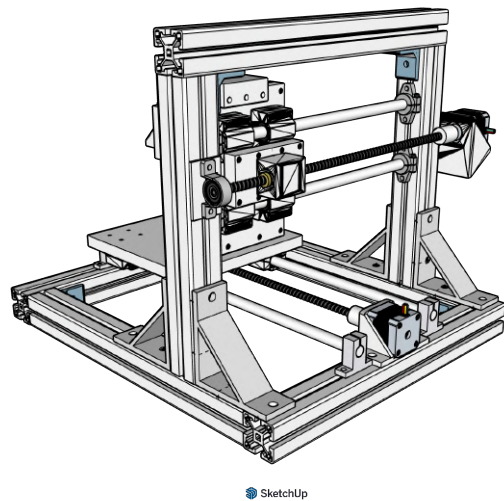
(a) Frontal direita



(b) Frontal esquerda



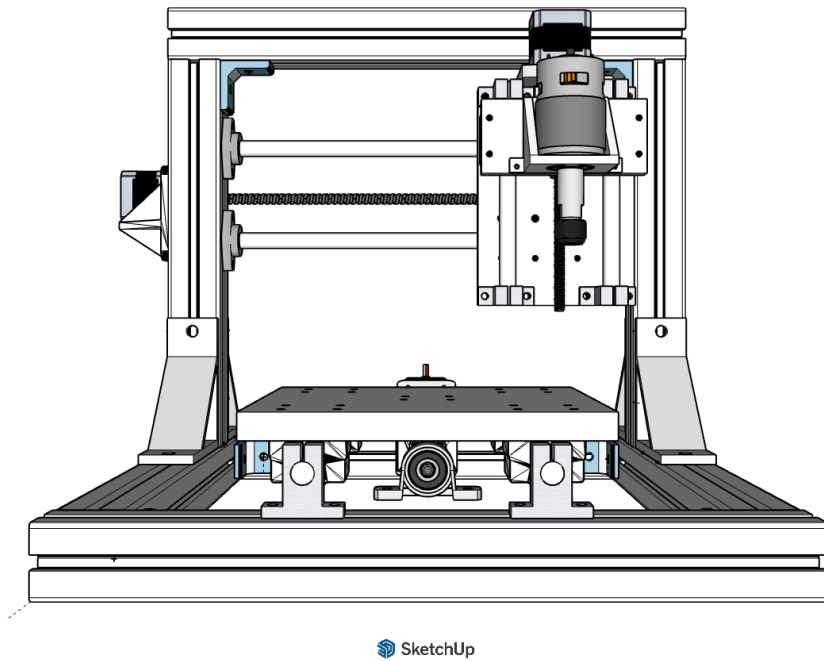
(c) Posterior direita



(d) posterior esquerda

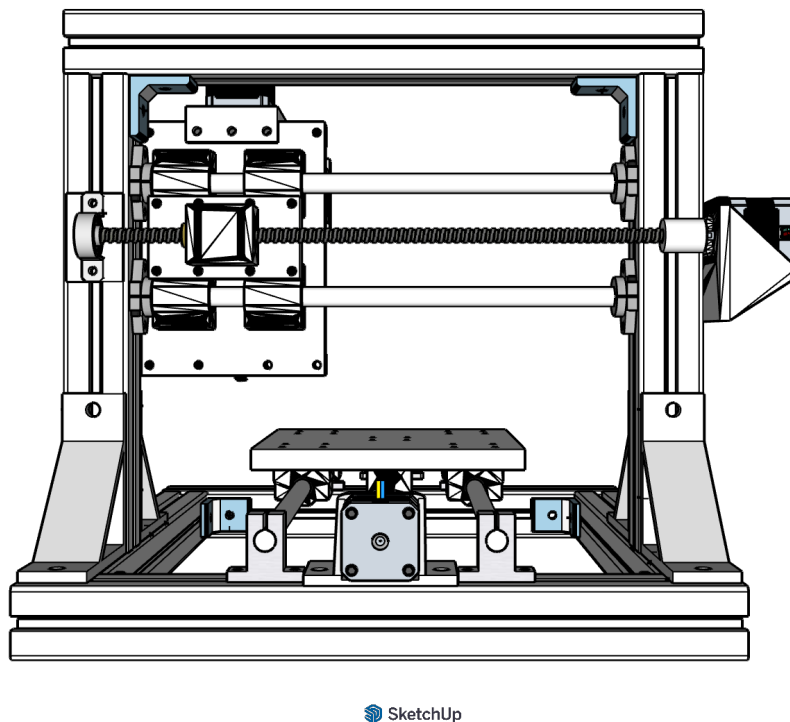
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53 – Vista frontal do modelo 3D da fresadora proposta



