



Trabalho de Conclusão de Curso

Concepção, Construção e Avaliação de uma Router CNC Modular Utilizando Tecnologias de Código Aberto para Aplicações Educacionais e de Prototipagem

de Rangel Gonçalves

orientado por

Prof. Dr. Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo

Universidade Federal de Alagoas
Instituto de Computação
Maceió, Alagoas
12 de maio de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
Instituto de Computação

**CONCEPÇÃO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA
ROUTER CNC MODULAR UTILIZANDO TECNOLOGIAS
DE CÓDIGO ABERTO PARA APLICAÇÕES EDUCACIONAIS
E DE PROTOTIPAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Computação da Universidade
Federal de Alagoas como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel em En-
genharia de Computação.

Rangel Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo

Banca Examinadora:

Glauber Rodrigues Leite	Prof. Dr., IC-UFAL, Examinador
Leandro Dias da Silva	Prof. Dr., IC-UFAL, Examinador

Maceió, Alagoas
12 de maio de 2025

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Lívia Silva dos Santos - CRB 1670

G635c Gonçalves, Rangel.

Concepção, construção e avaliação de uma router CNC modular utilizando tecnologias de código aberto para aplicações educacionais e de prototipagem / Rangel Gonçalves. –2025.

38 f. il.: color.

Orientador: Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Computação) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Computação. Maceió, 2025.

Bibliografia: f. 38

1. Tecnologia – Código aberto. 2. Automação - Educação. 3. Usinagem digital.
4. Router CNC Modular. 5. Arquitetura CNC. I. Título.

CDU: 6:37

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
Instituto de Computação

CONCEPÇÃO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA ROUTER CNC MODULAR UTILIZANDO TECNOLOGIAS DE CÓDIGO ABERTO PARA APLICAÇÕES EDUCACIONAIS E DE PROTOTIPAGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovado em 12 maio, 2025:

Documento assinado digitalmente
 ICARO BEZERRA QUEIROZ DE ARAÚJO
Data: 19/05/2025 11:41:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo,
Prof. Dr., Orientador

Documento assinado digitalmente
 GLAUBER RODRIGUES LEITE
Data: 19/05/2025 11:45:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Glauber Rodrigues Leite,
Prof. Dr., IC-UFAL, Examinador

Documento assinado digitalmente
 LEANDRO DIAS DA SILVA
Data: 19/05/2025 14:37:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leandro Dias da Silva,
Prof. Dr., IC-UFAL, Examinador

Agradecimentos

Agradeço à minha família, que foi um pilar crucial em todo o meu processo de formação acadêmica e pessoal; a todos os meus orientadores, que me guiaram em minha trajetória; um agradecimento especial à minha cúpula de amigos, que me acompanhou durante todo o curso; e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma máquina CNC router de alto desempenho, com foco em acessibilidade, modularidade e compatibilidade com tecnologias de código aberto. O projeto foi concebido com base em uma arquitetura cartesiana de três eixos, utilizando microcontroladores da família AVR e firmware GRBL para controle em tempo real. São detalhadas as etapas de modelagem tridimensional, escolha de materiais, dimensionamento eletrônico e integração com o software Universal Gcode Sender (UGS). A construção física da máquina validou o modelo 3D, evidenciando boa precisão dimensional e estabilidade estrutural. Os testes experimentais demonstraram resultados satisfatórios em termos de taxa de avanço, aceleração e qualidade de corte em diferentes materiais, como MDF, acrílico e alumínio. O sistema também incorporou recursos de autonivelamento e sensores de fim de curso, ampliando a segurança e confiabilidade operacional. Os resultados obtidos indicam que a solução desenvolvida é tecnicamente viável e representa uma alternativa competitiva para pequenas e médias aplicações industriais e educacionais.

Palavras-chave: CNC, Router, GRBL, Arduino, Usinagem digital, Automação.

Abstract

This work presents the development of a high-performance CNC router machine, focusing on accessibility, modularity, and compatibility with open-source technologies. The project was designed based on a three-axis Cartesian architecture, using AVR family microcontrollers and the GRBL firmware for real-time control. The work details the stages of three-dimensional modeling, material selection, electronic system design, and integration with the Universal Gcode Sender (UGS) software. The physical construction of the machine validated the 3D model, demonstrating good dimensional accuracy and structural stability. Experimental tests showed satisfactory results in terms of feed rate, acceleration, and cutting quality across different materials, including MDF, acrylic, and aluminum. The system also incorporated auto-leveling features and limit switches, increasing operational safety and reliability. The results indicate that the developed solution is technically feasible and represents a competitive alternative for small and medium-scale industrial and educational applications.

Keywords: *CNC, Router, GRBL, Arduino, Digital manufacturing, Automation.*

Lista de Figuras

2.1	Diagrama simplificado da Arquitetura CNC	9
2.2	Detalhe de um fuso de esferas e respetiva castanha, ilustrando o mecanismo de recirculação de esferas.	10
2.3	Fluxograma do Processo de Manufatura Digital CAD-CAM-CNC	12
2.4	Representação esquemática do efeito de backlash.	16
3.1	Modelo 3D do frame da mesa com guias lineares do eixo Y	18
3.2	Estrutura do eixo X	19
3.3	Estrutura do eixo Z	20
3.4	Diagrama de pinagem do Arduino Mega para GRBL, ilustrando as conexões com Drivers TB6600 e sensores. Para este projeto, os pinos de controle de refrigeração (<i>Coolant</i>) não foram utilizados.	23
3.5	Ligações entre Arduino Mega e Inversor de Frequência WEG CFW300 . . .	24
3.6	Esquema de ligação do inversor CFW300 ao spindle e à rede elétrica . . .	24
3.7	Diagrama de conexões entre driver TB6600 e motor de passo NEMA23 . .	25
4.1	Estrutura montada da máquina CNC finalizada	28
4.2	União das estruturas do eixo X e Y	29
4.3	Vista lateral do eixo Z	30
4.4	Verificação do esquadro do eixo Z	30
4.5	Quadro elétronico finalizado	31
4.6	Cortes em MDF 15mm	32
4.7	Corte em acrílico para case usados em prototipagem	33
4.8	Corte em acrílico para decorações	33
4.9	Cortes em alumínio	33
4.10	Cortes em EVA 30mm	34

Lista de Tabelas

2.1	Comparativo entre softwares CAD	12
-----	---	----

Lista de Abreviações

CNC *Computer Numerical Control*

PC *Personal computer*

CAD *Computer-Aided Design(Design Assistido por Computador)*

CAM *Computer-Aided Manufacturing(Manufatura Assistida por Computador)*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos do Trabalho	2
1.2	Organização do trabalho	3
2	Fundamentação Teórica	4
2.1	Sistemas Embarcados	4
2.1.1	Microcontroladores	4
2.2	Software e Firmware em Sistemas CNC	5
2.2.1	Firmware CNC: Núcleo Lógico e Controle de Movimento	5
2.2.2	Controle de Movimento no GRBL: Algoritmos de Interpolação	5
2.2.3	Desempenho e Alternativas do Firmware	7
2.2.4	Software: Interface e Pré-processamento	7
2.2.5	Alternativas de Arquitetura de Controle e Casos de Uso	8
2.3	Sistemas CNC	8
2.3.1	Motores NEMA e Microstepping	10
2.4	Programas de CAD	11
2.5	Código G	13
2.6	Plano Cartesiano	14
2.7	Cinemática	15
3	Metodologia	17
3.1	Desenvolvimento do Projeto 3D	17
3.2	Frame da Mesa e Eixo Y	17
3.3	Estrutura do Eixo X	18
3.4	Estrutura do Eixo Z	19
3.5	Escolha dos Materiais	20
3.6	Projeto Eletrônico	21
3.7	Interligação Eletrônica: Arduino, Drivers e Sensores	21
3.8	Ligações entre Arduino Mega e Inversor de Frequência CFW300	23
3.9	Ligações entre Inversor CFW300 e o Spindle	24
3.10	Ligações entre Drivers TB6600 e Motores de Passo	25

3.11	Escolha do Software e do Firmware	25
3.11.1	Software de Interface: UGS	25
3.11.2	Firmware: GRBL	26
3.12	Sistema de Probe	27
4	Resultados e Discussões	28
4.1	Estrutura Finalizada	28
4.1.1	Formação e Alinhamento do Plano XY a partir das Estruturas dos Eixos X e Y	28
4.1.2	Estrutura final do eixo Z	29
4.1.3	Quadro Elétrico	31
4.2	Testes de Precisão	31
4.3	Taxa de Avanço e Aceleração	31
4.4	Corte em Diferentes Materiais	32
5	Conclusão	35
5.1	Trabalhos Futuros	35
	Bibliografia	38

Capítulo 1

Introdução

As máquinas CNC representam uma transformação profunda na manufatura digital, ao permitir a automação de processos de usinagem que antes exigiam intensa intervenção humana. Como destacado por Groover (2011), os sistemas automatizados de produção são essenciais para aumentar a produtividade, melhorar a qualidade dos produtos e reduzir custos operacionais, especialmente em contextos industriais com alta demanda por precisão e repetibilidade. Com sua capacidade de executar tarefas repetitivas com precisão, consistência e velocidade, as CNCs trouxeram benefícios significativos, como aumento da produtividade, redução de erros, melhor aproveitamento de materiais e menor desgaste físico dos trabalhadores. Desde seu surgimento na década de 1950, inicialmente voltadas para aplicações militares e aeroespaciais, essas máquinas vêm evoluindo continuamente. Tradicionalmente programadas por meio do padrão ISO 6983, operam com comandos de baixo nível que controlam diretamente os movimentos da ferramenta em relação aos eixos da máquina. Com o avanço da microeletrônica e a popularização dos microcontroladores, especialmente a partir da década de 2010, soluções baseadas em plataformas como Arduino e softwares de código aberto, como o GRBL, democratizaram o acesso à tecnologia CNC. Isso possibilitou que pequenos produtores, makers e instituições de ensino desenvolvessem e utilizassem suas próprias máquinas de forma mais econômica, flexível e personalizada, ampliando suas aplicações em áreas como prototipagem, marcenaria, engenharia e design.

O princípio de funcionamento de uma máquina router CNC baseia-se no controle numérico, no qual um computador interpreta instruções codificadas, geralmente escritas em linguagem G-code. Essas instruções são convertidas em movimentos precisos nos eixos X, Y e Z, permitindo que a ferramenta de corte percorra trajetórias programadas com alto grau de precisão. Uma máquina CNC é composta por diversos elementos críticos. A estrutura mecânica, normalmente construída em alumínio ou aço, deve equilibrar rigidez, para evitar vibrações durante o corte, e leveza, a fim de reduzir a inércia e permitir movimentos mais ágeis. O sistema de acionamento é responsável pela movimentação dos eixos e pode ser composto por motores de passo ou servomotores, que transmitem força através de correias sincronizadoras, parafusos de esfera (*ballscrews*) ou combinações

híbridas. Já a ferramenta de corte é acionada por um *spindle*, um motor de alta rotação, que gira fresas ou brocas em velocidades que podem ultrapassar 24.000 RPM, dependendo do tipo de material a ser usinado.

