



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI - CAMTUC
FACULDADE DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ATANAIL GONÇALVES DE ANDRADE

**CONSTRUÇÃO DE UMA MINI FRESADORA ROUTER CNC DE BAIXO
CUSTO PARA APLICAÇÃO EM USINAGEM DE CIRCUITOS IMPRESSOS**

TUCURUÍ
2025

ATANAIL GONÇALVES DE ANDRADE

**CONSTRUÇÃO DE UMA MINI FRESADORA ROUTER CNC DE BAIXO
CUSTO PARA APLICAÇÃO EM USINAGEM DE CIRCUITOS IMPRESSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Computação, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Licenciado em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Marco José de Sousa Rocha.

TUCURUI

2025

ATANAIL GONÇALVES DE ANDRADE

**CONSTRUÇÃO DE UMA MINI FRESADORA ROUTER CNC DE BAIXO
CUSTO PARA APLICAÇÃO EM USINAGEM DE CIRCUITOS IMPRESSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Computação, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Licenciado em Engenharia de Computação.

Data da aprovação: ____/____/____

Conceito:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marco José de Sousa Rocha (UFPA/CAMTUC)
Orientador

Prof. Dr. Renato Luz Cavalcante (UFPA/ CAMTUC)
Examinador interno

Prof. Vigner Vieira (UFPA/ CAMTUC)
Examinador interno

Esperai confiantemente pelo Senhor; Ele se inclinou pra mim e me ouviu....Bem aventurado o homem que põe no Senhor a sua confiança... Salmo: 40: 1,4.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre me levantar nas horas de desânimo. Também aos meus pais que foram meu incentivo. E aos meus familiares por me apoiam nos momentos difíceis. Também a todos professores pela força durante este curso.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Unidades Básicas da CNC.....	5
Figura 2 - Modelo da primeira máquina Operatriz CN	6
Figura 3 – Centro de Usinagem	7
Figura 4 - Pontos Iniciais de Referências	8
Figura 5 - Ferramenta Multicortante (fresa).....	9
Figura 6 - Router CNC Profissional, modelo NovaCut.....	10
Figura 7- Projeto Estrutural da Máquina	12
Figura 8 - Projeto dos Pórticos Laterais: Esquerdo e Direito - 2D.....	14
Figura 9 - Estrutura Montada do Eixo X - 3D.....	14
Figura 10 - Projeto das Bases: Frontal e Traseira - 2D.....	15
Figura 11 - Estrutura Montada do Eixo Y - 3D	15
Figura 12- Estrutura Montada Eixo Z - 3D.....	16
Figura 13 - Projeto da Base Inferior- 2D	17
Figura 14 - Base Inferior da Área de Trabalho - 3D	17
Figura 15 - Projeto da Base Superior da Área de Trabalho - 2D.....	18
Figura 16 - Base Superior da Área de Trabalho - 3D.....	18
Figura 17 - Sistema de Transmissão de Movimento Mecânica - Montado	20
Figura 18 - Sistema de Deslizamento de Movimentos – Montado	21
Figura 19 - Esquema da ferramenta de controle	22
Figura 20 - Placa Arduino configurada pelo GRBL.....	23
Figura 21 - Placa Arduino Shield CNC V3.....	24
Figura 22- Drive DRV8825.....	24
Figura 23- Ferramenta de Usinagem.....	25
Figura 24 – Softwares utilizados no processo de PC.....	26
Figura 25 - Desenho Inicial - ArtCam	28
Figura 26 - Visualização do Gcode – Candle	28
Figura 27- Primeiros Resultados Obtidos	29
Figura 28 - Diagrama do Circuito	30
Figura 29 - Esquemático do Desenho - KiCAD.....	30
Figura 30 - Layout da placa – KiCAD	31
Figura 31 - Layout da placa – KiCAD	31
Figura 31- Imagem dos arquivos de furação, trilhas e isolamento – FlaCAM.....	31
Figura 33 - Simulação do arquivo G-code – Candle.....	32
Figure 34 - Simulação de Fresamento	33

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem o propósito de projetar e construir uma fresadora controlada por comandos numéricos computadorizados, de pequeno porte, para aplicação em placas de circuito impresso. O objetivo da construção desta fresadora é permitir que a comunidade local tenha acesso a essa tecnologia, utilizando materiais e métodos que possibilitem um menor custo financeiro. A princípio, foram empregados conceitos teóricos como fresamento, sistemas de coordenadas, usinagem, entre outros elementos essenciais para uma compreensão precisa dos métodos utilizados no projeto. Também foram detalhados os materiais e os métodos empregados no sistema, levando em conta suas funções de acordo com a área específica em que atuam no projeto. Dessa forma, foram examinados os componentes mecânicos utilizados na movimentação; os dispositivos eletrônicos de controle; assim como os *softwares* que geram as instruções para os movimentos da máquina. Para avaliação da máquina, foram realizados testes e analisados os resultados obtidos. Assim, pôde-se verificar o desempenho da máquina conforme os critérios especificados. Por último, foram abordados pontos relevantes do projeto, incluindo o que foi realizado, a faixa do custo, os resultados obtidos e as restrições da máquina. Também foram sugeridas novas implementações no projeto, para melhor contribuição com pesquisas futuras.

Palavras-chave: comando numérico computadorizado; fresamento; usinagem.

ABSTRACT

The purpose of this Final Paper is to design and build a small computer numerical command (CNC) controlled milling machine for application on printed circuit boards (PCB). The objective of the construction of this milling machine is to allow the local community to have access to this technology, using materials and methods that enable a lower financial cost. At first, theoretical concepts such as milling, coordinate systems, machining, among other essential elements for an accurate understanding of the materials and methods used in the project were used. The materials and methods used in the system were also detailed, taking into account their functions according to the specific area in which they work in the project. Thus, the mechanical components used in the movement were examined; electronic control devices; as well as the software that generates the instructions for the machine's movements. To evaluate the machine, tests were carried out and the results obtained were analyzed. Thus, it was possible to verify the performance of the machine according to the specified criteria. Finally, relevant points of the project were addressed, including what was accomplished, the cost range, the results obtained and the constraints of the machine. New implementations in the project were also suggested, for better contribution to future research.

Keywords: computerized numerical control; Milling; machining.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	1
1.2	Objetivo geral	2
1.3	Objetivos específicos	2
1.4	Estrutura do trabalho	2
2	REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1	Comandos numéricos (CN)	3
2.2	Comandos numéricos computadorizados (CNC)	3
2.3	Partes básicas do CNC	4
2.4	Máquinas CNC	5
2.5	Sistema de Coordenadas em CNC	7
2.5.1	Eixos e movimentos	7
2.5.2	Coordenadas e referências CNC	7
2.6	Usinagem CNC	8
2.7	Fresamento	9
2.8	Router CNC	9
2.9	Placas de circuitos impressos (PCI)	10
2.10	Placa microcontroladora – <i>arduino</i> UNO	10
2.11	Placa <i>arduino shield</i> CNC	11
2.12	<i>Drivers</i> de potência (<i>Driver</i> DRV8825)	11
2.13	GRBL	11
2.14	Motor de Passos	11
3	MATERIAIS E MÉTODOS	11
3.1	Projeto mecânico	12
3.1.1	Projeto estrutural da máquina CNC	12
3.1.2	Estruturas de suporte	13
3.1.2.1	Estrutura de suporte 1 – EIXO X	13
3.1.2.2	Estrutura de suporte 2 – EIXO Y	15
3.1.2.3	Estrutura de suporte 3 – EIXO Z	16
3.1.2.4	Estrutura de suporte 4 – ÁREA DE TRABALHO	16
3.1.3	Componentes mecânicos	18
3.1.3.1	Sistema de transmissão de movimentos mecânicos	18
3.1.3.2	Sistema de Deslizamento dos Movimentos Mecânicos	20
3.2	Projeto eletrônico	21

3.2.1 Ferramenta de controle.....	21
3.2.1.1 <i>Arduino UNO</i>	22
3.2.1.2 <i>Shield CNC</i>	23
3.2.1.3 <i>Driver DRV8825</i>	24
3.2.2 Ferramenta de usinagem – Motor DC 775.....	24
3.3 Projeto de <i>software</i>	25
3.4 Avaliação de custo do projeto	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 Experimento inicial.....	27
4.2 Projeto de circuito básico.....	29
5 CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

As máquinas controladas automaticamente são evidências que testemunham a necessidade humana de produzir mais em menos tempo. Essa exigência levou a humanidade a adaptar-se aos novos métodos produtivos, nesse cenário destacam-se os comandos numéricos computadorizados.

Segundo Júnior (2017 apud Fritzen, 2020), a utilização da tecnologia CNC é cada vez maior, pois se trata de um sistema programável via computadores. Esta tecnologia permite tanto a flexibilidade no desenvolvimento de projetos, quanto o envio de instruções para a máquina executar as atividades requisitadas, o que possibilita produzir peças geometricamente complexas de forma eficiente.

Atualmente, a tecnologia CNC é utilizada em diversas áreas de produção e em vários processos produtivos, o que possibilita fabricar desde simples peças de artesanato a produtos de alta complexidade. Além disso, oferece diversas vantagens como redução de custo operacional, qualidade de produção, precisão, entre outras.

A tecnologia CNC controla máquinas por meio de instruções programadas em computadores. Atua em diversas operações de usinagem, como fresamento, torneamento, corte, ou atividades que exigem precisão e alta complexidade. O uso desta tecnologia revolucionou a manufatura, oferecendo métodos eficientes de aprimorar a qualidade de produção (QUEROBOLSA, 2024).

Para o início do trabalho, foi necessário compreender o mecanismo de funcionamento de uma máquina CNC, o que envolveu o conhecimento de todos os componentes utilizados na parte mecânica, eletrônica e computação. Portanto, nos capítulos seguintes serão descritos todos os conhecimentos adquiridos, para que haja uma melhor compreensão deste trabalho.

1.1 Justificativa

Em primeiro lugar, este trabalho propõe uma alternativa de cooperar com o uso desta tecnologia no município de Tucuruí-PA e região. Sendo que o município comporta importantes núcleos universitários, entre estes, o Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC/UFPA) e o Campus Tucuruí do IFPA (Instituto Federal do Pará). Onde há diversos cursos de engenharia. Entretanto, tem-se observado a ausência desta ferramenta em nossos laboratórios acadêmicos.

Em segunda análise, busca amenizar o problema do alto custo, o que inviabiliza o acesso de estudantes e profissionais da eletrônica a essa tecnologia. Isso eleva o

nível de dificuldades na fabricação das PCIs, o que possibilitaria o desenvolvimento de diversos projetos de pesquisa.

E ainda, é notável a utilização de processos tradicionais em nossos laboratórios, como a transferência térmica do layout da placa e a utilização de tinta fotossensível com processamentos químicos perigosos.

Devido a essas realidades, foi proposto o desenvolvimento desta máquina CNC.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho de graduação foi projetar e construir uma fresadora *router* CNC de pequeno porte, com 03 eixos, para fresamento de PCI.

1.3 Objetivos específicos

- Colaborar para o uso desta tecnologia nas instituições de ensino locais, auxiliando alunos em projetos de eletrônica, propondo um método mais eficiente de produzir PCIs.
- Contribuir para uma melhor compreensão dos elementos essenciais de uma máquina CNC, considerando a metodologia, os componentes, os processos, valores e os resultados obtidos.
- Sugerir uma alternativa para tornar acessível a utilização dessa tecnologia a um custo reduzido.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, no primeiro capítulo trata-se da parte introdutória, onde foi apresentada a importância do tema, abordando justificativas e a definição dos objetivos. No segundo, toda a fundamentação teórica é apresentada para a melhor compreensão dos elementos presentes nessa pesquisa. No terceiro capítulo, são descritos os materiais utilizados no projeto e os métodos aplicados para a construção da máquina. No quarto capítulo, são apresentados os resultados dos experimentos e suas discussões. O quinto capítulo apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda os conceitos teóricos necessários para o entendimento do trabalho. Serão descritas aqui as noções de comando numérico (CN), CNC, máquinas CNC, bem como seu histórico, os eixos de coordenadas e vários outros conceitos importantes relacionados ao tema.

2.1 Comandos numéricos (CN)

No passado, a precisão e qualidade das peças produzidas pelas primeiras máquinas-ferramentas eram determinadas pela habilidade de um operador. Buscando maior produtividade, posteriormente, os processos de usinagem começaram a ser mecanizados pelo novo sistema de automação, o CN.

Considera-se CN uma forma de automação programável de dispositivos, capaz de dirigir os movimentos de posicionamento de um sistema mecânico. Em que os comandos relativos a esse movimento são elaborados a partir de informações numéricas ou alfanuméricas (números, letras ou outros símbolos) definidas, manualmente ou através de um programa.

Os processos de pesquisa para melhoria dos modos de produção foram acelerados devido à Segunda Guerra Mundial. Neste período, a demanda pela produção de equipamentos bélicos aumentou consideravelmente. Portanto, o momento histórico da época dependia do desenvolvimento de ferramentas que conseguissem aumentar a produção. Desta forma, na década de 40, surgiram as investigações para aprimoramento desses processos, dando origem à máquina controlada numericamente. Assim, os comandos e controles convencionais foram substituídos pelo CN (VEMAX USINAGEM, 2021).

O CN trabalhava com manipulação de dados para o controle de uma máquina, utilizava funções lógicas fixas, os programas eram gravados em fitas e cartões perfurados, e as informações ali contidas eram interpretadas, resultando no movimento autônomo dos respectivos componentes móveis dessas máquinas.

2.2 Comandos numéricos computadorizados (CNC)

O CNC foi a evolução do CN, isto devido ao avanço da tecnologia computacional e da eletrônica no início da década de 70, quando foram desenvolvidos os microprocessadores e memórias, incorporando assim novas tecnologias de informática. O que permitiu integrar o CN a um núcleo de processamento e interface

gráfica usando *Computer Assisted Design* (CAD, sigla em inglês para Desenho Assistido pelo Computador) e *Computer Assisted Manufacturing* (CAM, sigla em inglês para Manufatura Assistida pelo Computador). Esta integração proporcionou a acessibilidade aos arquivos de programa que podiam ser facilmente alterados de acordo com a necessidade do usuário, surgindo assim, CNC.

