

ASSOCIAÇÃO EDUCATIVA EVANGÉLICA
FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA – FACEG
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS HENRIQUE CRISTINO CALIXTO

**Projeto e fabricação de uma Máquina de Comando Numérico Computadorizado, com
foco em baixo custo de produção e manutenção**

GOIANÉSIA

2021

FACEG

2021

LUCAS HENRIQUE CRISTINO CALIXTO

**Projeto e fabricação de uma Máquina de Comando Numérico Computadorizado, com
foco em baixo custo de produção e manutenção**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica,
da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

GOIANÉSIA
2021

FICHA CATALOGRÁFICA

C153p

Calixto, Lucas Henrique Cristino.

Projeto e fabricação de uma Máquina de Comando Numérico Computadorizado, com foco em baixo custo de produção e manutenção / Lucas Henrique Cristino Calixto – Goianésia: Faculdade Evangélica de Goianésia, 2021 – Faceg, 2020.

74 p.; il.

Orientador: Prof. Dr Cleber Caetano Thomazi

Monografia de Graduação – Faculdade Evangélica de Goianésia: FACEG, 2021.

1. Router CNC. 2. Projeto de Máquinas.

I. Calixto, Lucas Henrique Cristino Calixto. II. Projeto e fabricação de uma Máquina de Comando Numérico Computadorizado, com foco em baixo custo de produção e manutenção;

CDU 621

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Calixto, L. H. C. **Projeto e fabricação de uma Máquina de Comando Numérico Computadorizado, com foco em baixo custo de produção e manutenção.** 2021. 74 p. Monografia - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2021.

CESSÃO DE DIREITOS

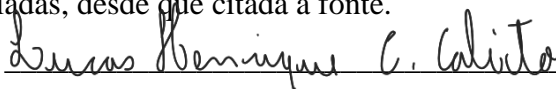
NOME DO AUTOR: Lucas Henrique Cristino Calixto

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Projeto e fabricação de uma Máquina de Comando Numérico Computadorizado, com foco em baixo custo de produção e manutenção.

GRAU: Bacharel em Engenharia Mecânica

ANO: 2021

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Graduação, única e exclusivamente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta Monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.



Nome: Lucas Henrique Cristino Calixto

CPF: 049.101.321-39

Endereço: RUA 42, Nº 403, NOVA FÍICA, GOIANÉSIA - GO

Email: lucashenrique3034@outlook.com

LUCAS HENRIQUE CRISTINO CALIXTO

**Projeto e fabricação de uma Máquina de Comando Numérico Computadorizado, com
foco em baixo custo de produção e manutenção**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica,
da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Goianésia, 03 de julho de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cleber Caetano Thomazi - Orientador
Faculdade Evangélica de Goianésia



Prof. Dr. Alessandro Rodrigues Faria - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia



Prof. Ivandro José de Freitas Rocha - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia

Dedico esse trabalho primeiramente aos meus pais, que ao longo de toda a jornada de graduação sempre me apoiaram, incentivaram e sempre me compreenderam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar saúde e forças para superar cada momento de dificuldade e continuar sempre seguindo em frente.

Agradeço aos meus pais, por se mostrarem presentes e serem os meus maiores incentivadores.

Agradeço a todos os profissionais que contribuíram para minha formação, em especial ao meu orientador, Dr. Cleber Caetano Thomazi, pelo auxílio e disponibilidade de tempo.

Às amizades construídas durante o curso e a troca de conhecimentos.

Agradeço de forma especial ao meu pai, Adolfo Calixto da Silva, por disponibilizar tempo para ajudar na fabricação, montagem e testes preliminares do protótipo.

RESUMO

O presente trabalho contempla o projeto e a construção do protótipo de uma *router* CNC com três eixos independentes. São abordados diversos aspectos construtivos referentes à mecânica e à eletrônica, sempre utilizando critérios de engenharia para seleção dos componentes. A estrutura é constituída por materiais de fácil manipulação e que necessitam da menor interação possível do usuário, de forma a projetar uma máquina de fácil construção, baixo custo e que atenda a diversas necessidades.

Palavras-chaves: *Router* CNC. Projeto de Máquinas.

ABSTRACT

This work includes the design and construction of a CNC router prototype with three independent axes. Several constructive aspects related to mechanics and electronics are approached, always using engineering criteria for component selection. The structure is made with materials that are easy to handle and that require the least possible interaction from the user, in order to design a machine that is easy to build, low cost and that meets different needs.

Keywords: CNC Router. Machine Design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de fabricação de uma peça.....	20
Figura 2 - Representação dos eixos em uma máquina CNC.....	20
Figura 3 - Sistemas de eixos de deslocamento.	21
Figura 4 - Fresamento de topo.	22
Figura 5 - Exemplo de <i>router</i> CNC - Pórtico móvel - Revolution 3.	22
Figura 6 - Peça tridimensional e parte do seu percurso de corte.	23
Figura 7 - Página inicial Mach 3.....	24
Figura 8 - Patrocinadores Grbl.	25
Figura 9 - Parafuso de avanço movido por servomotor para dispositivo de posicionamento.	26
Figura 10 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento tangencial discordante.	28
Figura 11 - Vista do projeto, montagem final.....	31
Figura 12 - Pré-visualização renderizada da máquina.	31
Figura 13 - Perfil Alumínio Estrutural C-Beam 80x40mm.....	32
Figura 14 - Perfil Alumínio Estrutural 40x40mm.....	32
Figura 15 - Peças de Junção da Estrutura.	33
Figura 16 - Fixação do perfil estrutural de alumínio a estrutura em aço.....	33
Figura 17 - Disposição dos perfis estruturais ao longo dos eixos.....	34
Figura 18 - Sistema de deslizamento linear com roldanas.....	35
Figura 19 - Roldanas.....	36
Figura 20 - Encaixe das roldanas sobre o trilho.	36
Figura 21 - Fuso trapezoidal e castanha.	37
Figura 22 - Coeficiente de segurança eixo Z.	38
Figura 23 - Tensão de von Mises eixo Z.	39
Figura 24 - Deslocamento eixo Z.	39
Figura 25 - Coeficiente de segurança eixo X.....	40
Figura 26 - Tensão de von Mises eixo X.....	40
Figura 27 - Deslocamento eixo X.....	40
Figura 28 - Coeficiente de segurança eixo Y.....	41
Figura 29 - Tensão de von Mises eixo Y.....	41
Figura 30 - Deslocamento eixo Y.....	41
Figura 31 - Arduino Uno.	42

Figura 32 - CNC <i>SHIELD V3</i>	43
Figura 33 - Driver DM542.....	44
Figura 34 - Motor de Passo.....	46
Figura 35 - Driver configurado.....	46
Figura 36 - Fonte Chaveada.....	47
Figura 37 - Plug C14 e conector Mike.....	48
Figura 38 - Corte das peças planas.	49
Figura 39 - Furos refeitos na furadeira de bancada.	50
Figura 40 - Marcação dos furos.	51
Figura 41 - Marcação do furo com punção.....	51
Figura 42 - Fabricação da rosca M5.	52
Figura 43 - Primeira montagem da Máquina.	52
Figura 44 - Fabricação do chicote.	53
Figura 45 - Chicote finalizado.	54
Figura 46 - Peças preparadas para o processo de pintura.	55
Figura 47 - Peças pintadas.	55
Figura 48 - Comparação projeto e protótipo.....	56
Figura 49 - Desenho que constatou o desnivelamento.	56
Figura 50 - Aplainamento da mesa.	57
Figura 51 - Desenho após o aplainamento.....	57
Figura 52 - Furação para fixação das buchas.....	58
Figura 53 - Tábua de sacrifício com buchas americanas.	58
Figura 54 - Usinagem de corpos de teste.....	59
Figura 55 - Superfície das peças usinadas.	60
Figura 56 - Controle dimensional quadrado 60x60mm.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propiedade Mecânica dos Materiais	38
Tabela 2 - Dimensionamento de motores de passo.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Elementos de transmissão de movimento e suas características	25
Quadro 2 - Acionamentos rotativos	27
Quadro 3 - Especificações do Driver DM542	43
Quadro 4 - Comparação de preços entre máquinas CNC equivalentes	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D – Três dimensões

A – Ampère – Unidade de Medida de Corrente Elétrica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACM – Alumínio Composto