O uso de routers CNC se estende por diversos setores da indústria e da educação. Na indústria criativa, destacam-se aplicações em marcenaria artística, como o corte de entalhes detalhados em madeira maciça, comuns na fabricação de móveis barrocos, bem como na produção de modelos e peças em materiais laminados, como o MDF, amplamente utilizado em móveis planejados e decoração. Na joalheria, a usinagem de moldes de precisão também se mostra essencial para a fundição de metais preciosos. No setor de engenharia, essas máquinas são amplamente utilizadas em processos de prototipagem rápida, especialmente na confecção de peças funcionais em materiais como ABS ou polycarbonato, viabilizando testes e iterações de projetos. Na indústria aeronáutica, routers CNC contribuem para a fabricação de componentes leves utilizando materiais compostos, como a fibra de carbono, onde a precisão e o acabamento são requisitos fundamentais. Além disso, o uso educacional é crescente, com destaque para os laboratórios de fabricação digital (*fab labs*), que utilizam routers CNC como ferramentas para ensino prático de automação, design industrial e manufatura digital.

1.1 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento e a validação de uma máquina CNC router, com ênfase na acessibilidade proporcionada por tecnologias de código aberto, na modularidade de seu design e na capacidade de operar com diferentes materiais.

Para alcançar este propósito, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e modelar tridimensionalmente a estrutura mecânica de uma router CNC com área útil de 1000 mm $\times$ 1500 mm, visando robustez e facilidade de montagem.
- Selecionar e integrar componentes eletrônicos de controle, incluindo microcontroladores da família AVR (Arduino Mega) e o firmware GRBL, para o gerenciamento em tempo real dos movimentos dos eixos e do acionamento do *spindle*.
- Construir o protótipo físico da máquina CNC, buscando validar o modelo 3D desenvolvido e assegurar a correta montagem e alinhamento dos componentes.
- Realizar testes experimentais para caracterizar o desempenho da máquina, avaliando parâmetros como precisão dimensional, taxa de avanço, aceleração e qualidade de corte em diversos materiais, incluindo MDF, acrílico e alumínio.
- Implementar e testar funcionalidades adicionais, como sistema de autonivelamento (*probe*) e sensores de fim de curso, com o intuito de ampliar a segurança operacional e a confiabilidade do equipamento.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho foi estruturado de forma a acompanhar a evolução do desenvolvimento da máquina CNC, partindo da contextualização técnica, passando pela fundamentação teórica necessária, até a aplicação prática e análise dos resultados obtidos. A divisão em capítulos segue a lógica do processo de construção do equipamento, desde o conceito até a execução e testes.

O Capítulo 2 aborda os conceitos técnicos essenciais para o entendimento do projeto, incluindo sistemas embarcados, firmware GRBL, softwares de interface como o UGS, arquitetura dos sistemas CNC, microcontroladores, motores de passo, tração por correias, programas de CAD e interpolação de movimentos.

O Capítulo 3 descreve o processo de desenvolvimento do projeto, incluindo a modelagem 3D, a seleção de materiais, o projeto eletrônico, e os softwares e firmwares utilizados.

O Capítulo 4 apresenta os testes de precisão, taxa de avanço, aceleração, qualidade de corte em diversos materiais e análise da estrutura física montada, verificando a viabilidade técnica da solução proposta.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Sistemas Embarcados

Pont (2002) explica que os sistemas embarcados são construídos com pelo menos um componente computacional programável, como microcontroladores ou DSPs, sendo empregados de forma que o usuário final muitas vezes nem percebe que há um computador envolvido, como em automóveis, eletrodomésticos, equipamentos médicos e sistemas industriais. Esses sistemas normalmente operam em tempo real, o que significa que devem responder a eventos externos dentro de limites de tempo predefinidos.

A arquitetura de um sistema embarcado é composta por um microcontrolador ou microprocessador, interfaces de entrada e saída (sensores, atuadores, comunicação serial, etc.), e um software embarcado (firmware) responsável por interpretar os sinais e executar tarefas de controle. De acordo com Wolf (2001), a integração estreita entre hardware e software é uma das características centrais dos sistemas embarcados, tornando seu projeto um desafio multidisciplinar que envolve engenharia elétrica, ciência da computação e controle automático.

Em contextos industriais, como o controle de máquinas CNC de pequeno porte, os sistemas embarcados são largamente utilizados por sua confiabilidade, baixo custo e capacidade de operação autônoma. Placas baseadas em microcontroladores como o ATmega328P ou ATmega2560 (presentes nas plataformas Arduino) são comumente adotadas em projetos que exigem precisão no controle de motores, leitura de sensores e comunicação com o usuário, sendo fundamentais para aplicações de manufatura digital acessível.

2.1.1 Microcontroladores

Microcontroladores como o ATmega2560 (utilizado no Arduino Mega) são componentes centrais em sistemas CNC modernos de baixo custo. Segundo Mazidi et al. (2015), esses dispositivos integram CPU, memória e periféricos em um único chip, sendo ideais para aplicações que exigem controle em tempo real. No contexto de routers CNC,

o ATmega2560 destaca-se por sua arquitetura baseada em RISC (8-bit AVR) com 256 KB de memória flash, permitindo armazenar firmwares complexos como o GRBL. Seu desempenho, com um clock de 16 MHz e 54 pinos de I/O, é suficiente para controlar três eixos, o *spindle* e sensores. Adicionalmente, o ecossistema Arduino oferece amplo suporte a bibliotecas de código aberto, como a `AccelStepper` para controle de motores.

2.2 Software e Firmware em Sistemas CNC

Em sistemas CNC, a combinação de **software** (executado em computadores) e **firmware** (embarcado no controlador) é essencial para a operação e precisão da máquina. Ambos atuam em camadas complementares, mas com funções distintas.

2.2.1 Firmware CNC: Núcleo Lógico e Controle de Movimento

O firmware representa o núcleo lógico de um sistema embarcado, sendo responsável por controlar o comportamento da máquina a partir das instruções recebidas. Em sistemas CNC, como *routers* baseadas na plataforma Arduino, o firmware é essencial para a interpretação de comandos G-code e para a geração de sinais de controle destinados aos motores de passo, ao *spindle* e aos sensores auxiliares. Um dos firmwares mais utilizados nesse contexto é o **GRBL**, um projeto de código aberto escrito em linguagem **C** e otimizado para microcontroladores **AVR** (como o ATmega328P e o ATmega2560). De acordo com os mantenedores do projeto GRBL Contributors (2023), o GRBL é amplamente adotado em soluções caseiras e educacionais devido à sua leveza, estabilidade e compatibilidade com softwares **CAM** populares. Sua arquitetura permite a interpretação de comandos padronizados pela **ISO 6983**, como **G00** (movimento rápido), **G01** (movimento linear), **G02/G03** (interpolação circular) e comandos **M** (por exemplo, **M03** para ativar o *spindle*).

2.2.2 Controle de Movimento no GRBL: Algoritmos de Interpolação

O GRBL emprega técnicas distintas para interpolação linear e circular, otimizadas para processadores de baixo desempenho.

Interpolação Linear (G01) – Algoritmo de Bresenham Para movimentos em linha reta, o GRBL utiliza uma versão **multieixo** do algoritmo de Bresenham, originalmente desenvolvido para rasterização de linhas em gráficos 2D. Este algoritmo destaca-se por operar exclusivamente com **operações inteiras** e um acumulador de erro, evitando cálculos de ponto flutuante que seriam mais custosos computacionalmente em microcontroladores com recursos limitados.

O funcionamento básico do algoritmo de Bresenham para dois eixos (X e Y) envolve o cálculo de um parâmetro de decisão (ou erro acumulado) para determinar qual eixo deve ser incrementado a cada passo, de forma a aproximar a linha ideal.

1. Calcula-se o erro acumulado inicial e para decidir qual eixo deve ser incrementado:

$$e = 2 \cdot \Delta y - \Delta x \quad (2.1)$$

onde Δx e Δy são as distâncias totais a serem percorridas nos eixos X e Y, respectivamente.

2. A cada passo, o algoritmo verifica o sinal de e :

- Se $e \geq 0$, significa que a linha está mais próxima do próximo pixel na direção Y. Assim, incrementa-se o eixo y , e o erro é atualizado subtraindo-se $2 \cdot \Delta x$:

$$e = e - 2 \cdot \Delta x \quad (2.2)$$

- Caso contrário ($e < 0$), a linha está mais próxima do próximo pixel mantendo o Y atual. Incrementa-se apenas o eixo x .
- Em ambos os casos (após incrementar X, ou X e Y), o erro é ajustado adicionando-se $2 \cdot \Delta y$ para prepará-lo para a próxima iteração:

$$e = e + 2 \cdot \Delta y \quad (2.3)$$

No GRBL, essa lógica é estendida para operar com **três eixos (XYZ)**, garantindo a sincronização precisa dos movimentos e permitindo a criação de trajetórias diagonais suaves no espaço tridimensional.

Interpolação Circular (G02/G03) – Aproximação Trigonométrica Para a geração de arcos e círculos, o GRBL **não utiliza** o algoritmo de Bresenham para arcos, mas sim uma **aproximação baseada na série de Taylor de primeira ordem** para calcular os incrementos de seno e cosseno necessários para traçar a trajetória circular. As identidades trigonométricas para a soma de ângulos são:

$$\begin{aligned} \cos(\theta + \delta) &= \cos(\theta) \cos(\delta) - \sin(\theta) \sin(\delta) \\ \sin(\theta + \delta) &= \sin(\theta) \cos(\delta) + \cos(\theta) \sin(\delta) \end{aligned}$$

Considerando que δ é um ângulo incremental pequeno, pode-se utilizar as aproximações de Taylor de primeira ordem para $\cos(\delta) \approx 1$ e $\sin(\delta) \approx \delta$. Substituindo essas aproximações

nas identidades, obtém-se:

$$\cos(\theta + \delta) \approx \cos(\theta) \cdot 1 - \sin(\theta) \cdot \delta = \cos(\theta) - \delta \cdot \sin(\theta) \quad (2.4)$$

$$\sin(\theta + \delta) \approx \sin(\theta) \cdot 1 + \cos(\theta) \cdot \delta = \sin(\theta) + \delta \cdot \cos(\theta) \quad (2.5)$$

Essa abordagem é **computacionalmente eficiente** e mantém uma precisão adequada para a maioria das aplicações CNC, mesmo em microcontroladores com capacidade de processamento limitada.

2.2.3 Desempenho e Alternativas do Firmware

A taxa de atualização de pulsos no GRBL pode atingir aproximadamente **30 kHz**, o que permite alcançar resoluções de até **0,01 mm** em máquinas CNC bem calibradas e configuradas. No entanto, para aplicações que demandam maior complexidade, como o controle de cinco eixos ou funcionalidades mais avançadas, outros firmwares podem ser mais indicados. O **Marlin**, por exemplo, originalmente desenvolvido para impressoras 3D, oferece suporte a múltiplos eixos e uma vasta gama de sensores, sendo uma alternativa popular. Outra opção robusta é o **LinuxCNC**, que opera em computadores pessoais com sistema operacional Linux em tempo real. Este último proporciona um nível de flexibilidade e capacidade industrial, mas, em contrapartida, exige um hardware mais potente e uma configuração mais complexa.

