



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Alex Lago de Oliveira

**Desenvolvimento de dispositivo CNC para corte de chapas finas de aço
carbono, com plasma de fluxo único**

Blumenau
2024

Alex Lago de Oliveira

Desenvolvimento de dispositivo CNC para corte de chapas finas de aço carbono, com plasma de fluxo único

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Alex Fabiano Bueno

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Luis Peixoto

Blumenau

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Oliveira, Alex Lago de
Desenvolvimento de dispositivo cnc para corte de chapas finas de aço carbono, com plasma de fluxo único / Alex Lago de Oliveira ; orientador, Alex Fabiano Bueno, coorientador, Fernando Luis Peixoto, 2024.
69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. CNC. 3. Corte Plasma. 4. Controle eletrônico. 5. Chapas metálicas. I. Bueno, Alex Fabiano. II. Peixoto, Fernando Luis. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. IV. Título.

Alex Lago de Oliveira

Desenvolvimento de dispositivo CNC para corte de chapas finas de aço carbono, com plasma de fluxo único

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 16 de Dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Orientador Prof. Dr. Alex Fabiano Bueno
Universidade Federal de Santa Catarina

Coorientador Prof. Dr. Fernando Luis
Peixoto
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Leonardo Mejia Rincon
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Maryah Elisa Morastoni Haertel
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e amigos.

AGRADECIMENTOS

Encerro com este trabalho o meu ciclo acadêmico, agradecendo especialmente aos meus queridos pais pela motivação, paciência e sabedoria durante toda a trajetória. Vocês me apoiaram e orientaram em cada passo, tornando possível a realização deste sonho.

Aos amigos que estiveram presentes nos últimos passos desta jornada, deixo meu mais sincero agradecimento. Vocês foram fundamentais para esta conclusão. Obrigado por todos os momentos compartilhados, especialmente aqueles regados a café, que tornaram os desafios mais leves e significativos.

A minha namorada, Clara Quarantani, que sempre esteve presente, me encorajando e auxiliando nos momentos tempestuosos, mostrando que o caminho é mais leve quando partilhado.

A todos que, de alguma forma, contribuíram e cruzaram meu caminho, mesmo que por um breve período, agradeço pelo aprendizado e pelas experiências proporcionadas. Cada contribuição foi essencial e marcou esta etapa da minha vida de forma única.

Ao meu orientador Professor Dr Alex Fabiano Bueno, pelos ensinamentos, pela confiança e oportunidades dentro do Laboratório de Expressão Gráfica (LABEX). Sentirei falta dos momentos partilhados.

Por fim, agradeço a Deus pela oportunidade de trilhar este caminho, pela força nos momentos de dificuldade e pela graça de alcançar esta conquista.

Ninguém é tão grande que não possa aprender, nem tão pequeno que não possa ensinar (ESOPO).

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo CNC para corte a plasma, projetado especificamente para chapas finas de aço carbono. Durante o desenvolvimento, foram abordados aspectos estruturais e eletrônicos, com ênfase na utilização de uma estrutura de pórtico móvel e no controle eletrônico via software Mach3® integrado a uma placa RNR Ecomotion. O projeto buscou balancear precisão técnica, eficiência e custo-benefício, apresentando soluções econômicas, como o reaproveitamento de materiais e o controle de corte via software. Os resultados mostraram que o dispositivo alcançou desempenho satisfatório, destacando a importância de ajustes em parâmetros de corte, como corrente e velocidade, para atender às demandas industriais e acadêmicas. Apesar das limitações observadas, o projeto reafirma sua aplicabilidade para pequenas e médias empresas, representando uma alternativa viável e econômica ao mercado de máquinas CNC comerciais. Melhorias futuras incluem a implementação de um controle de corte dedicado e o aumento da área útil de corte.

Palavras-chave: CNC; Corte Plasma; Controle eletrônico; Chapas metálicas.

ABSTRACT

This work aims to develop a CNC plasma cutting device specifically designed for thin carbon steel sheets. During development, structural and electronic aspects were addressed, emphasizing the use of a mobile gantry structure and electronic control via Mach3® software integrated with an RNR Ecomotion board. The project sought to balance technical precision, efficiency, and cost-effectiveness, presenting economical solutions such as material reuse and software-based cutting control. The results showed that the device achieved satisfactory performance, highlighting the importance of adjusting cutting parameters, such as current and speed, to meet industrial and academic demands. Despite observed limitations, the project reaffirms its applicability for small and medium-sized enterprises, representing a viable and cost-effective alternative to commercial CNC machines. Future improvements include implementing dedicated cutting control and increasing the effective cutting area.

Keywords: CNC; Plasma Cutting; Electronic Control; Metal Sheets.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de ponte fixa.	20
Figura 2 – Diagrama da eletrônica de controle.	21
Figura 3 – Bloco de comando G-code.	25
Figura 4 – Placa CNC Shield.	27
Figura 5 – Placa <i>RNR Ecomotion</i>	28
Figura 6 – Acionamento de bobinas em motor de passo	30
Figura 7 – Arquitetura de um sistema servo motor.	32
Figura 8 – Plasma a ar.	33
Figura 9 – Deflexão do jato plasma.	35
Figura 10 – Montagem da estrutura	38
Figura 11 – Guias roletes	39
Figura 12 – Diagrama do THC.	42
Figura 13 – Diagrama da eletrônica.	42
Figura 14 – Driver DM 556	44
Figura 15 – Visão geral dos componentes.	45
Figura 16 – Detalhe dos componentes internos e calhas de passagem.	46
Figura 17 – Fluxograma do processo de preparo para corte.	48
Figura 18 – Primeiro corte	50
Figura 19 – Corte ajustado	50
Figura 20 – Corte em chapa de espessura média	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre sistemas de guias	40
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Inversora de Frequência para Corte Plasma	43
Tabela 2 – Tabela de Custos	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
AC	<i>Alternating Current</i>
CAD	Projeto e Desenho Assistidos por Computador
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DC	<i>Direct Current</i>
FEA	Análise de Elementos Finitos
G-code	<i>Código G</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
M-code	<i>Código M</i>
PAC	<i>Plasma arc cutting</i>
PM	<i>Permanent Magnet</i>
THC	<i>Torch Height Control</i>
UGS	<i>Universal G-code Sender</i>
VR	<i>Variable Reluctance</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

X	Eixo horizontal de uma coordenada 3D
Y	Eixo de profundidade de uma coordenada 3D
Z	Eixo vertical de uma coordenada 3D
kHz	Kilo-hertz
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
V	Unidade de mediada para potencial elétrico (<i>Volts</i>)
A	Unidade de mediada para corrente elétrica (<i>ampère</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	APLICAÇÕES DE DISPOSITIVOS CNC	18
2.2	ESTRUTURA DE MÁQUINAS	18
2.3	SISTEMAS DE CONTROLE	21
2.3.1	Mach3®	21
2.3.2	LinuxCNC	22
2.3.3	GRBL	23
2.3.4	<i>Universal G-code Sender-UGS</i>	23
2.4	G-CODE	24
2.4.1	Sistema de Referência	25
2.4.1.1	<i>Zero da Máquina</i>	25
2.4.1.2	<i>Zero da Peça</i>	25
2.4.2	Sistema de Coordenadas	26
2.4.2.1	<i>Sistema Absoluto</i>	26
2.4.2.2	<i>Sistema Incremental</i>	26
2.5	ELETRÔNICA DE CONTROLE	26
2.5.1	CNC Shield	27
2.5.2	Controlador <i>RNR Ecomotion</i>	28
2.6	MOTORIZAÇÃO	29
2.6.1	Motores de Passo	29
2.6.2	Servo Motores	31
2.7	TOCHAS DE PLASMA	32
2.7.1	Variações do processo de corte a plasma	34
2.8	ANÁLISE DO CORTE A PLASMA CNC	34
2.8.1	Parâmetros de Corte	34
2.8.2	Precisão e Qualidade do Corte	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	PROJETO MECÂNICO	37
3.1.1	Estrutura	37
3.1.2	Guias de deslocamento	39
3.1.3	Motores	40
3.1.4	Sistemas de transmissão de potência	40

3.1.5	Mesa de Sacrifício	41
3.1.6	Controle de Altura da Tocha	41
3.2	PROJETO ELÉTRICO E ELETRÔNICO	42
3.2.1	Inversor de frequência	43
3.2.2	<i>drivers</i> de comando	43
3.2.3	Interface de Controle	44
3.2.4	Montagem do painel elétrico	45
3.2.5	Custos e Viabilidade Econômica	46
3.3	PROCESSO DE CORTE	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	ESTRUTURA E DISCUSSÃO DO PROJETO	49
4.2	DESEMPENHO DA MÁQUINA E PRECISÃO DO CORTE	49
4.3	ANÁLISE DO CONTROLE ELETRÔNICO E SOFTWARE	51
4.4	APROVEITAMENTO DA ÁREA ÚTIL DE CORTE	52
4.5	ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO	52
4.6	POTENCIAIS DE MELHORIA	52
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICE A – Desenho técnico eixo Z	60
	APÊNDICE B – Montagem estrutural	61
	APÊNDICE C – Montagem estrutura	65
	ANEXO A – Tabela de g-code	66

1 INTRODUÇÃO

A utilização de máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado) no corte de metais tem transformado a indústria metalúrgica, oferecendo maior precisão e eficiência aos processos de produção. O corte a plasma avançou tecnologicamente e se tornou uma solução eficaz para manufatura de chapas metálicas. Esse processo utiliza plasma de alta temperatura para derreter o metal, enquanto o excesso é removido por ar comprimido (STANGER *et al.*, 2020).

O uso de CNC no corte a plasma oferece diversos benefícios: redução no tempo de produção, melhoria no acabamento das peças e aumento da competitividade. Essas características tornam o sistema viável para indústrias que demandam alta precisão, como a de implementos rodoviários e a automobilística (CARDOSO JÚNIOR, 2024). Além disso, com *softwares* e dispositivos CNC (Controle Numérico Computadorizado), é possível reproduzir formas geométricas complexas que seriam difíceis de realizar manualmente (STANGER *et al.*, 2020).

No entanto, o alto custo de aquisição dessas máquinas pode ser um obstáculo, o que impulsionou o desenvolvimento de máquinas CNC próprias e mais acessíveis. Protótipos didáticos de máquinas de corte a plasma têm demonstrado eficácia na redução de custos, mantendo a precisão e funcionalidade exigidas pela indústria (STANGER *et al.*, 2020). Estudos indicam que o corte a plasma CNC é uma área em constante evolução, com foco na otimização dos controles e no uso eficiente de materiais, contribuindo para processos mais econômicos e sustentáveis (FRANÇA, 2021).

Dessa forma, o desenvolvimento de um dispositivo CNC específico para o corte de chapas finas de aço carbono, utilizando plasma de fluxo único, aparece como uma alternativa promissora para pequenos e médios empreendedores, proporcionando eficiência tecnológica e redução de custos operacionais (AVENI, 2023). Este trabalho visa propor uma solução CNC adaptada às necessidades do mercado, trazendo benefícios para o setor industrial de pequeno e médio porte, como também para o ambiente acadêmico.

A motivação surge da necessidade de oferecer uma alternativa acessível e eficiente ao mercado de corte de chapas metálicas, especialmente para pequenos e médios empreendedores. O alto custo de equipamentos CNC comerciais, junto com a demanda crescente por processos de manufatura precisos e econômicos, mostra a importância do desenvolvimento de um protótipo didático e funcional. Além de contribuir para a otimização dos processos industriais, este projeto também visa promover a disseminação do conhecimento técnico-científico no ambiente acadêmico, encorajando estudantes e profissionais a utilizarem esta tecnologia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um dispositivo CNC para corte de chapas finas de aço carbono utilizando uma tocha de plasma de fluxo único, com foco em alcançar alta precisão e eficiência no corte, oferecendo uma alternativa de baixo custo que atenda às demandas de pequenas empresas e instituições acadêmicas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral de desenvolver um dispositivo CNC para corte de chapas finas de aço carbono com tocha de plasma, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Implementar e integrar o sistema de movimentação linear e o controlador de hardware e software, garantindo o controle eficiente do sistema com foco na precisão posicional e no custo-benefício;
- b) Utilizar um controlador disponível no mercado, integrando o *software* com o *hardware*, com o objetivo de atender as necessidades de controle do sistema, respeitando os limites de custo;
- c) Realizar testes experimentais para analisar a qualidade do corte, a eficiência do sistema de controle e validar o equipamento em condições operacionais reais.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1: Introduz o tema a ser abordado no desenvolvimento do projeto, bem como os objetivos propostos;
- Capítulo 2: Apresenta uma revisão abrangente da literatura sobre o corte a plasma, o uso de máquinas CNC, o uso de plasma no corte de chapas de carbono, além de sistemas CNC;
- Capítulo 3: Descreve os materiais e métodos utilizados no projeto, incluindo o desenvolvimento e a construção do dispositivo CNC, o uso da tocha de plasma de fluxo único, bem como a integração dos componentes;
- Capítulo 4: Apresenta os resultados obtidos durante a fase de testes, assim como as discussões sobre a eficiência do equipamento e a qualidade do corte;
- Capítulo 5: Conclusão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 APLICAÇÕES DE DISPOSITIVOS CNC

Os sistemas CNC encontram aplicações variadas em setores industriais, educacionais e de pesquisa, com abordagens diversas implementadas para atender necessidades específicas.

Rahman et al. (2023) destacam o uso de máquinas CNC de bancada em projetos de pequeno porte em ambientes educacionais. Essas máquinas são ideais para educação e prototipagem, onde modularidade e baixo custo são essenciais. Sua portabilidade e capacidade de operar em espaços restritos as tornam populares em escolas técnicas e laboratórios de pesquisa. Cuzzuol e Siqueira (2023) também ressaltam a construção de uma fresadora CNC compacta, adequada para pequenas oficinas e projetos de prototipagem rápida.

Esses equipamentos têm sido combinados com tecnologias de manufatura aditiva, como a impressão 3D (Tridimensional), descrita por Krimpenis e Iordanidis (2023). Os autores desenvolveram uma máquina híbrida que une CNC e manufatura aditiva, oferecendo uma solução eficiente para produzir peças com geometrias complexas. Essa abordagem é especialmente útil na fabricação de materiais não metálicos, como polímeros e compósitos, onde a flexibilidade de design é essencial.

Outra aplicação comum das máquinas CNC está no corte de chapas metálicas finas, utilizando sistemas de corte a plasma. Tahseen e Jassar (2023) abordam o desenvolvimento de uma máquina de fresagem portátil, controlada por sistemas na nuvem, facilitando o corte e a usinagem de peças metálicas em ambientes industriais. O corte preciso de chapas de aço carbono é um dos maiores desafios desse processo, exigindo sistemas robustos e controladores eficientes.

Jaimes, Santaella e Díaz (2015) destacam o impacto das máquinas CNC nos processos industriais de manufatura, enfatizando sua capacidade de trabalhar com peças de alta complexidade e precisão, graças à interpolação multieixos, um processo que permite o controle simultâneo de múltiplos eixos em uma máquina CNC, permitindo maior precisão e complexidade nas peças produzidas e ao controle eficiente dos movimentos. Isso reforça a importância do uso deste tipo de equipamento tanto no setor industrial quanto no acadêmico.

2.2 ESTRUTURA DE MÁQUINAS

A rigidez estrutural é uma das principais características a serem consideradas no projeto de uma máquina CNC, pois afeta diretamente a precisão e a durabilidade da máquina durante o processo de manufatura. A estabilidade da estrutura é fundamental para garantir que a máquina seja capaz de resistir às forças geradas durante o corte,

minimizando vibrações e deformações que podem comprometer a qualidade do acabamento e a vida útil dos componentes (GUPTA; GOSWAMI; KHANDELWAL, 2021).