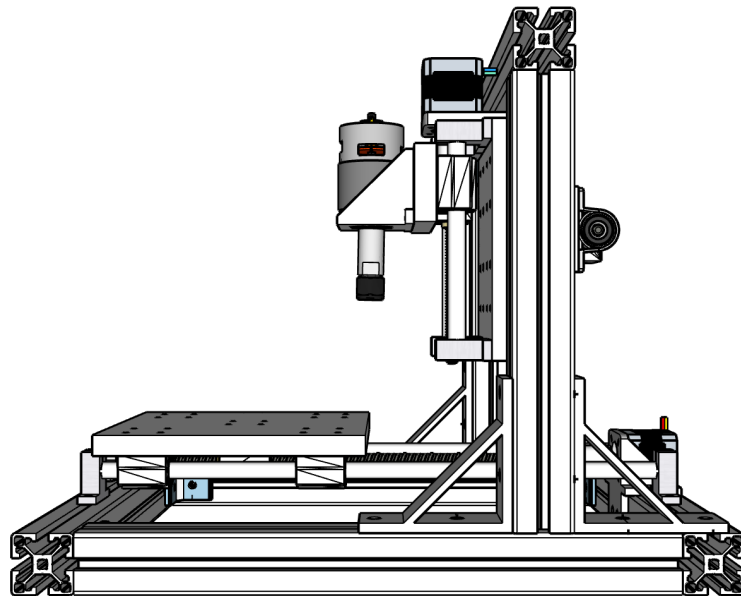
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 54 – Vista posterior do modelo 3D da fresadora proposta



Fonte: Elaborada pelo autor.

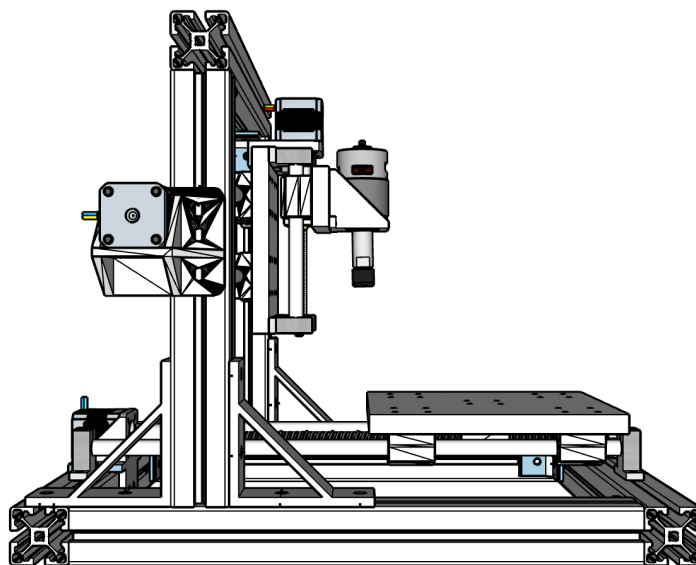
Figura 55 – Vista direita do modelo 3D da fresadora proposta



SketchUp

Fonte: Elaborada pelo autor.