A escolha do firmware ideal deve, portanto, ponderar os **recursos desejados** contra as **limitações de hardware** e a complexidade de implementação. Para o escopo deste projeto, o GRBL se destaca por sua compatibilidade com o microcontrolador **ATmega2560**, pela simplicidade de sua configuração e pela existência de uma comunidade ativa que oferece suporte e desenvolvimento contínuo.

2.2.4 Software: Interface e Pré-processamento

Enquanto o firmware é responsável pela gestão direta do hardware da máquina CNC, o **software** executado em um computador pessoal desempenha um papel crucial na interface com o usuário e no pré-processamento das tarefas de usinagem. Programas como o Universal G-code Sender (UGS) oferecem uma **interface gráfica do usuário (GUI)** que facilita a operação da máquina, permitem o **pré-processamento** de arquivos G-code, incluindo simulação de percursos e otimização de trajetórias, e gerenciam a **comunicação serial** com o firmware embarcado, geralmente via conexão USB/UART.

A integração entre software e firmware, como no caso da combinação UGS e GRBL, estabelece uma **ponte** eficaz entre o operador e a máquina. O UGS, por exemplo, converte as ações do usuário em comandos G-code que são transmitidos sequencialmente ao GRBL. Além disso, exibe informações de **monitoramento** em tempo real, como a posição atual

da ferramenta e eventuais erros de operação. Softwares de interface também auxiliam na **gestão de recursos**, contornando limitações do firmware, como o tamanho finito do buffer de comandos, ao regular o fluxo de dados enviados à controladora.

Esta arquitetura híbrida apresenta vantagens significativas. O **microcontrolador** dedicado garante a execução em tempo real das operações críticas de movimento, com o GRBL operando a taxas de até 30 kHz, o que assegura baixo custo e resposta rápida. Por sua vez, o **computador** oferece a flexibilidade necessária para implementar algoritmos mais complexos, como a funcionalidade de *look-ahead* (antecipação de movimentos para otimizar a velocidade e suavidade) presente em alguns softwares CAM ou de envio de G-code.

2.2.5 Alternativas de Arquitetura de Controle e Casos de Uso

Diferentes abordagens podem ser adotadas para o controle de máquinas CNC. Soluções baseadas puramente em **firmware** embarcado, como o GRBL em um Arduino, são ideais para máquinas mais simples, onde os recursos de processamento são limitados e o custo é um fator primordial. Essas soluções são frequentemente encontradas em projetos DIY (faça-você-mesmo) e em equipamentos de pequeno porte.

Por outro lado, **soluções baseadas em PC**, como o LinuxCNC, requerem um computador dedicado para executar o software de controle em tempo real. Embora demandem um hardware mais robusto, essas plataformas permitem um controle direto e mais granular do hardware da máquina através do software, oferecendo maior poder de processamento para algoritmos complexos, interfaces personalizadas e integração com sistemas de planejamento e monitoramento mais sofisticados.

A sinergia entre um **software** de interface como o UGS e um **firmware** otimizado como o GRBL viabiliza a construção de máquinas CNC que são ao mesmo tempo acessíveis financeiramente e capazes de produzir resultados precisos. Para este projeto, a combinação GRBL + UGS foi considerada ideal por oferecer **baixa latência** nas operações de controle (devido ao firmware dedicado), manter a **flexibilidade** de uma interface rica em recursos no PC e ser plenamente compatível com o microcontrolador ATmega2560 escolhido.

2.3 Sistemas CNC

Os sistemas de Controle Numérico por Computador (CNC) constituem a base da manufatura digital moderna, permitindo a automação precisa de processos de usinagem. Conforme descrito por Groover (2011), os sistemas de produção automatizados evoluíram a partir de tecnologias rígidas e programáveis, incorporando ao longo das décadas sensores inteligentes, integração digital e conectividade em rede, o que contribuiu para o surgimento de sistemas flexíveis e altamente adaptáveis.

Um sistema CNC típico é composto por um conjunto de componentes responsáveis por interpretar instruções codificadas (geralmente em G-code) e executar os movimentos da ferramenta de corte nos eixos da máquina. Sua arquitetura é dividida, de forma geral, em três grandes módulos: unidade de controle, unidade de acionamento e sistema mecânico.



Figura 2.1: Diagrama simplificado da Arquitetura CNC

A unidade de controle, geralmente baseada em um microcontrolador ou processador industrial, processa o programa de usinagem e determina os movimentos a serem realizados. Esses comandos são então transmitidos à unidade de acionamento, que inclui os drivers dos motores e os sistemas de tração. O sistema mecânico converte esses sinais em movimentos físicos da máquina.

Em termos de estratégia de controle, destacam-se dois tipos principais de arquitetura:

- **Malha aberta:** utilizada em configurações mais simples, emprega motores de passo sem realimentação. Embora tenha menor custo e complexidade, está sujeita a perdas de passo caso haja interferência mecânica ou sobrecarga.
- **Malha fechada:** incorpora servomotores e encoders para monitoramento e correção em tempo real da posição dos eixos. Essa abordagem oferece maior precisão e confiabilidade, sendo comum em aplicações industriais.

A precisão de um sistema CNC depende tanto da estratégia de controle quanto da qualidade e adequação dos componentes mecânicos. Em máquinas CNC de baixo custo que utilizam sistemas de tração por correias, como as robustas correias de perfil HTD com passo de 5mm (HTD 5M) escolhidas para este projeto, e motores de passo, a precisão alcançável pode variar, mas frequentemente situa-se na faixa de $\pm 0,1$ mm a $\pm 0,2$ mm, dependendo da rigidez da estrutura, do correto tensionamento das correias e da calibração do sistema. Já em sistemas industriais com fusos de esferas retificados (como os *ballscrews* de classe C5), é possível alcançar precisões da ordem de $\pm 0,005$ mm.

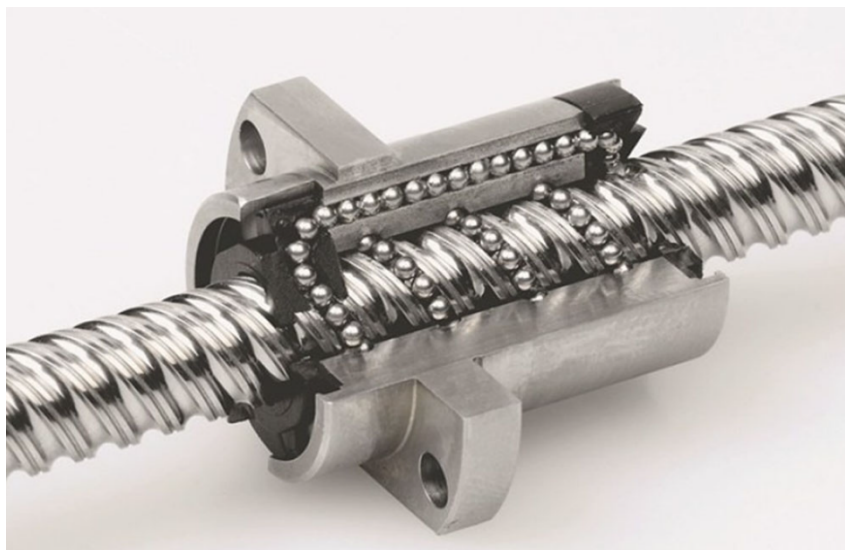


Figura 2.2: Detalhe de um fuso de esferas e respetiva castanha, ilustrando o mecanismo de recirculação de esferas.

Fonte: Adaptado de <https://www.rolibras.com.br/images/servicos/fuso-de-esferas-conheca-o-componente-mecanico-perfeito-para-aplicacoes-industriais/fuso-de-esferas-conheca-o-componente-mecanico-perfeito-para-aplicacoes-industriais-1.webp>.

Recentemente, tem-se observado um crescente interesse por soluções de baixo custo e fácil implementação para sistemas CNC aplicados em marcenaria, prototipagem e fabricação digital. Nesses contextos, o equilíbrio entre simplicidade, precisão e confiabilidade é essencial. Configurações com motores de passo e correias dentadas, apesar de suas limitações em termos de força e rigidez, oferecem desempenho satisfatório quando bem ajustadas e calibradas. Além disso, o uso de firmwares otimizados e estratégias de compensação de erros tem contribuído para melhorar a qualidade dos acabamentos e a repetibilidade dos processos, mesmo em sistemas operando em malha aberta.

No contexto deste projeto, optou-se por uma abordagem de malha aberta, utilizando motores de passo NEMA 23 e drivers dedicados, aliados a um firmware otimizado. Essa configuração oferece uma boa relação entre custo e desempenho, sendo adequada para aplicações de marcenaria, prototipagem e design digital.

2.3.1 Motores NEMA e Microstepping

Nos sistemas CNC de baixo custo, os motores de passo são amplamente utilizados devido à sua simplicidade de controle e boa precisão posicional. Entre os diversos modelos disponíveis, os motores do tipo **NEMA** são os mais comuns. A sigla NEMA (National Electrical Manufacturers Association) refere-se a um padrão que define, entre outras características, as dimensões da face de montagem do motor.

No presente projeto, optou-se por motores do tipo **NEMA 23**, que possuem 56 mm de largura na face e são conhecidos por fornecerem um bom equilíbrio entre torque e tamanho físico. Eles são adequados para aplicações que exigem torque moderado, como marcenaria, usinagem leve e prototipagem.

Para aumentar a resolução dos movimentos, foi empregado o recurso de **microstepping**, configurável diretamente nos drivers TB6600. Essa técnica permite que cada passo completo do motor (geralmente $1,8^\circ$ por passo) seja subdividido em micropassos, como 1/8, 1/16 ou até 1/32 do passo original. Isso melhora a suavidade do movimento, reduz vibrações e aumenta a precisão da máquina.

A escolha da configuração de microstepping leva em consideração o equilíbrio entre resolução e torque disponível. Valores muito altos de micropassos podem comprometer o torque útil do motor, enquanto valores muito baixos reduzem a precisão e a suavidade da usinagem.

2.4 Programas de CAD

Os programas de CAD (*Computer-Aided Design*) são ferramentas empregadas no fluxo de trabalho da manufatura digital para a modelagem tridimensional de peças e conjuntos. Estes programas são utilizados na etapa de concepção, servindo como base para a posterior geração do código de usinagem (G-code), através de softwares CAM (*Computer-Aided Manufacturing*).

Em um ambiente CNC, o processo típico se inicia com o desenvolvimento de um modelo tridimensional da peça, utilizando um software CAD. Esse modelo é então exportado em formatos de intercâmbio, como STEP ou IGES, para ser processado em um software CAM, que realiza o planejamento da usinagem e gera o código G correspondente. Essa sequência é essencial para garantir a fidelidade dimensional entre o projeto virtual e a peça fabricada.