Para Krimpenis e Iordanidis (2023), a escolha dos materiais para a estrutura da máquina CNC desempenha um papel crucial na garantia de sua rigidez e estabilidade. O uso de perfis de alumínio, por exemplo, tem sido amplamente adotado devido à sua alta relação rigidez/peso e facilidade de montagem. Estudos recentes sobre máquinas CNC híbridas destacam essa escolha como uma solução eficiente, que combina leveza e robustez, permitindo uma montagem rápida e um desempenho estável.

Portanto demonstrou-se que a otimização estrutural, por meio de análise FEA (Análise de Elementos Finitos), possibilita o desenvolvimento de máquinas que suportam grandes forças sem comprometer a precisão, mantendo os custos de fabricação baixos. A análise de vibrações é igualmente importante, pois o cálculo adequado das frequências naturais da estrutura evita deformações durante o processo de usinagem, assegurando durabilidade e alto desempenho, mesmo em condições operacionais intensas. Estudos mostram que a redução de vibrações melhora significativamente a precisão do corte em materiais mais rígidos (KRIMPENIS; IORDANIDIS, 2023).

Além da rigidez estrutural, um fator relevante na concepção de máquinas CNC é a integração eficiente dos sistemas de movimentação e suporte de carga. De acordo com Oliveira (2019), componentes como guias lineares e fusos de esferas são essenciais para garantir que o sistema tenha uma operação suave e precisa, permitindo o controle adequado dos movimentos da máquina. As guias lineares suportam a carga, minimizando as deformações estruturais, enquanto os fusos de esferas convertem o movimento rotativo em movimento linear, garantindo precisão nos deslocamentos e minimizando o atrito. O uso desses componentes, aliado a uma estrutura rígida e bem dimensionada, garante a durabilidade e a precisão da máquina, fatores cruciais para a qualidade do corte CNC.

Rahman et al. (2023) discutem o desenvolvimento de uma máquina CNC de bancada de três eixos, cujo design compacto foi cuidadosamente otimizado para equilibrar robustez e facilidade de transporte. A adoção de uma abordagem modular permitiu que diferentes partes da estrutura fossem facilmente substituídas ou atualizadas, tornando o equipamento altamente versátil para diversas aplicações.

Essa modularidade também simplifica a manutenção, pois a substituição de componentes pode ser feita rapidamente, sem a necessidade de desmontar a máquina por completo. A flexibilidade da estrutura modular torna o equipamento adaptável a diferentes necessidades de produção, aumentando a eficiência em processos variados. O projeto leve e compacto, aliado à flexibilidade proporcionada pela estrutura modular, se apresenta como uma solução eficaz para ambientes com espaço limitado, sem comprometer a precisão e a funcionalidade da máquina.

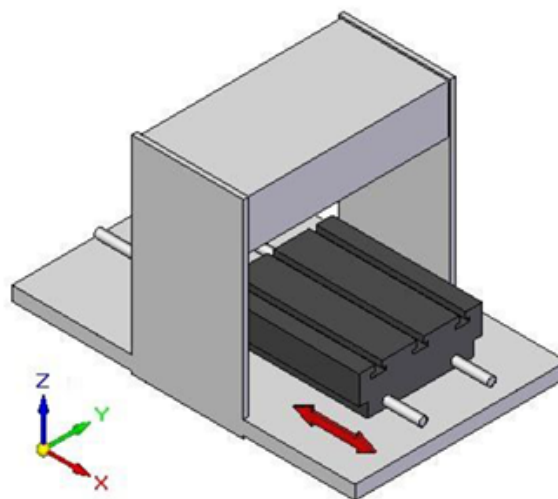
Entretanto, para projetos de máquinas CNC de grande porte, a escolha de materiais e a construção da estrutura tem suma importância para garantir a estabilidade e a

precisão necessárias. Um exemplo notável é o uso de componentes de fundição monobloco, que proporciona alta rigidez estrutural e excelente amortecimento de vibrações, como demonstrado por (KRIMPENIS; IORDANIDIS, 2023).

É citado também componentes fundidos em ferro cinzento, como GG25 e GG50, se destacam por absorver até três vezes mais vibrações em comparação com estruturas de aço soldado. Essa característica é crucial para garantir que a máquina mantenha a precisão dos cortes, mesmo sob cargas elevadas, prevenindo distorções e falhas nos movimentos durante a usinagem. Além disso, o reforço da estrutura interna, por meio da adição de elementos como nervuras ou reforços no pórtico, ajuda a preservar a rigidez necessária durante os movimentos dos eixos, minimizando as deformações. A combinação de uma construção sólida e um controle eficiente das vibrações garante maior durabilidade e qualidade nos processos de usinagem (KRIMPENIS; IORDANIDIS, 2023).

O uso de uma estrutura do tipo ponte fixa com mesa móvel foi adotado por Jaimes, Santaella e Díaz (2015), a solução proposta, ilustrada na Figura 1, oferece maior estabilidade em comparação com o tipo ponte móvel ou monobloco. Ao manter as colunas fixas e realizar o movimento no eixo X através da mesa, onde o material é ancorado, a solução proposta oferece uma maior estabilidade em comparação com o tipo ponte móvel, ou monobloco.

Figura 1 – Estrutura de ponte fixa.



Fonte: (JAIMES; SANTAELLA; DÍAZ, 2015)

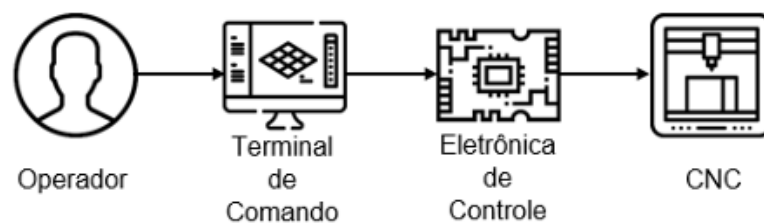
Essa abordagem reduz a complexidade do sistema, uma vez que mover o material é mais eficiente do que deslocar toda a estrutura da ponte, no entanto, essa abordagem limita o tamanho da peça a ser processada. Durante os testes de funcionamento, o uso de aço estrutural na base, colunas e suportes laterais provou ser eficaz, garantindo a estabilidade necessária ao conjunto. Além disso, o sistema de barras estabilizadoras e guias deslizantes desempenhou eficazmente a função de unir de maneira robusta as colunas da estrutura, o que contribuiu para a precisão dos resultados obtidos. Os autores destacam que o uso de

fusos de esferas foi fundamental para o bom funcionamento do projeto, proporcionando baixo atrito e alta precisão, facilitando a conexão entre o motor e a mesa móvel, ou monobloco (JAIMES; SANTAELLA; DÍAZ, 2015).

2.3 SISTEMAS DE CONTROLE

A operação de uma máquina CNC requer o auxílio de computadores e microprocessadores, os quais são responsáveis pela conversão de dados virtuais em comandos elétricos. Como ilustrado na Figura 2, o sistema de controle CNC adota uma arquitetura composta por componentes como *drivers* de motor, placas de interface e microcontroladores. Esses elementos são responsáveis por receber os comandos do *software* de controle e enviá-los para os atuadores da máquina, permitindo a movimentação precisa dos eixos e a execução das tarefas programadas (OLIVEIRA, 2019).

Figura 2 – Diagrama da eletrônica de controle.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019)

No contexto dos sistemas de controle CNC, o uso de controladores multicritério tem se mostrado cada vez mais eficiente, especialmente em processos que requerem o ajuste simultâneo de múltiplos parâmetros operacionais. Segundo Das e Chakraborty (2023), esses controladores são fundamentais para o gerenciamento preciso dos movimentos e do posicionamento dos eixos, permitindo otimizar múltiplos critérios, como velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte, de forma integrada. Além de realizar funções complexas, como a interpolação de eixos e o gerenciamento de sinais digitais de entrada e saída, os controladores multicritério garantem uma operação equilibrada e eficiente. Esses sistemas modernos também oferecem interfaces amigáveis ao operador, facilitando a configuração e interpretação dos códigos inseridos.

2.3.1 Mach3®

Entre os sistemas mais utilizados, está o Mach3¹, que transforma um computador pessoal em um controlador CNC, processando comandos de G-code para controlar o movimento de motores de passo e servo motores. Devido à sua versatilidade e facilidade de

¹Disponível em: <https://www.machsupport.com/software/mach3/>. Acesso em: 25 set. 2024.

configuração, o Mach3 é empregado em diversas máquinas, incluindo cortadoras a plasma, fresadoras e impressoras 3D (HARJA *et al.*, 2023).

Esse controlador é frequentemente combinado com motores de passo ou servo motores, conforme a demanda por precisão e torque.. O Mach3, por exemplo, suporta múltiplos eixos, como X , Y e Z e A , sendo ideal para aplicações que exigem movimentação coordenadas em diversas direções. Além disso, oferece uma interface gráfica intuitiva, que simplifica a configuração de parâmetros como velocidade do motor e endereços de portas (HUY, 2023).

Outro ponto importante é a capacidade de comunicação do controlador com diversos componentes da máquina, integrando periféricos como *drivers* de motor de passo, motores AC (*Alternating Current*), botões de emergência e sensores de fim de curso, independentemente do fabricante. Isso proporcionando flexibilidade tanto para aplicações industriais quanto educacionais (HARJA *et al.*, 2023).

2.3.2 LinuxCNC

Outro controlador popular é o LinuxCNC², uma plataforma de código aberto amplamente utilizada em projetos de automação CNC. Desenvolvido com base em uma arquitetura aberta, o LinuxCNC é conhecido por sua flexibilidade, permitindo que os usuários configurem quase todos os aspectos do sistema, desde o controle dos motores até a integração com *hardware* externo.

Uma das principais vantagens do LinuxCNC é sua capacidade de operar em tempo real, o que o torna ideal para aplicações que exigem alto nível de precisão e estabilidade, como sistemas de multieixos. Rakic et al. (2021) destacam que o LinuxCNC é capaz de se integrar com máquinas virtuais e simulações, permitindo a verificação prévia de programas em G-code antes da execução, o que é crucial para evitar erros e colisões em sistemas complexos (RAKIC *et al.*, 2021).

Destaca-se como uma solução de controle amplamente acessível e de baixo custo para projetos de automação, sendo uma excelente opção para laboratórios educacionais e protótipos. O LinuxCNC provou ser uma plataforma confiável para o desenvolvimento de mini máquinas CNC, especialmente em ambientes de ensino, onde é necessário realizar a simulação e o controle simultâneo de máquinas reais e virtuais. A implementação de um sistema de controle de arquitetura aberta, como o LinuxCNC, permite flexibilidade na adaptação de novos conceitos e na integração de ferramentas educacionais acessíveis, tornando-o uma solução viável tanto para a revitalização de máquinas existentes quanto para a construção de novas ferramentas CNC para fins educacionais e de pesquisa (ZIVANOVIC *et al.*, 2020).

²Disponível em: <https://linuxcnc.org/>. Acesso em: 25 set. 2024.

2.3.3 GRBL

O GRBL³ é uma solução de controle de movimento para fresadoras CNC, amplamente utilizada devido ao seu alto desempenho, sendo de código aberto, uma alternativa eficiente aos controladores baseados em porta paralela. Projetado para operar em placas *Arduino*⁴, com microcontroladores *Atmega 328*, o GRBL é escrito em linguagem C otimizada, explorando ao máximo as funcionalidades dos chips *AVR*. Dessa forma, o sistema alcança até 30 *kHz* de pulsos de controle estáveis e sem interferências significativas, oferecendo uma precisão significativa para dispositivos CNC. A documentação de desenvolvimento e funcionamento do *software* também encontra-se na plataforma *GitHub*⁵ e é constantemente atualizada.

Com suporte completo para comandos G-code padrões, o GRBL tem sido testado com diversas ferramentas CAM (*Computer Aided Manufacturing*) sem apresentar problemas, sendo capaz de executar arcos, círculos e movimentos helicoidais. Embora não suporte funções avançadas como macros, a sua estrutura modular permite que interfaces gráficas GUI (*Graphical User Interface*) gerenciem esses comandos, traduzindo-os em G-code básico. Além disso, o GRBL oferece um robusto gerenciamento de aceleração com previsão de até 18 movimentos futuros, garantindo transições suaves e sem solavancos, característica essencial para operações que exigem alta precisão.

2.3.4 Universal G-code Sender-UGS

O UGS (*Universal G-code Sender*)⁶ é uma plataforma abrangente para o envio de comandos G-code (*Código G*), amplamente utilizada em controladores CNC avançados, como o *GRBL*. Esta aplicação Java é autossuficiente e inclui todos os componentes necessários. Se o *Java Runtime Environment*⁷ estiver instalado, o UGS cuida de todo o processo. No entanto, o programa não gera G-code nem converte imagens em comandos, sua função principal é enviar comandos para as máquinas CNC. Para gerar G-code a partir de imagens, é necessário o uso de *software* externo, como o *Inkscape*⁸, que converte desenhos ou modelos em comandos G-code (VEERAMONY; ZAHID, 2022).

Uma das grandes vantagens do seu uso, é a capacidade de simular o caminho da ferramenta. Oferece uma GUI que permite a visualização dos movimentos da ferramenta em tempo real, garantindo que os motores operem conforme programado. Isso garante que o processo de usinagem siga o modelo projetado.

³Disponível em: <https://github.com/grbl/grbl>. Acesso em: 25 set. 2024.

⁴Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e *software* fáceis de usar. Disponível: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 25 set. 2024.

⁵GitHub é uma plataforma de hospedagem de código-fonte com controle de versão. Ele permite que programadores e usuários contribuam em projetos de forma colaborativa e organizada.

⁶Disponível em: https://winder.github.io/ugs_website/. Acesso em: 25 set. 2024.

⁷Java Runtime Environment (JRE) é necessário para a execução de aplicações em Java. Disponível em: <https://www.java.com/en/download/manual.jsp>. Acesso em: 25 set. 2024.

⁸Disponível em: <https://inkscape.org/pt-br/>. Acesso em: 25 set. 2024.

De acordo com Veeramony e Zahid (2022), o UGS foi utilizado para controlar motores de passo em uma máquina CNC modular, verificando o caminho das ferramentas com precisão em simulações 2D (Bidimensional) e 3D. Além disso, o *software* identifica erros no código G-code antes da execução, proporcionando uma interface confiável e intuitiva para a usinagem de peças complexas.

Essa combinação de recursos o torna uma escolha popular para o controle e a visualização de projetos em máquinas CNC, integrando-se perfeitamente a sistemas como o *GRBL* proporcionando uma interface prática para a execução de projetos de manufatura e usinagem.

2.4 G-CODE

O G-code é uma linguagem de programação amplamente utilizada no controle de máquinas CNC. Ele foi criado para padronizar a comunicação entre o *software* de controle e o *hardware* da máquina, facilitando a especificação precisa dos movimentos e operações que devem ser executados. De acordo com Veeramony e Zahid (2022), o G-code funciona como a principal interface para enviar instruções a máquinas CNC modulares, controlando eixos e componentes baseados em plataformas como o *Arduino*, usando *firmwares* como o GRBL.

Para Jaimes, Santaella e Díaz (2015), o G-code desempenha um papel crucial na precisão e eficiência do processo de manufatura, pois permite o controle fino dos movimentos da máquina, incluindo funções como interpretação multieixos, o que é fundamental para a fabricação de peças de alta complexidade. No Anexo A, encontra-se a tabela completa dos G-code usados em máquinas CNC.