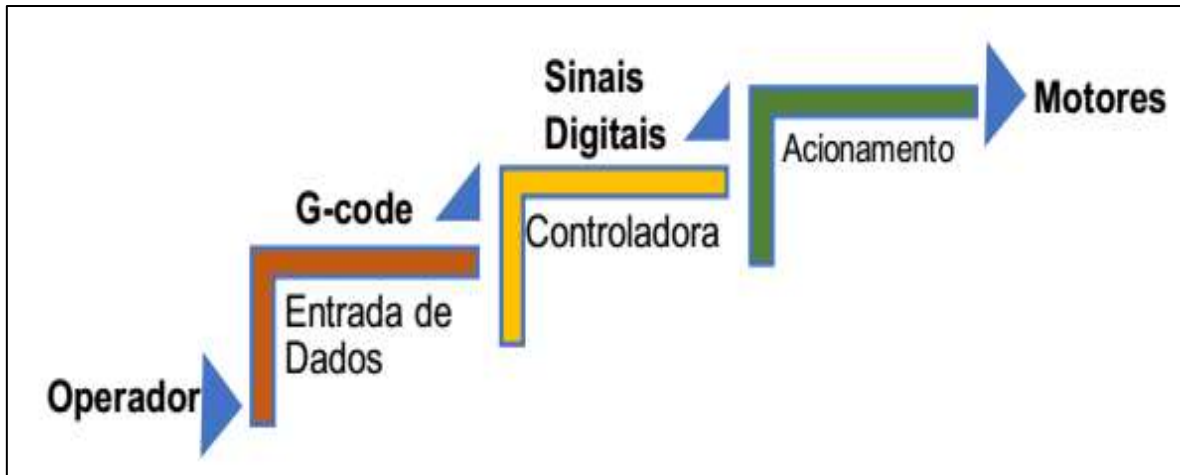
No CNC, o elemento de entrada de dados é composto por um programa codificado baseado na linguagem de programação textual conhecida como *G-code* (termo em inglês para Código G), a qual pode ser gerada por meio do sistema de *softwares* CAD/CAM. Este sistema permite ao projetista modelar a peça a ser trabalhada utilizando os recursos gráficos CAD e, através das ferramentas de manufatura CAM, é possível fazer a simulação, incluindo parâmetros como velocidade de avanço, rotação, diâmetro de ferramenta, profundidade de corte, etc.

Nesse contexto, uma das melhorias mais significativas foi a implementação dos *softwares* CAD/CAM específicos para usinagem, capazes de aumentar a eficiência no processo de produção. Além de permitir a programação, facilitando a automação de processos, resulta em maior eficiência e precisão na produção. Por este motivo, tem sido amplamente utilizado nos processos de usinagem modernos. A tecnologia CAD/CAM e a linguagem de programação *G-Code* serão detalhadas de modo mais específico no capítulo 4.

2.3 Partes básicas do CNC

A maioria dos sistemas CNC pode ser dividida em três partes básicas, conforme ilustrado na Figura 01: unidade de entrada de dados, unidade controladora e unidade de acionamento (CARSTENS; CARSTENS, 2015).

Figura 1- Unidades Básicas da CNC



Fonte: Autoria Própria (2024).

As Unidades de Entrada de Dados são dispositivos de comunicação que recebem as instruções (programas com CNC) sobre a fabricação de peças para um computador. Normalmente, esta comunicação é feita através de portas seriais, *pendrives* ou sistemas de interconexão de redes Ethernet. A Unidade Controladora, por sua vez, é responsável por transformar as instruções dos programas CNC em trajetórias de movimentação e outras funções da máquina. Essa unidade envia sinais de comandos para a unidade de acionamento, para que esta mesma acione os motores (CARSTENS; CARSTENS, 2015).

Atualmente, o CNC é empregado em uma variedade de máquinas e em diversos lugares, principalmente nas máquinas operatrizes de usinagem. O seu campo de atuação abarca desde pequenas oficinas até grandes empresas de manufatura. Cerca de 90% das máquinas vendidas atualmente possuem esta tecnologia, o que, na realidade, prova que todos os produtos fabris estão relacionados a estas inovadoras máquinas-ferramentas. (AZEVEDO, 2017).

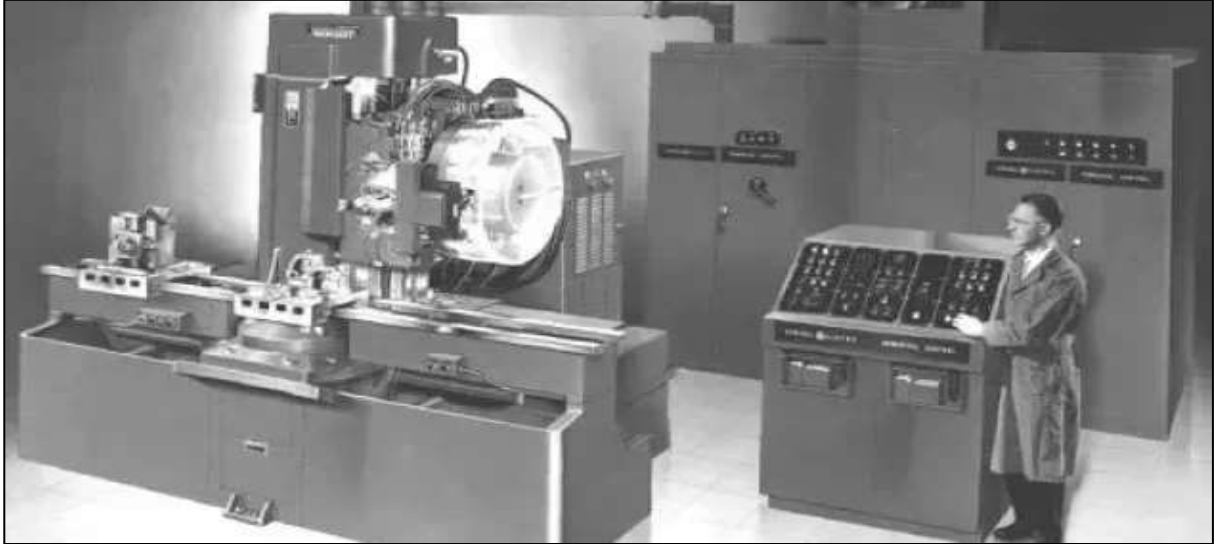
2.4 Máquinas CNC

Máquinas Operatrizes (máquinas-ferramentas) que funcionam através de CNC, são equipamentos que trabalham seguindo uma rotina de comandos pré-programados, com ações a serem executadas pela máquina baseada em um sistema de coordenadas cartesianas, gerando peças de qualquer perfil geométrico (LYRA, 2010).

O primeiro modelo de máquina operatriz (Figura 02) que utilizava o método de CN teve seu desenvolvimento iniciado em 1949 pelo laboratório de Servomecanismo

do Instituto de Tecnologia de *Massachusetts* (MIT) em parceria com a Força Aérea Norte-Americana e a empresa *Parsons Corporation of Traverse City*. O modelo usado como base foi uma fresadora de 3 eixos Hydro-Tel, da marca *Cincinnati Milling Machine Company*.

Figura 2 - Modelo da primeira máquina Operatriz CN



Fonte: RAPIDDIRECT (2021).

Com a popularização dos circuitos integrados, que proporcionavam um aumento considerável na capacidade de armazenamento, além da redução de espaço físico utilizado, surgiram no início dos anos 70 as primeiras máquinas operatrizes de CNC que conhecemos hoje, as quais evoluíram dos menores até o porte industrial, como os centros de usinagem (figura 03). Entre as máquinas-ferramentas existentes, pode-se citar as furadeiras, tornos, fresadoras, plainas, limadoras, centros de usinagem, dentre outras.

Figura 3 – Centro de Usinagem



Fonte: ROMI [(2023?)].

2.5 Sistema de Coordenadas em CNC

2.5.1 Eixos e movimentos

Na técnica CNC, eixo é uma direção segundo a qual se podem programar os movimentos, portanto, quando se diz que uma máquina CNC tem 3 eixos, significa que a máquina tem a capacidade de deslocamento em 3 direções simultâneas. Os eixos de movimento coincidem com os eixos dos sistemas de coordenadas cartesianas tridimensionais (X, Y e Z), sendo que os sentidos dos eixos são determinados pela regra da mão direita.

2.5.2 Coordenadas e referências CNC

A produção de peças em máquinas CNC ocorre por meio de geometrias, que são convertidas em um sistema de coordenadas cartesianas. Para estabelecer a orientação das coordenadas, como mostrado na figura 04, é necessário um ponto de partida. O caminho que a ferramenta de corte deve percorrer é definido a partir do ponto inicial de referência, que pode ser da máquina ou da peça.

Figura 4 - Pontos Iniciais de Referências



Fonte: Autoria Própria (2024).

Na programação CNC, os valores de coordenadas podem ser referenciados de dois modos distintos, sendo referencial absoluto ou incremental. No referencial absoluto, a referência será definida como o ponto zero ou ponto de origem (coordenada inicial da máquina ou da peça). Já no referencial incremental ou relativo, a referência será sempre reiniciada a cada novo movimento, ou seja, após efetuar um comando de deslocamento, o novo ponto atingido será a nova referência para as próximas coordenadas.

2.6 Usinagem CNC

A usinagem é um processo mecânico que transforma matéria-prima em peças funcionais com formato específico, através de desbaste dessas matérias, sendo por isso utilizada mundialmente. Portanto, a usinagem desempenha importantes funções que abrangem corte, perfurações, soldagens, dentre outras aplicações. (VEMAX USINAGEM, 2021).

A usinagem CNC é um processo de manufatura automatizado que utiliza computadores para controlar ferramentas de corte e outros equipamentos. Este sistema permite a fabricação de peças com alta precisão e repetibilidade, utilizando comandos programados em códigos que orientam os movimentos da máquina. Dentre as áreas do conhecimento que utilizam o sistema de usinagem CNC pode-se citar a: automobilística, eletrônica, indústria metalúrgica, eletrodomésticos, eletrônicos, dentre outras. As operações mais comuns incluem: fresamento, furação, torneamento, etc.

2.7 Fresamento

O fresamento é uma técnica de usinagem onde a remoção de material ocorre devido ao movimento relativo entre a peça e uma ferramenta rotativa denominada fresa (Figura 05). Este processo é utilizado para dar forma ou acabamento em peças através da remoção de material (desbaste) da superfície da peça.

Fresamento CNC é um processo de usinagem que executa um trabalho de remoção de material, automático e controlado por computadores. Utiliza ferramentas rotativas multicortantes de forma progressiva, denominadas fresas, para produzir uma variedade de peças com diferentes tipos de materiais. Este processo envolve desde a criação do projeto em programas específicos até a execução pela máquina, [(ÁTICA, 2024?)].

Figura 5 - Ferramenta Multicortante (fresa)



Fonte: Aatoria Própria (2024).

2.8 Router CNC

Uma *router* CNC é uma máquina fresadora que é utilizada para corte, gravação e usinagem de materiais como madeira, plástico, metal e outros. Funciona através da combinação de máquina física, software de programação CNC e ferramenta de corte. E possui as vantagens de precisão, velocidade, redução de erros e de custos (AKAD, 2023). A figura 06 mostra um exemplo de *router* CNC moderna.

Figura 6 - Router CNC Profissional, modelo NovaCut



Fonte: AKAD (2023).

2.9 Placas de circuitos impressos (PCI)

As primeiras PCI's foram produzidas por volta de 1943, durante a Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de fabricar os rádios de comunicação para fins militares. Após a invenção do transistor, foi possível a sintetização de diversos tipos de circuitos analógicos e digitais em um único componente chamado de circuito integrado (CI).

A PCI é um componente essencial em toda a eletrônica. Sua composição é feita com um material plástico ou fibroso (como fenolite, fibra de vidro ou filme de poliéster), onde são impressas trilhas feitas com um material condutor. Enquanto a placa se comporta como um isolante, as trilhas são responsáveis por conectar eletricamente os diversos componentes, gerando os circuitos elétricos. Além disso, ela serve também como suporte mecânico para os componentes.

2.10 Placa microcontroladora – *arduino UNO*

Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto baseada em hardware e software simples, que permite ler entradas (sensores, botões, mensagens, etc.) e transformá-las em saídas (ativação de um motor, ligar uma lâmpada, etc.). Portanto, possibilita ao usuário enviar um conjunto de instruções (programa) para o microcontrolador executar determinada ação (ARDUINO, 2022).

2.11 Placa *arduino shield* CNC

O *Arduino shield* CNC é uma placa eletrônica de extensão para *arduino*, que utiliza todos os pinos do Arduino e fornece uma maneira fácil de conectar diversos componentes da máquina. Além de permitir diversos ajustes de configuração da máquina.

2.12 Drivers de potência (*Driver DRV8825*)

Driver de potência é um dispositivo eletrônico que controla o movimento de um motor de passo bipolar, permitindo a divisão de micropassos e o ajuste da corrente elétrica do motor, a fim de garantir movimentos precisos.

2.13 GRBL

GRBL é um *software* livre de código aberto utilizado para controle de movimento em placas *Arduino* com o microcontrolador *ATmega328P*. Ele permite que um *Arduino* UNO seja utilizado para operar máquinas CNC (como cortadoras a laser, impressoras 3D, entre outras). Essencialmente, o GRBL atua como um tradutor de *G-code* (termo em inglês para Código G), possibilitando o controle de máquinas de até 3 eixos (GRBL, 2021).

2.14 Motor de Passos

O motor de passo, basicamente, é um transdutor eletromecânico que transforma pulso elétrico em energia mecânica, permitindo o movimento rotacional discreto de um eixo em pequenos incrementos angulares, denominados de passos (MOREIRA, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo, além da análise de custo, abarcou três grandes áreas de estudo que foram aplicadas no projeto: Mecânica, Eletrônica e Computação. Portanto, o que neste capítulo será abordado é fundamental para que se possa ter um amplo conhecimento do mecanismo de funcionamento de um sistema CNC.