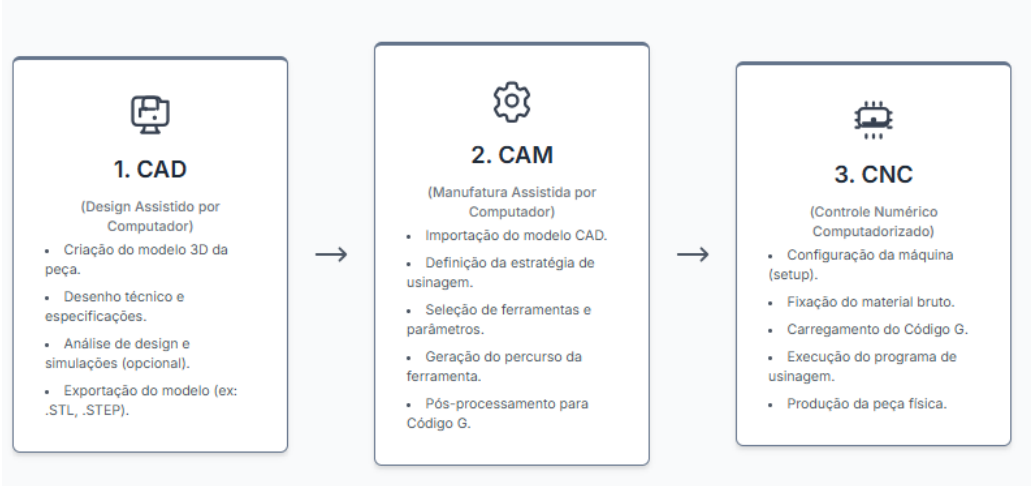


Figura 2.3: Fluxograma do Processo de Manufatura Digital CAD-CAM-CNC

Atualmente, diversas opções de softwares CAD estão disponíveis, variando em funcionalidades, custo e complexidade de uso. A Tabela 2.1 apresenta um comparativo entre alguns programas utilizados no contexto de usinagem CNC acessível:

Tabela 2.1: Comparativo entre softwares CAD

Software	Vantagens	Limitações
Fusion 360	Integração nativa com CAM e simulação. Interface intuitiva e baseada na nuvem.	Licença gratuita limitada ao uso pessoal. Versão comercial exige assinatura.
FreeCAD	Código aberto. Possui módulo <i>Path</i> para geração de G-code. Suporte ativo da comunidade.	Curva de aprendizado pode ser acentuada. Algumas funções CAM ainda em desenvolvimento.
SolidWorks	Ferramentas avançadas de modelagem, simulação estrutural e análise de montagens.	Alto custo de licenciamento, geralmente voltado ao setor industrial.

O *Fusion 360*, desenvolvido pela Autodesk, é uma das soluções populares entre makers e pequenos empreendedores devido à sua integração entre modelagem 3D, geração de trajetórias de usinagem e simulações mecânicas. Já o *FreeCAD* se destaca por ser uma ferramenta de código aberto, oferecendo flexibilidade e personalização, além de possuir um módulo CAM em constante evolução. O *SolidWorks*, por sua vez, é amplamente utilizado em ambientes industriais de médio e grande porte, sendo reconhecido por sua robustez e conjunto completo de ferramentas.

No presente projeto, optou-se pela utilização do *Fusion 360* na etapa de modelagem e geração de G-code, considerando a sua facilidade de uso, integração com o processo CAM e compatibilidade direta com o firmware GRBL utilizado na máquina desenvolvida.

2.5 Código G

O código G, também conhecido como G-code, é a linguagem padrão utilizada para programar máquinas CNC. Regulamentado pela norma ISO 6983, esse sistema de codificação define instruções numéricas que comandam os movimentos da máquina, ativação do *spindle*, controle de velocidade e demais parâmetros relacionados ao processo de usinagem.

A estrutura do G-code é composta por uma série de blocos (linhas de comando), cada um iniciando com uma letra identificadora seguida de valores numéricos. Os comandos mais comuns incluem:

- **G00**: Movimento rápido (sem corte).
- **G01**: Movimento linear com avanço (corte).
- **G02/G03**: Interpolação circular no sentido horário e anti-horário, respectivamente.
- **M00**: Parada do programa.
- **M01**: Parada opcional do programa.
- **M02**: Fim do programa.
- **M03**: Liga o *spindle* no sentido horário.
- **M04**: Liga o *spindle* no sentido anti-horário.
- **M05**: Desliga o *spindle*.
- **F**: Define a velocidade de avanço.
- **S**: Define a rotação do *spindle*.

A simplicidade da linguagem G-code contribui para sua ampla adoção, especialmente em sistemas CNC acessíveis e de código aberto. No entanto, essa simplicidade também traz limitações. O G-code opera com instruções de baixo nível, descrevendo como a máquina deve se mover, ele não fornece informações semânticas sobre as características da peça (features), como furos, bolsões ou contornos. Isso dificulta a reutilização do programa em diferentes contextos, reduz a interoperabilidade entre máquinas distintas e limita o potencial de automação avançada.

Além disso, como o G-code foi projetado originalmente para máquinas específicas com hardware rígido, sua portabilidade entre diferentes fabricantes pode exigir adaptações manuais, principalmente nos comandos M (funções miscelâneas), que podem variar conforme a máquina.

Apesar dessas limitações, o G-code continua sendo a linguagem dominante no universo CNC, sustentado por sua robustez, compatibilidade com a maioria dos softwares CAM e

suporte em plataformas de baixo custo como o GRBL. No contexto deste projeto, o G-code é utilizado como linguagem intermediária entre o software de geração de trajetórias (Fusion 360) e o firmware embarcado (GRBL), possibilitando o controle direto dos eixos da máquina a partir de instruções padronizadas e configuráveis.

2.6 Plano Cartesiano

O sistema de coordenadas cartesianas constitui a base geométrica sobre a qual se estruturam os movimentos das máquinas CNC. Esse sistema define posições e deslocamentos no espaço por meio de três eixos ortogonais, X, Y e Z, formando um espaço tridimensional onde a ferramenta de corte pode ser posicionada com precisão em qualquer ponto do volume útil da máquina.

Em aplicações de usinagem, adota-se geralmente um sistema de coordenadas *dextro-giro*, também conhecido como “regra da mão direita”. Nesse sistema:

- O eixo **X** representa o movimento da ferramenta no sentido esquerdo-direito;
- O eixo **Y** representa o movimento no sentido frente-trás;
- O eixo **Z** representa o movimento vertical (subida e descida da ferramenta).

A origem das coordenadas (ponto 0,0,0) é comumente estabelecida sobre a peça de trabalho ou em um ponto de referência fixo da máquina, sendo crucial para o correto posicionamento e início dos processos de usinagem.

Para a realização de movimentos coordenados, a geometria cartesiana pode ser associada a transformações geométricas utilizando matrizes homogêneas. Essas transformações são importantes para aplicações mais complexas, como interpolações, compensações de ferramenta e simulações de movimento. Craig (2005) descreve de forma abrangente o uso de matrizes homogêneas para representar tanto rotações quanto translações no espaço.

No contexto de uma máquina CNC que realiza primariamente movimentos lineares, como a desenvolvida neste projeto, a transformação de interesse para o posicionamento da ferramenta é a translação pura. Uma matriz de transformação homogênea que representa uma translação pelas coordenadas (x, y, z) é dada por:

$$T_{\text{trans}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Essa matriz permite representar o deslocamento da ferramenta para uma nova posição (x, y, z) em relação à origem do sistema de coordenadas. Embora matrizes mais gerais possam incluir rotações, para o controle dos eixos lineares desta router, a matriz de

translação é fundamental e é amplamente utilizada em algoritmos de planejamento de trajetória e controle de movimento.

No contexto das máquinas router CNC de 3 eixos, como a desenvolvida neste projeto, a movimentação ocorre em planos ortogonais controlados de forma independente. A precisão dos deslocamentos é garantida pela calibração dos motores de passo e dos sistemas de tração, que convertem os sinais digitais do controlador em movimentos físicos proporcionais ao deslocamento desejado nos eixos cartesianos.

2.7 Cinemática

A cinemática é o ramo da mecânica que estuda o movimento dos corpos sem considerar as causas que o produzem. No contexto das máquinas CNC, a cinemática é utilizada para calcular o posicionamento da ferramenta em relação à peça, garantindo a trajetória correta nos processos de usinagem. Duas abordagens principais são utilizadas: a cinemática direta e a interpolação de trajetórias.

Em máquinas CNC de 3 eixos cartesianos, como a desenvolvida neste projeto, a cinemática direta é simples e linear. Cada motor controla um eixo independente, de modo que a posição da ferramenta pode ser descrita diretamente pelas coordenadas dos atuadores:

$$\begin{cases} x = q_1 \\ y = q_2 \\ z = q_3 \end{cases}$$

Onde q_1 , q_2 e q_3 representam as posições desejadas (ou reais) nos eixos X, Y e Z, respectivamente. Esse modelo assume que não há acoplamento entre os eixos — uma suposição válida para a maioria das máquinas router CNC de arquitetura cartesiana.

Por outro lado, a cinemática inversa, amplamente usada em robótica e máquinas com múltiplos graus de liberdade (como braços articulados ou máquinas CNC com cabeçotes rotativos), busca determinar quais devem ser os valores dos atuadores para que a ferramenta alcance uma posição e orientação desejadas no espaço. Embora não seja estritamente necessária em sistemas cartesianos puros como o deste projeto, a cinemática inversa pode ser útil para compensações, por exemplo, em casos de folgas mecânicas ou desalinhamentos estruturais.

Um aspecto relevante em máquinas CNC de baixo custo é a compensação de *backlash* — pequenos desvios causados por folgas nos elementos de transmissão mecânica, como entre correias e polias ou em fusos trapezoidais. De acordo com Craig (2005), essas folgas podem introduzir erros na movimentação, especialmente em sistemas baseados em correias sincronizadoras, exigindo correções via software ou ajustes estruturais, como o uso de tensionadores de correias ou molas que, geralmente posicionadas nas extremidades

das correias, possuem a função de tensioná-las e reduzir folgas.

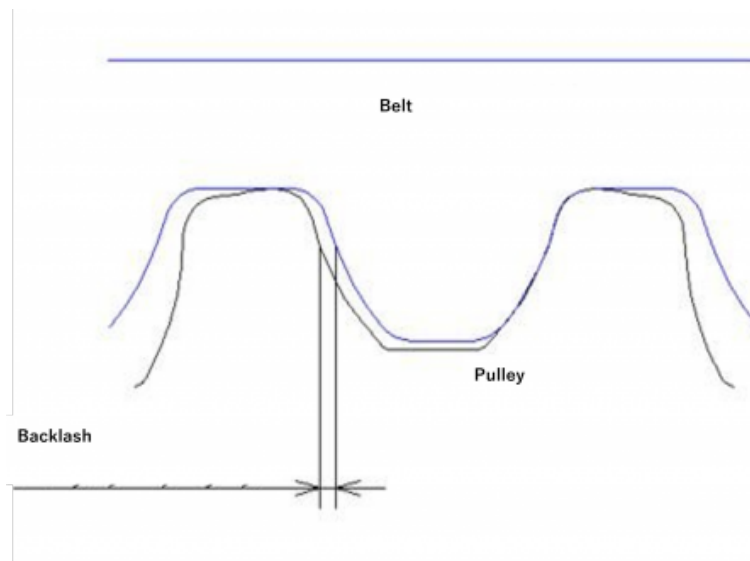


Figura 2.4: Representação esquemática do efeito de backlash.