Segundo Kumar, Ranjan e Davim (2020), o G-code é dividido em diferentes categorias de funções, conhecidas como códigos preparatórios (G-code) e códigos auxiliares (M-code). O G-code são usados para controlar os movimentos geométricos da máquina, como o posicionamento e deslocamento linear e circular das ferramentas de corte. Por exemplo, comandos como G01 e G02 são usados para a interpolação linear e circular, respectivamente, enquanto o G00 realiza movimentações rápidas ponto a ponto. Além disso, os M-codes servem para controlar funções auxiliares, como ligar ou desligar o resfriamento (M08, M09) e controlar a ativação da ferramenta de trabalho, como o *spindle* (M03, M04), sendo controlada pelo código S.

Os autores explicam que a programação do G-code segue uma estrutura hierárquica composta por caracteres, palavras, blocos e programas. Cada palavra de código instrui a máquina sobre uma ação específica, como movimentação, velocidade de corte, velocidade de avanço, ou seleção de ferramentas. Ela permite a criação de programas modulares e altamente específicos para operações em máquinas CNC, tornando possível executar tarefas complexas de usinagem de forma automatizada e precisa (KUMAR; RANJAN; DAVIM, 2020).

Denota-se então que há junção de palavras e blocos para a criação dos programas, começando com um número de sequência seguido por um bloco de instruções em uma ordem lógica. Na figura 3, encontra-se um bloco de comando que será interpretado por um programa CAM (*Computer Aided Manufacturing*).

Figura 3 – Bloco de comando G-code.

N01 G00 X01 Y05 F200 S000 T01 M30 EOB		
N	—————>	Sequência de números
G	—————>	Modo de operação
X	—————>	Coordenada X
Y	—————>	Coordenada Y
F	—————>	Taxa de avanço
S	—————>	Velocidade do <i>Spindle</i>
T	—————>	Troca de ferramenta
M	—————>	Funções sobressalentes
EOB	—————>	<i>End of Block</i>

Fonte: Adaptada de Kumar, Ranjan, e Davim (2020)

2.4.1 Sistema de Referência

Nas máquinas CNC, o sistema de referência é essencial para determinar a posição precisa da ferramenta em relação à peça de trabalho e à própria máquina. Segundo Kumar, Ranjan e Davim (2020), o sistema de referência utiliza pontos específicos, como o zero da máquina e o zero da peça, para controlar os movimentos das ferramentas com precisão.

2.4.1.1 Zero da Máquina

O zero da máquina, ou ponto de referência ou posição inicial, é o ponto de origem fixo dentro da máquina CNC a partir do qual todas as posições das ferramentas são calculadas. Esse ponto é definido pelo fabricante e varia entre diferentes tipos de máquinas, servindo como referência global para os movimentos. A localização exata do zero da máquina é crucial para garantir que todas as operações sejam executadas corretamente (Kumar, Ranjan, e Davim, 2020).

Este modo de referência é utilizado toda vez que há o início de operação do equipamento CNC, definindo para o controlador onde ele se localiza no espaço interno da máquina (OLIVEIRA, 2019).

2.4.1.2 Zero da Peça

O zero da peça, ou ponto de referência da peça de trabalho, é definido pelo programador e está localizado em um ponto, linha ou superfície específica da peça que está sendo processada. Essa referência permite que todos os movimentos da ferramenta sejam calculados com base na peça de trabalho em vez de na estrutura da máquina. A relação

entre o zero da peça e o zero da máquina deve ser bem compreendida para que o programador ajuste corretamente as coordenadas e garantir que a usinagem seja executada de forma correta (KUMAR; RANJAN; DAVIM, 2020).

2.4.2 Sistema de Coordenadas

O sistema de coordenadas é o grande diferencial na manufatura CNC, pois define como as posições das ferramentas são calculadas e controladas. Para Kumar, Ranjan e Davim (2020), existem dois tipos principais de sistemas de coordenadas utilizados em programas CNC: o sistema absoluto e o sistema incremental.

2.4.2.1 Sistema Absoluto

No sistema absoluto, todos os comandos de movimento são referenciados a um ponto de origem fixo, conhecido como ponto zero. Nesse sistema, as coordenadas indicadas representam diretamente a distância entre a posição atual da ferramenta e a origem da peça. Isso significa que, para cada movimento, o sistema se refere ao ponto zero, garantindo maior precisão ao seguir as dimensões especificadas no projeto da peça (KUMAR; RANJAN; DAVIM, 2020).

2.4.2.2 Sistema Incremental

Já no sistema incremental, o ponto de referência para os movimentos da ferramenta é a última posição da própria ferramenta. Cada novo movimento é calculado com base na distância entre a posição atual e a anterior, ou seja, o ponto de origem se desloca a cada nova instrução. Isso pode ser vantajoso em operações onde pequenas correções contínuas são necessárias durante o processo de usinagem (KUMAR; RANJAN; DAVIM, 2020).

2.5 ELETRÔNICA DE CONTROLE

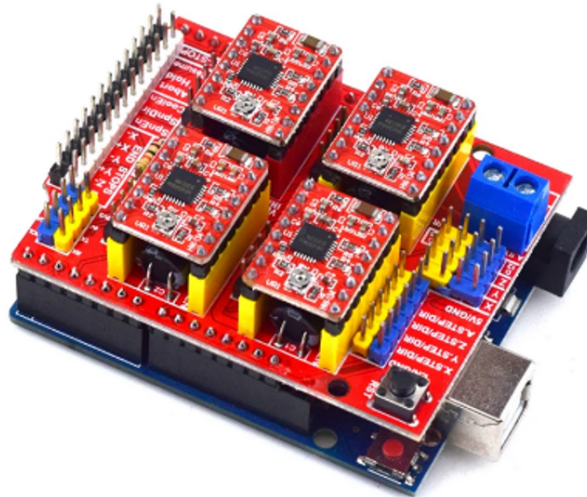
A eletrônica de controle é crucial para o funcionamento eficiente das máquinas CNC, garantindo que os comandos do *software* sejam convertidos em ações precisas nos motores e componentes. A escolha adequada de *drivers*, microcontroladores e sensores é essencial para manter a precisão e o desempenho, especialmente em sistemas de pequeno e médio porte. A integração eficiente desses elementos permite o controle coordenado dos eixos, minimizando erros e otimizando o fluxo de trabalho, enquanto os sistemas de feedback, quando aplicados, garantem que o equipamento opere com máxima precisão e qualidade (OLIVEIRA, 2019).

Abaixo serão explorados outros equipamentos eletrônicos de controle de mesmo propósito, utilizado por outros autores.

2.5.1 CNC Shield

No desenvolvimento de uma máquina CNC de bancada de três eixos, (RAHMAN *et al.*, 2023) destaca a utilização de uma interface de controle simples e acessível, baseada no *Arduino*, que facilita a operação e o controle dos motores de passo, ilustrada na figura 4. Essa abordagem oferece uma solução modular e de baixo custo, adaptável a diferentes necessidades de aprendizado e experimentação.

Figura 4 – Placa CNC Shield.



Fonte: Imagem retirada de *DIY Engineers*, 2024.

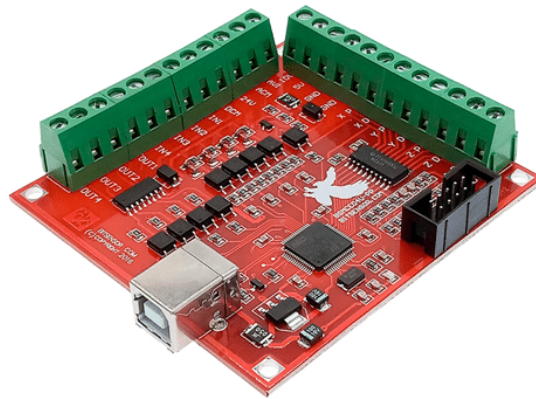
O *CNC Shield*, acoplado ao *Arduino*, foi implementado para gerenciar até três eixos da máquina, proporcionando controle preciso dos motores de passo e facilitando a configuração dos *drivers*. Com essa interface, os eixos *X*, *Y* e *Z* são controlados de forma eficiente, permitindo ajustes flexíveis de velocidade e posição. Além disso, a modularidade do *CNC Shield* possibilita a integração de periféricos adicionais, como sensores de fim de curso, e facilita futuras melhorias conforme as necessidades do projeto. A combinação de simplicidade, versatilidade e baixo custo torna o *CNC Shield* uma escolha popular em sistemas educacionais, onde a facilidade de uso e manutenção contínua são essenciais (RAHMAN *et al.*, 2023).

Oliveira (2019) adotou essa solução em seu projeto de uma fresadora CNC de bancada, utilizando o *CNC Shield* acoplado ao *Arduino UNO* para controlar os motores de passo. Essa configuração permitiu integração fácil dos *drivers* de motor de passo A4988 e conectar sensores de fim de curso, garantindo o controle preciso dos eixos da máquina. A escolha pelo *CNC Shield* foi motivada por sua flexibilidade e compatibilidade com outros componentes modulares, proporcionando uma solução prática para projetos de baixo custo.

2.5.2 Controlador *RNR Ecomotion*

No projeto de uma máquina CNC de fresagem tipo portal de pequeno porte, o controlador *BSMCE04U-PP*, Figura 5, foi escolhido por sua capacidade de controlar até quatro eixos com alta precisão. Esse controlador utiliza um microcontrolador STM32 e opera com uma frequência de até 100 kHz , o que garante uma resposta rápida e eficiente aos comandos de movimento. Além disso, o controlador permite integrar com motores de passo e sensores de posição, proporcionando um controle robusto e flexível da máquina. Sua interface USB facilita a comunicação com computadores e outros dispositivos, tornando-o uma escolha popular para projetos que exigem alta precisão e flexibilidade de controle (TAHSEEN; JASSAR, 2023).

Figura 5 – Placa *RNR Ecomotion*.



Fonte: Imagem retirada de MAKER HERO, 2024.

Além de sua capacidade de controlar múltiplos eixos com precisão, o *BSMCE04U-PP* se destaca pela facilidade de integração com diversos componentes periféricos, como inversores e sensores de fim de curso, o que o torna altamente versátil. O controlador suporta funções de interpolação linear e circular, permitindo o controle suave dos movimentos da máquina CNC em trajetórias complexas. Outro diferencial importante é a sua interface gráfica amigável, que facilita a configuração dos parâmetros e a monitorização em tempo real. Isso o torna ideal para projetos de pequeno e médio porte que exigem um alto nível de controle e personalização, sem comprometer a simplicidade de uso (TAHSEEN; JASSAR, 2023).

Cuzzuol e Siqueira (2023) utilizaram a placa *RNR Ecomotion (BSMCE04U-PP)* como solução central para a eletrônica de controle. A escolha desse controlador foi motivada por sua eficiência no gerenciamento de até quatro eixos e sua compatibilidade com o *software* Mach3, amplamente utilizado em projetos de automação CNC. A placa permite a integração de motores de passo e *drivers*, além de facilitar a conexão com sensores de fim de curso, garantindo o controle preciso dos movimentos dos eixos. O projeto destacou

que essa solução oferece excelente relação custo-benefício, sendo ideal para projetos de pequeno e médio porte, que demandam flexibilidade e precisão.

Apesar das vantagens oferecidas pela *RNR Ecomotion*, Cuzzuol e Siqueira (2023) mencionaram um desafio no projeto: a necessidade de um módulo conversor de sinal *PWM* para assegurar a compatibilidade com inversores de frequência. Isso se deve ao fato de que, em alguns casos, o sinal emitido pela placa pode não ser diretamente compatível com certos periféricos, mesmo quando corretamente configurados. Ainda assim, com a implementação desse módulo adicional, o sistema operou de forma estável e confiável, oferecendo um controle robusto e garantindo que a router CNC cumprisse suas funções de maneira eficiente e precisa (CUZZUOL; SIQUEIRA, 2023).

2.6 MOTORIZAÇÃO

A motorização é um dos elementos mais críticos no desempenho de máquinas CNC, influenciando diretamente a precisão, a velocidade e a força aplicada durante a manufatura, independente de qual seja. Entre as opções mais utilizadas, destacam-se os motores de passo e os servo motores, cada um com suas características específicas. A escolha entre essas tecnologias depende das exigências da aplicação, variando de acordo com fatores como o tipo de material a ser trabalhado, a complexidade do projeto e a demanda por precisão e eficiência (GILL, 2009).

Para máquinas CNC de bancada, como observado por Oliveira (2019), os motores de passo costumam ser a opção mais vantajosa devido ao seu baixo custo e à facilidade de controle. Esses motores são ideais para projetos que exigem alta precisão de posicionamento sem a necessidade de grandes forças ou altas velocidades.

Por outro lado, em aplicações mais complexas, como em máquinas CNC de grande porte ou que operam em altas velocidades e com materiais mais resistentes, os servo motores são recomendados por sua capacidade de oferecer maior torque, controle dinâmico e velocidade de resposta (BABALLE *et al.*, 2022).

Assim, a escolha do tipo de motorização deve considerar não apenas o custo, mas também os requisitos técnicos de cada aplicação, buscando o equilíbrio entre desempenho e viabilidade econômica.

2.6.1 Motores de Passo

Brites (2008) explica que os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos, gerando variações angulares discretas. O eixo do motor de passo, ou rotor, é rotacionado em pequenos incrementos angulares, chamados de "passos". Esses movimentos ocorrem quando pulsos elétricos são aplicados de forma sequencial nos terminais do motor.

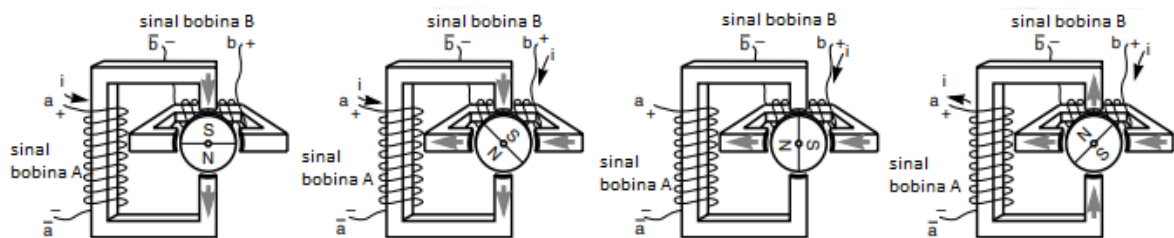
Os motores de passo realizam rotações por meio de pequenos incrementos controla-

dos, e cada passo corresponde a uma sequência de pulsos elétricos aplicados. O número de passos realizados está diretamente relacionado à quantidade de pulsos recebidos, enquanto a velocidade de rotação é determinada pela frequência desses pulsos. A direção de rotação é controlada pela ordem de aplicação dos pulsos (GRANT, 2005). Na Figura 6 observa-se o funcionamento de um motor de passo.

Brites e Almeida Santos (2008) afirmam que o acionamento das bobinas de motores de passo utilizando *PWM*, é uma técnica eficiente para controlar a corrente aplicada ao motor, permitindo um controle preciso do torque e da velocidade. O *PWM* funciona alternando rapidamente a tensão aplicada às bobinas, com a largura dos pulsos (*duty cycle*), determinando a quantidade de energia fornecida.

Essa modulação é essencial para manter o motor estável e evitar o superaquecimento, especialmente em baixas velocidades, onde o controle da corrente se torna crítico para garantir movimentos suaves e evitar vibrações. O uso de PWM em motores de passo permite ajustar dinamicamente o torque sem a necessidade de alterar a tensão diretamente, otimizando a eficiência do sistema (BRITES; ALMEIDA SANTOS, 2008).

Figura 6 – Acionamento de bobinas em motor de passo



Fonte: Adaptada de Grant (2005).