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAD – *Computer Aided Design* – Projeto Assistido por Computador

CAM – *Computer Aided Manufacturing* – Fabricação Assistida por Computador

CNC – Comando Numérico Computadorizado

DIY – *Do It Yourself* – Faça Você Mesmo

DWG – *DraWinG Format*

GPLv3 – Versão 3 da Licença Geral GNU

JOG – Velocidade de Operação no Vazio

MDF – *Medium Density Fibeboard* – Placa de Fibra de Média Densidade

NC – Numérico Computadorizado

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

POM - Poliformaldeído

PWM – *Pulse Width Modulation* – Modulação por Saída de Pulso

rpm – Rotações por Minuto

USB – *Universal Serial Bus* – Porta Serial Universal

LISTA DE SÍMBOLOS

F_c = força de corte [N]

K_s = pressão específica de corte [N/mm²]

V_c = velocidade de corte [m/min]

V_f = velocidade de avanço [mm/min]

a_p = profundidade [mm]

f_c = avanço de corte [mm]

f_z = avanço por dente

A = seção transversal de corte [mm²]

D = diâmetro da fresa [mm]

N = velocidade de rotação da ferramenta de corte [rpm]

f = avanço [mm/golpe]

n = número de rotações por minuto

z = número de dentes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.1.3	Justificativa.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Máquinas CNC.....	19
2.2	Eixos de deslocamento	20
2.3	Router CNC.....	21
2.4	G-code	22
2.5	Interfaces de comando.....	23
2.5.1	Mach 3.....	23
2.5.2	Grbl.....	24
2.6	Elemento de transmissão de movimento	25
2.7	Acionamentos rotativos	26
2.8	Usinagem e parâmetros de corte	27
3	DESENVOLVIMENTO	30
3.1	Projeto e modelamento estrutural.....	30
3.1.1	Alumínio estrutural.....	32
3.1.2	Componentes de junção da estrutura.....	33
3.1.3	Trilhos de deslizamento.....	33
3.1.4	Rolamentos	35
3.1.5	Fuso trapezoidal	36
3.1.6	Análise pelo método de elementos finitos.....	37
3.2	Parte eletrônica	41
3.2.1	Placa controladora	42
3.2.2	Drivers de potência.....	43
3.2.3	Motores de passo	44
3.2.4	Alimentação elétrica.....	47
3.2.5	Conectores	48
4	FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO	49

5	RESULTADOS OBTIDOS.....	59
6	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	63
	ANEXOS	65
	Anexo A – RELATÓRIO DE CORTE CNC PLASMA	65
	Anexo B – Relatório de Controle Dimensional.....	69
	Anexo C – QR Code de Acesso aos Arquivos	73

1 INTRODUÇÃO

A acelerada progressão tecnológica possibilitou a usinagem de diversas matérias primas com uma produtividade crescente, o incremento de máquinas automatizadas e, mais recentemente, as Máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) permitiram uma grande flexibilidade nas linhas de manufatura. A sigla NC representa a automação das máquinas, em que um determinado programa retém todos os códigos para a fabricação e execução de uma peça.

Tais tecnologias de fabricação trazem consigo grandes benefícios, uma vez que amplificam a produtividade e qualidade geral das peças e facilitam a fabricação de peças complexas. Essas características têm forçado as empresas a substituírem suas máquinas ferramentas operadas de forma manual por máquinas automatizadas, para se manterem competitivas no mercado atual.

Esta busca por modernização tem sido observada nos últimos anos não unicamente em grandes indústrias, mas igualmente em setores menores, como os de prestação de serviços. Estudantes, artesões, joalheiros e pequenos empreendedores têm se aproveitado desta ciência para o fabrico dos mais variados objetos, como placas de circuitos impresso, moldes para joias, fabricação de peças em madeira, dentre outras.

Dentre as opções mais usuais de operadoras CNC estão pequenas fresadoras e impressoras 3D. “Uma das principais características da fresadora é a realização de uma grande variedade de trabalhos tridimensionais. O corte pode ser realizado em superfícies situadas em planos paralelos, perpendiculares, ou formando ângulos diversos...” (SCHAPLA, 2010, p. 8).

As fresadoras à disposição do mercado, porém, requerem um investimento inicial muito alto, manutenção rígida e especializada. Logo, inúmeros estudantes e *hobbyistas* ao redor do globo se esforçam para desenvolver protótipos alternativos que visam transformar estas máquinas em um projeto simples, versátil e de qualidade, a fim de propiciar o seu uso para a execução das mais diversas atividades, favorecendo para que pessoas com pouca competência técnica possam replicar sem grandes dificuldades. O projeto da *router* CNC possui o princípio de jamais apresentar intuito lucrativo, e sua execução ser da forma *DIY* (*Do It Yourself*, faça você mesmo). Segundo Pearce (2012), esta espécie de projeto inicia à idade das máquinas livres, de tal maneira que *software* e *hardware* sejam disponibilizados de forma gratuita.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Neste trabalho propõe-se a projetar, dimensionar, implementar e verificar uma fresadora CNC de pequeno porte que possa usinar materiais não ferrosos. A eletrônica deve ser facilmente encontrada no mercado nacional e o *software* de implantação livre. Este sistema deverá ser aplicável a uma máquina obtendo precisão, produtividade e um custo inferior aos sistemas existentes no mercado, de forma a atender a necessidade de pequenos negócios, e servindo como objeto de estudo para os acadêmicos de Engenharia Mecânica e ainda oferecer capacidade de expansão e suporte para novos projetos.

O trabalho será segmentado em etapas que contemplarão: analisar as fresadoras disponíveis no mercado, detalhar o conjunto mecânico, fabricar os componentes, realizar a montagem e posteriormente fazer a verificação. De forma a abranger todo o processo de projeto e prototipagem de engenharia mecânica, agregando ao conhecimento do autor.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Fazer o projeto Mecânico de uma *router CNC*;
- projetar a parte eletrônica: fonte, proteções, sensores de final de curso, motores, dentre outros;
- nomear uma plataforma gratuita no mercado para interpretação do gráfico eletrônico a ser fabricado em extensão DWG e executado pela máquina CNC;
- estabelecer comunicação via interface USB com o microcontrolador Arduino, a fim de viabilizar a utilização da fresadora com qualquer computador portátil, que não possua porta serial ou paralela;
- construir um protótipo;
- integrar os sistemas;
- realizar testes;
- disponibilizar o projeto na plataforma *Google Drive*.

1.1.3 Justificativa

O desenvolvimento de uma fresadora de comando numérico de baixo custo possui uma ampla gama de aplicações, desde empreendedorismo, como a economia criativa, aplicações laboratoriais e didáticas, e o aprendizado baseado em projetos.

Este trabalho visa o desenvolvimento de um sistema que possibilite ser facilmente replicado por outras faculdades, permitindo o seu uso para contribuir com o desenvolvimento

de novos projetos como peças de aerodelismo e placas de circuitos impressos para projetos eletrônicos.

A construção de uma fresadora de comando numérico agrega no aprendizado de diversos conteúdos permitindo assim o seu uso durante as aulas experimentais de diversas disciplinas, tais como: eletrônica e robótica, elementos de máquinas, fabricação assistida por computador, dentre outras. É de grande valia para agregar conhecimento específico e familiarização dos estudantes de Engenharia Mecânica com tecnologias que estão cada vez mais presentes no universo industrial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tratará da apresentação de uma *router* de comando numérico computadorizado e apresentação individualizada dos principais componentes que compõem a sua estrutura. Os materiais e equipamentos aqui descritos são frutos da análise de fresadoras existentes no mercado e que serviram de referência para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Máquinas CNC

As máquinas CNC são dispositivos eletromecânicos que manipulam ferramentas por meio de entradas de programação feitas por um computador. As primeiras máquinas do tipo foram desenvolvidas nas décadas de 1940 e 1950, e à medida que novas tecnologias e maior poder de processamento digital são introduzidos, as máquinas CNC continuam a melhorar sua eficiência.

A linguagem de programação comumente utilizada para passar instruções às máquinas é conhecida como G-code. G-code é uma notação para ordenar e regular o movimento das várias partes de uma máquina (BELL, 2014, p.14). Foi criada devido a necessidade de os fabricantes industriais terem uma linguagem padronizada.