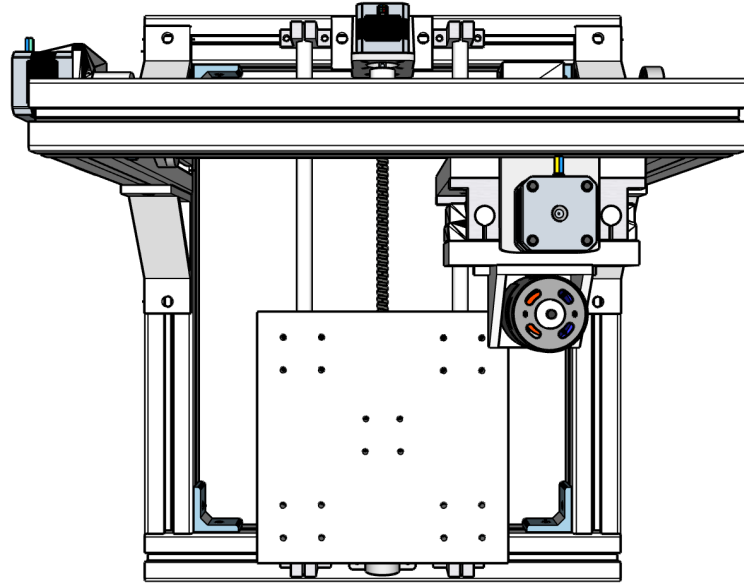
Figura 56 – Vista esquerda do modelo 3D da fresadora proposta



SketchUp

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 57 – Vista acima do modelo 3D da fresadora proposta

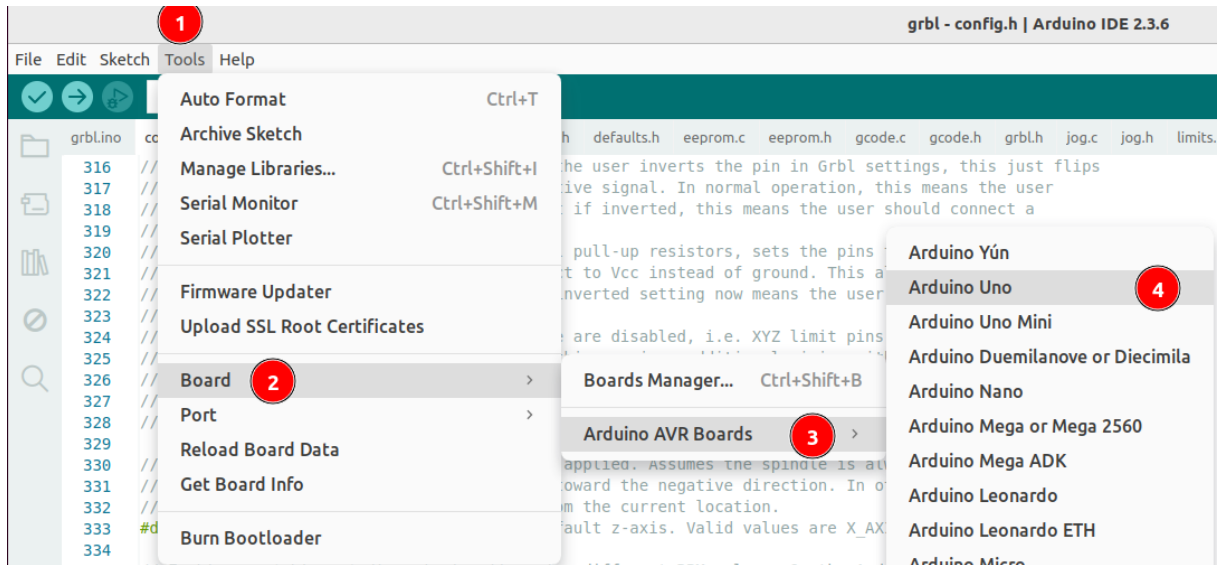


SketchUp

Fonte: Elaborada pelo autor.