Fonte: https://www.mitsuboshi.com/dcms_media/image/image_backlash_en.png.

Além disso, a interpolação de movimentos (como linhas e arcos) é geralmente realizada por algoritmos embarcados no firmware da máquina. O GRBL, por exemplo, utiliza o algoritmo de Bresenham para interpolação linear e aproximações trigonométricas para interpolação circular, gerando os pulsos dos motores de passo com base na trajetória desejada. Isso permite que a ferramenta percorra curvas suaves e segmentos retos com precisão, mesmo em controladores com baixa capacidade de processamento.

No projeto em desenvolvimento, os princípios da cinemática direta são utilizados para planejar os movimentos nos eixos, enquanto as funções de interpolação são delegadas ao firmware embarcado. Essa abordagem garante simplicidade no projeto de hardware e flexibilidade na programação do movimento da ferramenta.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Desenvolvimento do Projeto 3D

O desenvolvimento do projeto tridimensional foi realizado no software *SketchUp*, com o objetivo de criar uma máquina CNC funcional e modular, capaz de atender a uma área útil desejável de 1000 mm $\times$ 1500 mm.

A modularidade da mecânica foi considerada desde as primeiras etapas do projeto, visando facilitar a montagem, manutenção e possíveis expansões futuras.

3.2 Frame da Mesa e Eixo Y

O projeto do frame da mesa foi a base para o restante da estrutura. Ele incluiu 2 perfis tubulares de aço galvanizado com 1600 mm cada, os quais irão servir de base para os suportes dos eixos lineares do eixo Y, com comprimento total de 1500 mm. Esta configuração garante estabilidade, precisão e maior resistência à flexão do eixo linear, permitindo maior tolerância ao peso do restante da estrutura. Os perfis tubulares de aço também contam com estruturas que servem para suportar as extremidades das correias que atuam no sistema de movimentação no sentido do eixo Y da máquina.

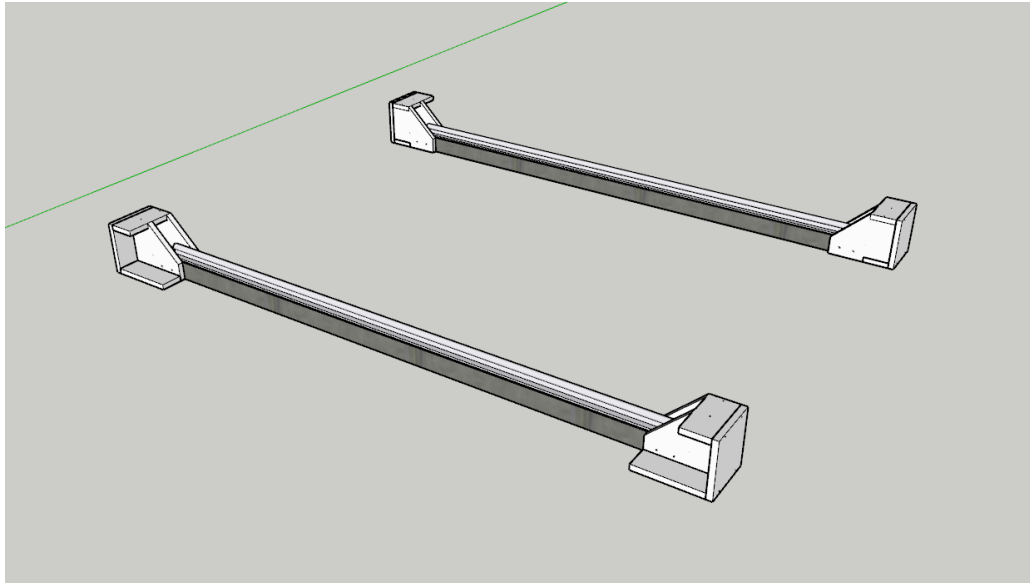


Figura 3.1: Modelo 3D do frame da mesa com guias lineares do eixo Y

3.3 Estrutura do Eixo X

A estrutura do eixo X desempenha um papel fundamental no projeto, pois atua como o principal elo entre os módulos estruturais da máquina. Sua concepção foi pensada para integrar a estrutura da base, onde estão fixados os guias do eixo Y, com a estrutura móvel do eixo Z, garantindo rigidez e estabilidade ao conjunto.

Além de sustentar a movimentação transversal do eixo Z, essa estrutura também é responsável por absorver os esforços mecânicos oriundos da usinagem, como as forças de torção geradas durante cortes e perfurações. Por esse motivo, foi projetada com seções reforçadas e fixações dimensionadas para suportar cargas dinâmicas, evitando vibrações que comprometeriam a precisão do processo.

Sua modularidade permite ajustes e manutenções independentes, o que contribui para a flexibilidade do projeto e facilita futuras modificações ou expansões.

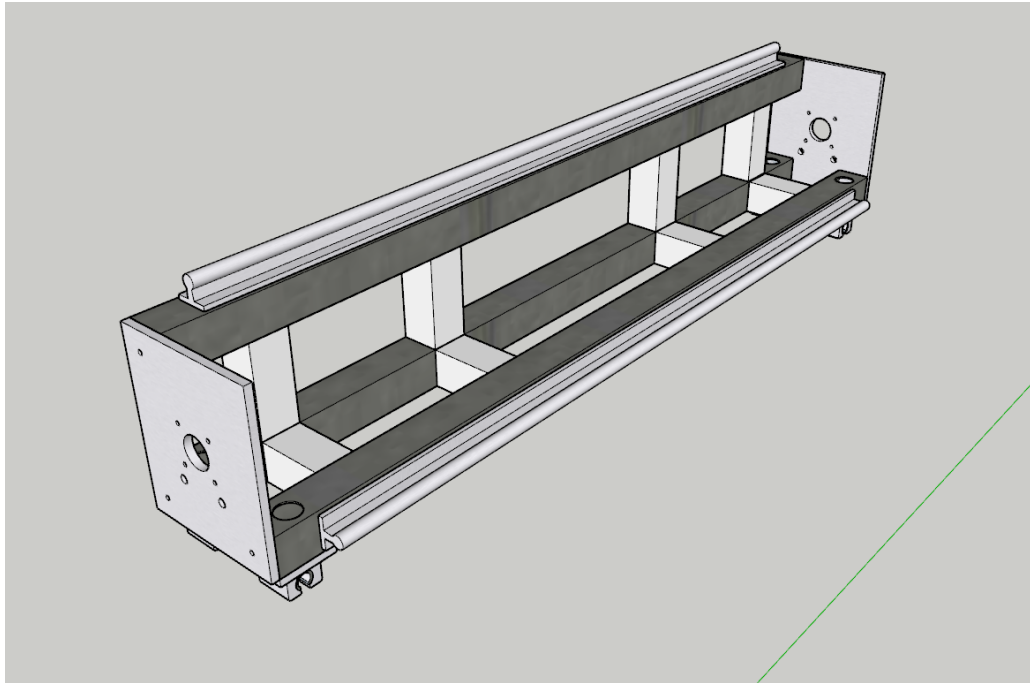


Figura 3.2: Estrutura do eixo X

3.4 Estrutura do Eixo Z

A estrutura do eixo Z foi projetada para ser compacta, robusta e de fácil manutenção. Sua principal função é permitir o movimento vertical da ferramenta com precisão, mantendo o alinhamento e a estabilidade durante o processo de usinagem.

Uma das preocupações centrais no desenvolvimento desta parte foi garantir que sua montagem assegurasse a perpendicularidade em relação ao plano XY, formando um ângulo de 90 graus com o mesmo. Esse alinhamento garante cortes verticais precisos e evitar erros acumulados na profundidade da usinagem.

A estrutura é composta por suportes rígidos e elementos de fixação ajustáveis, que permitem tanto a calibração inicial quanto eventuais ajustes durante o uso da máquina. Adicionalmente, foram inseridos elementos que auxiliam na absorção de vibrações e aumentam a resistência a torções, contribuindo para o bom desempenho do sistema mesmo em operações de corte mais agressivas.

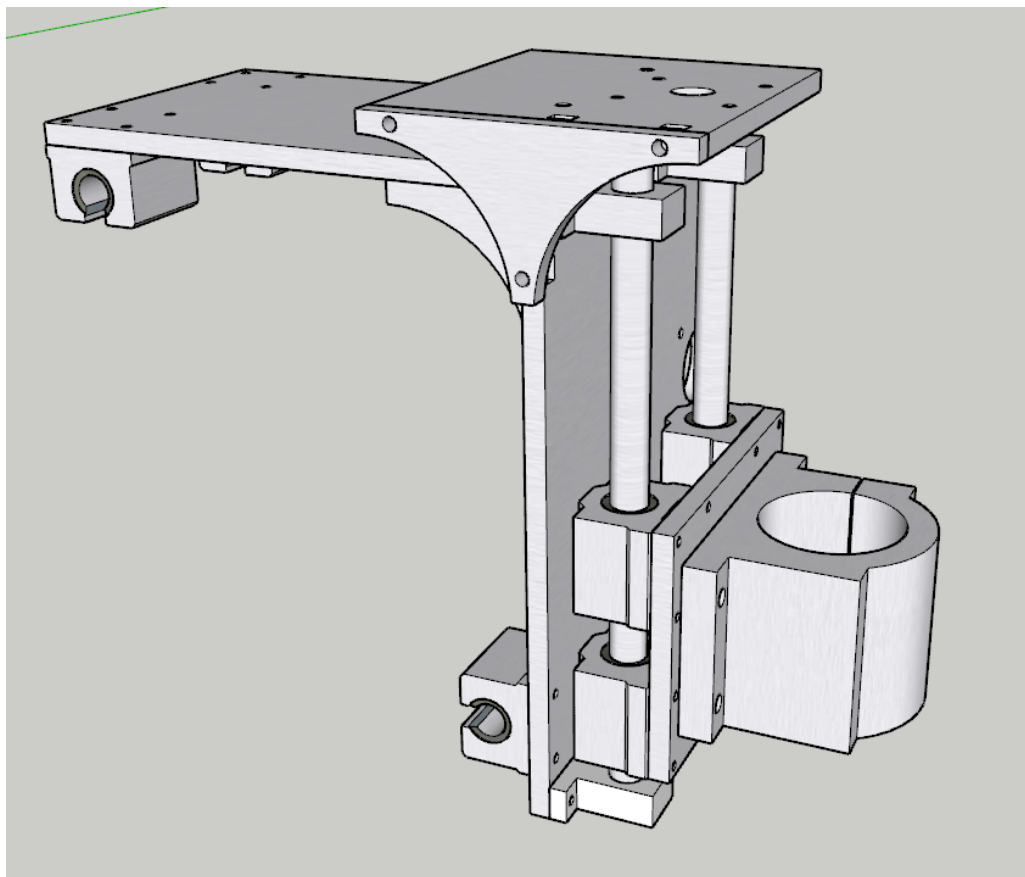


Figura 3.3: Estrutura do eixo Z

A modelagem 3D permitiu uma melhor visualização da integração dos eixos, análise do espaço de trabalho e dimensionamento adequado de todos os componentes estruturais.