Existem dois tipos principais de motores de passo: o motor de ímã permanente PM (*Permanent Magnet*) e o motor de relutância variável VR (*Variable Reluctance*). O motor de ímã permanente utiliza forças entre ímãs permanentes e eletroímãs para criar movimento, apresentando alguma resistência magnética mesmo quando não energizado. Já o motor de relutância variável, que não utiliza ímãs permanentes, depende inteiramente dos campos eletromagnéticos gerados pelas bobinas sem oferecer resistência quando o motor está desligado (GRANT, 2005).

Além disso, a rotação do eixo está diretamente relacionada aos pulsos elétricos recebidos, e a sequência desses pulsos determina a direção de rotação do motor. A frequência dos pulsos controla a velocidade de rotação, e o ângulo rotacionado é proporcional ao número de pulsos aplicados (BRITES; ALMEIDA SANTOS, 2008).

Morar (2015) destaca que a modelagem e simulação de motores de passo podem melhorar seu desempenho, especialmente quando combinados com *drivers* de micropasso. Essa técnica suaviza o movimento e aumenta a precisão, sendo um recurso importante

em sistemas CNC que requerem controle refinado, uma vez que motores de passo, por natureza, não possuem um sistema integrado de *feedback* de posicionamento do seu eixo.

2.6.2 Servo Motores

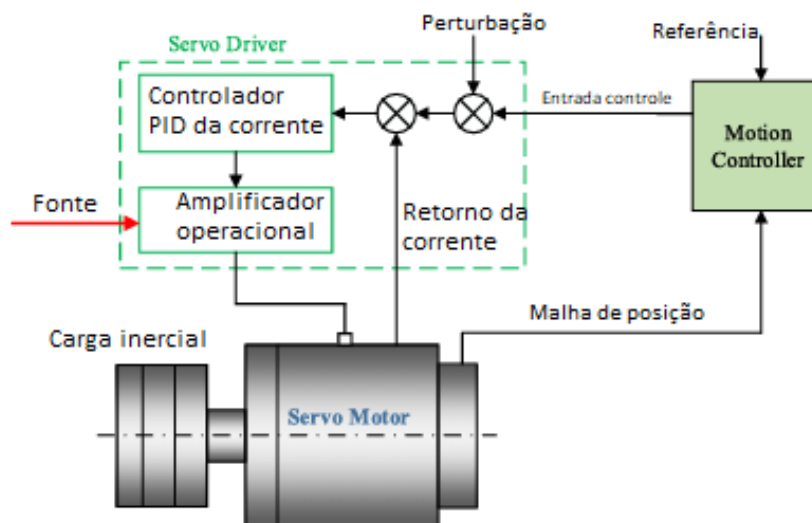
Os servo motores podem ser classificados em categorias como servo motores de corrente contínua (DC), servo motores de corrente alternada (AC), servo motores de rotação contínua e servo motores lineares. Cada um desses tipos possui características específicas que os tornam adequados para diferentes aplicações (BABALLE *et al.*, 2022).

Ambos motores são amplamente utilizados em aplicações industriais devido à sua capacidade de controlar com alta precisão a posição do eixo, graças ao uso de sistemas de *feedback*, como encoders ou sensores de posição. Métodos de controle como modulação por largura de pulso (*PWM*), controle vetorial e controle baseado em lógica *fuzzy* são frequentemente aplicados, cada um com suas vantagens específicas dependendo da aplicação (AUTSOU *et al.*, 2024).

Uma das principais vantagens dos servo motores é a capacidade de ajustar dinamicamente torque e velocidade, o que os torna ideais para aplicações que requerem ajustes contínuos de posição e força. Em comparação com os motores de passo, os servo motores oferecem maior torque e velocidade, sendo mais indicados para aplicações que demandam força elevada e controle dinâmico. Por exemplo, os servo motores AC, equipados com *feedback* de encoders, permitem ajustes contínuos de posição e garantem precisão mesmo em altas velocidades (BABALLE *et al.*, 2022).

O controle de servo motores envolve uma malha de controle fechada, onde a posição e a velocidade do motor são constantemente ajustadas com base no *feedback* fornecido por sensores, como encoders. Li e Zhu (2019) explicam que o sistema de controle de um servo motor consiste em uma combinação *PWM* para controlar a potência aplicada ao motor, juntamente com o *feedback* de posição e velocidade para garantir ajustes dinâmicos durante a operação. A Figura 7 ilustra o sistema de controle típico de um servo motor, onde o controlador recebe o *PWM* do sensor e ajusta os sinais de controle para manter a precisão de torque e posição.

Figura 7 – Arquitetura de um sistema servo motor.



Fonte: Adaptada de Li e Zhu (2019)

Esses motores são particularmente vantajosos em máquinas CNC de grande porte, onde o feedback em tempo real possibilita um controle de posição rigoroso, essencial para operações que exigem altíssima precisão e velocidades elevadas (CUZZUOL; SIQUEIRA, 2023).

2.7 TOCHAS DE PLASMA

Com o crescimento da demanda por artefatos industriais, tornou-se necessária a melhoria dos processos de corte a plasma já existentes. Uma das inovações surgiu no corte de metais, que antes era amplamente realizado pelo método oxicorte. Esse avanço levou ao aumento do uso do corte a plasma com ar comprimido ou gases diversos, um processo que oferece vantagens significativas em relação ao oxicorte (SUMIG, 2021).

O plasma, como a quarta forma da matéria, desempenha um papel fundamental nos processos de corte a plasma devido à sua capacidade de concentrar energia em um jato de alta temperatura e velocidade. Essa característica possibilita cortes precisos em materiais condutores, como aço e alumínio. As altas temperaturas geradas pelo plasma, permitem que o material seja rapidamente fundido e removido, enquanto a pressão do jato de gás auxilia na expulsão do material derretido, garantindo um corte limpo e eficiente (SUBHAN *et al.*, 2020).

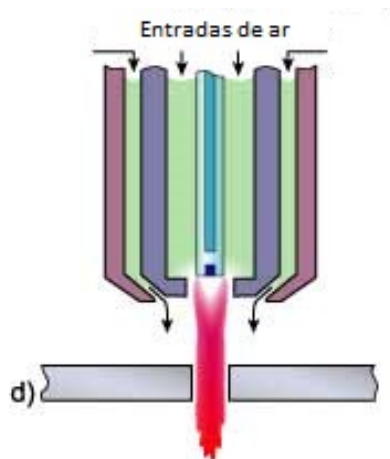
A qualidade do corte é influenciada por vários fatores, incluindo temperatura, pressão e composição do gás de corte. Por exemplo, materiais mais espessos podem exigir correntes mais altas e velocidades de corte mais baixas para garantir que o calor penetre completamente na espessura do material. Tal que materiais finos podem ser cortados em velocidades mais altas, embora isso possa aumentar a incidência de rebarbas ou desvios do feixe de plasma, dependendo do ajuste de parâmetros como distância da tocha e pressão

do gás. Esta forma desempenha um papel crítico no corte a plasma (PAC (*Plasma arc cutting*)), sendo responsável pela manufatura de componentes em vários ambitos (SUBHAN *et al.*, 2020).

Como destacado por (RAMAKRISHNAN *et al.*, 1997), o arco de plasma gerado precisa ter alta densidade de energia e pressão para garantir cortes precisos.

A produção de plasma em uma tocha de corte (PAC), como visto na figura 8, inicia-se com a ionização de um gás, como ar comprimido ambiente ou oxigênio, quando uma corrente elétrica de alta potência é aplicada. O arco elétrico é gerado entre o eletrodo da tocha e o material a ser cortado, elevando rapidamente a temperatura do gás e separando os elétrons de seus átomos. Essa separação cria uma mistura de íons e elétrons. A eficiência da formação do plasma depende da combinação de corrente elétrica, tipo de gás e design do bico (FRETTON *et al.*, 2002).

Figura 8 – Plasma a ar.



Fonte: Adaptada de Twi (2024)

Uma vez formado, o plasma é expelido através de um bico estreito, o que aumenta sua velocidade e densidade de energia. Esse efeito de constrição mantém a temperatura elevada e permite que o jato atinja o material com precisão. Em tochas que utilizam oxigênio, é possível gerar um jato mais energético, ideal para cortes em metais como o aço. Isso resulta em cortes mais limpos e precisos, com menor quantidade de material derretido (GHORUI; HEBERLEIN; PFENDER, 2007).

Magid (2021) explica que esse processo oferece vantagens significativas em comparação com métodos tradicionais de corte térmico, como corte com oxicomustível, laser e jato de água abrasivo. Ele é especialmente eficiente para cortar materiais com alta resistência e alto ponto de fusão, pois proporciona cortes com perfil estreito, bordas limpas e menor deformação da peça. Para otimizar a qualidade do corte, é essencial ajustar variáveis como a pressão do gás plasma, a velocidade de corte e a potência aplicada, garantindo alcançar as melhores condições para o material específico.

2.7.1 Variações do processo de corte a plasma

O processo de corte a plasma possui várias variações que foram desenvolvidas para atender às necessidades específicas de diferentes materiais e exigências de precisão. Uma das técnicas comuns é o corte com dois fluidos distintos, que utiliza dois gases separados: um para formar o arco de plasma e outro como gás de proteção. Essa configuração proporciona maior estabilidade ao arco e melhora a qualidade do corte (KUDŽMA, 2017).

Kudzma (2017) explica que a injeção de água no processo de corte atua aumentando a densidade do arco e reduzindo a dispersão do calor. Essa técnica proporciona um controle mais preciso do corte e diminui os danos térmicos na região ao redor da área trabalhada.

Contudo, o plasma a ar é uma opção popular por seu custo-benefício, usando ar comprimido como gás de plasma, o que o torna versátil e adequado para metais ferrosos e não ferrosos de espessura média. Embora seja menos preciso em comparação com outros gases especializados, ele proporciona uma excelente relação entre custo e eficiência, tornando-o ideal para aplicações onde o orçamento é uma consideração importante. Além disso, o plasma a ar tem a vantagem de ser amplamente acessível e de fácil utilização, especialmente em ambientes de pequena e média escala. No entanto, é importante considerar que o uso de ar como gás de plasma pode gerar uma zona termicamente afetada maior e bordas com um nível de acabamento inferior quando comparado a métodos de alta precisão, como o plasma de alta tolerância (MAGID, 2021).

2.8 ANÁLISE DO CORTE A PLASMA CNC

Serão analisados os principais fatores que influenciam a qualidade e precisão do corte a plasma em chapas metálicas utilizando uma máquina CNC. A análise considera parâmetros técnicos e operacionais fundamentais para a obtenção de cortes consistentes e de alta qualidade.

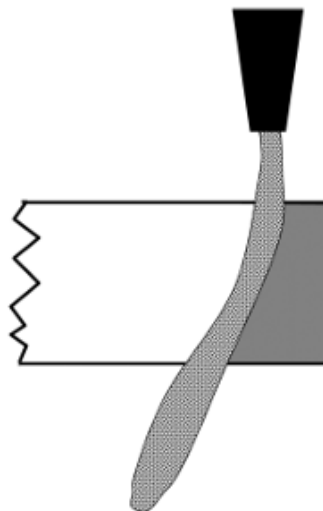
2.8.1 Parâmetros de Corte

A qualidade do corte a plasma depende fortemente dos parâmetros operacionais configurados, tais como velocidade de corte, corrente de corte e pressão do gás. A velocidade ideal proporciona um equilíbrio entre produtividade e qualidade de corte, evitando rebarbas e deformações. O ajuste adequado desses parâmetros é crucial para atender às demandas de qualidade e produtividade em diferentes materiais e espessuras (MAGID, 2021).

A velocidade de avanço em uma direção impacta significativamente na definição das bordas e na precisão geral do corte. De acordo com Nemchinsky e Severance (2009), o jato de plasma pode se desviar em altas velocidades, como representado na figura 9, resultando em cortes com precisão variável e ângulos nas bordas. Esse desvio ocorre devido ao comportamento dinâmico do plasma, que, em altas velocidades, tende a diminuir a densidade energética do jato, comprometendo a qualidade do corte. Portanto, é essencial

encontrar o equilíbrio entre velocidade de corte e precisão é essencial, especialmente em aplicações que demandam alta definição.

Figura 9 – Deflexão do jato plasma.



Fonte: (NEMCHINSKY; SEVERANCE, 2009)

Além da velocidade, a corrente também desempenha um papel crucial na qualidade do corte. A corrente de corte deve ser ajustada para minimizar a largura da ranhura (*kerf*) e a ZTA (Zona Termicamente Afetada), melhorando assim a qualidade da borda. Esse ajuste é particularmente importante em cortes de materiais como o aço SAE 1020, onde a minimização de danos térmicos nas bordas preserva a integridade da peça. Segundo Magid, um ajuste cuidadoso da pressão e corrente permite que o jato de plasma mantenha sua concentração de energia, resultando em cortes mais limpos e com menor necessidade de acabamento posterior (MAGID, 2021).

O corte feito com uma chama fina de plasma, obtida com uma velocidade de corte mais elevada, tende a produzir cortes precisos, especialmente em chapas finas. No entanto, essa configuração pode resultar em uma ZTA maior devido ao menor tempo de exposição, o que aumenta o risco de distorção nas bordas do corte (NEMCHINSKY; SEVERANCE, 2009).

Por outro lado, ao reduzir a velocidade de corte e aumentar a corrente, é possível gerar uma chama de plasma mais grossa. Essa configuração, em especial, permite que o plasma penetre completamente em chapas mais espessas, criando um *kerf* mais largo e minimizando a ZTA. Esse ajuste é vantajoso em materiais espessos que exigem cortes profundos, embora aumente o consumo energético e a quantidade de material removido durante o processo (NEMCHINSKY; SEVERANCE, 2009).

2.8.2 Precisão e Qualidade do Corte

A qualidade do corte a plasma é frequentemente comparada ao corte a laser, que se destaca pela precisão e pelo acabamento mais suave em materiais finos. O corte a laser produz uma ZTA menor devido ao controle mais preciso da energia e ao menor impacto térmico. No entanto, o corte a plasma apresenta maior viabilidade econômica, especialmente para materiais mais espessos, com custos significativamente menores e tempos de ciclo reduzidos (CUNHA; C. ARES ELISEI, 2016; MAGID, 2021).

A ZTA é uma região do material adjacente à área cortada que sofre alterações microestruturais devido à exposição a altas temperaturas. Cunha e Ares Elisei (2016) explicam que, embora esta região não envolva a fusão completa do material, ocorrem mudanças nas propriedades mecânicas, como aumento da dureza e perda de resistência, o que pode comprometer a integridade da peça. A extensão e os efeitos dessa região dependem diretamente dos parâmetros do processo, como corrente, velocidade de corte e distância entre a tocha e a superfície do material. Velocidades mais baixas resultam em maior transferência de calor, ampliando a ZTA e criando uma borda uniforme, porém com maior fragilidade térmica. Já velocidades mais altas reduzem a ZTA, mas tendem a comprometer a precisão, resultando em desvios angulares e rebarbas.

Além disso, Oliveira (2007) destaca que manter a distância adequada da tocha e ajustar corretamente a pressão do gás de corte são práticas essenciais para minimizar a ZTA. Correntes mais baixas e pressões adequadas concentram o jato de plasma, diminuindo a dissipação de calor e gerando cortes mais limpos, preservando a integridade estrutural da peça.

Cunha e Elisei (2016) ainda observaram as variações microestruturais em chapas de aço 1020 submetidas ao corte a plasma. Em chapas mais finas, a rápida dissipação térmica gera estruturas predominantemente martensíticas nas bordas, aumentando a fragilidade. Já em resfriamentos mais prolongados, podem surgir áreas esferoidizadas, que afetam a dureza e, conseqüentemente, o desempenho das peças.