Existem vários tipos de máquinas CNC, no entanto o princípio básico de operação para todas ocorre da seguinte forma: inicialmente a peça é projetada em um software CAD (Desenho Auxiliado por Computador) e, logo após, o arquivo é enviado a um programa CAM (Manufatura Auxiliada por Computador), o qual será responsável por criar o arquivo G-code que conterá as instruções e os parâmetros de ferramentas necessárias para o processo. As instruções geradas na linguagem de programação são enviadas à máquina CNC que interpreta cada linha do código inserido e executa as funções nele contido. Uma vez que o código de fabricação for gerado, pode ser utilizado inúmeras vezes, repetindo a produção, permitindo a leitura de várias peças em um único arquivo e facilitando a produção em larga escala.

O processo de fabricação de uma peça segue o fluxograma abaixo proposto na Figura 1.

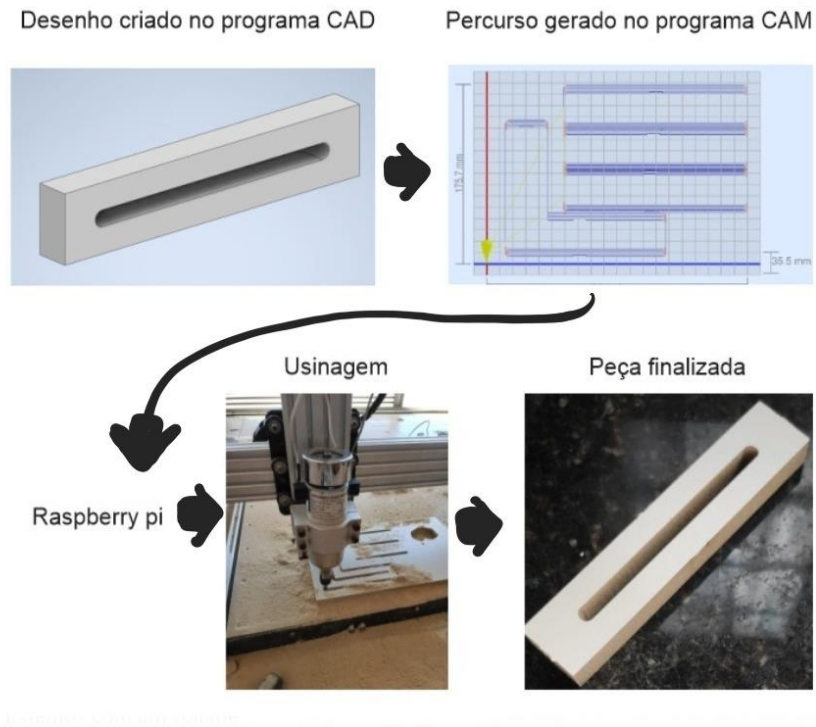


Figura 1 - Fluxograma de fabricação de uma peça.

Fonte: O próprio autor.

2.2 Eixos de deslocamento

Segundo Albert (2011), as *routers* CNC possuem três eixos de movimentação que são usados para definir cada ponto no espaço, geralmente chamamos de eixo X e Y (horizontais), e o eixo vertical Z que possui deslocamento reduzido em proporção aos demais. Os eixos estão representados na Figura 2.

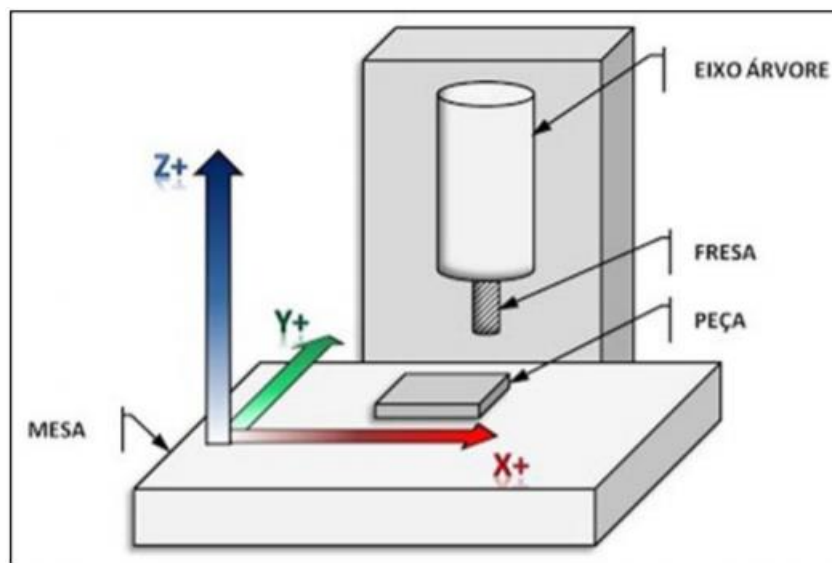


Figura 2 - Representação dos eixos em uma máquina CNC.

Fonte: Azevedo (2017).

Madison (1996, p.11-17), diz ainda que os eixos lineares (X, Y, Z) são adotados como eixos lineares primários de deslocamento e que a capacidade de rotação em torno destes eixos gera mais 3 eixos angulares. As rotações em torno dos eixos X, Y e Z recebem respectivamente os nomes de eixo rX ou A, rY ou B e rZ ou C. Alguns sistemas mais complexos ainda são dotados de outros 3 eixos lineares secundários que atuam de maneira paralela aos eixos primários, os quais levam a nomenclatura de U, V e W, paralelos respectivamente aos eixos X, Y e Z. Que estão representados na Figura 3.

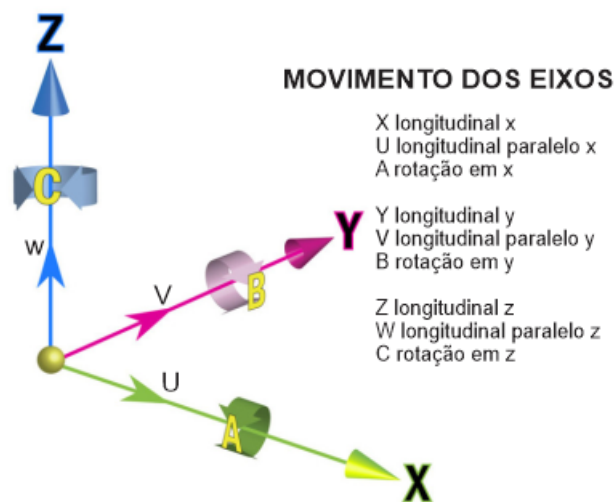


Figura 3 - Sistemas de eixos de deslocamento.

Fonte: Adaptado de Garden City Machine (2021).

Madison (1996) complementa que máquinas CNC de 7 eixos ou mais, são utilizadas para a fabricação de projetos com altíssimo grau de complexidade.

2.3 Router CNC

Pode se definir uma *router* CNC como uma fresadora projetada para processar matérias-primas mais leves como acrílicos, madeiras e algumas ligas de alumínio. O projeto do equipamento pode priorizar a força de deslocamento ou a velocidade. É um processo de fabricação convencional, com remoção de cavaco, do tipo fresamento.

Dentre os processos de fresamento, as *routers* adotam o fresamento de topo (Figura 4). O material é removido por uma ferramenta giratória (fresa) de múltiplos gumes cortantes. Cada gume remove certa quantidade de material a cada revolução do eixo o qual a ferramenta está fixada (CHIAVERINI, 1986).

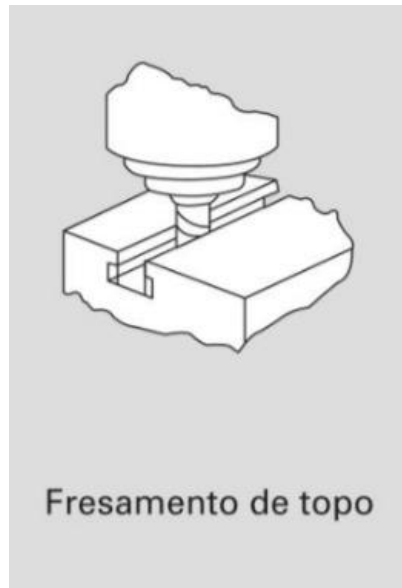


Figura 4 - Fresamento de topo.

Fonte: Adaptado de Machado (2015).