3.5 Escolha dos Materiais

A seleção dos materiais considerou critérios como custo, rigidez, peso e disponibilidade no mercado nacional. A estrutura principal da máquina foi construída com tubos de aço galvanizado de 50×50 mm, oferecendo alta robustez e resistência a torções, sem comprometer a simplicidade de fabricação.

Para os suportes e chapas estruturais, optou-se por chapas de alumínio com espessura de $3/8$ polegadas. Essa escolha foi motivada pela dificuldade de aquisição de chapas métricas de 10 mm de espessura, que são frequentemente utilizadas em projetos similares, mas apresentam menor disponibilidade e custo elevado em fornecedores locais.

Além da estrutura física, o sistema de movimentação linear também foi definido com base em critérios de desempenho e acessibilidade. Os eixos X e Y utilizam o sistema de tração por correias HTD5M, combinado com polias de 15 dentes. As correias HTD (High Torque Drive) possuem perfil curvilíneo e são projetadas para transmitir torque com precisão e baixa folga, o que contribui para a suavidade e repetibilidade do movimento.

A escolha deste sistema, em detrimento de fusos de esfera ou cremalheiras, foi justificada pelo seu baixo custo, facilidade de montagem e manutenção, e desempenho satisfatório para aplicações que exigem precisão.

3.6 Projeto Eletrônico

O sistema eletrônico da máquina CNC foi projetado para garantir confiabilidade, modularidade e fácil manutenção. A plataforma escolhida foi o **Arduino Mega 2560**, devido à sua ampla disponibilidade de pinos digitais e compatibilidade com firmwares como GRBL. Seu uso é comum em aplicações maker e industriais de pequeno porte por oferecer boa estabilidade em tarefas de controle em tempo real.

O controle dos motores de passo é feito por drivers dedicados do modelo **TB6600**, que suportam correntes maiores (até 4 A) e oferecem recursos como microstepping e proteção contra sobrecarga térmica. A escolha por esses drivers foi motivada pela necessidade de movimentar cargas significativas nos eixos X, Y e Z com precisão e torque adequado.

Para o controle do spindle, foi utilizado um inversor de frequência **WEG CFW300**, conectado ao Arduino e ao motor spindle. O inversor permite variação de rotação do motor em tempo real, com maior controle sobre o processo de corte, sendo uma solução eficiente e segura para motores AC trifásicos.

Além disso, o sistema conta com sensores de fim de curso (*limit switches*), um relé para o controle do acionamento do spindle (detalhado na Seção 3.8), e um sistema de *probe* baseado em fotoacopladores, detalhado na Seção 3.12.

3.7 Interligação Eletrônica: Arduino, Drivers e Sensores

A interligação dos componentes eletrônicos ao Arduino Mega 2560 segue o mapeamento de pinos definido pelo firmware GRBL para o controle da máquina CNC. Os drivers TB6600 foram conectados aos pinos digitais designados, permitindo o controle individual de cada eixo (X, Y e Z). Cada driver recebe sinais de *step* (pulso de passo) e *direction* (direção) do Arduino, que determinam, respectivamente, a quantidade de passos (ou micropassos) que o motor deve percorrer e o sentido da rotação. O pino de *enable* (habilitação), comum a todos os drivers, também é controlado pelo Arduino para energizar ou liberar os motores.

A alimentação dos drivers é feita por uma fonte dedicada de 24 V, com corrente suficiente para alimentar todos os motores simultaneamente. Cada driver possui pinos de configuração para microstepping (subdivisão do passo do motor) e corrente de saída, os quais foram ajustados de acordo com as especificações dos motores de passo NEMA 23

utilizados no projeto.

Além dos drivers, foram conectados ao Arduino Mega os sensores de fim de curso para cada eixo. Estes sensores são cruciais para a segurança operacional e para o processo de referenciamento da máquina (*homing*), interrompendo o movimento do respectivo eixo ao ser atingido o limite físico do equipamento e evitando danos mecânicos. As conexões específicas utilizadas neste projeto foram:

- Fim de curso do eixo X (*Limit X-Axis*): pino digital 10;
- Fim de curso do eixo Y (*Limit Y-Axis*): pino digital 11;
- Fim de curso do eixo Z (*Limit Z-Axis*): pino digital 12.

Também foi conectado ao sistema um sensor de toque (*probe*), utilizado para a calibração automática da altura da ferramenta em relação à superfície de trabalho. O *probe* foi ligado ao pino digital 15 do Arduino Mega (tipicamente A5 no mapeamento GRBL, usado como entrada digital), permitindo que o firmware detecte o contato da ferramenta. Outros pinos do Arduino Mega são reservados pelo GRBL para funções como controle do spindle (habilitação, direção e velocidade via PWM), e comandos de controle em tempo real (Reset, Feed Hold, Cycle Start), conforme detalhado na documentação do firmware e visualizado esquematicamente na Figura 3.4.

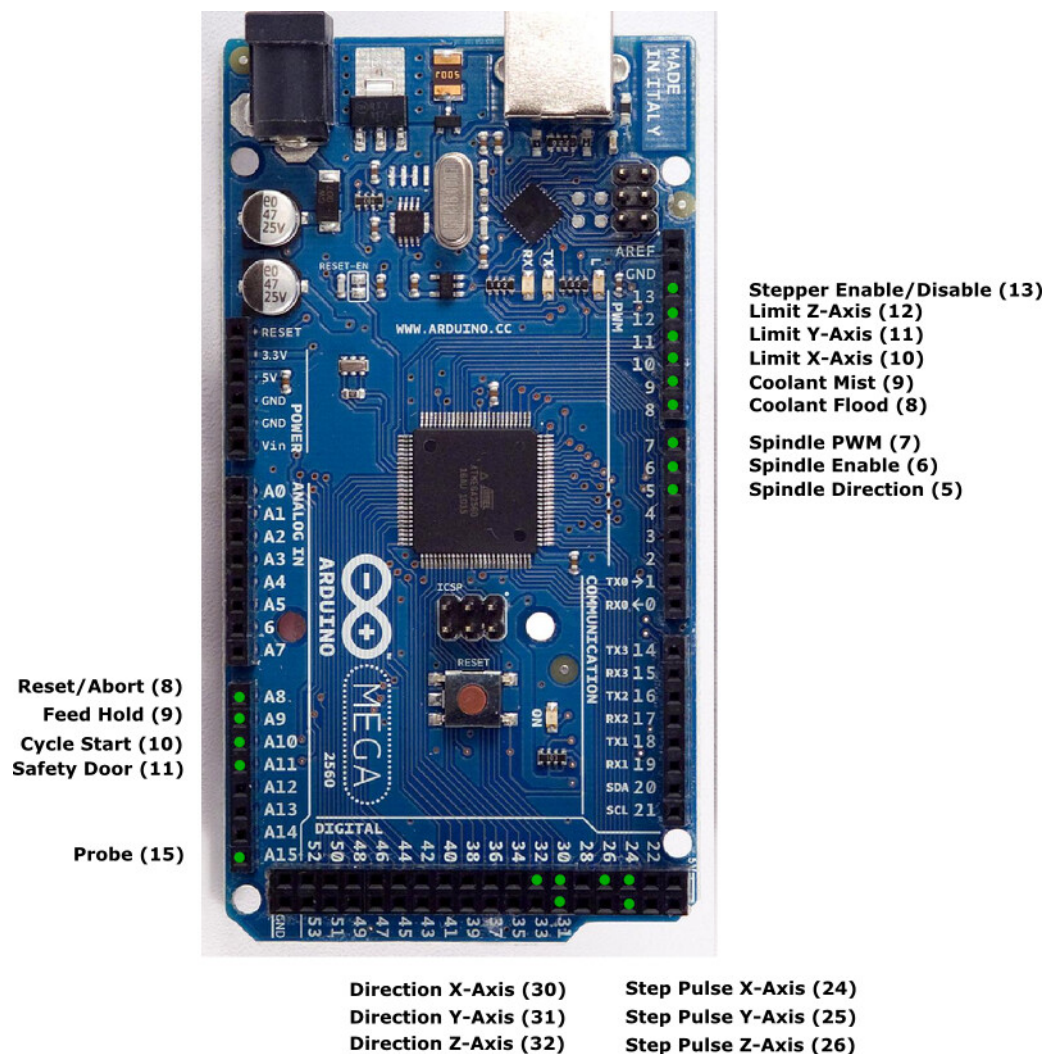


Figura 3.4: Diagrama de pinagem do Arduino Mega para GRBL, ilustrando as conexões com Drivers TB6600 e sensores. Para este projeto, os pinos de controle de refrigeração (*Coolant*) não foram utilizados.

Fonte: Adaptado de Fórum Arduino (2022).

3.8 Ligações entre Arduino Mega e Inversor de Frequência CFW300

A interface entre o Arduino Mega e o inversor CFW300 é feita por meio de saídas digitais (geralmente via relé para ligar/desligar e/ou sinal PWM para controle de velocidade), utilizadas para acionar o spindle e controlar sua rotação. O sinal PWM, quando utilizado para velocidade, é tipicamente convertido em uma tensão de controle analógica (0–10 V) por um circuito conversor, permitindo que o inversor ajuste a velocidade de rotação do motor de acordo com os comandos recebidos do firmware.

Essa integração oferece maior controle do processo de usinagem, permitindo variação

da rotação do spindle conforme o tipo de material e a operação a ser executada.

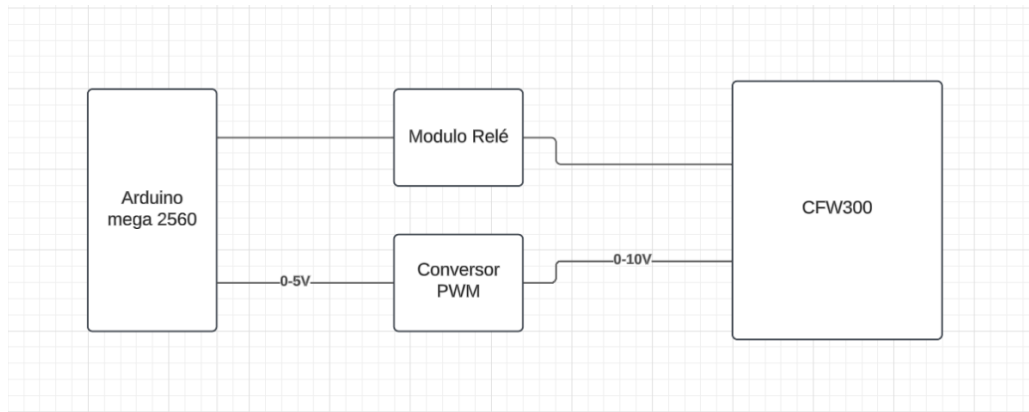


Figura 3.5: Ligações entre Arduino Mega e Inversor de Frequência WEG CFW300

3.9 Ligações entre Inversor CFW300 e o Spindle

O spindle, sendo um motor AC trifásico, é alimentado diretamente pelo inversor de frequência. O CFW300 é responsável por fornecer a tensão trifásica com frequência variável, controlando a velocidade de rotação do spindle com precisão.