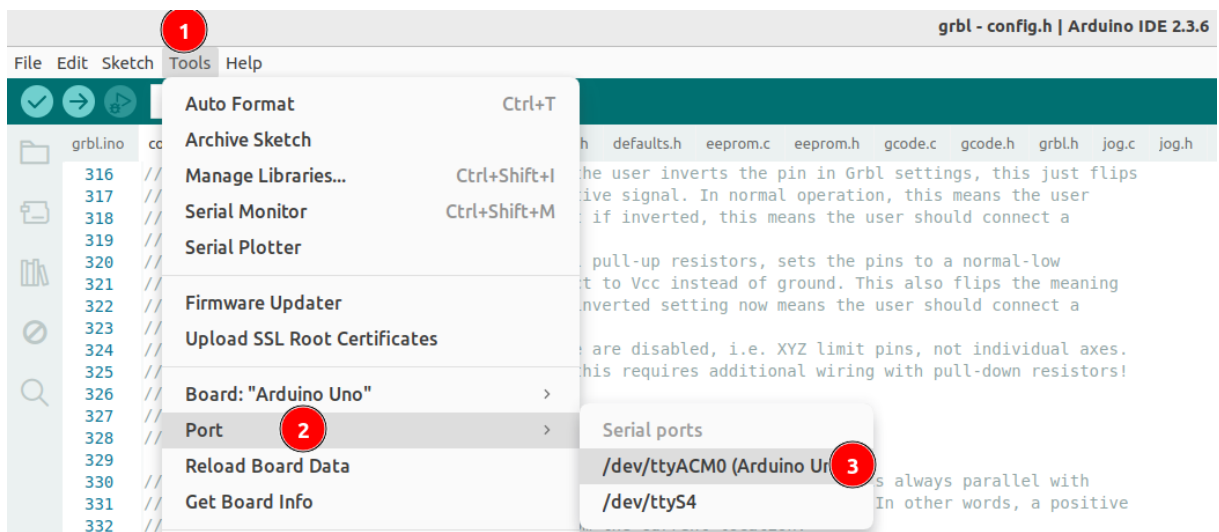
APÊNDICE C – INSTALAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DO *FIRMWARE GRBL*

Figura 58 – Definição do modelo da placa no *software Arduino IDE*



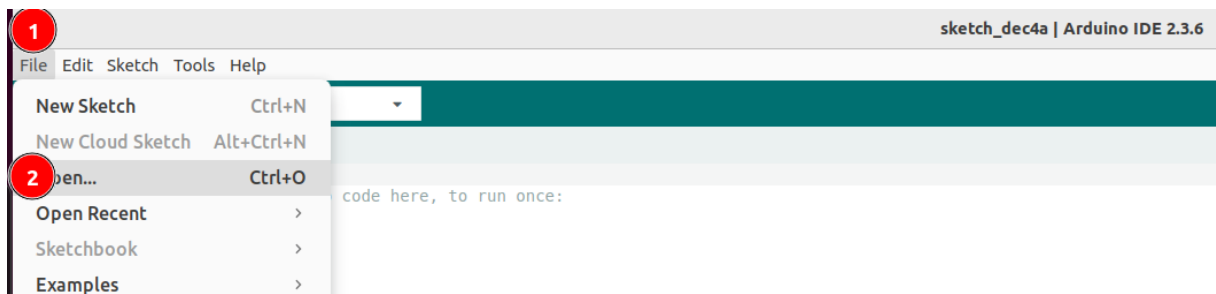
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 59 – Definição da porta da placa no *software Arduino IDE*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 60 – Importação do código-fonte do *firmware Grbl* no *software Arduino IDE*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 61 – Configuração para desabilitar o controle de velocidade do motor 775

```

335 // Enables variable spindle output voltage for different RPM values. On the Arduino Uno, the spindle
336 // enable pin will output 5V for maximum RPM with 256 intermediate levels and 0V when disabled.
337 // NOTE: IMPORTANT for Arduino Unos! When enabled, the Z-limit pin D11 and spindle enable pin D12 switch!
338 // The hardware PWM output on pin D11 is required for variable spindle output voltages.
339 // #define VARIABLE_SPINDLE // Default enabled. Comment to disable.

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 62 – Configuração para inverter lógico do pino de acionamento do motor 775

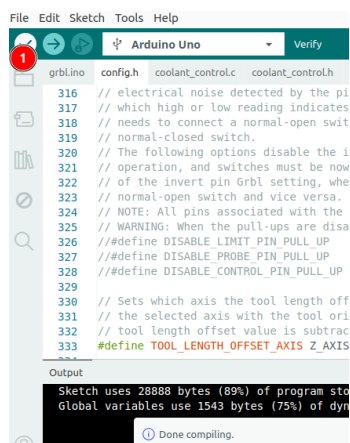
```

206 // Inverts the spindle enable pin from low-disabled/high-enabled to low-enabled/high-disabled. Useful
207 // for some pre-built electronic boards.
208 // NOTE: If VARIABLE_SPINDLE is enabled(default), this option has no effect as the PWM output and
209 // spindle enable are combined to one pin. If you need both this option and spindle speed PWM,
210 // uncomment the config option USE_SPINDLE_DIR_AS_ENABLE_PIN below.
211 // #define INVERT_SPINDLE_ENABLE_PIN // Default disabled. Uncomment to enable.