É montada sobre um sistema de pórtico, o qual pode ser fixo ou móvel. Em sistemas com pórtico móvel (Figura 5), o pórtico realiza o deslocamento sobre a mesa onde fica o material a ser usinado, já em sistemas de pórtico fixo a mesa fica responsável por fazer o movimento de avanço. A ferramenta de corte fica acoplada no *spindle*, que por sua vez fica fixado ao pórtico.

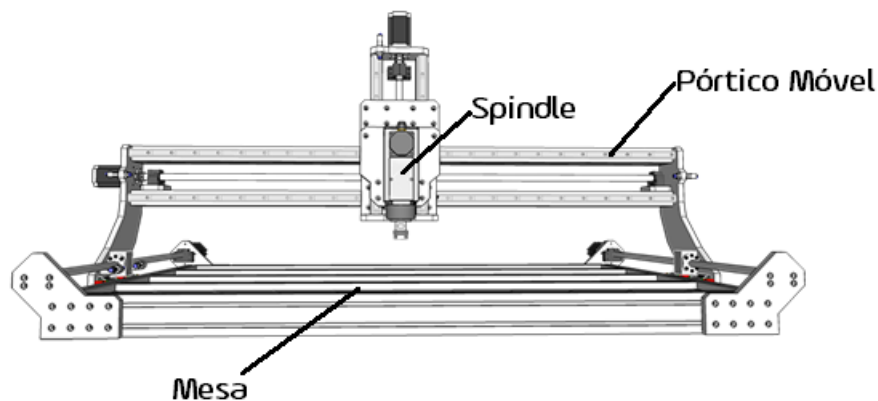


Figura 5 - Exemplo de *router* CNC - Pórtico móvel - Revolution 3.

Fonte: adaptado de Atividade Maker (2017).

2.4 G-code

G-code é o nome genérico dado a linguagem de programação utilizada em computadores para se comunicarem com máquinas CNC. De acordo com o How To Mechatronics (2020), os comandos atribuídos pelo código geométrico instruem a máquina para onde se mover, a que velocidade, dentre outros parâmetros.

Um arquivo de código G é criado através da conversão de modelos bidimensionais ou tridimensionais em linhas de comando. Vários *softwares* permitem a criação do desenho e geração do G-code na mesma plataforma. A Figura 6 representa um desenho e a ilustração do seu código.

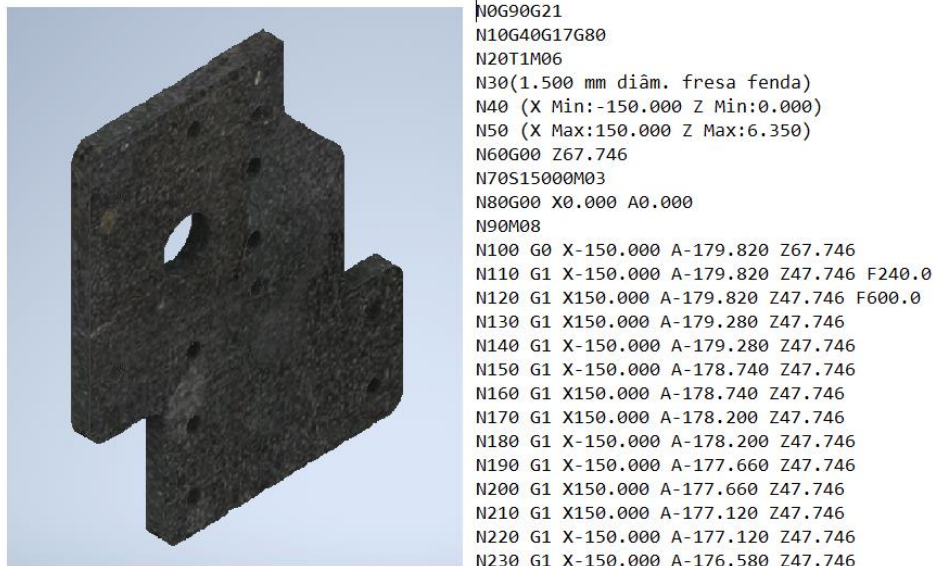


Figura 6 - Peça tridimensional e parte do seu percurso de corte.

Fonte: O próprio autor.

Quando o usuário carrega o arquivo para a fabricação de uma peça, uma interface de comando interpreta o código e o transforma em movimentos.

2.5 Interfaces de comando

2.5.1 Mach 3

Mach 3 é um *software* que transforma um computador em um controlador de máquina CNC. Foi desenvolvido pela empresa Newfangled ArtSoft e hoje é o *software* de comando numérico mais utilizado no mundo.

Segundo sua empresa criadora, o *software* é compatível com diversos sistemas Windows e pode se comunicar via porta paralela DB25, porta USB ou via rede Ethernet WIFI (LAN/ RJ45). Além de poder controlar máquinas de 3, 4, 5 e até 6 eixos. Na Figura 7 é possível visualizar a sua interface de início.

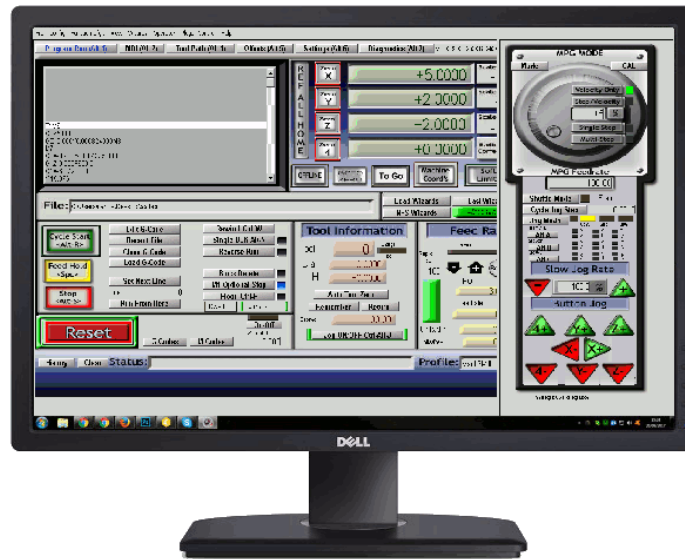


Figura 7 - Página inicial Mach 3.

Fonte: Newfangled ArtSoft (2020).

A grande desvantagem que dificulta a implantação é o fato de seu uso requerer uma licença de usuário do tipo paga.

2.5.2 Grbl

É um programa livre de controle para máquinas de comando numérico computadorizado lançado sobre a licença GPLv3 (versão 3 da Licença Pública Geral). O que permite a liberdade de usar o software para qualquer finalidade, fazer mudanças em sua estrutura e compartilhar estas mudanças, tudo de forma gratuita.

Foi escrito em linguagem C altamente otimizada para funcionar em microcontroladores atmega328p (presentes em diversas placas, como por exemplo o Arduino Uno), com a finalidade de coordenar máquinas operatrizes (GITHUB, 2020).

Seu desenvolvedor líder e criador foi o norueguês Simen Svale Skogsrud. Ele foi lançado em 2009. Hoje o projeto conta com um novo desenvolvedor chefe (Sungeun K. Jeon) e diversos apoiadores (Figura 8).



Figura 8 - Patrocinadores Grbl.

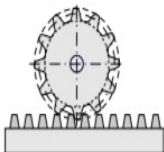
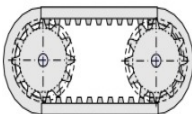
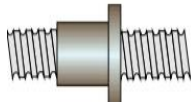
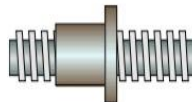
Fonte: GITHUB (2020).

O seu uso requer a utilização de um programa que envie o conjunto de instruções do computador à placa controladora. Dentre eles se destacam o Universal G-code Sender, bCNC e Easel (GITHUB, 2020).

2.6 Elemento de transmissão de movimento

Como afirma Stoeterau (2004) existem diversos sistemas mecânicos que convertem movimento rotacional em movimento linear. Cada sistema com as suas particularidades de aplicação, tendo vantagens e desvantagens. Os mais comumente empregados em *routers* são os fusos trapezoidais, fusos de esfera, polias sincronizadas e cremalheiras. O Quadro 1 resume as principais características de cada um destes sistemas.