Portanto, o controle preciso dos parâmetros de corte é fundamental para minimizar os efeitos da ZTA. A redução do impacto térmico é particularmente relevante em materiais sensíveis à temperatura, onde deformações e variações nas propriedades mecânicas podem comprometer a aplicação das peças cortadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e métodos envolvidos no desenvolvimento de uma máquina CNC de corte a plasma de pequeno porte. A construção deste dispositivo abrange a construção mecânica, elétrica e eletrônica, além do sistema de controle necessário para a operação de corte de alta precisão. Cada uma dessas etapas é detalhada, destacando-se os componentes selecionados, as configurações implementadas e a calibração.

O objetivo é assegurar que a máquina desenvolvida seja capaz de realizar cortes precisos, mantendo uma qualidade consistente. Serão discutidos os parâmetros de operação, como velocidade de corte, pressão do gás, e controle de altura da tocha, essenciais para a obtenção de um acabamento adequado em chapas de média espessura. Para assegurar a funcionalidade e a segurança do dispositivo, a estrutura mecânica foi projetada para suportar o processo de corte sem comprometer a estabilidade ou o alinhamento.

3.1 PROJETO MECÂNICO

O projeto mecânico é um processo iterativo de decisão, com foco na criação e otimização de sistemas ou equipamentos que atendam a necessidades específicas. Esse processo envolve diversas etapas de análise e refinamento para garantir que o design final seja eficiente, e acima de tudo, seguro e adequado ao seu propósito (COLLINS; BUSBY; STAAB, 2006).

3.1.1 Estrutura

As estruturas de máquinas CNC variam em design, mas nas máquinas de corte a plasma, existem dois tipos principais de estruturas. A estrutura de pórtico com vigas I é amplamente utilizada em indústrias metalúrgicas pesadas, onde há alta produção e necessidade de cortar chapas de grande espessura (acima de 25,4 mm). Essa estrutura oferece robustez, permitindo o uso de chapas mais pesadas e maiores velocidades de corte, além de maior resistência ao desgaste (NIADA, 2020).

A estrutura de pórtico monobloco é mais simples e compacta, com a mesa de sacrifício integrada à estrutura principal. É indicada para cortes em chapas finas e de espessura média (até 25,4 mm), proporcionando precisão adequada (NIADA, 2020).

Barbosa et al. (2015) enfatizam que mover o material é mais eficiente do que deslocar a ponte completa, embora isso limite o tamanho da peça a ser processada. No entanto, esse sistema possui um custo de implantação mais alto, enquanto o sistema de ponte móvel, ou monobloco, é mais eficiente para chapas finas e de maiores dimensões.

Tendo isto em vista, optou-se pelo uso da estrutura de ponte móvel, devido à sua eficiência no processamento de chapas finas e de maiores dimensões.

Optou-se por um desenvolvimento direto, focando na montagem e no ajuste prático dos componentes da máquina. Essa abordagem permitiu concentrar os esforços nas etapas físicas, avaliando a robustez e a funcionalidade da máquina diretamente durante o processo de construção, sem o uso prévio de modelagem digital ou cálculos estruturais detalhados.

A Figura 10 apresenta o início da construção do equipamento, onde é possível visualizar os eixos de movimentação primários. Enquanto na Figura 11, o sistema de roletes escolhido para a estruturação do movimentos linear dos eixos, a qual será explicado posteriormente a utilização de tal método.

Figura 10 – Montagem da estrutura



Fonte: Autor

Figura 11 – Guias roletes



Fonte: Autor

No Apêndice B, encontram-se mais relatos visuais da construção do equipamento CNC.

Para a mesa de sacrifício, optou-se pelo uso de cantoneiras com dimensões de 50,8 mm x 3,175 mm, devido à facilidade de construção que esse material oferece. A escolha das cantoneiras atende aos requisitos de resistência e durabilidade necessários para suportar o processo de corte a plasma, além de simplificar a montagem da estrutura, sendo modular.

3.1.2 Guias de deslocamento

Na escolha do sistema de guias para a máquina CNC de corte a plasma, foram avaliadas diferentes alternativas em relação a parâmetros como precisão de deslocamento, necessidade de lubrificação e fricção, facilidade de montagem e custo. O Quadro 1, baseado no estudo de Niada (2020), apresenta uma comparação entre três sistemas de guias: eixos guia, sistema de roletes e patins.

Quadro 1 – Comparação entre sistemas de guias

Sistema de guias	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
	Eixos guia	Sistema de roletes	Patins
Precisão de deslocamento	Alta	Alta	Alta
Necessidade de lubrificação	Alta	Média	Média
Fricção	Média	Média	Baixa
Montagem	Baixo	Baixo	Baixo
Custo	Média	Baixo	Alta

Fonte: (NIADA, 2020)

Para o desenvolvimento da máquina CNC de corte a plasma, optou-se pelo uso do sistema de roletes. Essa escolha se baseou na análise apresentada no Quadro 1, onde este sistema se destacou por oferecer boa precisão de deslocamento, facilidade de montagem e um baixo custo. Além disso, o sistema de roletes é mais econômico em comparação com outras alternativas, tornando-o uma opção viável para o projeto. Embora tenha uma precisão ligeiramente inferior ao sistema de eixos guia, o sistema de roletes atende aos requisitos necessários para o corte de chapas finas, mantendo um equilíbrio adequado entre custo e desempenho.

3.1.3 Motores

Os motores mais comuns para o deslocamento da mesa e da torre em máquinas CNC são os motores de passo e os servomotores, cada um com vantagens e desvantagens em relação aos requisitos deste projeto. Os motores de passo oferecem precisão e controle simplificado, tornando-se uma escolha econômica e eficaz para movimentos de curto alcance. Por outro lado, os servomotores proporcionam maior velocidade e torque, o que os torna ideais para aplicações que exigem maior robustez e dinâmica no controle (NIADA, 2020).

Além disso, esses motores oferecem precisão suficiente para a aplicação, movendo a ferramenta de corte plasma conforme a peça a ser manufaturada, e como o corte a plasma gera baixo esforço (diferente do que ocorre em processos como a fresagem), o risco de perda de exatidão por conta de eventuais perdas de passo do motor é reduzido, convergindo ao uso de motores de passo para o deslocamento da CNC.

3.1.4 Sistemas de transmissão de potência

Para haver o movimento, utilizando dos motores, é necessário um sistema físico que faça a transcrição do movimento angular para movimento linear. O modelo escolhido foi o de polias dentadas com correias, comumente utilizado em impressoras 3D. Esse sistema foi selecionado devido a suas vantagens em termos de custo-benefício, precisão e facilidade de manutenção. As correias dentadas são capazes de transmitir movimento sem deslizamento.

Embora existam alternativas como fusos de esferas e cremalheiras com pinhão, que proporcionam maior rigidez e precisão, o sistema de correias dentadas foi considerado mais adequado para este projeto, visto que ele oferece uma precisão suficiente para o corte a plasma em chapas finas, além de ser uma opção mais econômica e de fácil instalação.

3.1.5 Mesa de Sacrifício

A mesa de sacrifício é um componente essencial no corte a plasma, pois oferece suporte ao material durante o corte e protege a estrutura principal da máquina dos impactos térmicos e resíduos. Para este projeto, foram utilizadas cantoneiras de aço com dimensões de 19mm x 3,175mm, garantindo resistência e durabilidade frente às altas temperaturas geradas pelo processo de corte.

O formato da mesa foi projetado para proporcionar um espaçamento adequado entre os suportes que facilita a queda do material cortado, prevenindo obstruções no jato de plasma e melhorando a precisão do corte. Além disso, a configuração modular da mesa permite uma fácil substituição de componentes danificados, garantindo maior vida útil ao sistema.

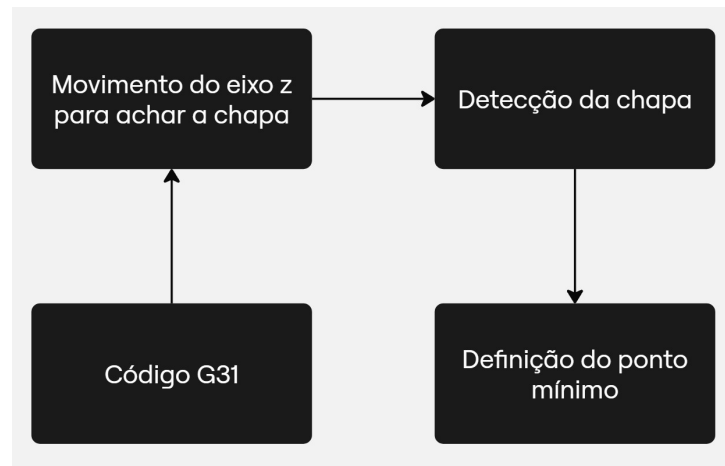
3.1.6 Controle de Altura da Tocha

O controle de altura da tocha THC (*Torch Height Control*) é indispensável para garantir cortes de qualidade, especialmente em chapas que podem não estar completamente planas. Uma altura adequada entre a tocha e a peça de trabalho permite que o jato de plasma mantenha a intensidade necessária para obter bordas limpas e evitar desgaste prematuro do equipamento. Este sistema foi projetado em *software* CAD, estando no Apêndice A.

No presente projeto, a altura da tocha é controlada via *software*, dispensando a necessidade de sensores adicionais. O sistema de controle utiliza um movimento no eixo Z para encontrar a superfície da peça, onde o *software* move a tocha para baixo até que esta encoste levemente na superfície do material. Ao detectar o contato, a tocha é elevada para uma altura predefinida, estabelecida como a distância ideal para o corte.

Na Figura 12, o diagrama demonstra o procedimento de atuação do eixo Z para o funcionamento do THC controlado via *software*

Figura 12 – Diagrama do THC.



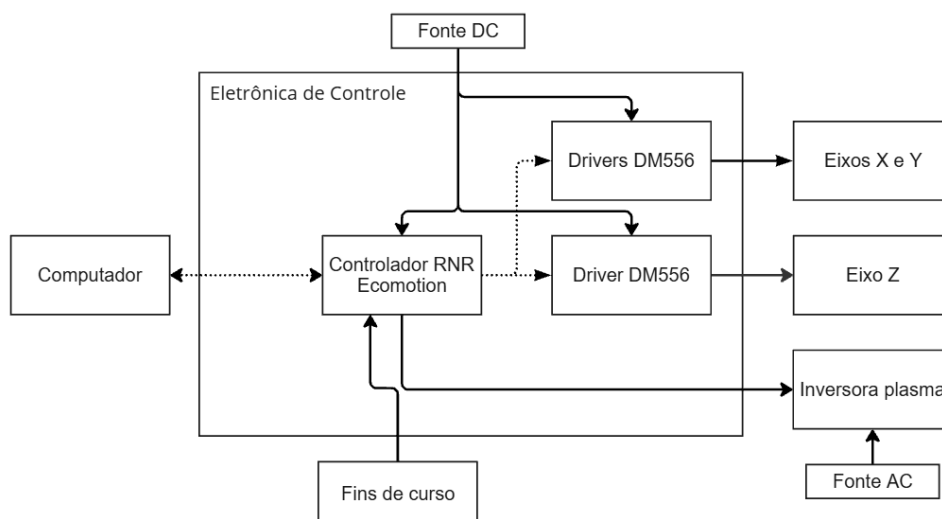
Fonte: Autor

O apêndice C apresenta o código utilizado no pós-processamento, que executa a função.

3.2 PROJETO ELÉTRICO E ELETRÔNICO

O funcionamento do sistema de controle eletrônico está representado na figura 13, onde é possível acompanhar os fluxos dos sinais de comando. As linhas tracejadas indicam sinais elétricos, enquanto as linhas contínuas representam os potenciais elétricos ao longo do circuito.

Figura 13 – Diagrama da eletrônica.



Fonte: Autor

A fonte de alimentação DC, de 24V, é responsável por fornecer a energia necessária para o funcionamento dos sistemas de controle e acionamento da máquina CNC de corte


a plasma. Ela é capaz de suportar a demanda energética dos *drivers*, garantindo um fornecimento contínuo e estável de energia. A tensão de 24V foi escolhida por ser compatível com todos dos componentes eletrônicos da máquina.

A fonte conta com proteções integradas contra sobrecarga, curto-circuito e sobreaquecimento, fatores essenciais para preservar a durabilidade dos componentes e a segurança da operação. A capacidade de entrega estável de 480W é fundamental para manter a precisão e confiabilidade do sistema, especialmente durante períodos prolongados de uso contínuo.

3.2.1 Inversor de frequência

A escolha da inversora de frequência para o sistema de corte a plasma foi baseada em dois critérios principais: sua capacidade de realizar cortes eficientes em chapas finas e seu custo acessível em comparação com outras opções do mercado, como demonstrado na tabela 1. O inversor LYNUS LCUT-50, destinado ao corte de metais pelo processo plasma, destaca-se por sua eficiência ao alcançar espessuras de corte de até 14 mm e separação de até 12 mm, sem a necessidade de utilização de gases específicos. Essa combinação de características atende plenamente aos requisitos de precisão e qualidade necessários para o projeto, garantindo desempenho adequado sem comprometer o investimento realizado.

Tabela 1 – Inversora de Frequência para Corte Plasma

Lcut50	Características
	Tensão da rede (V): 220Vac
	Frequência da rede (Hz): 60
	Seção do cabo de alimentação: 3 x 2,5 mm ²
	Faixa de corrente CUT (A): 10 - 50
	Fator de potência (máx): 0,93
	Eficiência (máx): 85%
	Grau de proteção: IP21S
	Corrente nominal máx (A): 38,9
	Potência aparente (kVA): 6,4
	Transformador recomendado (kVA): 8,0
	Disjuntor/fusível retardado (A): 30
	Temperatura de operação (°C): 10 a 40
	Compressor de ar mínimo: 10 pés ³ /min
Peso do equipamento (kg): 7,2	

Fonte: (LYNUS, 2024)

3.2.2 drivers de comando

O driver DM556, como visto na figura 14 permite na sua configuração um controle preciso e estável do motor de passo, essencial para as necessidades de precisão do corte

a plasma. O driver possui proteção contra sobrecorrente e sobreaquecimento, garantindo uma operação segura e prolongada mesmo sob diversas condições. Além disso, é compatível com uma variedade de motores de passo e pode ser ajustado para diferentes resoluções de passos, facilitando sua adaptação em diversas aplicações de automação e controle CNC.

Para este projeto, o driver foi configurado para operar com corrente de 3,2A, tensão de alimentação de 24V e uma resolução de 1600 pulsos/revolução.

Figura 14 – Driver DM 556



Fonte: Autor

3.2.3 Interface de Controle

Com base no estudo de Cuzzuol e Siqueira (2023), que implementaram a placa *RNR Ecomotion* (BSMCE04U-PP) no controle eletrônico de uma *Router CNC*, justifica-se a escolha dessa controladora para o projeto de CNC de corte a plasma principalmente pela sua disponibilidade no mercado.

A *RNR Ecomotion* destaca-se pela sua capacidade de gerenciamento de até quatro eixos e pela compatibilidade com o *software Mach3*, uma plataforma consolidada em sistemas de automação CNC. Essa compatibilidade proporciona uma interface amigável e flexível, simplificando o controle da máquina e permitindo que operadores com diferentes níveis de experiência possam utilizá-la sem a necessidade de programação complexa.

Além disso, a placa *RNR Ecomotion* permite uma conexão eficiente com motores de passo e *drivers*, oferecendo também suporte para sensores de fim de curso. Essas funcionalidades garantem uma precisão confiável e segurança nos movimentos dos eixos. Para projetos de pequeno e médio porte, que exigem flexibilidade e precisão a um custo acessível, essa placa representa uma escolha técnica e economicamente viável, atendendo bem aos requisitos de controle e resposta do sistema (TAHSEEN; JASSAR, 2023).