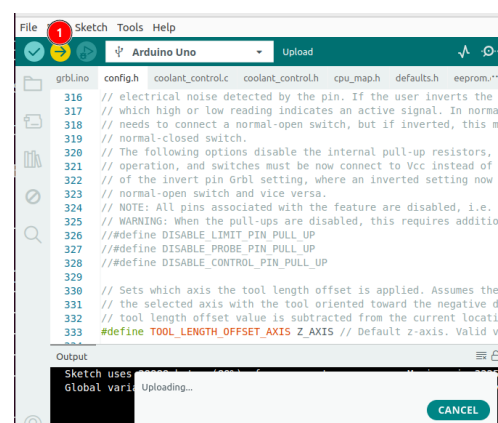
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 63 – Compilando e carregando código para o *Arduino Uno*



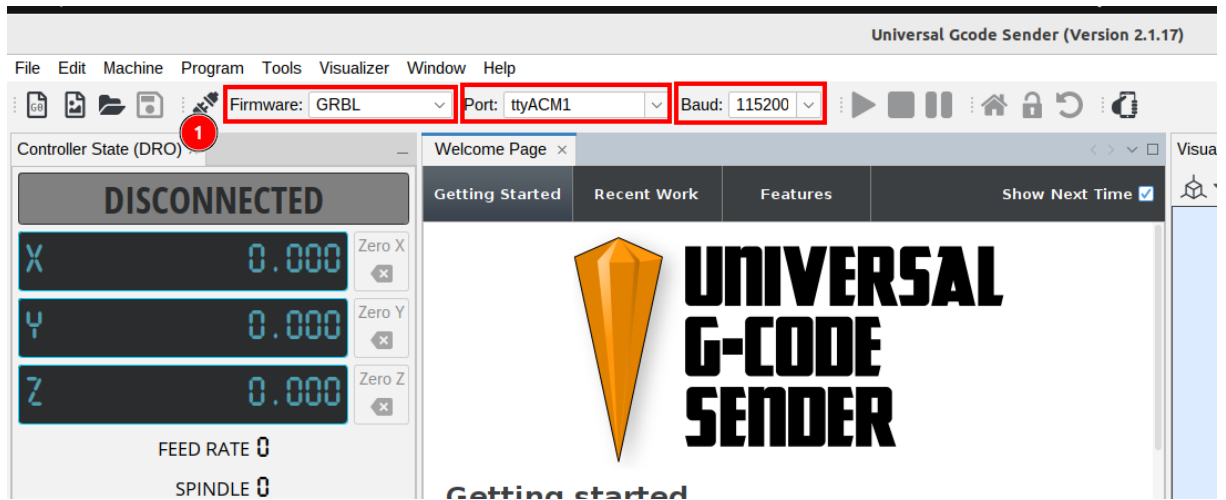
(a) Verificar código



(b) Carregar o código do *firmware*

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 64 – Configurando *Arduino Uno* no software *Universal Gcode Sender (UGS)*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 65 – Informação de conexão com o *firmware* no console do software *UGS*

```

Console x
$120 = 10.000 (X-axis acceleration, mm/sec^2)
$121 = 10.000 (Y-axis acceleration, mm/sec^2)
$122 = 10.000 (Z-axis acceleration, mm/sec^2)
$130 = 200.000 (X-axis maximum travel, millimeters)
$131 = 200.000 (Y-axis maximum travel, millimeters)
$132 = 200.000 (Z-axis maximum travel, millimeters)
ok
*** Fetching device state
>>> $G
[GC:G0 G54 G17 G21 G90 G94 M5 M9 T0 F0]
ok
*** Connected to GRBL 1.1h

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 66 – Valores padrões de parâmetros do *firmware* apresentados no UGS

Setting ^	Value	Description
\$0	10	Step pulse time
\$1	25	Step idle delay
\$2	0	Step pulse invert
\$3	0	Step direction invert
\$4	0	Invert step enable pin
\$5	0	Invert limit pins
\$6	0	Invert probe pin
\$10	1	Status report options
\$11	0.010	Junction deviation
\$12	0.002	Arc tolerance
\$13	0	Report in inches
\$20	0	Soft limits enable
\$21	0	Hard limits enable
\$22	0	Homing cycle enable
\$23	0	Homing direction invert
\$24	25.000	Homing locate feed rate
\$25	500.000	Homing search seek rate
\$26	250	Homing switch debounce delay
\$27	1.000	Homing switch pull-off distance
\$30	1000	Maximum spindle speed
\$31	0	Minimum spindle speed
\$32	0	Laser-mode enable
\$100	250.000	X-axis travel resolution
\$101	250.000	Y-axis travel resolution
\$102	250.000	Z-axis travel resolution
\$110	500.000	X-axis maximum rate
\$111	500.000	Y-axis maximum rate
\$112	500.000	Z-axis maximum rate
\$120	10.000	X-axis acceleration
\$121	10.000	Y-axis acceleration
\$122	10.000	Z-axis acceleration
\$130	200.000	X-axis maximum travel
\$131	200.000	Y-axis maximum travel
\$132	200.000	Z-axis maximum travel

Close Export Import Save

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE D – GUIA DE OPERAÇÃO DA FRESADORA CNC

D.1 INTRODUÇÃO

Este apêndice apresenta o guia de operação da fresadora CNC desenvolvida neste trabalho. O objetivo é orientar o usuário quanto aos procedimentos de inicialização, calibração e operação da máquina, bem como fornecer recomendações de segurança e boas práticas para preservar a integridade do equipamento.

D.2 CUIDADOS DE SEGURANÇA

Esta seção apresenta as principais recomendações de segurança que devem ser seguidas antes e durante a operação da fresadora. A adoção desses cuidados reduz significativamente o risco de acidentes e danos ao equipamento.

- Utilize óculos de proteção durante todo o processo de usinagem;