Para uma melhor estruturação do estudo, o capítulo foi subdividido em três seções, conforme segue:

- 1) Projeto mecânico: detalha o projeto estrutural da máquina e os componentes mecânicos utilizados na transmissão de movimentos;
- 2) Projeto eletrônico: descreve as funcionalidades dos componentes eletrônicos e seus métodos de comunicação no sistema;
- 3) Projeto de Software: demonstra os softwares específicos utilizados para gerar os arquivos de instruções para o movimento da máquina.

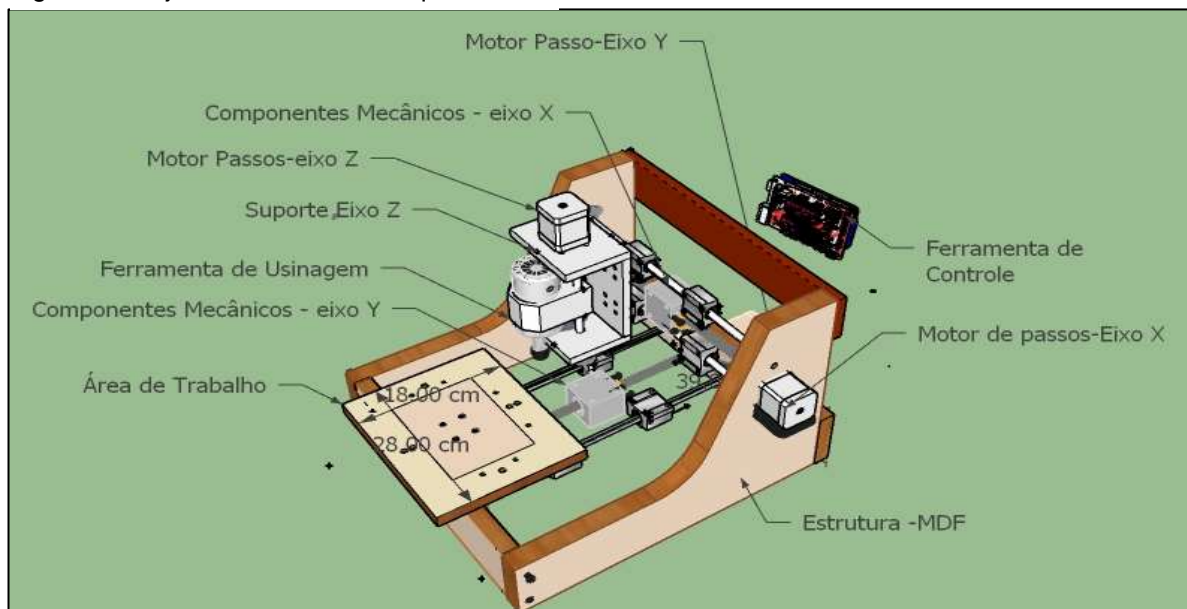
3.1 Projeto mecânico

Nesta seção são descritos todos os processos de desenvolvimento e construção do projeto, onde foram incluídos: o projeto estrutural em 3D; a estrutura física e suas subdivisões; e os componentes que integram o sistema mecânico com suas características, especificações e função no projeto.

3.1.1 Projeto estrutural da máquina CNC

O Projeto Estrutural da Máquina foi a base para a execução do projeto, representa o que foi planejado e o que precisaria ser feito. Neste primeiro passo, foi possível visualizar em detalhes a estrutura completa da máquina CNC em 3D, figura 07. Seu foco foi demonstrar os elementos escolhidos para a construção do projeto físico. Como ferramenta para a criação do modelo em 3D, foi utilizado a ferramenta CAD *Sketchup* (SKETCHUP, 2024).

Figura 7- Projeto Estrutural da Máquina



Fonte: (3DWAREHOUSE, 2024).

3.1.2 Estruturas de suporte

A estrutura serve de base de montagem para todos os elementos que constituem a máquina. Portanto, por se tratar de um suporte para movimentos de precisão, foi necessário um estudo adequado das medidas de corte, furos e materiais que suportassem a força do trabalho em cada eixo da máquina. Os materiais utilizados para compor a estrutura da máquina foram descritos abaixo:

- Uma chapa de madeira cor branca em *Medium Density Fiberboard* (MDF), para confecção das peças que compõem a estrutura;
- Quatro cantoneiras “L” para reforço de móveis bicromatizados, para o apoio na rigidez; parafusos tipo allen e Philips entre 25 a 50 mm, para conexão das partes componentes;
- Um conjunto de porcas garra, porcas borboletas e parafusos sextavados M5, para fixação de peças; brocas para madeira de tamanhos diversificados, utilizadas nos furos de fixação.

Todas as dimensões tratadas nos desenhos ou citadas no trabalho estão representadas em milímetros (mm).

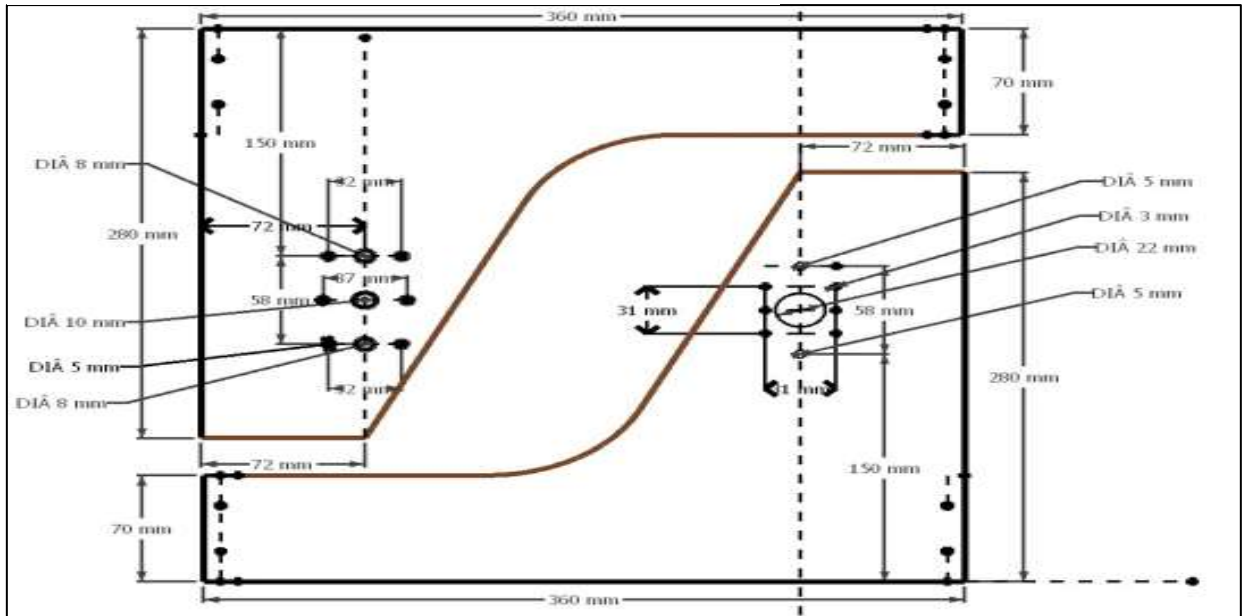
A dimensão completa da estrutura foi projetada com uma área total de 36 cm de comprimento, 32 cm de largura e 28 cm de altura, os quais refletem o sistema dos movimentos composto por três eixos, X, Y e Z, que se movem independentemente uns dos outros para posicionar a ferramenta de corte em relação ao material. A estrutura foi subdividida em 02 pórticos laterais fixos, 01 área de trabalho, 02 bases (frontal e traseira) e 01 suporte do eixo Z, os quais serão descritos a seguir.

Para um melhor entendimento desta seção, primeiro foi demonstrado o desenho do projeto de cada parte da estrutura em 2D, onde estão incluídas todas as medidas laterais, assim como as internas e os diâmetros dos furos das peças. Também é descrita a finalidade das peças no projeto, em seguida, é demonstrada a estrutura de montagem, conforme as especificações do projeto em 3D.

3.1.2.1 Estrutura de suporte 1 – EIXO X

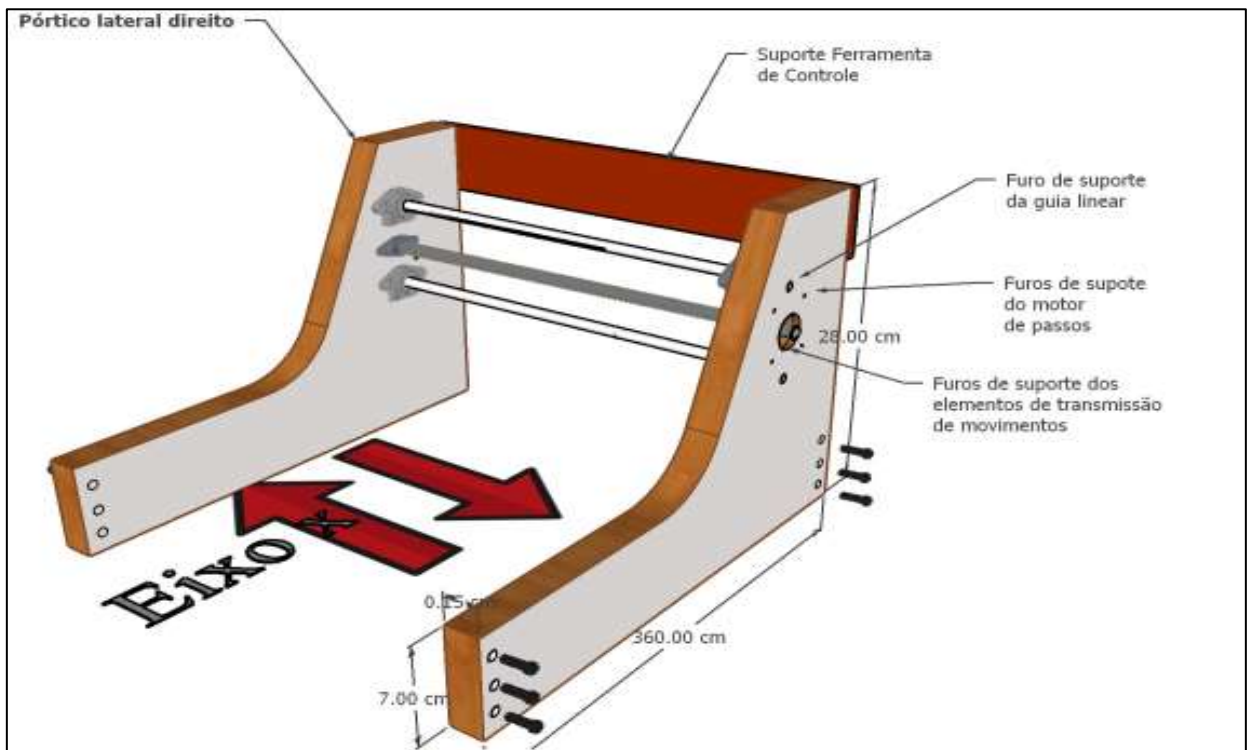
A figura 08 apresenta o desenho do projeto dos pórticos laterais, esquerdo e direito, os quais servirão de suporte para os componentes do eixo X, que corresponde ao movimento transversal da máquina.

Figura 8 - Projeto dos Pórticos Laterais: Esquerdo e Direito - 2D



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 9 - Estrutura Montada do Eixo X - 3D

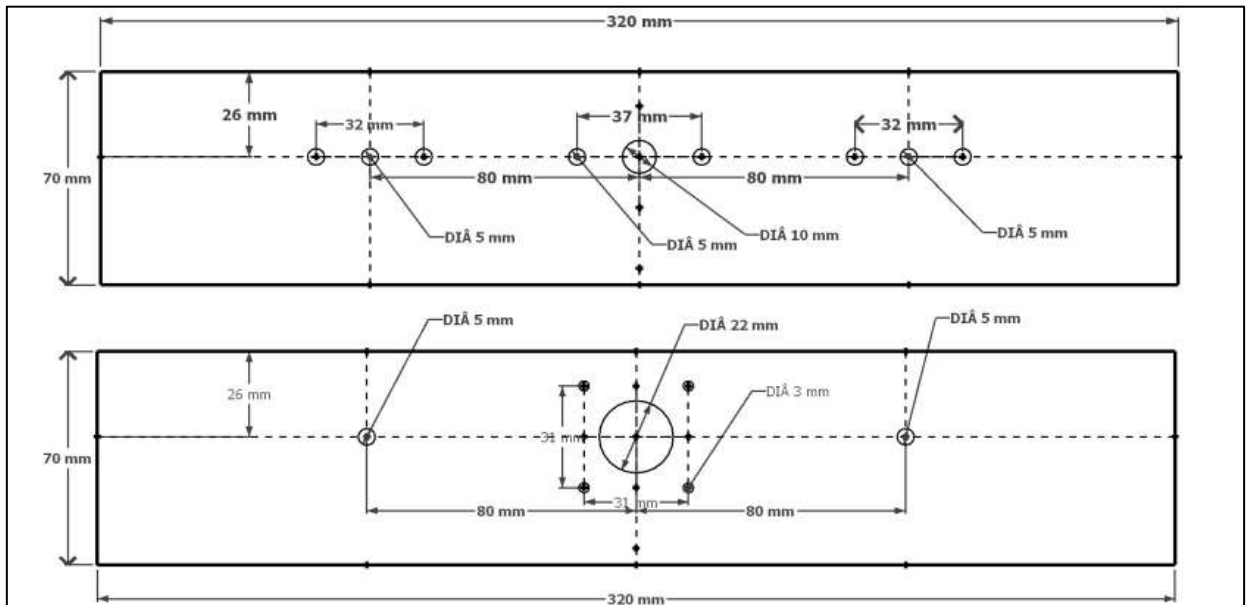


Fonte: Autoria Própria (2024).