Como visto na figura 13, esta interface vai ser o ponto central de comunicação com todos os dispositivos que promovem a utilização do equipamento CNC.

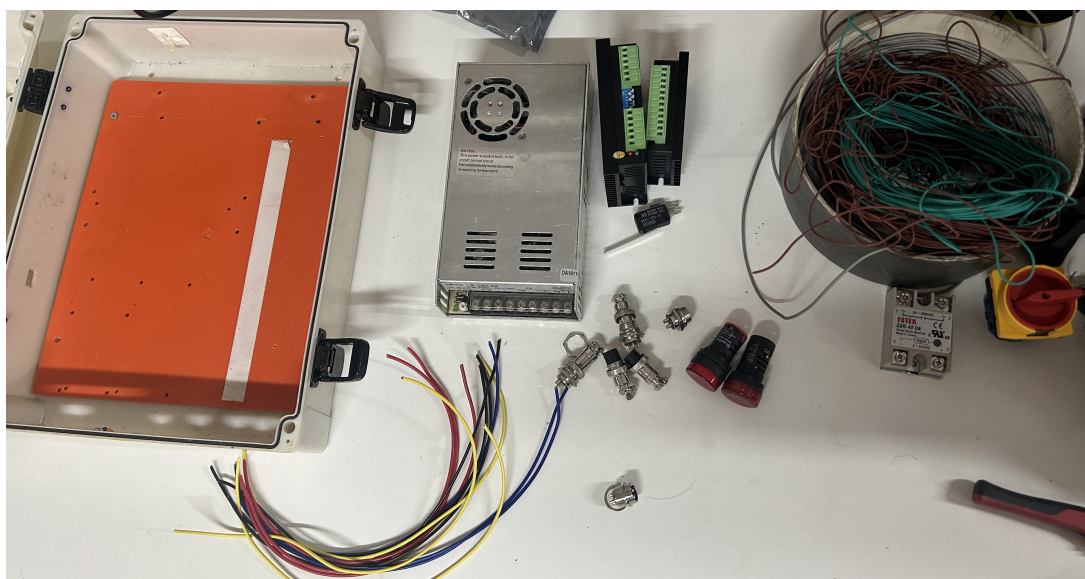
3.2.4 Montagem do painel elétrico

O painel elétrico foi montado de forma a garantir a segurança e organização dos componentes, além de proporcionar uma disposição funcional e apresentável do projeto. Para isto foram utilizadas calhas de passagem para acomodar os cabos de forma organizada e permitir uma manutenção mais fácil e uma melhor apresentação interna. As calhas ajudam a evitar danos mecânicos aos fios, prevenindo que se misturem ou fiquem soltos, garantindo ordem e facilidade em manutenções futuras.

Foi usado um painel reconicionado de um projeto passado, o que reduziu significativamente o custo do projeto e o desperdício de materiais. Além disso, foram instalados engates rápidos em várias posições para que a máquina pudesse ser desconectada e movida facilmente sempre que necessário.

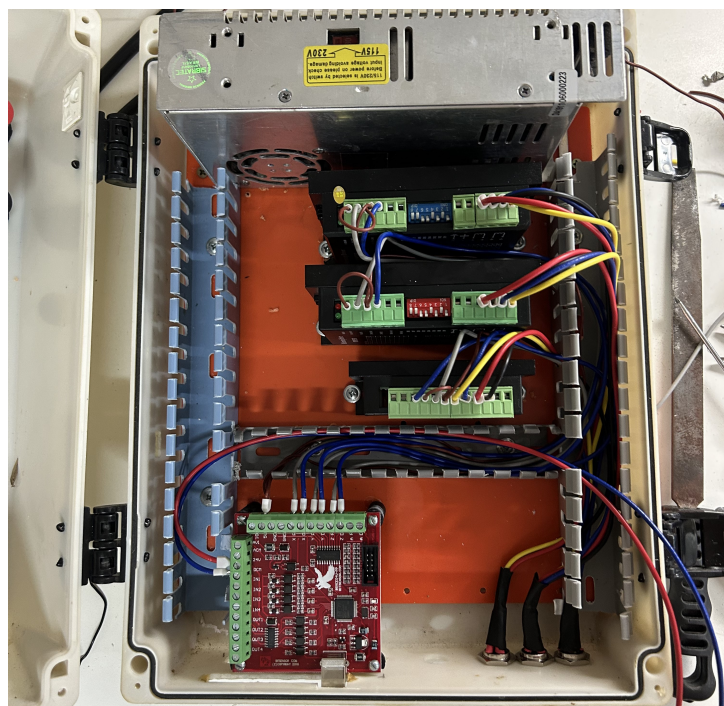
As imagens a seguir ilustram o painel elétrico montado, destacando a organização dos componentes, a utilização das calhas de passagem e a disposição geral do sistema elétrico. A Figura 15 apresenta uma visão geral dos componentes que serão utilizados, enquanto a Figura 16 mostra o painel montado com os componentes internos, destacando calhas que auxiliam na organização dos fios.

Figura 15 – Visão geral dos componentes.



Fonte: Autor

Figura 16 – Detalhe dos componentes internos e calhas de passagem.



Fonte: Autor

3.2.5 Custos e Viabilidade Econômica

A Tabela 2 apresenta os custos detalhados relacionados à construção do dispositivo CNC, reunindo componentes mecânicos, eletrônicos e outros materiais utilizados. Essa análise é importante para mostrar a viabilidade econômica do projeto em comparação com modelos comerciais.

O custo total estimado do projeto, de R\$ 5.399,99, é significativamente inferior ao de máquinas CNC comerciais com especificações similares, cujo valor pode ultrapassar os R\$ 30.000,00 - como, por exemplo o equipamento 1215 da marca Autech CNC¹. Essa diferença ressalta ainda mais o potencial do dispositivo como uma alternativa viável para pequenas e médias empresas que buscam soluções econômicas para o corte de chapas metálicas, sem abrir mão de precisão e confiabilidade.

¹Disponível em: <https://autechcnc.com.br/>. Acesso em: 25 set. 2024.

Tabela 2 – Tabela de Custos

Descrição	Preço (R\$)	Qtd	Subtotal (R\$)
Tubo de aço 40x20x2mm 6m	67,00	1	67,00
Rolamento 608zz	4,50	38	171,00
Nema 23	116,00	2	232,00
Nema 34	339,00	1	339,00
Polia intermediária	34,00	6	204,00
Driver DM556	114,00	2	228,00
Driver tb6600	85,40	1	85,40
Placa controladora <i>RNR Ecomotion</i>	125,00	1	125,00
Parafusos diversos	50,00	1	50,00
Cabos de quatro vias	10,00	12	120,00
Cabos diversos	30,00	1	30,00
Impressão 3D	20,00	1	20,00
Guia linear 8mm	82,00	2	164,00
Rolamento linear 8mm	23,00	6	138,00
Fuso trapezoidal 200mm	17,22	1	17,22
Acoplamento elástico	10,50	1	10,50
Rolamento 608zz	3,50	6	21,00
Caixa de montagem	84,00	1	84,00
Calhas de passagem	25,00	1	25,00
Inversora de frequência plasma	1.350,00	1	1.350,00
Fonte 24V 480W	75,90	1	75,90
Correia dentada alma aço 10mm	21,99	3	65,97
Cantoneira de Aço 31,75mm X 4,76mm X 6m	104,00	3	312,00
Mão de Obra*	75,00	50	3.750,00
Total			7.675,99

* Valor referente à construção mecânica do dispositivo, incluindo a manufatura da estrutura.

Fonte: Autor.

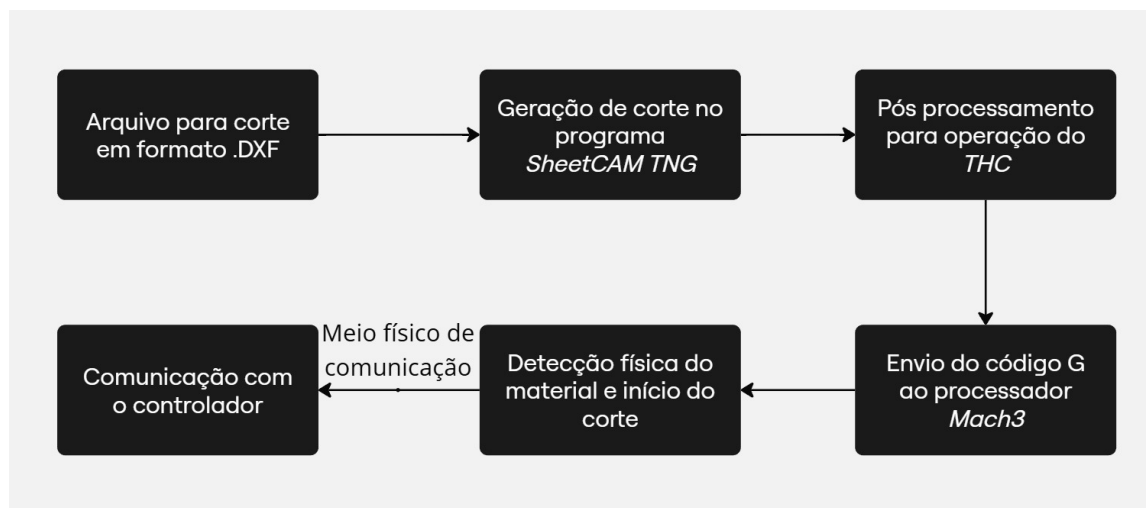
3.3 PROCESSO DE CORTE

O preparo para o corte envolve uma sequência de etapas fundamentais que integram a comunicação entre software e hardware, garantindo a correta execução do processo. Na Figura 17, o fluxo inicia-se com a criação de arquivos para corte no formato *.DXF*, seguido pela geração do plano de corte no programa *SheetCAM TNG*.

O pós-processamento prepara os dados necessários para a operação do *THC*, e

o envio do código G é realizado ao processador utilizando o *software Mach3*. A etapa subsequente consiste na detecção física do material e no início do corte. Por fim, ocorre a comunicação física com o controlador, permitindo o acionamento e monitoramento do processo.

Figura 17 – Fluxograma do processo de preparo para corte.



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As atividades desenvolvidas no projeto proporcionaram uma visão abrangente dos componentes básicos necessários para a construção de um dispositivo CNC, além de uma análise sobre a viabilidade e qualidade do corte obtido com essa tecnologia. Este capítulo apresenta os resultados práticos obtidos com o dispositivo construído, bem como uma discussão sobre os principais parâmetros e desafios encontrados ao longo do projeto.

4.1 ESTRUTURA E DISCUSSÃO DO PROJETO

Durante o desenvolvimento do projeto, foi adotada uma abordagem de estrutura de pórtico móvel, em contraste com a ponte fixa com mesa móvel discutida por Jaimes, Santaella e Díaz (2015). Essa escolha foi fundamentada em aspectos práticos e de espaço, considerando que o pórtico móvel simplifica o posicionamento das chapas no equipamento e reduz a necessidade de uma área física ampla para sua operação.

Além disso, os estudos de Krimpenis e Iordanidis (2023) recomendam reforços para absorção de vibrações, rais quais foram incorporadas ao projeto, mesmo com a escolha do pórtico móvel. Reforços estruturais na base e a seleção de componentes que aumentam a estabilidade foram implementados para minimizar os efeitos de vibrações e garantir maior precisão durante o corte. Essa configuração demonstra-se adequada para demandas de corte em chapas metálicas de espessura fina e média, conciliando precisão e versatilidade em um espaço reduzido, característica principal da estrutura de ponte móvel.

4.2 DESEMPENHO DA MÁQUINA E PRECISÃO DO CORTE

Durante os testes, a máquina demonstrou um desempenho consistente nos cortes de chapas de espessura fina, alcançando os objetivos de precisão estabelecidos. Observou-se que a velocidade de corte e a corrente configuradas impactaram diretamente a qualidade da borda e a ZTA. Em velocidades mais altas, a borda apresentava menos rebarbas, mas com maior incidência de desvio angular. Por outro lado, em velocidades mais baixas, o corte apresentou uma borda mais uniforme, porém com uma ZTA mais pronunciada, indicando uma maior transferência de calor para a peça. Na Figura 18, observa-se a ZTA, destacada pela região escura ao redor do corte.

Na análise da primeira peça cortada pela máquina, representada na Figura 18, constatou-se que os resultados foram promissores, com cortes relativamente precisos e bordas limpas. No entanto, devido à configuração inicial da corrente abaixo do ideal, o plasma não conseguiu realizar a perfuração total na chapa em alguns pontos, comprometendo a separação completa da peça. Como resultado, houve a necessidade de ajustes mais refinados nos parâmetros de corte, especialmente no aumento da corrente, para garantir cortes consistentes e profundos, sem influenciar na ZTA.

Figura 18 – Primeiro corte



Fonte: Autor

Após os ajustes realizados na corrente de corte, observou-se uma melhoria significativa na qualidade do corte. Como ilustrado na Figura 19, o ajuste proporcionou a penetração completa do plasma na chapa, eliminando os problemas observados na primeira tentativa.

Figura 19 – Corte ajustado



Fonte: Autor

Os resultados obtidos estão em consonância com estudos de Nemchinsky e Severance (2009), que destacam a importância do controle preciso de parâmetros como velocidade e corrente para minimizar a ZTA e garantir a integridade da peça.

A utilização de uma chama de plasma mais estreita, obtida com velocidades elevadas, mostrou-se vantajosa para chapas finas, enquanto para chapas mais espessas, a redução da velocidade permitiu uma penetração mais efetiva, minimizando rebarbas e proporcionando um corte mais uniforme, como é visível na Figura 20.

Figura 20 – Corte em chapa de espessura média



Fonte: Autor

4.3 ANÁLISE DO CONTROLE ELETRÔNICO E SOFTWARE

A placa controladora RNR Ecomotion (BSMCE04U-PP) revelou-se uma solução eficiente para o controle do dispositivo CNC, devido à sua compatibilidade com o *software* Mach3, amplamente reconhecido na comunidade de máquinas CNC. Estudos como o de Cuzzuol e Siqueira (2023) corroboram que essa integração simplifica a configuração dos eixos e dos parâmetros de corte, além de oferecer uma resposta ágil do sistema em tempo real. A avaliação realizada neste projeto confirma que a RNR Ecomotion apresenta uma excelente relação custo-benefício, sendo particularmente adequada para projetos de pequeno porte que demandam precisão e confiabilidade.

A atuação da inversora de frequência no sistema de corte a plasma é realizada por meio de um relé, que funciona como um interruptor. O relé recebe o sinal do controlador e aciona a inversora, permitindo o início do corte. Esse método simples garante o controle seguro e eficiente do sistema.

O controle da altura da tocha THC foi realizado por meio de uma abordagem via *software*, na qual o sistema move o eixo Z até detectar a superfície da chapa, ajustando a altura para manter uma distância de segurança predefinida. Essa técnica demonstrou ser eficaz para garantir cortes uniformes, especialmente em chapas de espessura variável, evitando colisões e maximizando a vida útil dos consumíveis da tocha.

Conforme sugerido por Oliveira et al. (2007), a utilização do controle de altura como um dispositivo específico, a mesma abordagem aplicada ao sistemas via *software* atinge os objetivos, a aquisição de um dispositivo THC específico poderia representar uma melhoria significativa para o projeto, principalmente em termos de pós-processamento e ajuste em tempo real.

Considerando o custo-benefício do projeto, a solução implementada via *software* atende muito bem aos requisitos de corte e representa uma escolha viável e econômica neste estágio.

4.4 APROVEITAMENTO DA ÁREA ÚTIL DE CORTE

Durante a execução dos testes, foi identificado que a área útil de corte da máquina não foi plenamente aproveitada devido a limitações no projeto mecânico. A ausência de um planejamento prévio mais detalhado resultou em restrições no deslocamento da tocha, que não consegue atingir todos os cantos da mesa de sacrifício.