- Mantenha o ambiente limpo e organizado, livre de materiais soltos que possam interferir no movimento da máquina;
- Nunca toque no fuso, motores ou ferramenta de corte durante a operação;
- Evite roupas largas, cabelos soltos ou acessórios que possam ser puxados pelos componentes móveis;
- Certifique-se de que o sistema elétrico esteja devidamente aterrado.

D.3 PREPARAÇÃO MECÂNICA ANTES DA ENERGIZAÇÃO

Antes de conectar a fresadora CNC à rede elétrica, recomenda-se realizar todas as etapas de preparação mecânica. Essa prática evita movimentações inesperadas dos eixos e reduz o risco de acidentes durante a instalação da ferramenta de corte e a fixação da peça de trabalho.

D.3.1 Instalação da Fresa na Pinça ER11

A ferramenta de corte deve ser instalada no conjunto ER11 do motor 775 sempre com a máquina completamente desligada. O procedimento é descrito a seguir:

1. Selecione a fresa adequada ao tipo de usinagem a ser realizada (por exemplo, fresa de 1 mm para trilhas de [Placa de Circuito Impresso \(PCI\)](#));
2. Insira a fresa na pinça ER11 , deixando apenas o comprimento necessário exposto para evitar vibrações excessivas durante o corte;
3. Ajuste a porca da pinça manualmente até que a fresa fique apoiada de forma uniforme;
4. Utilize as chaves apropriadas do conjunto ER11 para realizar o aperto final.

A correta fixação da fresa é fundamental para evitar desvios, vibrações ou desprendimento da ferramenta durante o processo de corte.

D.3.2 Fixação da Peça de Trabalho

Após instalação da fresa, deve-se realizar a fixação da peça a ser usinada, como a placa de fenolite utilizada na fabricação de [PCIs](#):

1. Posicione a placa sobre a mesa de trabalho, garantindo que esteja completamente apoiada;
2. Utilize **grampos, parafusos ou outro sistema de fixação adequado** para impedir qualquer movimentação durante o corte;
3. Verifique se a superfície superior da peça está nivelada em relação ao plano de movimentação da fresa;
4. Confirme o alinhamento da peça com o eixo de referência da máquina.

Somente após a conclusão dessas etapas deve-se prosseguir para a energização e configuração da fresadora.

D.4 LIGAÇÃO INICIAL E CONFIGURAÇÃO

Esta seção descreve os procedimentos necessários para iniciar a fresadora após a preparação mecânica, assegurando a correta comunicação entre o computador e a controladora.

1. Conecte o computador ao *Arduino Uno* via [USB](#);
2. Conecte as fontes de alimentação e certifique-se de que a tensão elétrica corresponde às especificações do equipamento (220 V);
3. Verifique se o *software* de controle ([Universal Gcode Sender \(UGS\)](#)) está instalado no computador e configurado para se comunicar com o *Arduino* (veja [Figura 64](#)).

D.4.1 Homing dos Eixos

No **UGS**, execute o comando de *homing*, que levará os eixos X, Y e Z até suas posições de referência. Aguarde até que os sensores de fim de curso confirmem a posição inicial.