Quadro 1 - Elementos de transmissão de movimento e suas características

Tipo	Cremalheiras	Polias Sincronizadoras	Fusos Trapezoidais	Fusos de Esfera
Requisitos				
Custo	baixo	baixo	baixo	médio
Vibrações	alto	baixo	média	baixa
Exatidão no posicionamento	baixa	média	baixa	alta
Capacidade de transmissão de forças/torque	alta	média	alta	alta
Facilidade de manutenção	alta	média	média	médio

Tipo	Cremalheiras	Polias Sincronizadoras	Fusos Trapezoidais	Fusos de Esfera
Atrito	baixo	médio	alto	baixo
Vida útil	média	média	média	alta

Fonte: adaptado de Stoeterau (2004).

“Se a rotação de entrada for fornecida por um servomotor ou motor de passo em combinação com um parafuso de avanço preciso, pode-se obter um posicionamento bastante preciso.” (NORTON, 2013, p. 866). A Figura 9 representa um acoplamento com parafuso de potência.

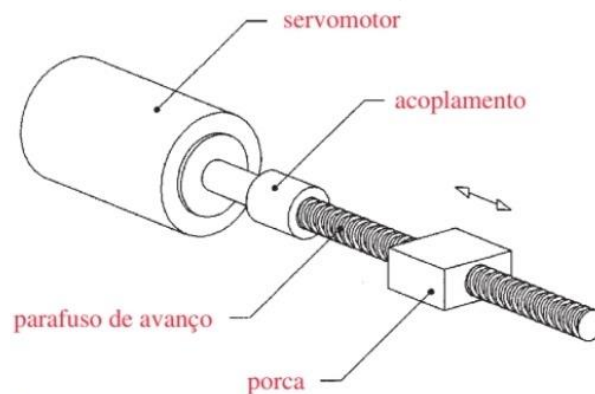


Figura 9 - Parafuso de avanço movido por servomotor para dispositivo de posicionamento.

Fonte: Norton (2013).

Ainda segundo Norton (2013), uma redução significativa no atrito de rosca pode ser obtida com o uso de parafusos de esfera. Eles possuem capacidade de carga maior que outros parafusos de potência com diâmetros parecidos, no entanto seu custo é bastante elevado, e uma precisão excessiva por parte do projetista pode se tornar uma decisão ruim, visto que muitas vezes não será requisitado e eleva rudemente o preço final.

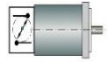


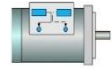

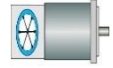
2.7 Acionamentos rotativos

“Acionamentos rotativos são os mais comumente encontrados em máquinas ferramentas, sendo seu uso amplamente difundido entre os projetistas, tanto pela diversidade de oferta quanto pela facilidade de seleção” (STOETERAU, 2004, p. 89).

Atualmente existem no mercado produtos capazes de suprir a maioria das necessidades de projeto. Em máquinas controladas numericamente usualmente se utiliza servomotores de corrente contínua quando se há a necessidade de alto torque ou motores de passo para casos de

torque moderado. Os tipos mais comuns de acionadores rotativos e suas características estão expostas no Quadro 2.

Quadro 2 - Acionamentos rotativos

	Servomotores de Corrente Contínua CC		Servomotores de Corrente Contínua AC		Motores de Passo		
	Comutação Mecânica	Comutação Eletrônica	Assíncronos	Síncronos	Relutância Variável	Imã Permanente	Híbridos
							
Controle	Alto	Alto	Ruim	Moderado	Alto	Alto	Alto
Manutenção	Alta	Alta	Não aplicável	Não aplicável	Alta	Alta	Alta
Custo	Alto	Alto	Alto	Moderado	Alto	Alto	Moderado
Dinâmica	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa
Torque	Bom	Alto	Bom	Bom	Moderado	Moderado	Bom
Cursos	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Precisão de Giro	Alto	Alto	Regular	Regular	Moderado	Moderado	Alto

Fonte: adaptado de Stoeterau (2004)

2.8 Usinagem e parâmetros de corte

A fabricação por usinagem em máquinas ferramentas parte do princípio de remoção de material até se formar a superfície desejada. O meio utilizado para obter tal fim é providenciar um movimento relativo entre a peça e a ferramenta escolhida. A peça durante o processo é considerada estacionária.

Estes movimentos relativos podem ser subdivididos entre os que geram diretamente a saída de cavaco e os que não tratam diretamente de sua retirada.

Movimentos que originam diretamente a saída de cavaco:

- Movimento de corte: movimento relativo entre a peça e a aresta de corte, caso não haja velocidade de avanço, origina-se apenas uma retirada de cavaco.
- Movimento de avanço: movimento relativo entre a peça e a aresta de corte, juntamente com o movimento de corte, causa a retirada contínua de cavaco.
- Movimento efetivo: movimento resultante originado pelo movimento de avanço e corte executados ao mesmo tempo.

Movimentos que não causam diretamente a formação de cavaco:

- Movimento de aproximação: aproximação da aresta de corte à peça anterior ao processo de usinagem.
- Movimento de ajuste: determina a espessura de material a ser retirado entre a peça e a aresta de corte.

- Movimento de correção: compensa a variação geométrica da ferramenta, realizado entre a peça e a aresta de corte.
- Movimento de recuo: afastamento da ferramenta após a usinagem.

A cada movimento está associada uma velocidade, e a seleção destes parâmetros depende da operação de usinagem, do material da ferramenta, da peça e da máquina. Embora as velocidades de aproximação, ajuste, correção e recuo não promovam a remoção direta de cavaco, elas se tornam muito importantes no projeto final, pois reduzem o tempo de operação. Comumente essas velocidades são muito superiores às velocidades de corte e de avanço, e no mundo das CNC são chamadas de velocidade de JOG. A Figura 10 representa os movimentos que geram diretamente a saída de cavaco.

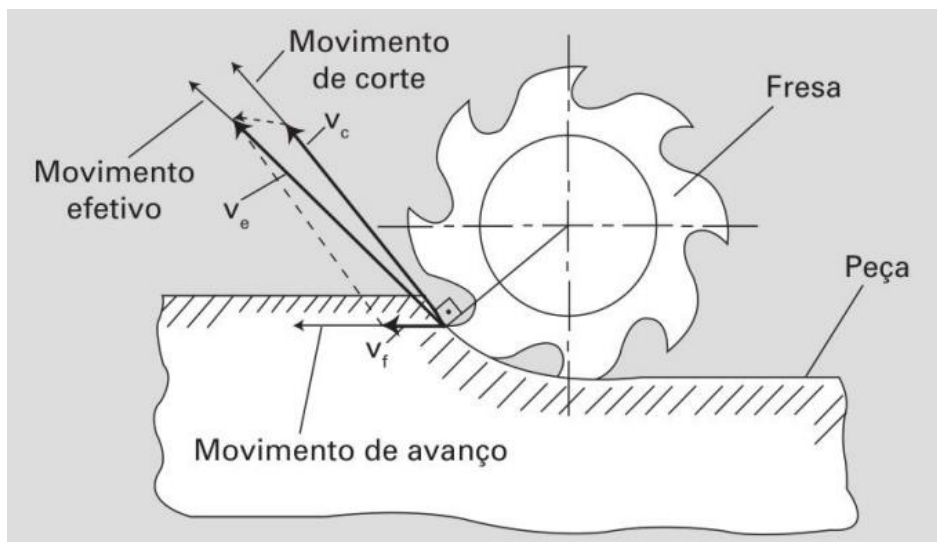


Figura 10 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento tangencial discordante.

Fonte: Machado (2015).

Os cálculos dos parâmetros de corte são de muita importância para o dimensionamento da máquina. As equações a seguir foram retiradas do livro Teoria das Usinagens dos Materiais (Machado, 2015).

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \text{ [m/min]} \quad (2.1)$$

$$V_f = f \cdot n \text{ [mm/min]} \quad (2.2)$$

$$f = f_z \cdot z \text{ [mm/rev]} \quad (2.3)$$

$$A = a_p \cdot f_c \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.4)$$

$$F_c = K_s \cdot A \text{ [N]} \quad (2.5)$$

Onde:

V_c = velocidade de corte [m/min]

D = diâmetro da fresa [mm]

N = velocidade de rotação da ferramenta de corte [rpm]

V_f = velocidade de avanço [mm/min]

f = avanço [mm/golpe]

n = número de rotações por minuto

f_z = avanço por dente

z = número de dentes

A = seção transversal de corte [mm²]

a_p = profundidade [mm]

f_c = avanço de corte [mm]

F_c = força de corte [N]

K_s = pressão específica de corte [N/mm²]

3 DESENVOLVIMENTO

Neste tópico será detalhado todo o processo de desenvolvimento do projeto e da fabricação do protótipo, bem como os critérios de seleção de cada item. Com o intuito de facilitar a compreensão, esta seção foi dividida em vários subitens, que abrangem a mecânica (estrutura da máquina), eletrônica (placas de controle e drivers de funcionamento), elétrica (painel e fonte de alimentação) e informática (*software* de desenho e de controle).