A área útil projetada inicialmente para a máquina é de **850 mm x 750 mm**, o que totaliza **637.500 mm²**. Contudo, na prática, a área efetivamente aproveitada foi de apenas **750 mm x 620 mm**, resultando em **465.000 mm²**. Assim, o percentual de utilização da área útil de corte é de aproximadamente **73%**, conforme demonstrado no cálculo a seguir:

$$\text{Percentual de Utilização} = \left(\frac{\text{Área Aproveitada}}{\text{Área Projetada}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Percentual de Utilização} = \left(\frac{465.000}{637.500} \right) \times 100 \approx 73\% \quad (2)$$

Essa limitação é atribuída principalmente à configuração física do equipamento, onde o sistema de deslocamento dos eixos restringem o alcance completo da tocha. A consequência prática é a subutilização do potencial da máquina, reduzindo a capacidade de produção em chapas de maiores dimensões e exigindo um reposicionamento do material.

4.5 ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO

A comparação dos custos de construção do dispositivo CNC desenvolvido com os de modelos comerciais evidencia que o projeto oferece uma solução economicamente viável para pequenas e médias empresas que necessitam cortar chapas metálicas de espessura fina. O custo total do equipamento desenvolvido equivale a aproximadamente um quinto do valor de modelos comerciais. A reutilização de componentes, como o painel elétrico e os tubos de aço para a estrutura, desempenhou um papel essencial na redução dos custos, mantendo a segurança e a funcionalidade do dispositivo.

O dispositivo foi projetado para permitir a reutilização de materiais e componentes elétricos, além de viabilizar a substituição de partes individuais em caso de desgaste ou falha, minimizando a necessidade de descarte e facilitando a manutenção. Adicionalmente, a utilização de motores de passo com drivers configurados para eficiência energética assegura um consumo reduzido de energia, mantendo a precisão no corte.

4.6 POTENCIAIS DE MELHORIA

Futuras melhorias para o sistema de corte a plasma podem ser implementadas, visando otimizar o desempenho e a qualidade do processo. Abaixo estão listadas algumas sugestões de aprimoramento:

- **Sistema de controle de altura robusto:** Implementação de um sistema THC mais robusto, permitindo o controle dinâmico da altura da tocha durante o corte, o que resultará em maior precisão e qualidade da borda.
- **Análise de diferentes gases de corte:** Estudo do uso de gases específicos para otimizar a qualidade do corte em diferentes materiais, visando bordas mais limpas e menor ZTA.
- **Automação do ajuste de parâmetros:** Integração de um sistema automatizado para ajustar os parâmetros de corte, como corrente e velocidade, com base na espessura e tipo da chapa, aumentando a eficiência e reduzindo a necessidade de intervenção manual.
- **Ajuste da área de corte útil:** Revisão e otimização do projeto mecânico para permitir o aproveitamento total da área de corte da máquina, que atualmente é inferior à área total disponível, garantindo melhor utilização da mesa de sacrifício.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de um dispositivo CNC para corte a plasma, voltado para chapas metálicas de espessura fina, com ênfase na análise técnica e econômica do projeto. Por meio da realização dos objetivos específicos, que incluíram a construção da máquina CNC, a implementação do controle eletrônico e a avaliação dos parâmetros de corte, foi possível alcançar importantes avanços e aprendizagens no processo de construção e operação deste tipo de equipamento.

A construção do protótipo representou um marco significativo no projeto. Durante sua execução, foram enfrentados desafios fora do domínio de conhecimento, especialmente na seleção e adequação de componentes devido à limitação de custos, bem como no controle da tocha plasma. Apresentando alta complexidade técnica, reiterando ajustes precisos de altura e parâmetros de corte, aspectos que não eram plenamente dominados no início do projeto.

Entre as adaptações realizadas para contornar as limitações técnicas e econômicas, destacam-se o uso de materiais reaproveitados e a implementação de um THC via *software*. Embora eficiente em condições iniciais, essa solução apresentou limitações significativas no ajuste automático de altura em tempo real, comprometendo parcialmente o desempenho em cortes mais complexos ou em chapas de espessura variável, gerando rebarbas e uma ZTA maior.

Durante os testes e a operação do protótipo, observou-se que a área de corte efetivamente utilizada não corresponde à totalidade da área física disponível, indicando uma subutilização do potencial do equipamento. Essa limitação deve-se ao projeto físico da máquina, que restringe o alcance total dos eixos. Característica que compromete a eficiência do aproveitamento do material e limita a flexibilidade do equipamento em atender a demandas de cortes em chapas com maiores dimensões. A ampliação dos eixos de movimentação seria oportuna para o aproveitamento total do equipamento.

Os testes de corte realizados revelaram desempenho satisfatório para chapas de espessura fina e média, mas evidenciaram desafios técnicos, como a precisão dos cortes em velocidades mais altas e a incidência da ZTA em cortes mais lentos. Esses resultados destacaram a importância de ajustar os parâmetros de corte, como corrente e velocidade, para otimizar a qualidade do corte e a integridade das bordas das peças.

Apesar das limitações encontradas, o projeto proporcionou uma valiosa experiência prática e teórica. A revisão de literatura sobre o processo de corte a plasma e a automação CNC contribuiu para uma investigação profunda da tecnologia já existente. As soluções usadas durante o desenvolvimento, como a configuração dos motores, drivers e os ajustes no *software* de controle, permitiram a operação do equipamento, embora não tenham resolvido integralmente as limitações.

Essa combinação de economia e desempenho alcançado reforça o potencial do

protótipo em preencher uma lacuna no mercado, oferecendo uma opção acessível para empresas que buscam automatizar seus processos de corte em chapas metálicas de forma confiável e precisa, reduzindo assim custos de manufatura, acrescentando mais possibilidades e competitividade no mercado.

Conclui-se que, embora o protótipo desenvolvido tenha atingido os objetivos principais, ainda existem margens para melhorias. As dificuldades enfrentadas evidenciam a relevância de um projeto aprofundado, bem como a necessidade de investimentos em sistemas de controle avançados, como a inclusão de um dispositivo THC dedicado. É necessária a continuação das investigações e o aprimoramento do sistema, com foco na integração de tecnologias mais avançadas e na análise de novos parâmetros de corte, a fim de alcançar um dispositivo CNC mais eficiente, podendo até ser competitivo no mercado.

REFERÊNCIAS

AUTSOU, Siarhei; KUDELINA, Karolina; VAIMANN, Toomas; RASSÖLKIN, Anton; KALLASTE, Ants. Principles and Methods of Servomotor Control: Comparative Analysis and Applications. **Applied Sciences**, v. 14, n. 2579, 2024. Published by MDPI, Basel, Switzerland.

AVENI, Alessandro. Industry 5.0 and industry 4.0 comparative definitions. **Revista Processus de Estudos de Gestão, Jurídicos e Financeiros**, Universidade de Brasília, Brasília, DF, v. 14, n. 46, p. 1–25, 2023.

BABALLE, Muhammad Ahmad; BELLO, Mukhtar Ibrahim; UMAR, Abubakar Abdullahi; SHEHU, Abdullahi Kabiru; BELLO, Dahiru; ABDULLAHI, Faiz Tijjani. Different Types of Servo Motors and Their Applications. *In: 1ST International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences (ICEANS)*. Konya, Turkey: [s.n.], 2022.

BRITES, Felipe Gonçalves; ALMEIDA SANTOS, Vinicius Puga de. **Motor de Passo**. Niterói, RJ, jul. 2008.

CARDOSO JÚNIOR, Edinaldo Serra. **Desenvolvimento de máquina CNC para a fabricação de encostos anatômicos e personalizados em blocos de espuma**. 2024. F. 114. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista - UNESP, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira.

COLLINS, Jack A.; BUSBY, Henry; STAAB, George. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção da Falha**. 2. ed. [S.l.]: LTC, 2006. ISBN 978-8521614753.

CUNHA, Geriel Apolinario da; C. ARES ELISEI, Cristina de. Análise e Comparação da Microestrutura da ZTA do Corte Realizado por Plasma e Oxicorte em Chapas de Aço 1020. **XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência**, Universidade do Vale do Paraíba, 2016.

CUZZUOL, Guilherme Santos; SIQUEIRA, João Pedro Radavelli. **Projeto de Construção de uma Router CNC Utilizando RNR Ecomotion**. 2023. Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Aracruz, Aracruz, ES. Acesso em: 23 set. 2024.

FRANÇA, Murilo Stall. Análise das oportunidades de melhoria no processo de corte por plasma em uma indústria de implementos rodoviários. **Revista Satc**, Faculdade SATC, Criciúma, SC, v. 6, n. 3, p. 101–120, 2021.

FRETON, P.; GONZALEZ, J. J.; GLEIZES, A.; CAMY PEYRET, F.; CAILLIBOTTE, G.; DELZENNE, M. Numerical and experimental study of a plasma cutting torch. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 35, n. 2, p. 115–131, 2002.

GHORUI, S.; HEBERLEIN, J. V. R.; PFENDER, E. Non-equilibrium modelling of an oxygen-plasma cutting torch. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 40, n. 7, p. 1966–1976, 2007.

GILL, P. **CNC Programming Handbook: A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming**. 3rd edition. [S.l.]: Industrial Press Inc., 2009.

GRANT, Matthew. **Quick Start for Beginners to Drive a Stepper Motor**. [S.l.], 2005. Application Note AN2974. Disponível em: <https://www.freescale.com/>.

GUPTA, Manu; GOSWAMI, Chandramani; KHANDELWAL, Nikil. Design and structural analysis of 3-sided and 4-sided columns of a CNC machine using finite element analysis. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

HARJA, Herman Budi; SETIAWAN, Heri; MUSLIM, Dede Buchori; PRIYAMANGGALA, Akil; KURNIAWAN, Rahma Dwi. Preliminary Development of Concrete 3D Printing Machine Controller Based on Mach3 Control Board. **Proceedings of the 5th International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science (iCAST-ES 2022)**, SCITEPRESS, p. 931–936, 2023.

HUY, Phan Ngoc Quang. **Design, Build and Experimentally Evaluate a Small CNC Machine for Wood Machining Featuring Mach3 Controller**. 2023. Vietnamese - German University.

JAIMES, Jhon Erickson Barbosa; SANTAELLA, José Ricardo Bermúdez; DÍAZ, Marco Aurelio. Methodology Used in the Design and Construction of a Computer Numerical Control Machine. **Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada**, Universidad de Pamplona, v. 1, n. 25, p. 25–31, 2015.

KRIMPENIS, A.; IORDANIDIS, D. Design and Analysis of a Desktop Multi-Axis Hybrid Milling-Filament Extrusion CNC Machine Tool for Non-Metallic Materials. **Machines**, 2023.

KUDŽMA, Ignas. **Evaluation of Blanks' Quality Formed by Plasma Cutting**. 2017. Master's Degree Final Project – Kaunas University of Technology, Kaunas, Faculty of Mechanical Engineering e Design.

KUMAR, Kaushik; RANJAN, Chikesh; DAVIM, J. Paulo. **CNC Programming for Machining**. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020. (Materials Forming, Machining and Tribology). ISBN 978-3-030-41278-4.

LYNUS. **Lynus - Ferramentas e Equipamentos**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 6 nov. 2024. Disponível em: <https://lynus.com.br/>.

MAGID, H.M. Experimental study of mild steel cutting process by using the plasma arc method. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 108, n. 2, p. 75–85, 2021.

NEMCHINSKY, V. A.; SEVERANCE, W. S. What We Know and What We Don't Know About Plasma Arc Cutting. **Journal of Physics D: Applied Physics**, IOP Publishing, v. 42, n. 11, p. 113001, 2009.

NIADA, Henrique Soares. **Projeto de uma máquina de corte a plasma CNC para uso em chapas de aço inox ABNT 304**. [S.l.: s.n.], 2020. Orientador: Heraldo José de Amorim. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/217390>.

OLIVEIRA, F. B. de. Projeto, construção e caracterização de uma fresadora CNC de bancada. **Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa**, Alegrete, RS, 2019.

RAHMAN, A.B.; ARAFAT, Yasin; KARIM, M.F.; ALI, Asad. Design and Development of 3-Axis Benchtop CNC Machine for Educational Purpose. **International Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v. 11, n. 3, p. 45–55, 2023.

RAKIC, Aleksandar; ZIVANOVIC, Sasa; DIMIC, Zoran; KNEZEVIC, Mladen. Digital Twin Control of Multi-Axis Wood CNC Machining Center Based on LinuxCNC. **BioResources**, North Carolina State University, v. 16, n. 1, p. 1115–1130, 2021.

RAMAKRISHNAN, S.; SRIVASTAVA, R.; GEISER, J.; RICHARDSON, S. *et al.* Plasma generation for the plasma cutting process. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 25, n. 5, p. 937–946, 1997.

STANGER, Henrique; DALEFFE, Anderson; TINELLI, Eduardo Possamai; ROSA, Magali da. Fabricação mecânica, montagem e ajuste do protótipo didático de uma máquina de corte plasma CNC. **Revista Vincci**, Faculdade SATC, Criciúma, SC, v. 5, n. 2, p. 199–222, 2020.

SUBHAN, Abdus; SHANKARA, M.; HEMANTH, H. S.; KISHORE, K.; KRISHNAMURTHY, L.; RAKESH, M. Design, Development and Simulation of CNC Plasma (or Oxy-Fuel) Cutting Gantry. **International Journal of Research in Engineering, Science and Management**, v. 3, n. 6, jun. 2020. ISSN 2581-5792.

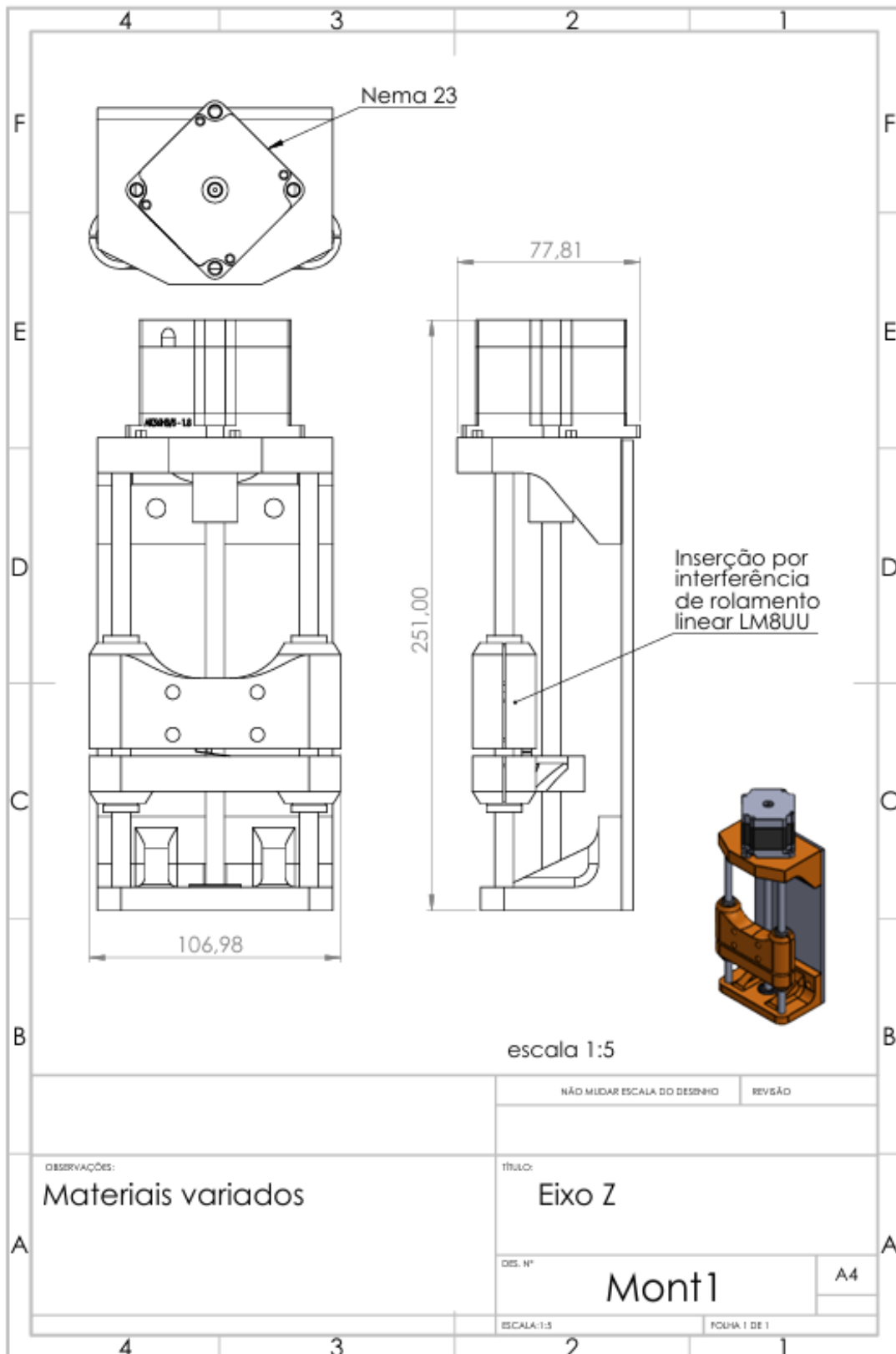
SUMIG. **Como funciona o corte plasma**. [*S.l.: s.n.*], 2021. Acesso em: 31 out. 2024. Disponível em: <https://www.sumig.com/pt/blog/post/como-funciona-o-corte-plasma->.