D.4.2 Definição do Ponto Zero da Peça

Posicione a fresa no ponto inicial desejado da peça (geralmente o canto inferior esquerdo). No *software*, zere as coordenadas dos eixos X, Y e Z.

D.4.3 Ajuste da Altura da Ferramenta

Aproxime o eixo Z da superfície da peça até que a ponta da fresa toque levemente o material. Em seguida, defina $Z = 0$ no **UGS**. Caso necessário, utilize uma **folha de papel** para melhorar a precisão no ajuste.

D.5 OPERAÇÃO

Esta seção apresenta o processo de carregamento do código de usinagem e os passos necessários para a execução segura do processo.

D.5.1 Carregamento do Arquivo

1. Exporte o arquivo de modelagem da **PCI** ou antena, no *software CAM* utilizado, em formato G-Code (`.gcode`);
2. Carregue o arquivo no *Universal Gcode Sender (UGS)*.

D.5.2 Execução do Corte

1. Inicie a rotação da fresa por meio de comando da *Grbl* (caso o código G-code não tenha sido configurado para iniciar automaticamente);
2. Inicie o processo de usinagem no *software UGS*;
3. Acompanhe a execução, mantendo uma distância segura da máquina;
4. Em caso de falha, execute a funcionalidade para abortar a usinagem no **UGS** ou **desconecte as fontes de alimentação da rede elétrica**.

D.6 FINALIZAÇÃO

- Ao término da usinagem, aguarde a fresa parar completamente;
- Desconecte as fontes de alimentação da rede elétrica;
- Remova a peça usinada e limpe a mesa, removendo cavacos ou resíduos acumulados;
- Realize o acabamento da superfície usinada, removendo possíveis rebarbas deixadas pela fresagem com lixa fina ou ferramenta apropriada, garantindo uma superfície limpa e segura para manuseio;
- Remova a fresa e armazene em local apropriado.

D.7 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

A manutenção periódica é essencial para garantir a durabilidade e precisão da fresadora. Recomenda-se que:

- Lubrifique periodicamente os fusos e guias lineares com graxa branca;
- Verifique o aperto dos parafusos estruturais;
- Inspeccione conexões elétricas e cabos;
- Substitua ferramentas desgastadas ou danificadas;
- Mantenha a máquina coberta quando não estiver em uso para evitar acúmulo de poeira.

D.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este guia apresenta os procedimentos básicos para a operação da fresadora CNC. Recomenda-se que o usuário se familiarize com o equipamento gradualmente, realizando inicialmente usinagens simples antes de operações mais complexas.

Para parametrizações avançadas, como ajustes de velocidade, aceleração e estratégias de usinagem, recomenda-se consultar os manuais dos *softwares Computer-Aided Manufacturing (CAM)* e do sistema de controle da CNC (*Universal Gcode Sender (UGS)*), bem como a documentação oficial do *firmware Grbl*. Esses materiais fornecem orientações detalhadas para configurações específicas e permitem explorar recursos adicionais conforme a complexidade do projeto