A conexão é feita utilizando cabos apropriados para alta corrente e protegidos contra interferência eletromagnética (EMI), seguindo as recomendações do manual técnico do equipamento.

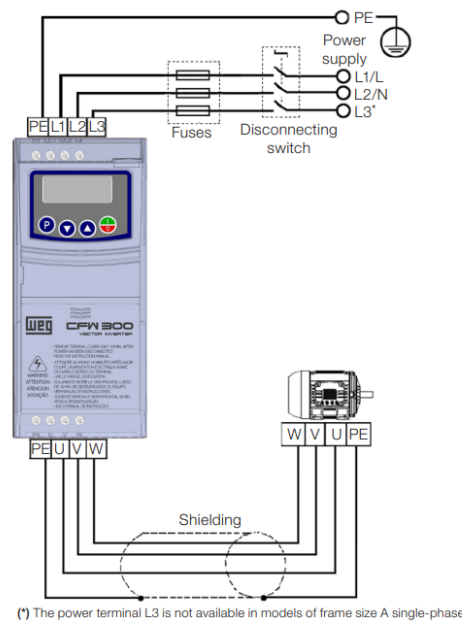


Figura 3.6: Esquema de ligação do inversor CFW300 ao spindle e à rede elétrica

Fonte: Adaptado de WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2022).

3.10 Ligações entre Drivers TB6600 e Motores de Passo

Cada driver TB6600 está conectado diretamente ao respectivo motor de passo NEMA 23. As ligações seguem o padrão de quatro fios (duas bobinas), com polaridade correta assegurada para evitar inversão de sentido.

Os motores de passo são os responsáveis por mover cada eixo da máquina com precisão milimétrica. A configuração de corrente nos drivers foi ajustada com base nas especificações dos motores, evitando superaquecimento e garantindo torque adequado para o deslocamento dos eixos com carga.

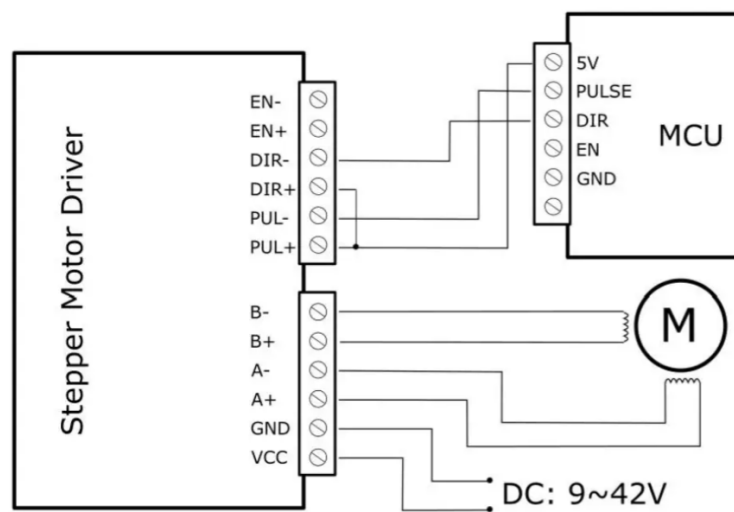


Figura 3.7: Diagrama de conexões entre driver TB6600 e motor de passo NEMA23

Fonte: Adaptado de DFRobot (2023).

3.11 Escolha do Software e do Firmware

A seleção das ferramentas de software e firmware foi guiada pela busca de soluções de código aberto, com ampla documentação, comunidade de suporte ativa e compatibilidade com o hardware escolhido, visando a acessibilidade e a flexibilidade do projeto.

3.11.1 Software de Interface: UGS

Para a comunicação entre o computador e o microcontrolador embarcado na máquina CNC, foi utilizado o **Universal Gcode Sender (UGS)**, um software de código aberto amplamente adotado por sua compatibilidade com firmwares como GRBL e sua interface gráfica amigável.

O UGS opera como intermediário entre o arquivo de G-code gerado pelo software CAM e o firmware que executa os movimentos da máquina. Além de transmitir os comandos, ele oferece uma série de ferramentas que auxiliam o operador durante a preparação e a execução do processo de usinagem.

Entre suas principais funcionalidades, destacam-se:

- **Visualizador de percurso da ferramenta:** exibe em tempo real a trajetória da fresa, permitindo identificar possíveis erros no arquivo G-code antes da execução;
- **Sistema de autonivelamento:** realiza uma varredura da superfície do material por meio do sensor de *probe*, gerando uma malha de compensação que corrige automaticamente as variações de altura;
- **Editor de G-code:** permite visualizar e editar os comandos diretamente, sem a necessidade de recorrer a softwares externos;
- **Execução de macros e comandos personalizados:** oferece atalhos configuráveis para tarefas repetitivas, como retorno ao ponto de origem, homing, ajuste de altura, entre outros;
- **Compatibilidade multiplataforma:** disponível para Windows, Linux e macOS, o que amplia sua acessibilidade.

Essas características tornam o UGS uma solução eficiente e confiável, especialmente para sistemas CNC de pequeno e médio porte baseados em GRBL. No projeto em questão, sua utilização contribuiu para um fluxo de trabalho mais eficiente, com maior controle visual e operacional sobre cada etapa da usinagem.

3.11.2 Firmware: GRBL

O firmware escolhido para o controle da máquina foi o **GRBL**, uma solução de código aberto amplamente utilizada em aplicações CNC baseadas na plataforma Arduino. Desenvolvido em linguagem C, o GRBL é compatível com microcontroladores AVR, como o ATmega2560 presente no Arduino Mega 2560, sendo otimizado para controle de máquinas de até três eixos com alto grau de precisão.

A instalação do GRBL foi realizada através da *Arduino IDE*, seguindo os procedimentos de importação da biblioteca do firmware e carregamento do código fonte no microcontrolador. Esse processo inclui a verificação da porta serial, seleção da placa correta e upload do firmware compilado.

Após a instalação, foram configurados os principais parâmetros de funcionamento da máquina, como:

- **Passos por milímetro (steps/mm)** para cada eixo, de acordo com o sistema de tração utilizado;
- **Aceleração e velocidade máxima** dos eixos, compatíveis com a estrutura mecânica e os motores empregados;
- **Limites físicos e de software**, para evitar colisões e garantir a integridade do sistema;
- **Função de *probe***, ativada para permitir o uso do sistema de autonivelamento.

O GRBL também oferece suporte nativo a comandos G-code conforme o padrão ISO 6983, incluindo funções de movimentação (G00, G01, G02, G03), controle do spindle (M03, M05), e rotinas de homing (G28). Sua estabilidade, documentação extensa e compatibilidade com softwares como o *Universal Gcode Sender (UGS)* foram fatores determinantes para sua escolha neste projeto.

3.12 Sistema de Probe

Para o ajuste automático da altura da ferramenta e nivelamento da superfície, foi desenvolvido um sistema de *probe* baseado em fotoacopladores. Essa abordagem garante isolamento elétrico e evita interferências no sinal de detecção.

O sistema é conectado ao pino de interrupção do Arduino (pino digital 15, conforme listado anteriormente) e é compatível com os comandos de nivelamento automático oferecidos pelo GRBL, proporcionando mais precisão e praticidade durante o processo de setup da máquina.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Estrutura Finalizada

A estrutura final da máquina CNC foi montada com base no projeto 3D desenvolvido previamente. A montagem física confirmou a viabilidade do design modular, facilitando o alinhamento dos eixos, a fixação dos componentes e o acesso a partes críticas para manutenção.

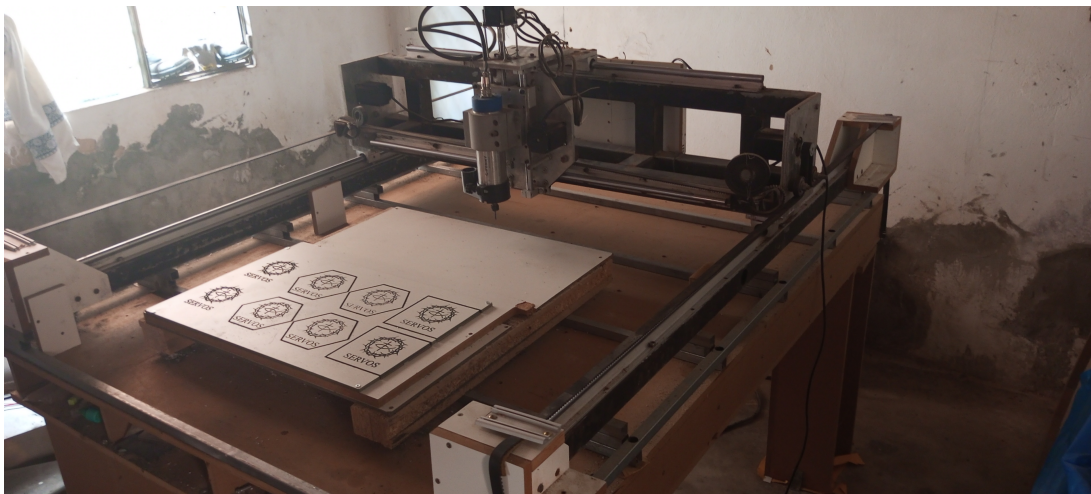


Figura 4.1: Estrutura montada da máquina CNC finalizada

4.1.1 Formação e Alinhamento do Plano XY a partir das Estruturas dos Eixos X e Y

A estrutura do eixo X foi construída conforme o planejado na etapa de projeto, atendendo plenamente aos requisitos funcionais. Essa estrutura garantiu a formação adequada do ângulo de 90 graus entre os eixos lineares X e Y, assegurando o esquadro da máquina. Além disso, cumpriu seu papel como base de sustentação do eixo Z, atuando como elemento estrutural central responsável por suportar todas as partes móveis. Sua rigidez e

estabilidade foram essenciais para o funcionamento confiável do sistema como um todo.

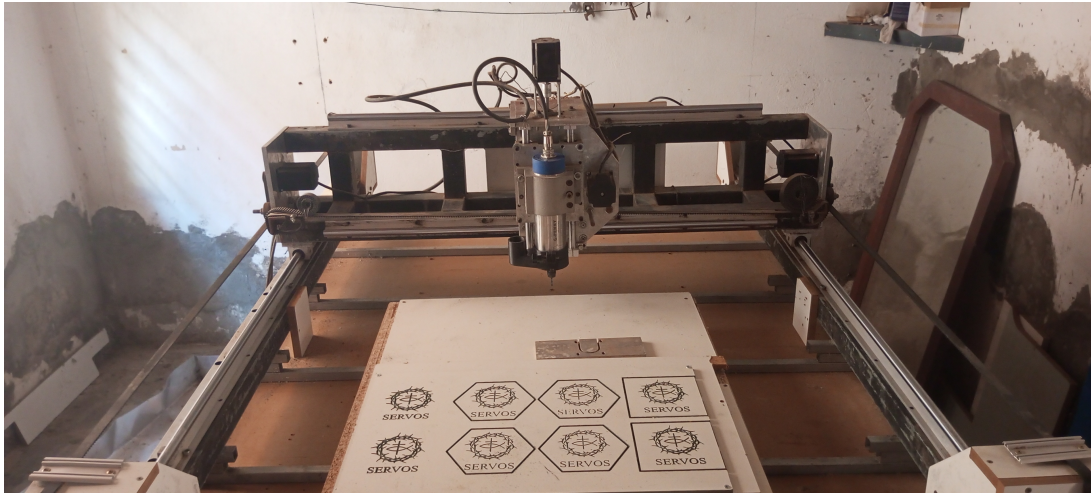


Figura 4.2: União das estruturas do eixo X e Y

4.1.2 Estrutura final do eixo Z

A estrutura do eixo Z demonstrou desempenho satisfatório, cumprindo seu papel de equilibrar robustez mecânica com precisão geométrica. Como pode ser observado nas imagens a seguir, o principal objetivo dessa estrutura — garantir a perpendicularidade entre a ferramenta de corte e o plano XY — foi plenamente alcançado, assegurando a qualidade dimensional das operações de usinagem.