TAHSEEN, A.; JASSAR, A. Using 3D Modeling Systems to Create a Small Portable Milling Machine Controlled by an Industrial Cloud. **Journal of Theoretical and Applied Information Technology**, v. 101, n. 8, 2023.

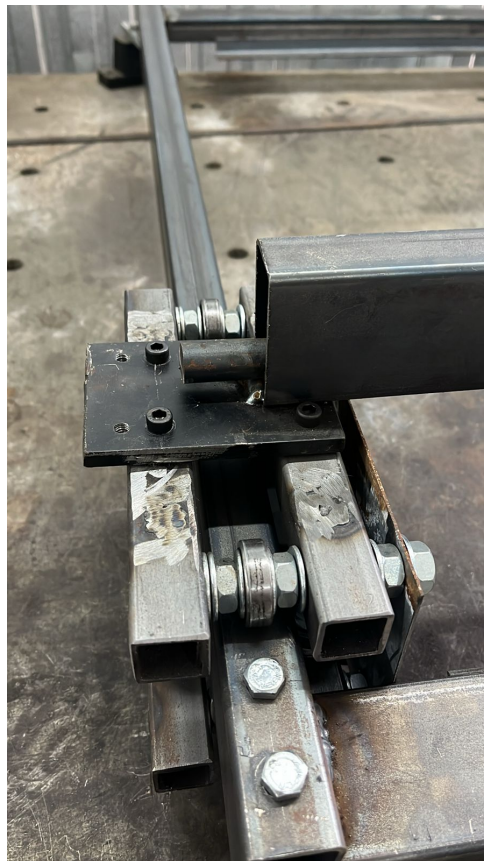
VEERAMONY, Jagathesvaran AL; ZAHID, Muhammed Nafis Osman. A Customizable Controller for 3 Axis Modular CNC Machine. **Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology**, v. 6, n. 2, p. 55–62, set. 2022.

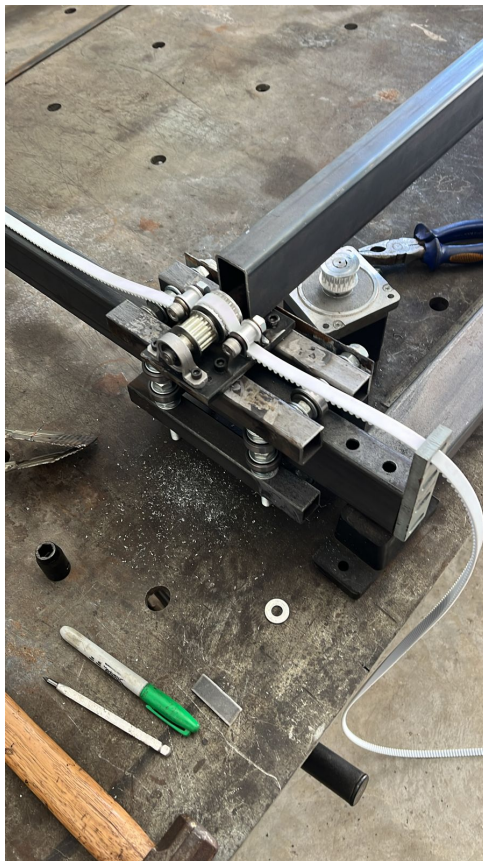
ZIVANOVIC, Sasa; DIMIC, Zoran; VORKAPIC, Nikola; MITROVIC, Stefan. Configuring of 3 Axis Mini CNC Machine Tool with Control System Based on LinuxCNC. **Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering**, v. 18, n. 3, p. 57–64, 2020.

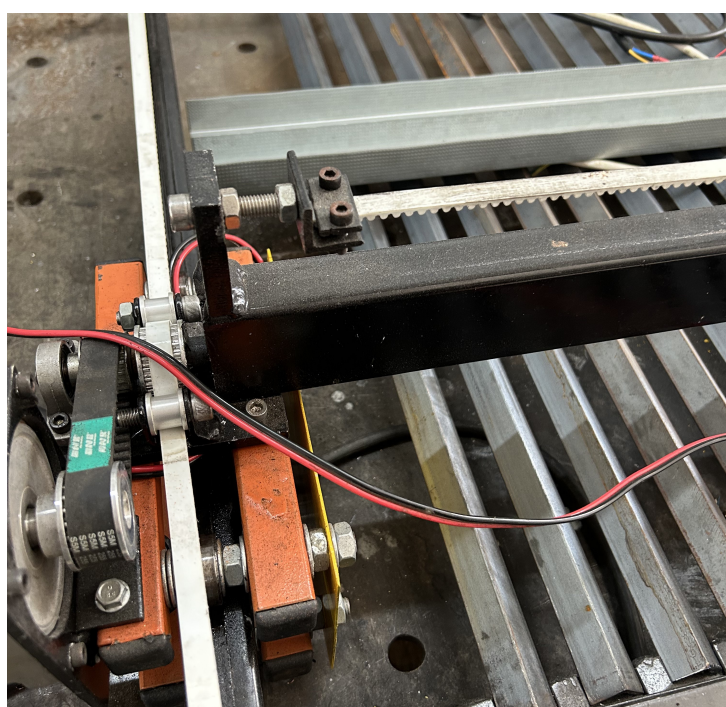
APÊNDICE A – Desenho técnico eixo Z

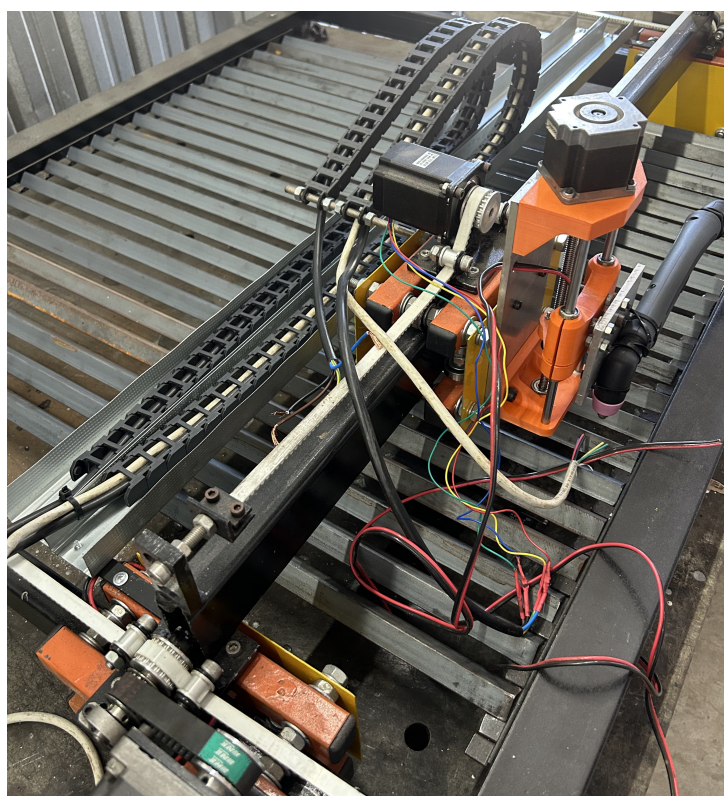
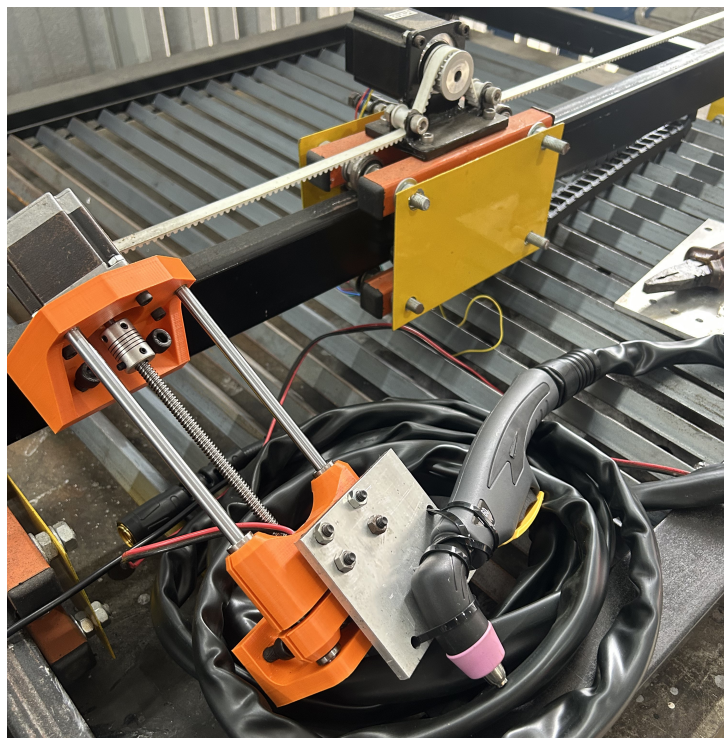


APÊNDICE B – Montagem estrutural









APÊNDICE C – Montagem estrutura

```
1 function OnPenDown()
2   if(useDrill == 1) then
3     DoDrill()
4   end
5
6   -- Comando de Probe Z para Auto Z Zero
7   post.Text ("G31_Z-50_F200\n") -- Move o Z para baixo ate tocar
   a chapa
8   post.Text ("G92_Z0\n")      -- Define a posicao atual como Z
   =0
9   post.Text ("G0_Z15\n")      -- Move para cima 15 mm apos
   tocar a chapa
10
11  if (preheat > 0.001) then
12    post.ModalText ("G00")
13    post.ModalNumber ("Z", cutHeight * scale, "0.0000")
14    post.Text ("\n_G04_P")
15    post.Number (preheat, "0.###")
16    post.Eol()
17  end
18
19  post.ModalText ("_G00")
20  post.ModalNumber ("_Z", pierceHeight * scale, "0.0000")
21  post.Text ("\n_M03\n")
22
23  if (pierceDelay > 0.001) then
24    post.Text ("_G04_P")
25    post.Number (pierceDelay, "0.###")
26    post.Eol()
27  end
28 end
```

ANEXO A – Tabela de g-code

Código	Grupo	Descrição	Modal
G00	1	Movimento rápido	Y
G01	1	Movimento linear com avanço	Y
G02	1	Movimento de arco horário com avanço	Y
G03	1	Movimento de arco anti-horário com avanço	Y
G04	0	Pausa (Dwell)	N
G09	0	Parada exata	N
G10	0	Definição de Offset de Ferramenta e Fixação	N
G12	1	Círculo horário	Y
G13	1	Círculo anti-horário	Y
G15	11	Cancelar coordenada polar	Y
G16	11	Coordenada polar	Y
G17	2	Selecionar plano XY	Y
G18	2	Selecionar plano ZX	Y
G19	2	Selecionar plano YZ	Y
G20	6	Polegada	Y
G21	6	Milímetro	Y
G28	0	Retorno ao zero	N
G30	0	2º, 3º, 4º Retorno ao Zero	N
G31	1	Função de Sonda	N
G32	1	Rosqueamento*	N
G40	7	Cancelar compensação de corte	Y
G41	7	Compensação de corte à esquerda	Y
G42	7	Compensação de corte à direita	Y
G43	8	Offset de comprimento de ferramenta + Ativar	Y
G44	8	Offset de comprimento de ferramenta - Ativar	Y
G49	8	Cancelar offset de comprimento de ferramenta	Y
G50	9	Cancelar escala	Y
G51	9	Escalar eixos	Y
G52	0	Deslocamento de sistema de coordenadas local	Y
G53	0	Sistema de coordenadas da máquina	N
G54	12	Offset de fixação 1	Y
G54.1	12	Offsets adicionais de fixação	Y
G55	12	Offset de fixação 2	Y
G56	12	Offset de fixação 3	Y
G57	12	Offset de fixação 4	Y

G58	12	Offset de fixação 5	Y
G59	12	Offset de fixação 6	Y
G60	0	Aproximação unidirecional	N
G61	13	Modo de parada exata	Y
G64	13	Modo de corte (Velocidade constante)	Y
G65	0	Chamada de macro	N
G66		Chamada de macro modal	Y
G67		Cancelar chamada de macro modal	Y
G68	15	Rotação do sistema de coordenadas	Y
G69	15	Cancelar rotação do sistema de coordenadas	Y
G73	16	Furação rápida em ciclos repetitivos	Y
G74	16	Rosqueamento à esquerda*	Y
G76	16	Mandrilagem fina*	Y
G80	16	Cancelar ciclo repetitivo	Y
G81	16	Furação de furos	Y
G82	16	Faceamento de pontos	Y
G83	16	Furação profunda em ciclos repetitivos	Y
G84	16	Rosqueamento à direita*	Y
G84.2	16	Rosqueamento rígido à direita*	Y
G84.3	16	Rosqueamento rígido à esquerda*	Y
G85	16	Mandrilagem, retração com avanço, spindle ligado	Y
G86	16	Mandrilagem, retração rápida, spindle desligado	Y
G87	16	Mandrilagem reversa*	Y
G88	16	Mandrilagem, retração manual	Y
G89	16	Mandrilagem, pausa, retração com avanço, spindle ligado	Y
G90	3	Modo de posição absoluta	Y
G90.1	4	Modo de arco central absoluto	Y
G91	3	Modo de posição incremental	Y
G91.1	4	Modo de arco central incremental	Y
G92	0	Definição de sistema de coordenadas local	Y
G92.1	0	Cancelar sistema de coordenadas local	Y
G93	5	Avanço por tempo inverso	Y
G94	5	Avanço por minuto	Y
G95	5	Avanço por revolução*	Y
G96	14	Velocidade superficial constante*	Y
G97	14	Velocidade constante	Y
G98		Retorno ao ponto inicial	Y

G99		Retorno ao ponto R	Y
-----	--	--------------------	---