3.1.2.2 Estrutura de suporte 2 – EIXO Y

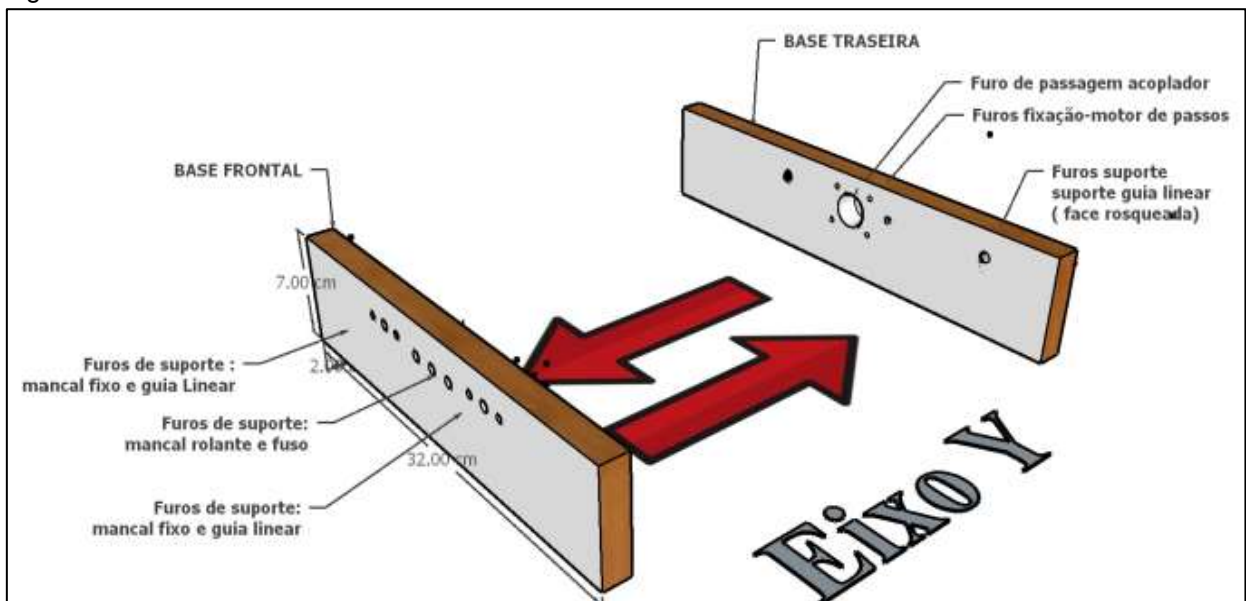
A figura 10 apresenta o desenho do projeto das bases frontal e traseira, as quais servirão de suporte para os componentes do eixo Y, que corresponde ao movimento frontal da máquina.

Figura 10 - Projeto das Bases: Frontal e Traseira - 2D



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 11 - Estrutura Montada do Eixo Y - 3D

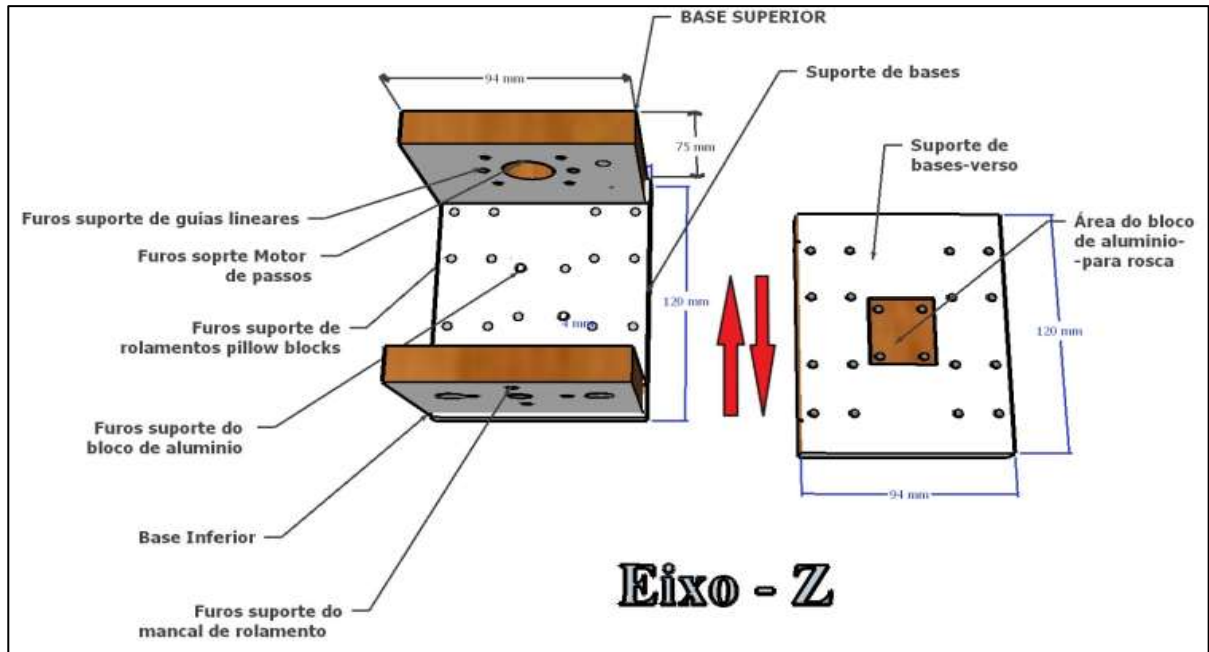


Fonte: Autoria Própria (2024).

3.1.2.3 Estrutura de suporte 3 – EIXO Z

A figura 12 apresenta a estrutura do eixo Z, conforme as especificações do projeto.

Figura 12- Estrutura Montada Eixo Z - 3D



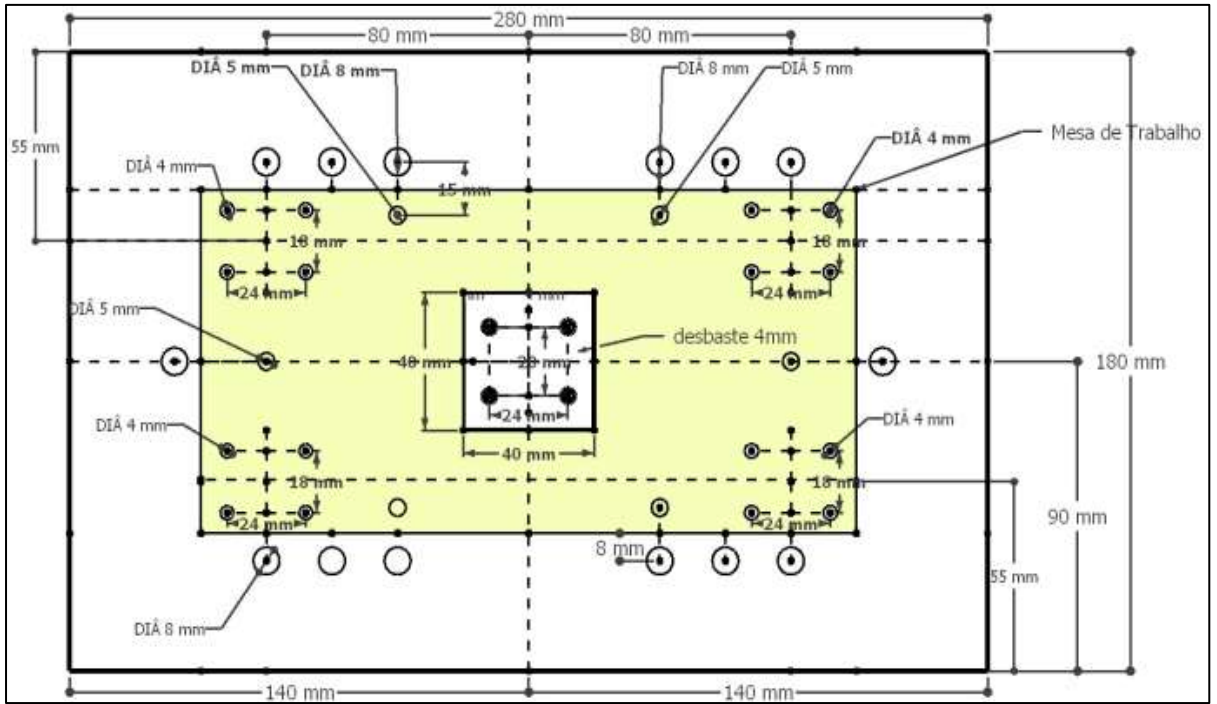
Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.2.4 Estrutura de suporte 4 – ÁREA DE TRABALHO

A Área de Trabalho é responsável pela fixação das peças a serem usinadas, onde será aplicado o fresamento no plano X, Y. Portanto, interage diretamente com os demais componentes da máquina.

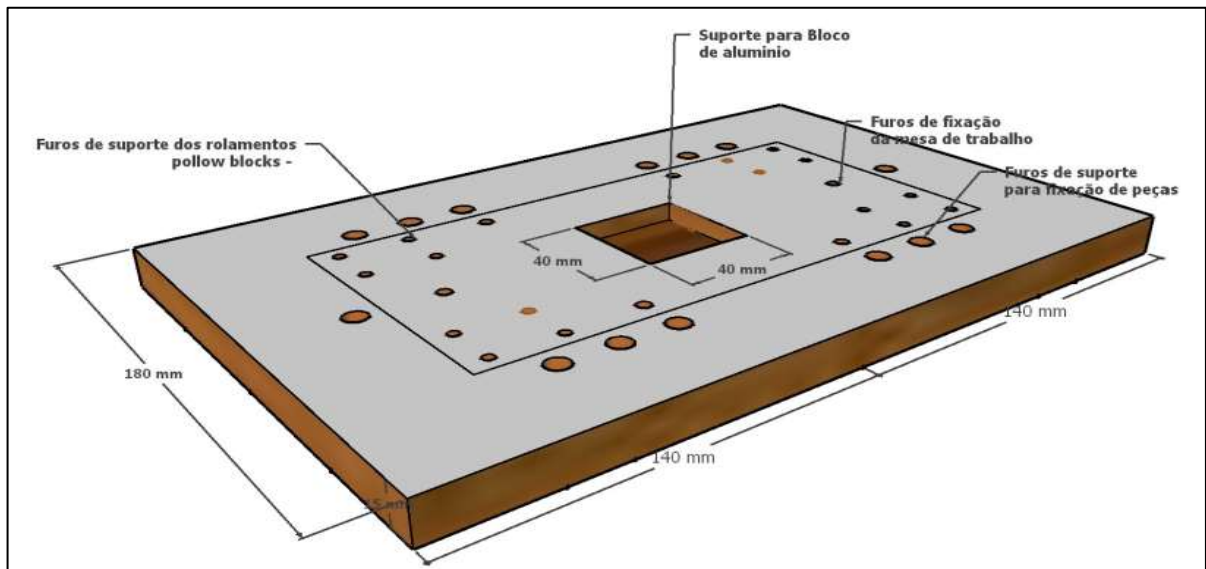
A estrutura da área de trabalho foi apresentada em duas partes, conforme as figuras 13, 14, 15 e 16.

Figura 13 - Projeto da Base Inferior- 2D



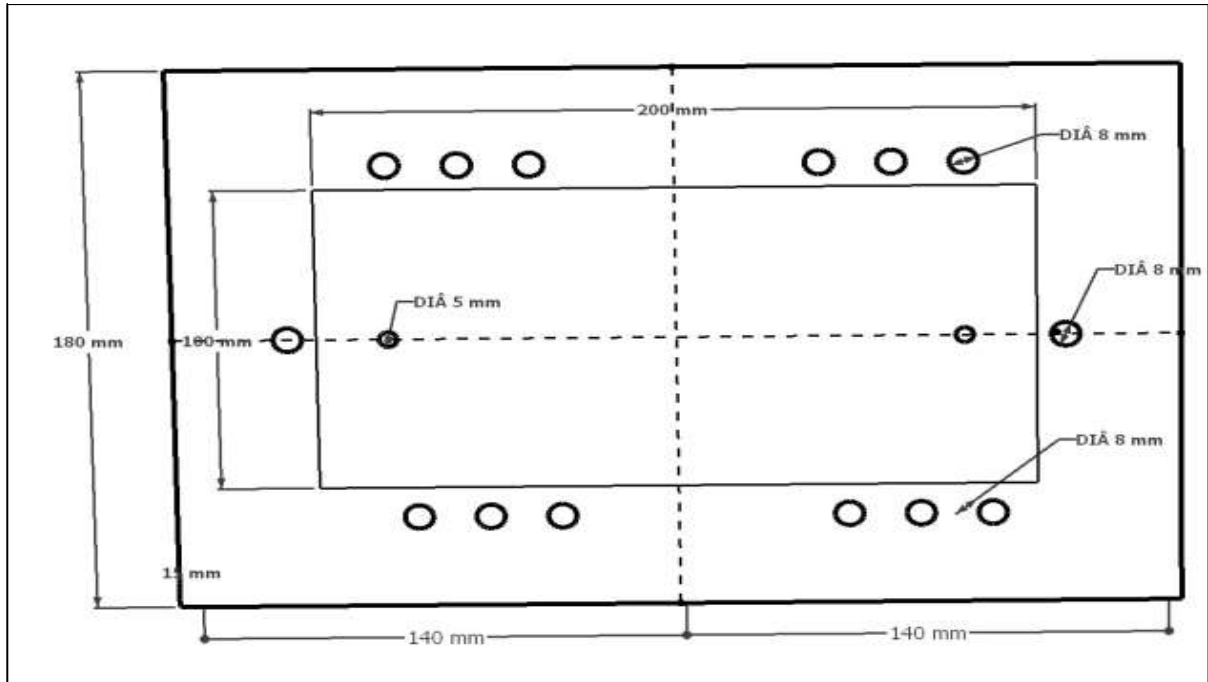
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 14 - Base Inferior da Área de Trabalho - 3D