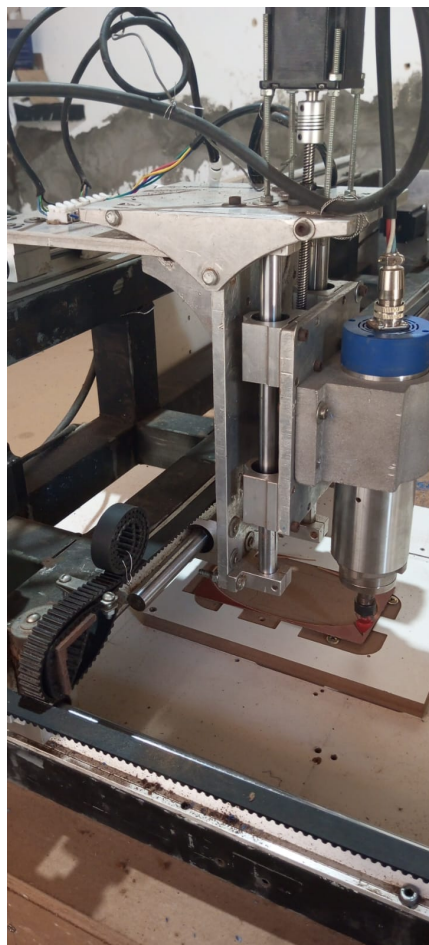


Figura 4.3: Vista lateral do eixo Z



Figura 4.4: Verificação do esquadro do eixo Z

4.1.3 Quadro Elétrico



Figura 4.5: Quadro eletrônico finalizado

4.2 Testes de Precisão

Para verificar a precisão da máquina, foram realizados testes de deslocamento utilizando comparador de relógio e marcações milimetradas. Os testes apresentaram variações inferiores a 0.05 mm nos eixos X e Y, e 0.03 mm no eixo Z, valores considerados adequados para aplicações em marcenaria e prototipagem.

4.3 Taxa de Avanço e Aceleração

Os parâmetros de taxa de avanço (*feed rate*) e aceleração foram ajustados progressivamente por meio da interface UGS, até alcançar um ponto de equilíbrio entre desempenho e estabilidade. Os valores finais configurados no GRBL foram:

- Velocidade máxima: 10.000 mm/min nos eixos X e Y; 4.000 mm/min no eixo Z;
- Aceleração: 300 mm/s² nos eixos X e Y; 100 mm/s² no eixo Z.

4.4 Corte em Diferentes Materiais

Foram realizados testes de corte com diversos materiais a fim de validar o desempenho da máquina:

- **MDF 15 mm:** cortes limpos e precisos, sem lascamento visível;



Figura 4.6: Cortes em MDF 15mm

- **Acrílico 4 mm:** Neste processo houve a necessidade de ajuste de velocidade de avanço e rotação do spindle para evitar fusão do material, juntamente com um ajuste fino da taxa de avanço para garantir que resultados alcançados fossem satisfatórios;



Figura 4.7: Corte em acrílico para case usados em prototipagem



Figura 4.8: Corte em acrílico para decorações

- **Alumínio 3/8"**: Cortes viáveis com avanço reduzido, 300 mm/min, e refrigeração auxiliar utilizando fluido para corte, confirmando a robustez do sistema.



Figura 4.9: Cortes em alumínio

- **EVA 30mm**: Cortes precisos sem sinais aparentes de tremulação nas faces laterais com taxas de avanços elevadas, 4000 mm/min.

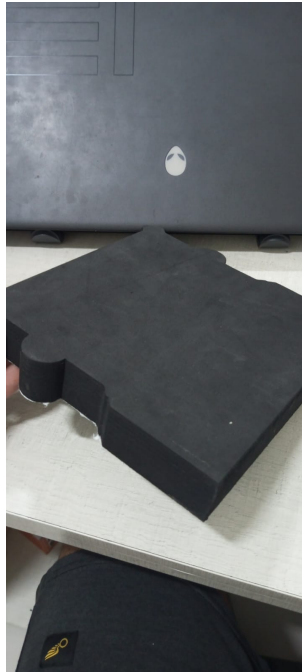


Figura 4.10: Cortes em EVA 30mm

Esses resultados confirmam a versatilidade da máquina, que atende tanto à prototipagem quanto a pequenas produções em diferentes tipos de substrato.

Capítulo 5

Conclusão

Com base nos resultados experimentais detalhados no Capítulo 4, que demonstraram uma precisão dimensional de aproximadamente 0.05mm nos eixos X e Y e 0.03mm no eixo Z, taxas de avanço máximas de 10.000mm/min e acelerações de até 300mm/s², além da capacidade de usinar materiais, como alumínio, com qualidade satisfatória, os quais demonstram que a router CNC desenvolvida neste estudo atinge os parâmetros de precisão e operacionais visados. A máquina demonstrou estabilidade estrutural, precisão adequada para as aplicações propostas e versatilidade de operação, atendendo aos requisitos definidos na fase de concepção.

Destaca-se a relevância do projeto tridimensional na etapa inicial, que permitiu prever interferências, dimensionar corretamente os componentes e garantir a integridade geométrica do conjunto. Os objetivos definidos durante o desenvolvimento foram, em sua maioria, atendidos, reforçando a viabilidade técnica e econômica da solução proposta como uma plataforma acessível para manufatura digital.

5.1 Trabalhos Futuros

Embora os objetivos principais deste projeto tenham sido alcançados, diversas melhorias e expansões podem ser consideradas para otimizar e ampliar as capacidades da máquina CNC desenvolvida. As propostas a seguir visam aprimorar a robustez, precisão, inteligência de controle e versatilidade funcional do sistema:

- **Desenvolvimento de uma bancada dedicada e otimizações estruturais:** A criação de uma bancada específica para a estrutura da CNC, mais rígida e nivelada, permitirá maior estabilidade operacional, reduzindo vibrações e melhorando o alinhamento geral dos eixos, o que impacta diretamente na precisão final da usinagem e na segurança.
- **Projeto de uma placa de circuito impresso (PCB) dedicada:** Substituir a atual montagem eletrônica, composta por módulos interconectados por fiação, por

uma PCB personalizada que integre o microcontrolador, os drivers dos motores de passo, os circuitos para sensores de fim de curso e o sistema de *probe*, além de interfaces para controle do spindle. Essa integração visa minimizar ruídos, reduzir falhas de conexão, facilitar a montagem e manutenção, e proporcionar um layout eletrônico mais compacto e profissional.

- **Investigação e implementação de controle em malha fechada:** Para mitigar o risco de perda de passos, inerente a sistemas de malha aberta com motores de passo, propõe-se o estudo e a implementação de um sistema de controle em malha fechada. Isso envolveria a adição de encoders rotativos aos eixos dos motores para fornecer feedback de posição em tempo real ao controlador, permitindo a detecção e correção de desvios e aumentando significativamente a confiabilidade e precisão, especialmente em usinagens de longa duração ou com cargas elevadas.
- **Implementação de um eixo rotativo (4º eixo):** A adição de um quarto eixo rotativo (eixo A) expandirá significativamente as aplicações da máquina, possibilitando a usinagem de peças cilíndricas, entalhes complexos e trabalhos que exigem indexação ou interpolação rotacional. Isso demandará adaptações no firmware (possivelmente migrando para uma solução que suporte mais eixos, como uma versão customizada do GRBL ou LinuxCNC), no software CAM para geração de trajetórias de 4 eixos, e no projeto mecânico para o suporte e acionamento do novo eixo.
- **Análise e implementação de algoritmos de planejamento de trajetória avançados:** Explorar algoritmos de interpolação mais sofisticados, como B-splines ou NURBS, e técnicas de otimização de percurso (por exemplo, baseadas em algoritmos como A* ou RRT) para gerar movimentos mais suaves, reduzir o tempo de usinagem em geometrias complexas e melhorar o acabamento superficial das peças.
- **Estudo aprofundado da cinemática da máquina e compensação de erros:** Embora a cinemática direta seja simples para uma máquina cartesiana de 3 eixos, um estudo mais aprofundado poderia levar à implementação de rotinas de compensação de erros geométricos (como desalinhamentos de eixos ou erros de perpendicularidade) e de *backlash*, utilizando, se necessário, conceitos de cinemática inversa para ajustes finos.
- **Análise comparativa e desenvolvimento orientado a "produto":** Realizar uma análise comparativa de desempenho, custo e funcionalidades da máquina desenvolvida em relação a soluções CNC comerciais de entrada. Adicionalmente, focar em otimizações de design, documentação detalhada de montagem e operação, e na seleção de componentes acessíveis, visando transformar o protótipo em uma solução mais robusta, replicável e com características de um produto final para o público maker, educacional ou pequenas oficinas.

Essas melhorias têm como objetivo transformar o protótipo atual em uma plataforma de manufatura digital mais completa, precisa, confiável e adequada a um espectro mais amplo de aplicações, tanto em ambientes educacionais e de pesquisa quanto em contextos de produção de pequena escala.

Referências Bibliográficas

- Craig, J. J. (2005). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 3 edition.
- Dassault Systèmes (2021). *SOLIDWORKS 2021: CAM Programming Guide*. Dassault Systèmes.
- DFRobot (2023). Manual do driver de motor de passo tb6600. Print de tela retirado para fins acadêmicos.
- Fórum Arduino (2022). Wire xyz cnc using arduino mega 2560 and tb6600 drivers. Imagem extraída de post público do fórum.
- GRBL Contributors (2023). Grbl: An open-source, embedded, high-performance g-code-parser and cnc milling controller. GitHub repository. Acesso em: 10 jul. 2024.
- Groover, M. (2011). *Automação industrial e sistemas de manufatura*. Pearson Education do Brasil.
- International Organization for Standardization (2012). Test code for machine tools – part 1: Geometric accuracy. Standard ISO 230-1, ISO, Genebra.
- Mazidi, M., Naimi, S., and Naimi, S. (2015). *AVR Microcontroller and Embedded Systems: Using Assembly and C: Pearson New International Edition*. Pearson Education.
- Pont, M. J. (2002). *Embedded C*. Pearson Education Limited, Harlow, United Kingdom.
- WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2022). Manual do inversor de frequência cfw300. Trecho extraído para fins acadêmicos.
- Wolf, W. (2001). *Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design*. Morgan Kaufmann.