3.1 Projeto e modelamento estrutural

A estrutura mecânica deve ser suficientemente rígida para receber os elementos de máquinas que proporcionem transmissão e conversão de energia mecânica, permitindo usar materiais como madeira e polímeros. Deverá ser de fácil expansão e atender a diversas propostas de tamanho, além de requerer a mínima capacidade de intervenção do usuário, dando prioridade a componentes prontos que demandem apenas montagem ou conexão simples.

Com o objetivo em mente foi traçado um conjunto básico de requisitos os quais a máquina deverá atender:

- área de usinagem útil: 470 x 790 mm (podendo ser facilmente ajustada às necessidades do usuário);
- velocidade de avanço: ao menos 1000 mm/s;
- baixo custo (se comparado a máquinas semelhantes);
- baixo peso;

Inicialmente foram feitas várias análises em máquinas com propostas similares já existentes, o que possibilitou a concepção do projeto. O modelamento levou como base máquinas compartilhadas na comunidade OpenBuilds, um fórum de compartilhamento de projetos sobre máquinas de comando numérico computadorizado.

O *software* utilizado para o modelamento tridimensional, em ambiente virtual, de toda a estrutura foi o Autodesk Inventor®, devido a sua facilidade de obter componentes padronizados previamente modelados (parafusos, rolamentos, fusos, motores, etc.), além dos seus recursos para operação e alterações de projeto.

As peças foram modeladas individualmente. Em seguida foram montadas em subconjuntos, montagem eixo x, montagem lateral direita eixo y, montagem lateral esquerda eixo y, montagem base esquerda, até se obter a montagem final, conforme a Figura 11.

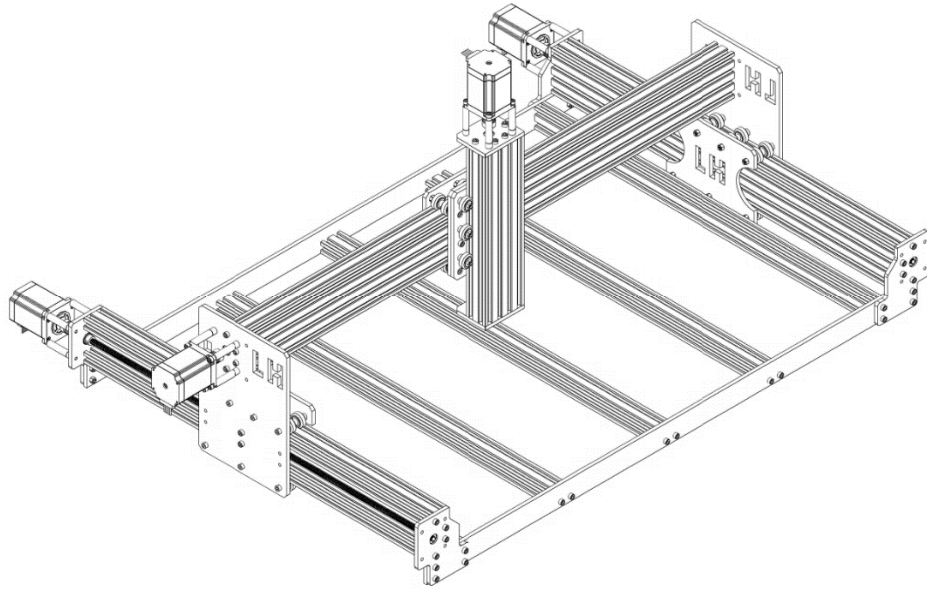


Figura 11 - Vista do projeto, montagem final.

Fonte: O próprio autor.

Uma das vantagens em se utilizar um sistema de modelamento 3D está na análise de interferências, o que faz com que o projeto possua uma alta probabilidade de sucesso. A partir da modelagem é possível obter uma pré-visualização da máquina (Figura 12), antes de iniciar o processo de fabricação.

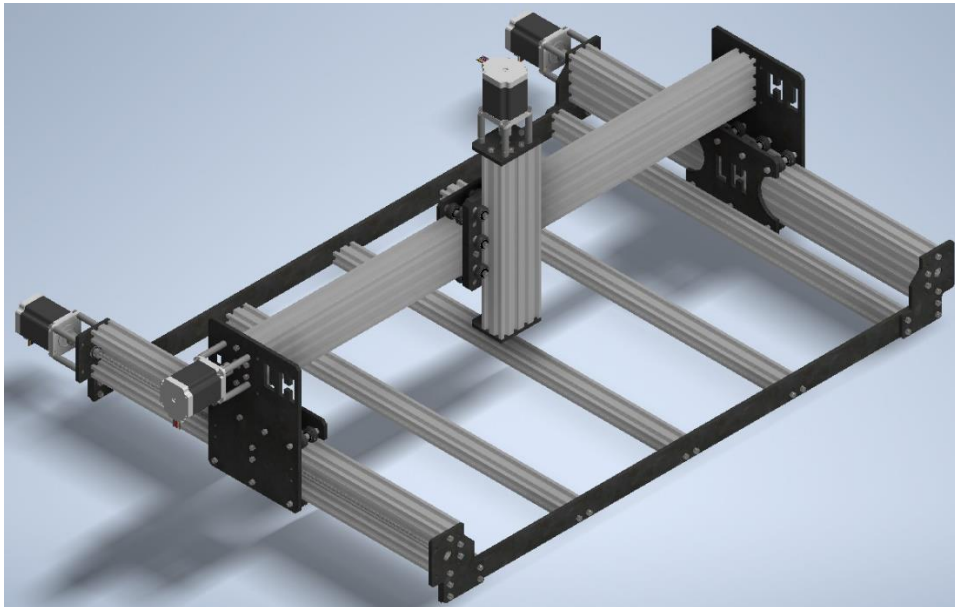


Figura 12 - Pré-visualização renderizada da máquina.

Fonte: O próprio autor.

Neste ponto já é conhecida a quantidade necessária de perfis, parafusos e demais materiais, otimizando a compra dos componentes. Outro importante recurso do *software*, é a capacidade de gerar desenhos em duas dimensões a partir do desenho 3D, vistas essas muito importantes para agilizar no processo de fabricação.

3.1.1 Alumínio estrutural

Perfis de alumínio estrutural são uma boa opção para criação de projetos. Possuem fácil junção, não requerem acabamento, são leves, geometria que ajuda na rigidez estrutural e ainda podem ser reaproveitados em outros projetos.

A estrutura da máquina conta com duas dimensões de perfis, o C-Beam 80 x 40mm (Figura 13) que constituem os eixos de deslocamento e os perfis 40 x 20mm (Figura 14) que reforçam a base.