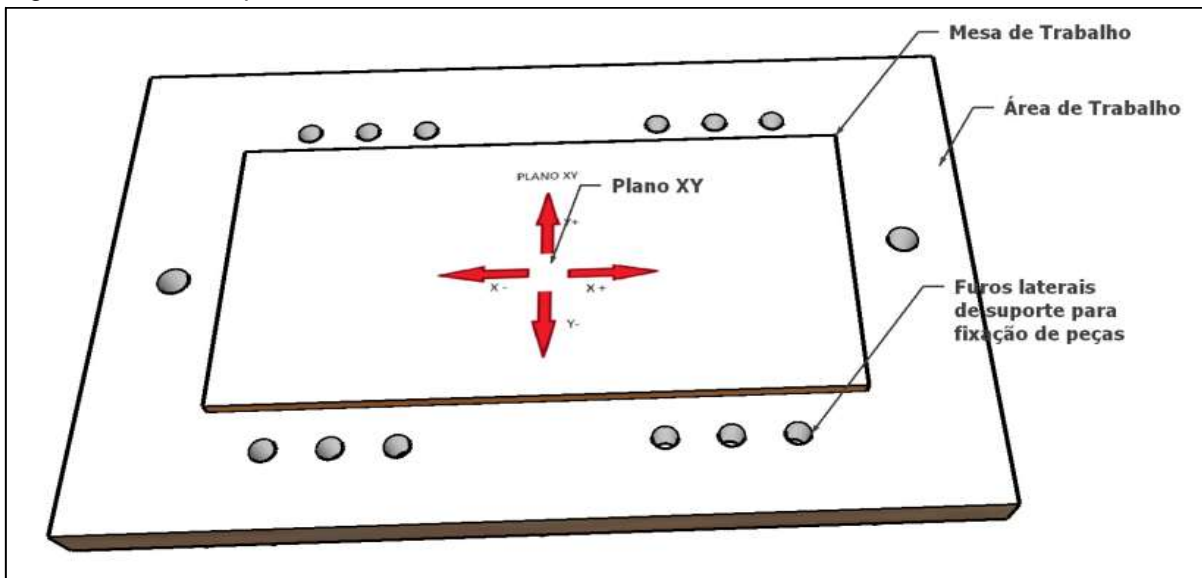
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 15 - Projeto da Base Superior da Área de Trabalho - 2D



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 16 - Base Superior da Área de Trabalho - 3D



Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.3 Componentes mecânicos

3.1.3.1 Sistema de transmissão de movimentos mecânicos

Para a transmissão de movimentos mecânicos, foram utilizados fusos trapezoidais do tipo TR8, isto é, com diâmetro de 8 mm, fabricado em aço revestido em inox. Os eixos X e Y possuem fusos de 320 mm e 360 mm de comprimento, com

passo de 2 mm e contam com 4 entradas, fazendo com que a cada revolução do deslocamento linear (avanço) da castanha seja de 8 mm. O eixo Z conta com um fuso trapezoidal de 120 mm de comprimento e passo de 2 mm, mas possui entrada simples, assim o avanço da castanha é também de 2 mm.

Fuso de rosca trapezoidal é uma barra cilíndrica, formada de liga de aço revestido em alumínio, com roscas contínuas de 30°. É usado em sistemas industriais de posicionamento e movimentação linear (vertical, horizontal). Tem a capacidade de transmitir torque elevado e fornecer grande força de tração. Sua função principal é converter movimento circular em movimento linear através de uma castanha (porca) de mesmo passo e diâmetro (KALATEC, 2022).

O sistema é responsável por transmitir a potência mecânica do motor e realizar a conversão do movimento rotativo em deslocamento linear, para isso se faz necessário o uso de outros componentes além do fuso trapezoidal, conforme mostra a figura 17. São eles.

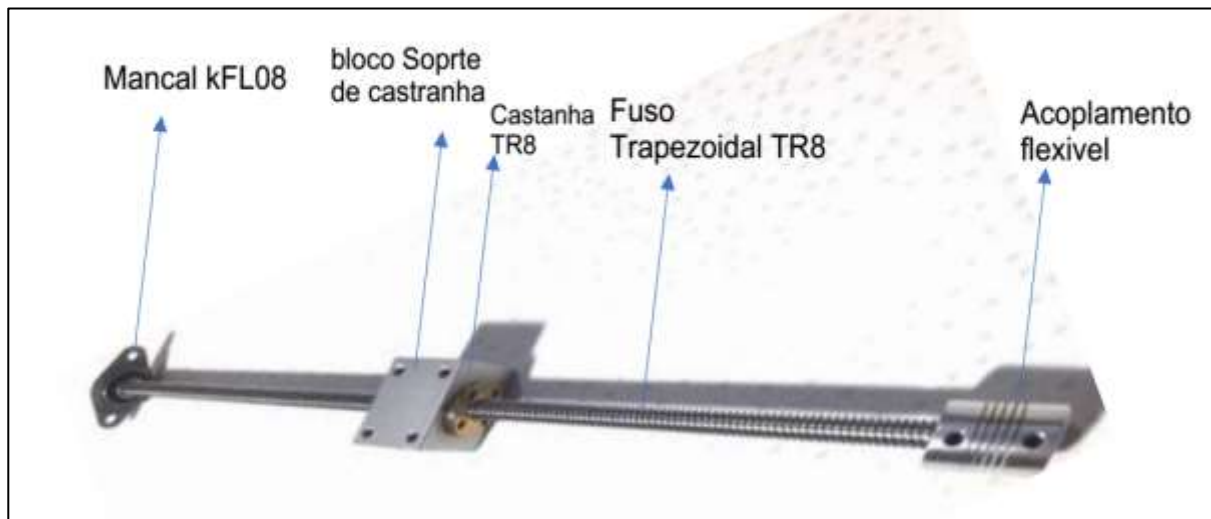
Acoplamento flexível: é o elemento que une o eixo do motor de passo ao fuso trapezoidal através de parafusos do tipo Allen. Para o sistema foram necessários três acopladores, um para cada eixo, com medidas dos furos para eixos de 8 mm para 5 mm. Pelo fato de ser flexível, este acoplamento consegue compensar um possível desalinhamento entre o eixo do motor e o fuso.

Suporte para castanha TR8 (bloco de alumínio): realiza a junção entre o sistema de transmissão de movimento e a estrutura de madeira da máquina. O suporte é fixado às peças da estrutura que serão deslocadas, nesse caso: área de trabalho (eixo Y) e suporte das bases (eixo Z).

Castanha TR8 passo 2 mm em metal (latão): transforma o movimento rotativo em deslocamento linear, é fixada ao suporte (bloco de alumínio), onde transmite o movimento para a peça.

Mancal com Rolamento para Eixo Linear de 8 mm - Modelo KFL08: localizado na extremidade oposta ao eixo do motor, tem a função de apoiar o fuso e garantir o alinhamento com o mínimo de perdas por atrito.

Figura 17 - Sistema de Transmissão de Movimento Mecânica - Montado



Fonte: Autoria Própria (2024).

Cada um dos três eixos possuem os mesmos componentes de transmissão, a diferença fica por conta do comprimento e avanço dos fusos e conseqüentemente o avanço das castanhas.

3.1.3.2 Sistema de Deslizamento dos Movimentos Mecânicos

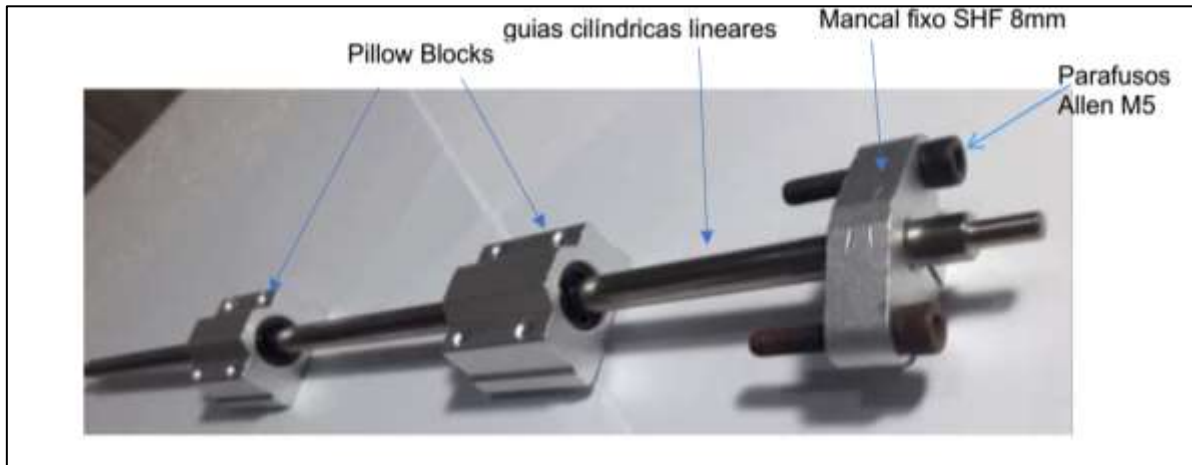
Com a conversão do movimento rotativo em linear através do sistema de transmissão de potência, se faz necessário o uso de mecanismos de deslizamento, com o intuito de guiar a estrutura e auxiliar na distribuição da carga. Para este projeto, foi adotado o uso de guias cilíndricas lineares. As guias escolhidas são fabricadas em aço inox, foram retiradas de eixos de impressoras (sucatas). Em uma das faces de cada guia, tem um furo com rosca métrica de 5 mm (M5) para a fixação das guias na estrutura da máquina. As medidas são: eixos X e Y possuem 320 mm e 360 mm de comprimento, e o eixo Z conta com 120 mm de comprimento. Portanto, as mesmas medidas dos fusos.

Uma guia linear é uma barra com a forma prismática ou cilíndrica, muito utilizada em máquinas industriais para movimentação linear (horizontal, vertical). Permite o deslocamento com estabilidade e um posicionamento preciso. Traz diversas vantagens como a movimentação suave, suporta pesos elevados, baixo atrito e baixa necessidade de torque (KALATEC,2022).

Semelhante ao sistema de movimento, neste sistema, se faz necessário o uso de outros componentes além das guias lineares, figura 18 São eles.

Rolamentos lineares: elemento responsável por unir a estrutura à guia, permitindo o movimento em apenas uma direção com perdas mínimas por atrito. Foram utilizados rolamentos *Pillow Block* (tradução do inglês para bloco de apoio) com SCS8UU, fixados à estrutura utilizando parafusos Allen M4 x 20 mm.

Figura 18 - Sistema de Deslizamento de Movimentos – Montado



Fonte: Autoria Própria (2024).

3.2 Projeto eletrônico

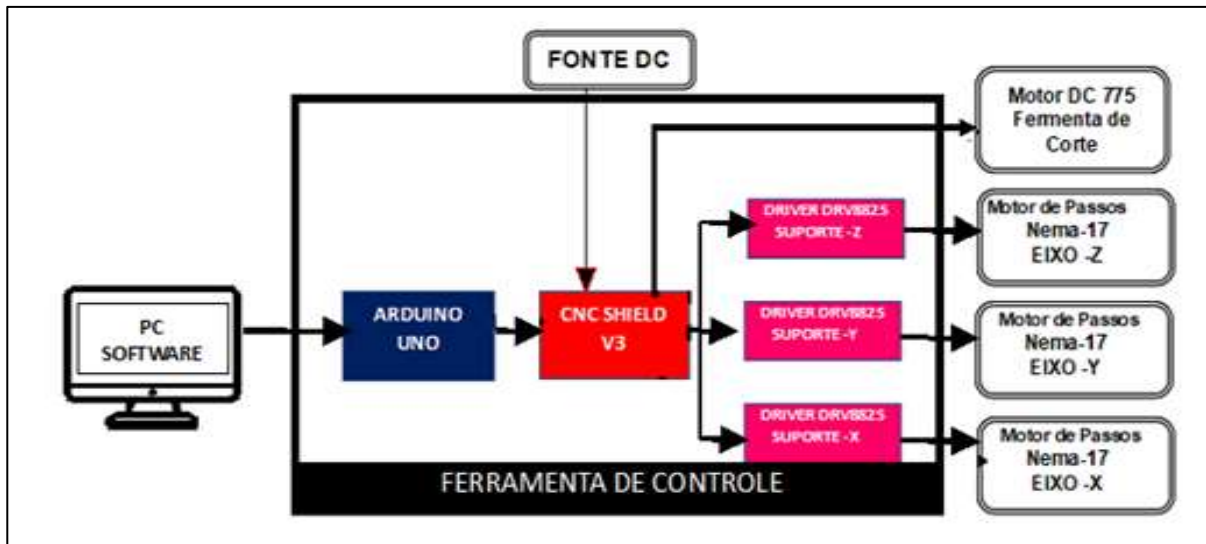
A eletrônica representa as unidades controladora e de acionamento da máquina. Esta seção foi dividida em: Ferramenta de controle, Ferramenta de usinagem, atuadores e demais componentes que integram o sistema eletrônico.

3.2.1 Ferramenta de controle

A Ferramenta de Controle é um módulo de componentes eletrônicos que gerencia as operações da fresadora CNC através da comunicação entre computador e a máquina. Ou seja, atua como intermediador entre o *software*, responsável pelo envio de dados para a parte eletrônica executar os movimentos dos eixos da máquina.

O funcionamento da Ferramenta de Controle pode ser visualmente representado pela figura 19, onde o processo inicia com o projeto da peça a ser produzida e geração dos arquivos de instruções (*G-code*), criados via *softwares* (CAD/CAM). Em seguida, o arquivo é enviado para a máquina, onde o *Arduino UNO* converte as instruções em sinais, que através da placa *CNC Shield*, são transferidos para os *drivers* de controle e para os acionamentos dos motores, os quais moverão os eixos da máquina nas direções e velocidades necessárias.

Figura 19 - Esquema da ferramenta de controle



Fonte: Autoria Própria (2024).

Conforme exibido na figura 19, os componentes que integram esta ferramenta são: uma placa *Arduino UNO*, uma placa *CNC shield V3* e três Drivers *DRV8825*, os quais serão descritos conforme a seguir.

3.2.1.1 *Arduino UNO*

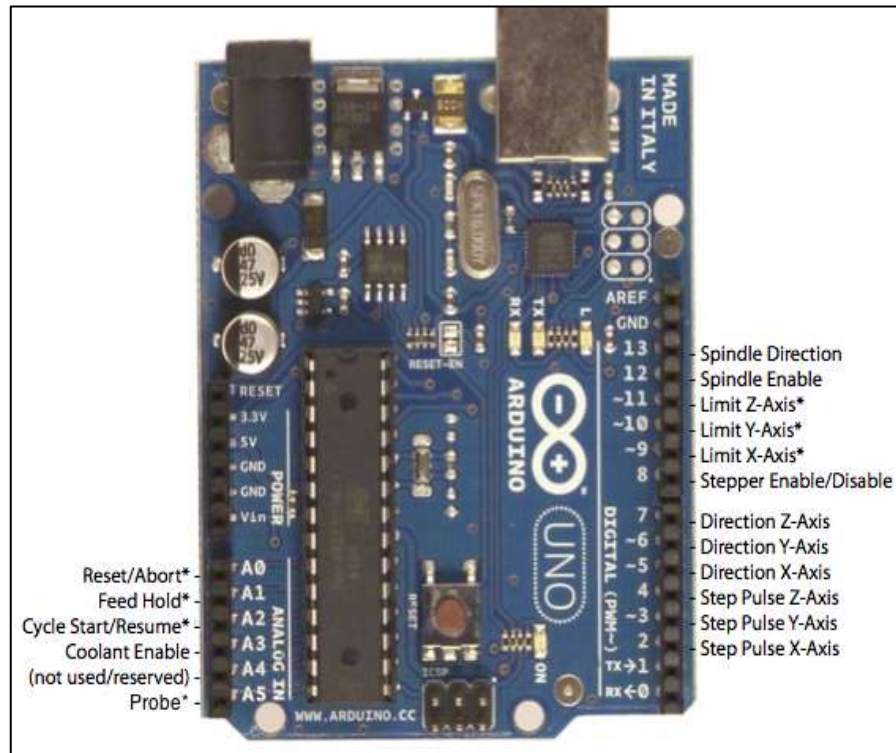
Neste projeto foi implementada uma placa *Arduino* modelo *UNO*, figura 20, a qual é baseada no microcontrolador *ATmega328P*, que embarca o *firmware* *GRBL* e tem as seguintes funcionalidades: possui 14 pinos de entradas e saídas digitais (dos quais, 6 podem ser utilizados como PWM); 6 entradas analógicas; tensão de operação 5V e 3,3V; cristal oscilador de 16Mhz. Além disso, é compatível com a *Shield CNC V3* e configurável com o *firmware* *GRBL*.

A placa *Arduino* é responsável por coordenar os movimentos da máquina, recebendo, interpretando e convertendo em sinais os dados enviados pelo software de controle. Para gerenciar o processo de operação da máquina, foi utilizado o *firmware* *GRBL*, que, uma vez embarcado na placa, define a pinagem para as conexões necessárias à movimentação dos eixos X, Y e Z, conforme ilustrado na Figura 28. Assim, a placa recebe os comandos *G-code* via USB e utiliza seis pinos digitais para acionar os drivers dos motores da máquina.

Dessa forma, o *Arduino* utiliza suas portas digitais para acionar os *drivers* dos motores da máquina. Possibilitando o controle dos passos e direção desses motores.

GRBL, basicamente, é um tradutor de *G-code*, utilizado em *arduino UNO* (*ATmega328*) para operar qualquer máquina que tenha 3 eixos. (GRBL, 2021).

Figura 20 - Placa Arduino configurada pelo GRBL

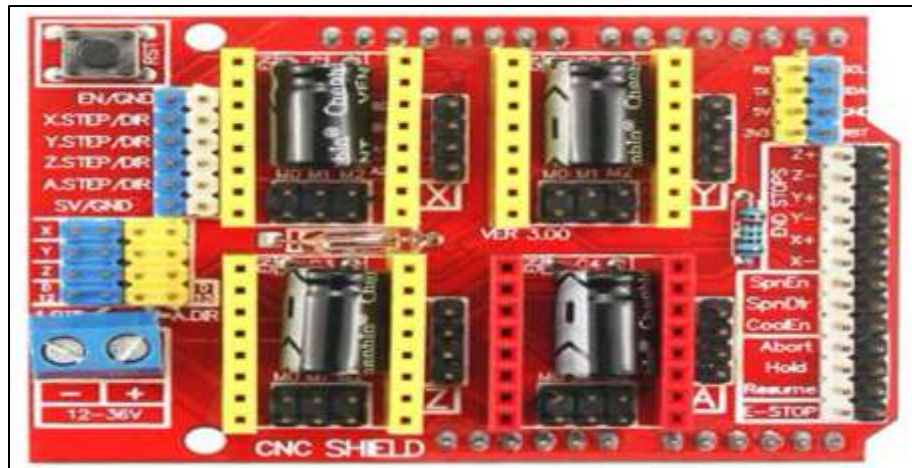


Fonte: GRBL (2021)

3.2.1.2 Shield CNC

Neste projeto, foi escolhida a placa *Shield Arduino CNC V3*, que integra o sistema de controle, conectando o *arduino UNO* aos *Drivers* (DRV8825). Nesta placa foram configurados a resolução de passos dos motores, o controle de saída dos drivers e ajuste de corrente. A figura 21 mostra a placa com suas principais conexões.

Figura 21 - Placa Arduino Shield CNC V3



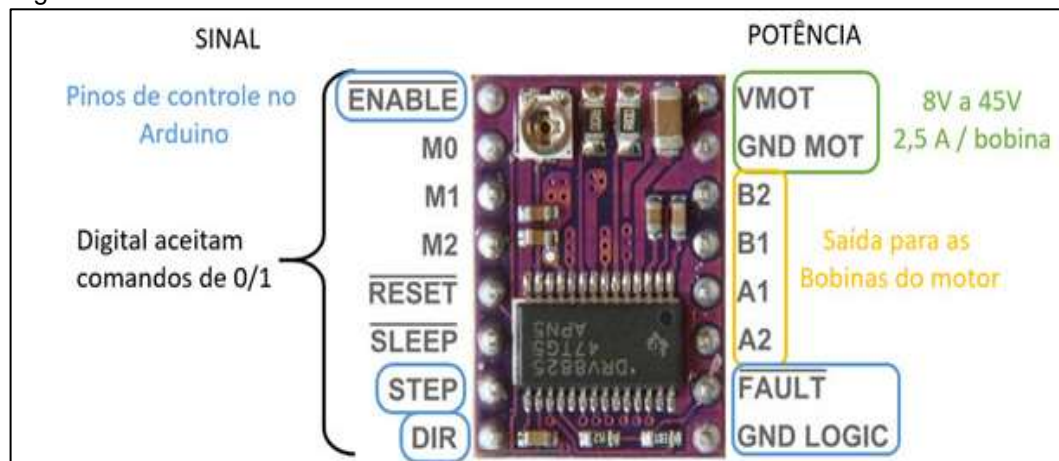
Fonte: ELETROGATE (2022)

3.2.1.3 Driver DRV8825

Para este projeto, foi escolhido o driver (um para cada motor) baseado no *CI DRV8825* da Pololu, que atua como intermediário entre o sistema de controle e o motor de passo, convertendo comandos digitais em pulsos elétricos que determinam a posição, velocidade e direção do motor.

O *DRV8825* possui seis níveis de resolução de passo (1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 e 1/32), opera na faixa de 8,2 V a 45 V DC e é compatível com a CNC Shield V3.

Figura 22- Drive DRV8825



Fonte: CRESCERENGENHARIA (2021).

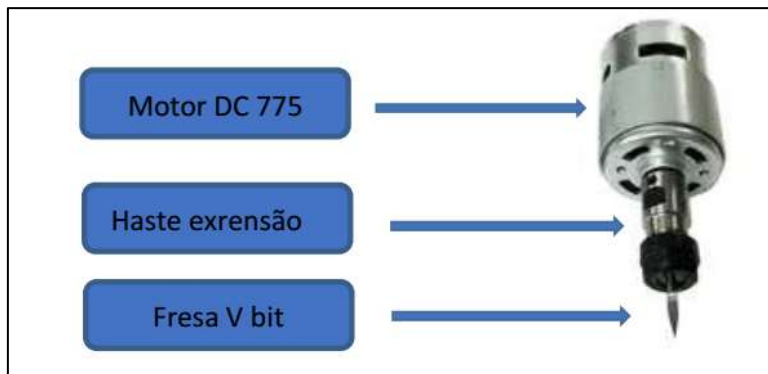
3.2.2 Ferramenta de usinagem – Motor DC 775

A ferramenta de usinagem é a parte da máquina responsável por utilizar ferramentas rotativas, como fresas e brocas, para realizar cortes e furos nas peças a serem produzidas. Ela é controlada pelos movimentos dos eixos X, Y e Z, operando conforme as instruções do programa CNC. Para este projeto, foi utilizado o processo

de fresamento para formar as trilhas e furos para as vias e ilhas na fabricação de placas PCB.

Como elementos de usinagem, foram utilizados um Mini Motor DC 775, uma haste de extensão para pinças ER11, fresas de gravação V Bit e fresas broca, ambas com diâmetro de 3,175 mm e ponta de 0,2 mm. O motor opera a uma velocidade de 10.000 rpm, com potência de 80 W e torque nominal de 2 kg.cm (0,2 Nm).

Figura 23- Ferramenta de Usinagem



Fonte: Autoria Própria (2024).

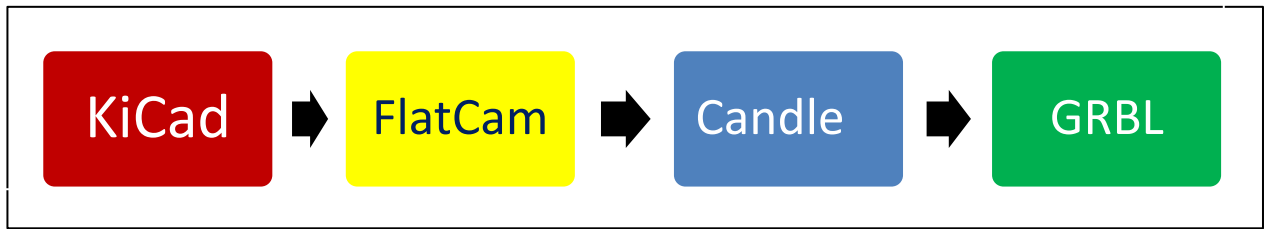
3.3 Projeto de software

Durante todo o processo de desenvolvimento de uma PCI utilizando o sistema proposto, foi necessário utilizar um *software* como ferramenta para a elaboração do esquemático do circuito, outro para transformar o esquemático em um código com uma linguagem específica de máquina CNC e outro para transferir esse código do computador para o *Arduino UNO*, onde haverá um programa capaz de interpretá-lo.

Como ferramentas para atuar neste processo, optou-se pelos *softwares* livres e de código aberto: *KiCad*, *FlatCam*, *Candle* e GRBL.

A relação sequencial entre eles é apresentada na figura 24. Primeiro, obtém-se o esquemático do circuito pelo *KiCad*. Depois, o *FlatCam* transforma o esquemático em código G (linguagem de programação específica para controle de máquinas CNC). Na sequência, o *Candle* envia esse código para o *Arduino UNO*, onde será interpretado pelo *firmware* GRBL, iniciando-se a operação de fresamento.

Figura 24 – Softwares utilizados no processo de PC



Fonte: Autoria Própria (2024)

3.4 Avaliação de custo do projeto

Para avaliar o custo atual do projeto, foram levantados os valores dos componentes aplicados na máquina, conforme a tabela 01.

Tabela 01 - Valores de componentes do projeto

COMPONENTES DE ESTRUTURA				
Item	Descrição	Quant	Custo Unit (R\$)	Custo Total (R\$)
1	Madeira MDF Banco - 1200X600X15 mm (doação)	1	0.00	0.00
2	Cantoneira L de moveis -50X50X1,5 mm	4	0.60	2.40
3	Porca garra (rosca M5).....	12	0.50	6.00
4	porca Borboleta (M5)- Aço Inox.....	6	1.77	10.62
5	Parafusos phillips - 4,8X450 mm	12	0.50	6.00
6	Parafusos Allen.M5 x 25mm...	20	0.50	10.00
7	Parafusos Allen M5 X 50mm.....	16	1.50	24.00
8	Parafusos Sextavado.....	10	0.80	8.00
9	Brocas para madeira. 8mm.....	1	12.43	12.43
Total.....				79.45
COMPONENTES MECÂNICOS				
Item	Descrição	Quant	Custo Unit (R\$)	Custo Total (R\$)
1	Mancal KFL08	2	R\$ 16.33	32.66
2	Bloco Suporte para Castanha TR8 (KIT)	2	R\$ 21.00	42.00
3	Castanha TR8 (KIT)	3	R\$ 19.50	58.50
4	Fuso Trapezoidal 8X36mm (kit)	2	R\$ 26.00	52.00
5	Fuso Trapezoidal 8X12mm	1	R\$ 16.00	16.00
6	Rolamentos Pillow block SCS8U	8	R\$ 15.00	120.00
9	Acoplador flexível para motor de passos	3	R\$ 24.00	72.00
10	Guia cilíndrica Lineares 8X36mm(sucatas)	4	R\$ 0.00	0.00
11	Guia cilíndrica Lineares 8X12mm (sucatas)	1	R\$ 0.00	0.00
Total.....				393.16
COMPONENTES ELETRÔNICOS				
Item	Descrição	Quant	Custo Unit (R\$)	Custo Total (R\$)
1	Placa Arduini UNO (alexpress KIT-incluido frete)	3	24.50	73.50
2	Placa CNC Shile V3 (alexpress KIT- incluido frete)	1	17.25	17.25
3	Driver DRV8825 (Aliexpress KIT - incluido frete)	3	11.50	34.50
4	Motor de passos bipolar Nema 17 (Kit frete grátis)	3	45.00	135.00
5	Motor DC 775 (CORTE) (frete grátis)	1	110.00	110.00
6	Pinça ER11 com furo de 6.0mm,	1	16.50	16.50
7	haste ER11 - porta pinça furos 8.0mm	1	39.45	39.45
8	fresas de gravação Vbit ((alexpress KIT-incluido frete)	1	33.83	33.83
Total.....				460.03
CUSTO TOTAL.....				932.64

Fonte: Autoria Própria (2024).

A tabela acima permite avaliar os valores dos componentes de uma forma geral, ou por divisão de área específica aplicada no sistema.

A tabela 02 demonstra uma análise comparativa do valor do projeto em relação a alguns valores de produtos similares ofertados no mercado.