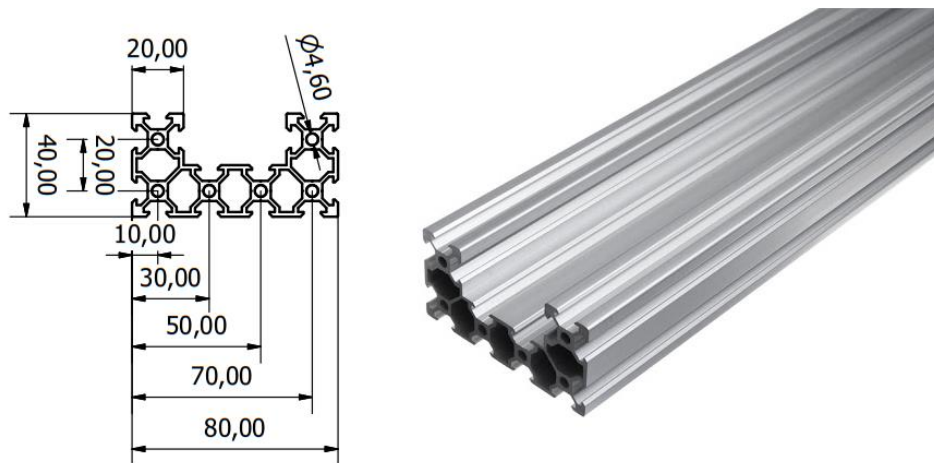


Figura 13 - Perfil Alumínio Estrutural C-Beam 80x40mm

Fonte: O próprio autor

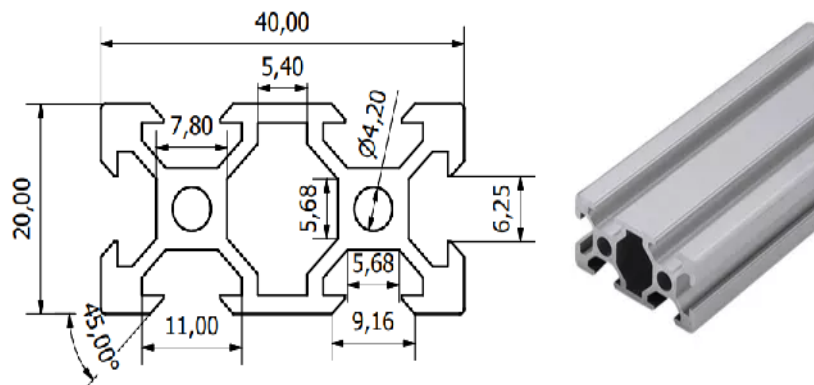


Figura 14 - Perfil Alumínio Estrutural 40x20mm

Fonte: O próprio autor

3.1.2 Componentes de junção da estrutura

O projeto necessita de elementos que permitam a junção dos componentes aos perfis de alumínio estrutural. Para este propósito devido à disposição dos métodos e do material foram utilizados chapas de aço ASTM-A36 com 4,76 mm de espessura para a confecção das peças. No entanto, podem ser utilizados outros materiais para a confecção, tais como: chapas de alumínio, ACM (Aluminium Composite Material), PEAD (Polietileno de Alta Densidade), dentre outros. Cabe ao usuário a escolha do material mais acessível para a confecção dos cortes (Figura 15).

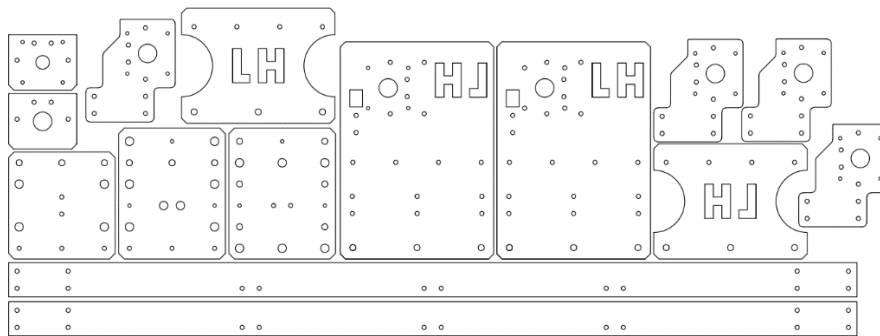


Figura 15 - Peças de Junção da Estrutura.

Fonte: O próprio autor

As peças demonstradas na figura acima são as bases de fixação dos motores, eixos e rolamentos. São fixadas através de parafusos, conferindo estabilidade e suportando os movimentos e carga de trabalho do sistema.

3.1.3 Trilhos de deslizamento

O sistema de deslizamento de cada eixo é composto por um perfil de alumínio estrutural do tipo C-beam com dimensões de 80 x 40 mm, fixado à estrutura através de parafusos nas extremidades, conforme a Figura 16.

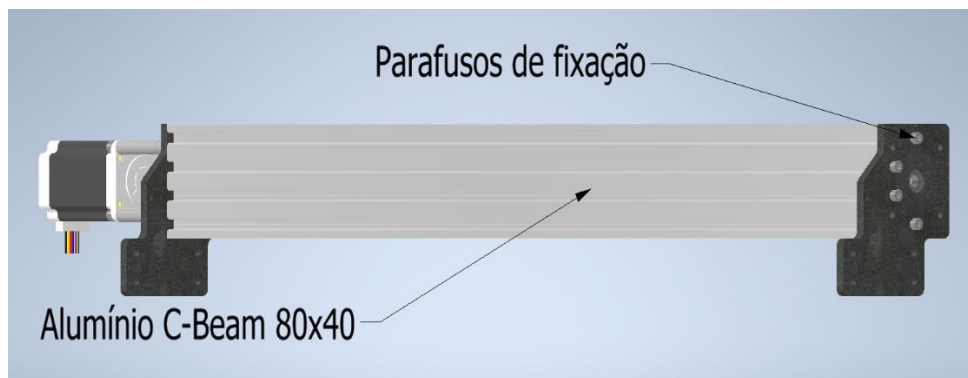


Figura 16 - Fixação do perfil estrutural de alumínio a estrutura em aço

Fonte: O próprio autor

Sobre os perfis deslizam rolamentos revestidos com poliacetal de baixo atrito, projetados e executados para não haver folga, nem mesmo desalinhamento. Por garantia, a fim de se obter a interferência necessária, foram adicionados ao projeto porcas excêntricas que permitem a regulagem do contato entre perfil e roldanas. A disposição dos perfis e os sistemas de deslizamento podem ser vistos nas Figuras 17 e 18, respectivamente.

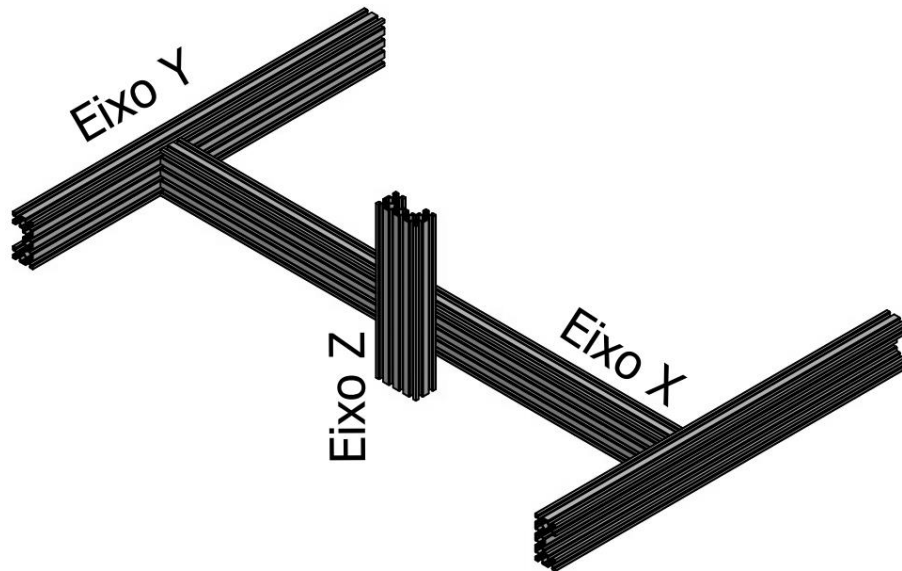


Figura 17 - Disposição dos perfis estruturais ao longo dos eixos

Fonte: O próprio autor

O deslocamento é ocasionado pelo deslizamento das roldanas de poliacetal ao longo das cavidades do alumínio, que servem como trilhos, além de darem rigidez a estrutura. Dessa forma, é gerada economia na construção da máquina, já que um único componente possui duas funções.