Tabela 02 - Comparativo por mercado

COMPARATIVO DE VALORES NO MERCADO	
MERCADO LIVRE.....	2409.90
ALIEXPRESS.....	1714.81
PROJETO CNC	932,64

Fonte: Autoria Própria (2024)

Portanto, conforme a tabela 02, pode-se verificar que o custo foi aproximado da metade do valor do AliExpress, e cerca de quase um terço do produto ofertado pelo Mercado Livre.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

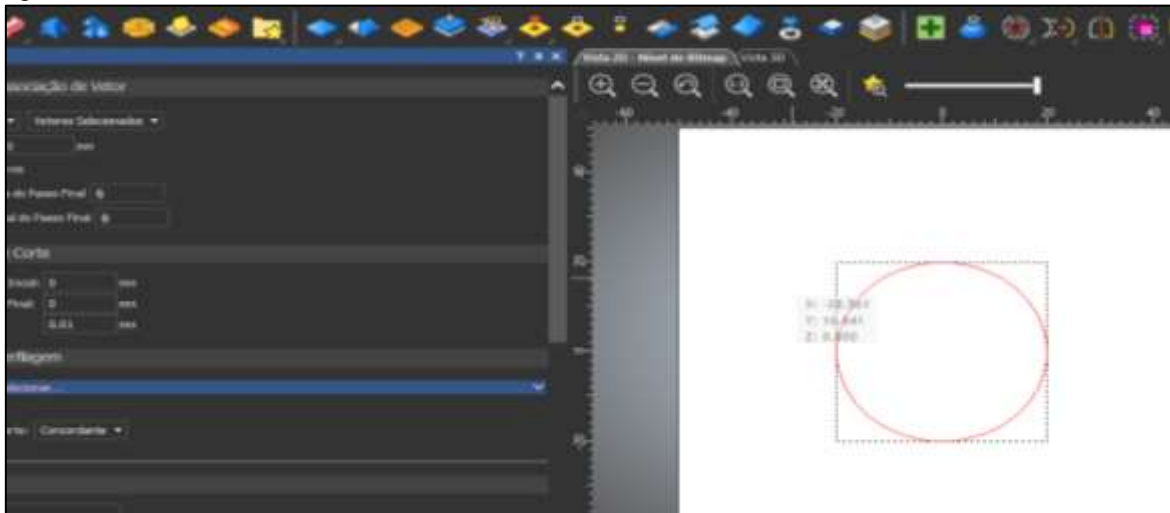
Nesta seção foram apresentados alguns entre vários resultados obtidos, os quais serão demonstrados a seguir. Entretanto, não foi possível concluir a etapa de fresamento das trilhas de um circuito em placa de fenolite. O que foi inviabilizado devido a problemas de rachaduras na área de trabalho da máquina e, consequentemente, folgas nos elementos de fixação. Sendo este considerado o fator limitador deste trabalho.

Portanto, para se chegar a cada resultado, foi necessário utilizar uma caneta esferográfica com ponta de 1,00 mm. A qual substitui a fresa, desenhando as trajetórias executadas pela máquina, conforme demonstrado a seguir.

4.1 Experimento inicial

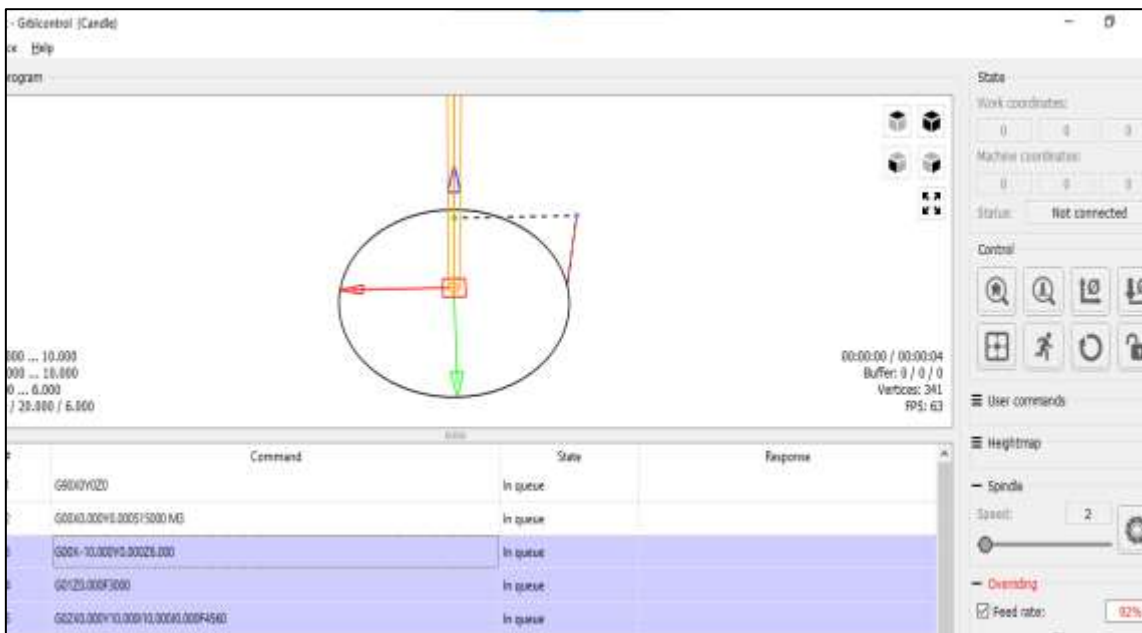
Neste primeiro teste básico, foi sugerido o desenho de uma figura geométrica, neste caso um círculo. Para gerar o desenho e o arquivo *G-code*, foi utilizado o *software* CAD/CAM ArtCam, figura 25. Para o envio e visualização do fresamento do arquivo gerado, foi utilizado o *software* Candle, figura 26.

Figura 25 - Desenho Inicial - ArtCam



Fonte: Autoria Própria (2024).

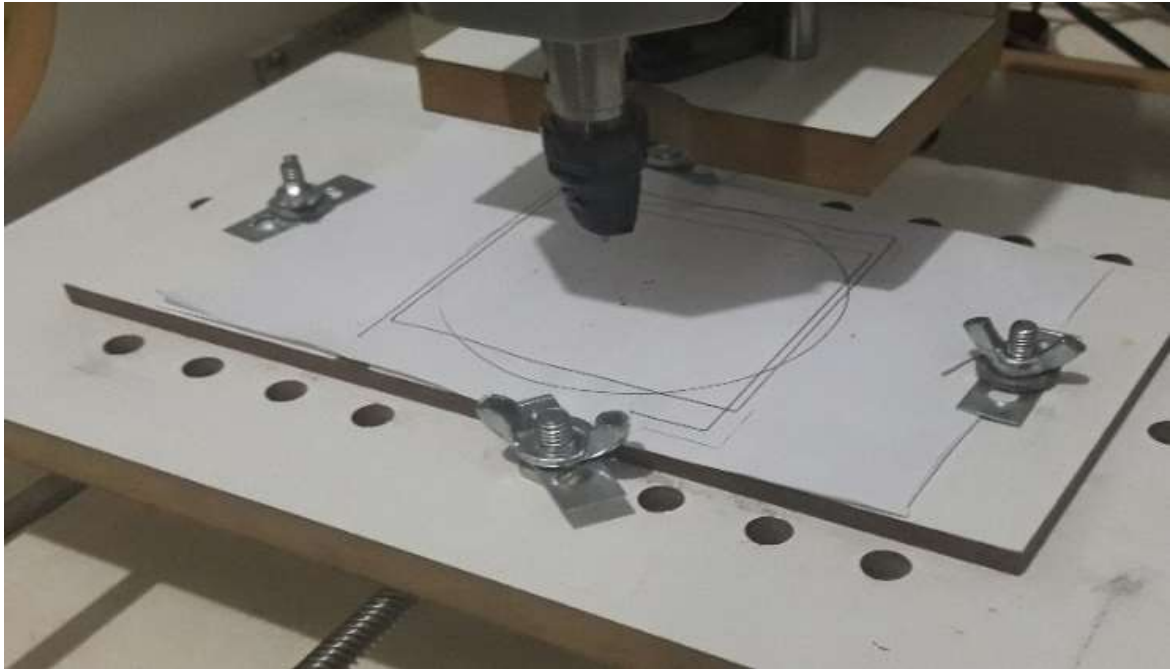
Figura 26 - Visualização do Gcode – Candle



Fonte: Autoria Própria (2024).

Aqui foram detectados problemas iniciais como ruídos, movimentos bruscos, dificuldade de definir o ponto inicial de fresagem e os limites de impressão. Portanto, tais problemas foram retificados, em seguida foi refeito o processo e foram obtidos bons resultados, conforme figura 27.

Figura 27- Primeiros Resultados Obtidos



Fonte: Autoria Própria (2024).

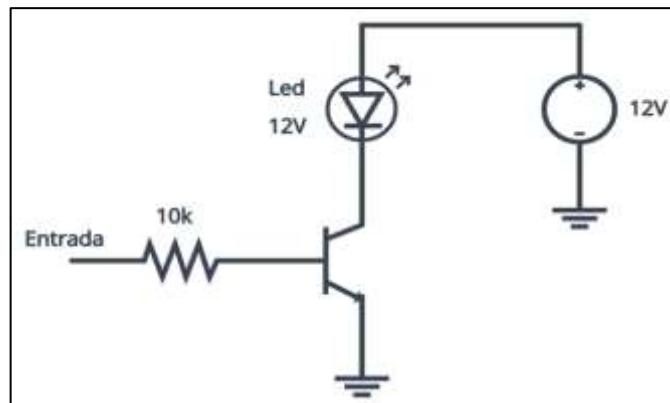
4.2 Projeto de circuito básico

O próximo passo dentre diversos testes foi o processo de fresamento de uma placa PCI simples, conforme descrito a seguir.

Neste exemplo, o objetivo foi projetar uma placa para um circuito básico, o esquema de controle de um *Light Emitting Diode* (LED, sigla em inglês para Diodo Emissor de Luz), como mostrado na figura 31 a seguir. Aqui foi necessário utilizar uma sequência de *softwares* específicos para gerar arquivos para fresar PCI, conforme a seguir.

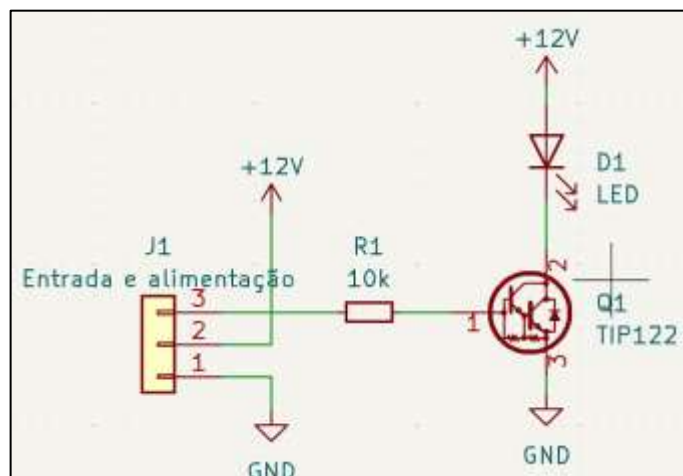
Aqui cabe lembrar que, embora seja um circuito simples, é suficiente para demonstrar o objetivo do projeto: a utilização da máquina CNC na usinagem de circuitos impressos.

Figura 28 - Diagrama do Circuito



Fonte: Autoria Própria (2024).

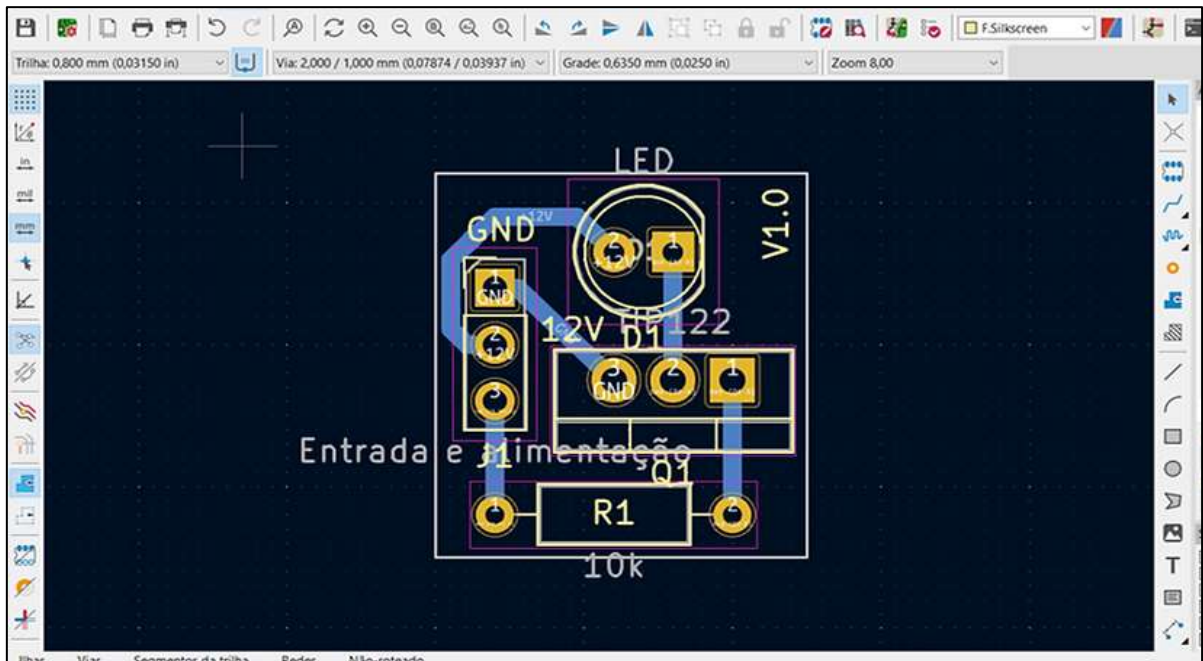
Figura 29 - Esquemático do Desenho - KiCAD



Fonte: Autoria Própria (2024).

A figura 30 demonstra o *layout* da placa, para gerar os arquivos Gerber (trilhas e furação) no *software KiCad*.

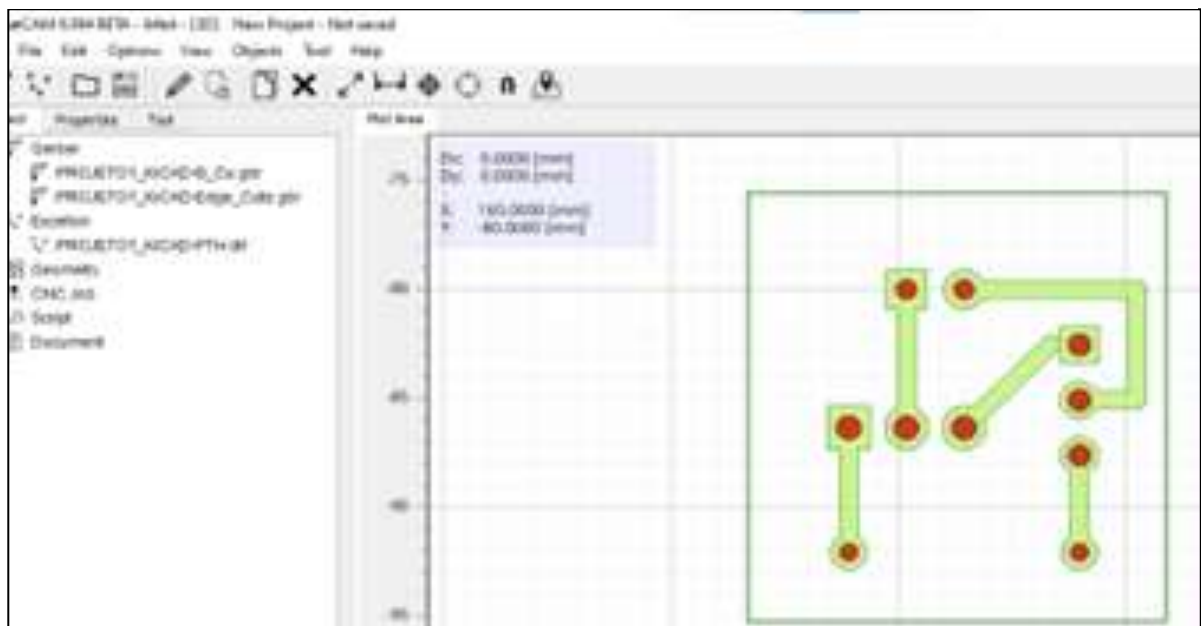
Figura 30 - Layout da placa – KiCAD



Fonte: Autoria Própria (2024).

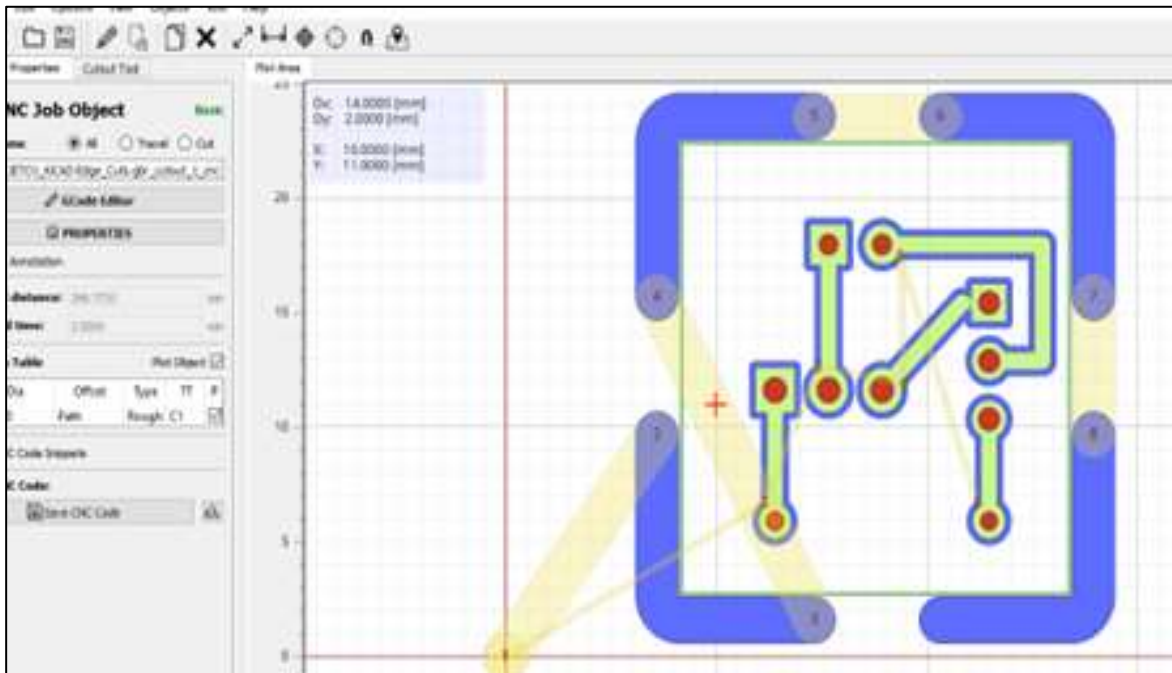
Procedimentos para geração dos arquivos *G-code* no software *FlatCam*, a partir dos arquivos Gerber gerados no *KiCad*.

Figura 32- Imagem dos arquivos de furação, trilhas e isolamento – FlaCAM



Fonte: Autoria Própria (2024).

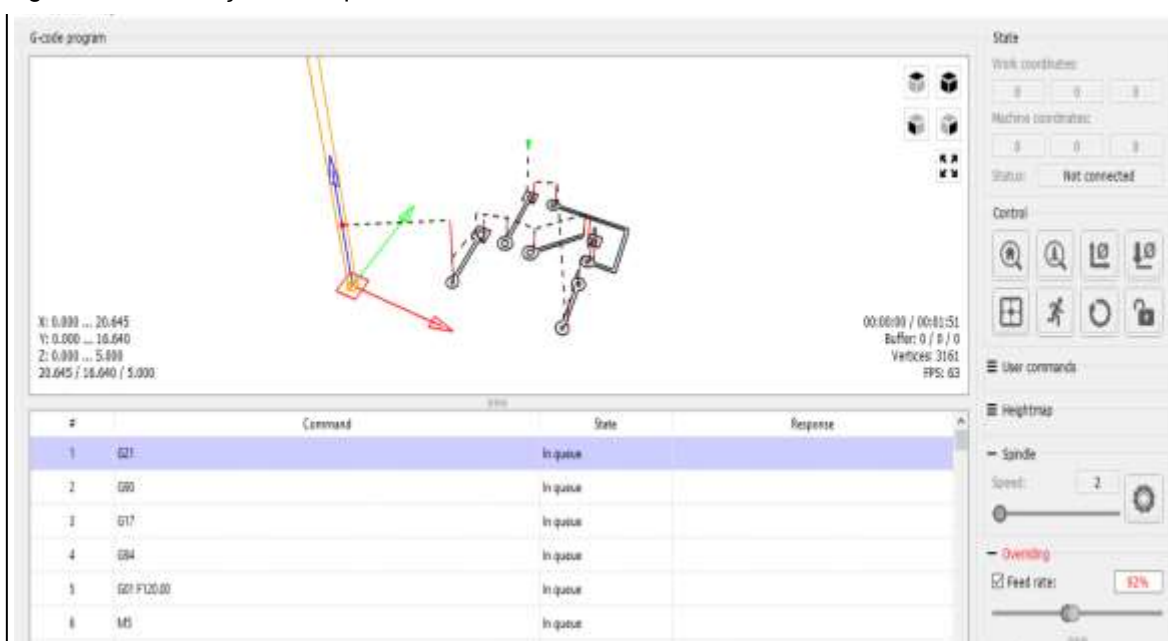
Figura 32 - Geração do Gcode - FlatCAM



Fonte: Autoria Própria (2025).

Conforme analisado acima, foi necessário gerar os arquivos *Gerber* do projeto, no *KiCad*, e em seguida foi gerado o arquivo CNC, referente ao *G-code* no *FlatCAM*. Finalmente, foi utilizado o *Candle* para ajustar a configuração da máquina e enviar o código à ferramenta de controle, figura 33.

Figura 33 - Simulação do arquivo G-code – Candle



Fonte: Autoria Própria (2025).

A figura 34 demonstra o desenho da trajetória do arquivo G-code, executado pela máquina.

Figure 34 - Simulação de Fresamento



Fonte: Autoria Própria (2025).

Considerando o que foi proposto e os resultados obtidos, pode-se concluir que os resultados foram alcançados apenas parcialmente. Portanto, mesmo com limitações, o equipamento se mostrou adequado para os fins especificados, o fresamento de PCIs. O que pode ser melhorado com a substituição da madeira utilizada na área de trabalho, por materiais mais resistentes.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposta a construção de uma fresadora, objetivando o fresamento de PCIs. Através das etapas alcançadas, foi possível fazer uma análise sobre o que foi proposto e os resultados obtidos.

Primeiro, ficou constatado que a máquina ficou concluída conforme foi projetada. Segundo, conforme já demonstrado, a máquina apresentou um custo médio na faixa de valores que se esperava.

E conforme verificado nos resultados, mesmo não havendo a possibilidade da utilização de fresas, devido à limitação por problemas de rachaduras. O produto final apresentou os resultados esperados. Onde as instruções geradas por computador permitiram o controle preciso dos movimentos da máquina. Sendo este o conceito de aplicação da tecnologia CNC em máquinas-ferramentas.

Portanto, para se obter melhores resultados é necessário investir em materiais mais resistente como placas de metal leve, as quais podem substituir as madeiras MDF utilizadas.

Como proposta de futuros trabalhos, seria interessante implementar a esta ferramenta um sistema pressionador para placas de fenolites. O que poderia solucionar o problema de desnível destas placas no ato do fresamento, evitando a perda de materiais em projetos de pesquisas. E assim, colaborar com o avanço deste projeto de forma útil em nossa comunidade.

REFERÊNCIAS

AKAD. **Equipamento CNC Router: tudo o que você precisa saber. Como funciona uma Router CNC (2023)**. Disponível em <<https://akad.com.br/blog/equipamento-cnc-router-tudo-o-que-voce-precisa-saber>>. Acessado em: 05 jan. de 2025.

AZEVEDO, Americo Luiz de. **Fundamento do CNC para Usinagem**. 1ª edição. São Jose dos Campos: JAC Gráfica-Editora.2017.

CARSTENS, Samuel Filipe; CARSTENS, TIAGO ALEXANDRE. **Projeto e fabricação de uma fresadora cnc para prototipagem de placas de circuitos impressos. 2015**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial). Instituto Federal de Santa Catarina - Joinville, 2015.

CRESCERENGENHARIA. **Tudo sobre o driver DRV8825 para motores de passo. (2021)**. Disponível em <<https://www.crescerengenharia.com/post/tudo-sobre-drv8825>> Acessado 25 fev de 2025.

ELETROGATE. O que é Arduino: Para que Serve, Vantagens e como Utilizar.(2020). Disponível em <<https://blog.eletrogate.com/o-que-e-arduino-para-que-serve-vantagens-e-como-utilizar/>> Acessado em: 10 fev. de 2025.

FRITZEN, Lucas Gustavo. **Projeto Estrutural de uma Router CNC de Baixo Custo**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências Exatas Tecnológicas e Agrária: Maringá, 2020.

GRBL. Conectando Grb. (2017). Disponível em <<https://github.com/grbl/grbl/wiki/Connecting-Grbl>> Acessado em: 08 fev. de 2025.

KALATEC. Guia Linear: o que é e como especificar?(2023). Disponível em <<https://blog.kalatec.com.br/guia-linear/>> Acessado em: 03 jan. de 2025.

LYRA, Pablo Vinícius Apolinário. **Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática**. 2010. Trabalho de Graduação (Engenharia de Controle e Automação). Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia – Brasília, 2010. Disponível em <<http://alvarestech.com/temp/cnc/Fresadora%20CNC%20Did%E1tica.pdf>>

Acesso em: 15 dez. 2024.

MOREIRA, Divino Luiz Barbosa. **Construção de uma fresa de controle numérico computadorizado para placas de circuitos impressos**. 2018. Trabalho de Graduação (Engenharia Eletrônica). Universidade de Brasília. Faculdade UnB – Brasília, 2018.

PINTO, Willian Silva. Fresadora CNC Didática. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Industrial) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG - Araxá, 2017. Disponível em: <<https://www.eng-automacao.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/152/2022/08/TCC-WILLIAN-Silvapdf.pdf>>

QUEROBOLSA. Cnc: entenda o que é a tecnologia e o que estudar para trabalhar na area. 2024. Disponível em <https://querobolsa.com.br/revista/cnc-entenda-o-que-e-a-tecnologia-e-o-que-estudar-para-trabalhar-na-area> . Acesso em: 04 nov. de 2024.

TWOTREES3D. **Roteador CNC**. [(2022?)]. Disponível em: < www.twotrees3d.com>. Acesso em: 9 set. 2022.

VEMAX USINAGEM. **Resgate histórico sobre a usinagem: CNC e seus processos**. 2021. Disponível em: <<https://vemax.ind.br/blog/resgate-historico-usinagem-cnc-processos/>>. Acesso em: 4 dez. 2024.

ROMI. **Máquinas Ferramentas. Centro de Usinagens**. [2023?]. Disponível em < <https://www.romi.com/produtos/centros-de-usinagem-romi-d-1500/>>. Acesso em: 18 dez. de 2024.

3DWAREHOUSE. **Fuso trapezoidal**. [(2023?)]. Disponível em < <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/b5bbc4cd-63f9-48e9-a896-bfde4bc109b3/Fuso-trapezoidal?hl=en> >. Acessado em: 05 jan. de 2024.

3DWAREHOUSE. **Eixo do roteador DC**. [(2023?)]. Disponível em < <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/ud197a3aa-1611-4370-92ba-0cf4db5c1e34/DC-Router-Spindle?hl=de>>. Acessado em: 05 jan. de 2024.

3DWAREHOUSE. **SC12UU Pillow Block**. [(2023?)]. Disponível em < <https://embed-stg-3dwarehouse-classic.sketchup.com/user/51085acf-db84-435c-a01a-6e55be75d31d/Juli%C3%A3o-F>>. Acessado em: 05 jan. de 2024.