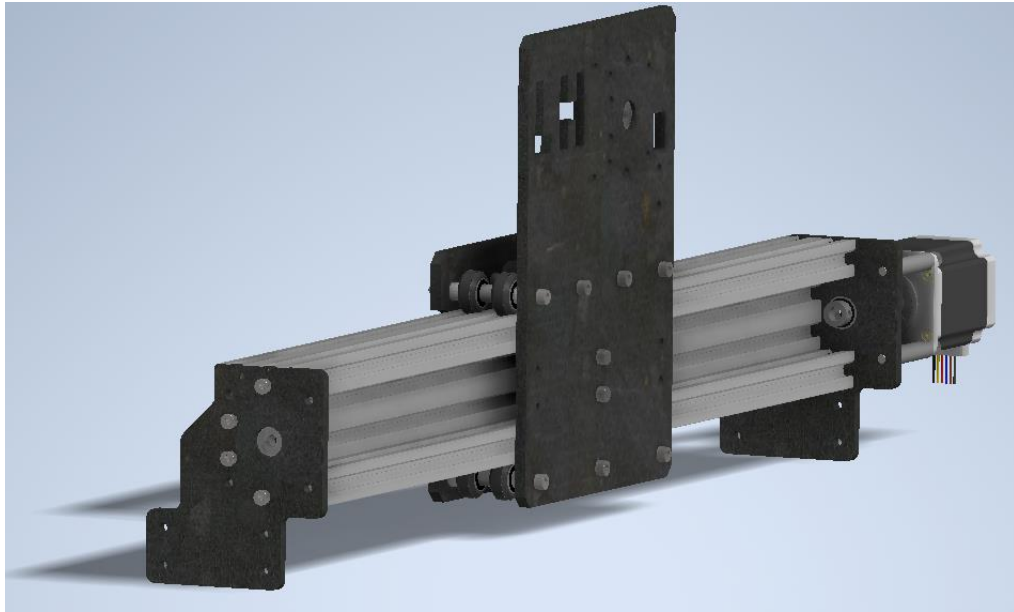


Figura 18 - Sistema de deslizamento linear com roldanas

Fonte: O próprio autor

3.1.4 Rolamentos

O sistema de trilhos linear com perfis de alumínio é bem difundido na comunidade de construção de máquinas CNC. Facilmente encontram-se os rolamentos já montados disponíveis para a compra, o que é mais viável do que comprar os rolamentos separados e toronar o revestimento de POM.

São encontrados no comércio em dois tamanhos padrões. O utilizado neste projeto conta com rolamentos 625zz duplos e a sua montagem e dimensões podem ser conferidas na Figura 19.

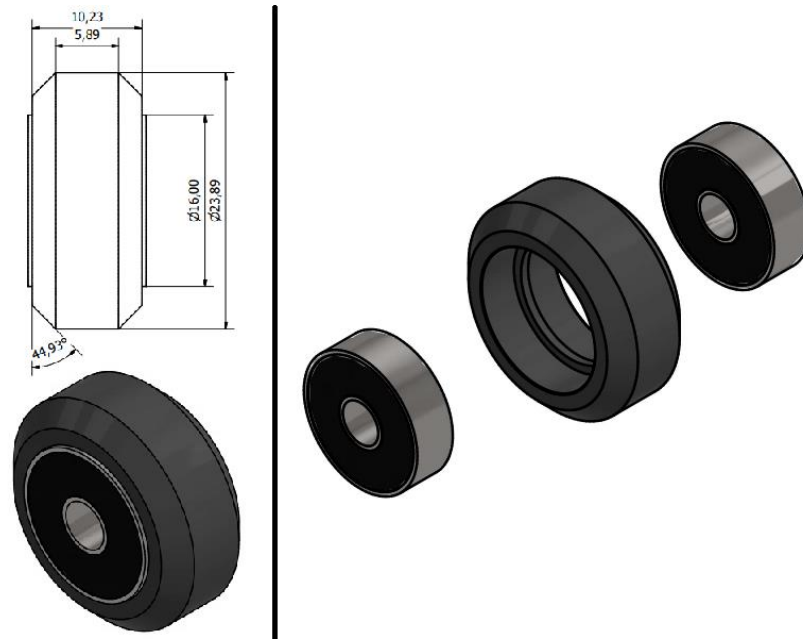


Figura 19 - Roldanas.

Fonte: O próprio autor

Os detalhes da montagem do eixo e sua fixação na estrutura estão disponíveis no apêndice do presente trabalho, no entanto é possível ter uma ideia do esquema com Figura 20.

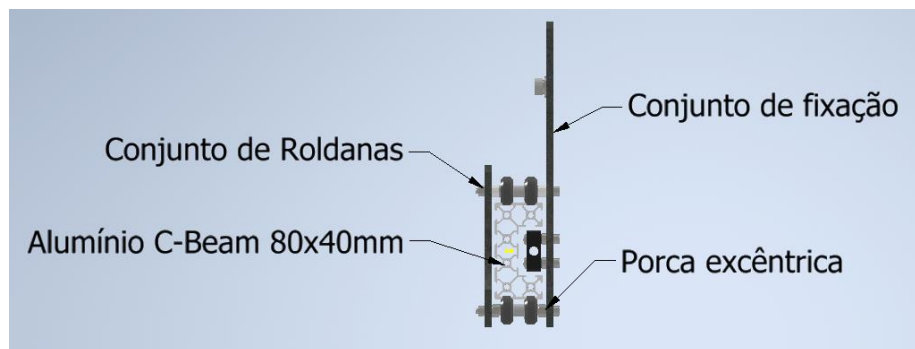


Figura 20 - Encaixe das roldanas sobre o trilho.

Fonte: O próprio autor

3.1.5 Fuso trapezoidal

A escolha de se utilizar fuso trapezoidal é facilmente justificada por suas boas características, aliadas ao seu baixo custo se comparado com fusos de esfera. O modelo selecionado para o projeto possui 8 mm de diâmetro externo, passo de 2 mm e 4 entradas, o que resulta em um avanço de 8 mm por revolução. Propriedades que garantem à máquina uma boa precisão, velocidade de deslocamento e eficiência na transmissão de torque, visto que aliado a uma castanha de poliacetal é possível obter rendimentos próximos aos 50 %.

As castanhas escolhidas também apresentam um sistema para evitar folgas. Na Figura 21 é possível visualizar um conjunto contendo castanha e fuso.

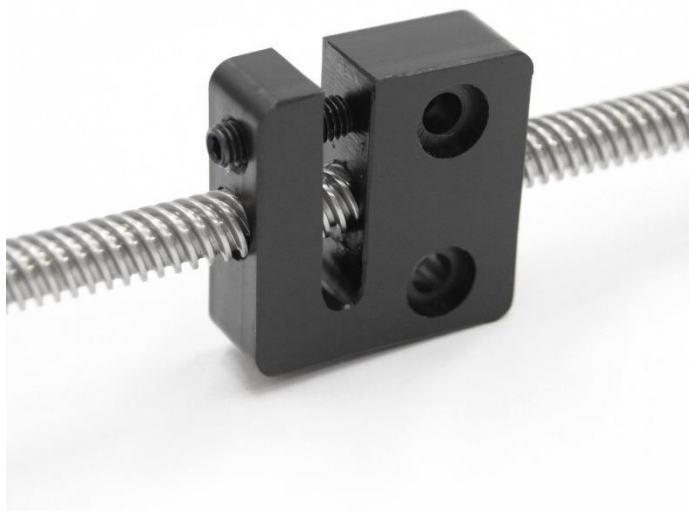


Figura 21 - Fuso trapezoidal e castanha.

Fonte: Shopify (2021)

3.1.6 Análise pelo método de elementos finitos

Primeiramente foi definida uma força de usinagem que seria a responsável pelos esforços solicitantes na estrutura. Foram utilizados alguns parâmetros base, como: material a ser usinado, velocidade de avanço, penetração de trabalho, dentre outros. A Tabela 1 a frente possui todos os dados necessários para determinar tal força.

Com o intuito de deixar as simulações mais fáceis e requisitar menos processamento, a estrutura foi subdividida e analisada de forma fracionada: eixo Z, eixo X e eixo Y.

O Autodesk Inventor® possui uma biblioteca própria para análise de estresse mecânico e para utilizá-la bastou associar materiais e as suas devidas propriedades mecânicas ao desenho 3D e delimitar as faces fixas que não possuem deslocamento, gerando logo em seguida a malha para simulações.

A estrutura é basicamente formada pela junção de liga de alumínio 6063 T5 e aço ASTM-A36, as propriedades mecânicas destes materiais podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedade Mecânica dos Materiais

Liga (ABNT/ASTM)	Têmpera	Limite de Resistência a Tração Máximo (Mpa)	Limite de Resistência a Tração Mínimo (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Alongamento "50 mm" (%)	Dureza Brinell (HB)
Alumínio 6063	T5	145	...	105	8	60
Aço A36	...	550	400	250	23	130

Fonte: Adaptado de SHOCKMETAIS e GELSON LUZ.

Finalmente obteve-se os resultados: Tensão de von Mises, Deslocamento, Deformação e Coeficiente de Segurança.

A Figura 22 apresenta o coeficiente de segurança para o eixo Z, seguida pela Tensão de von Mises (Figura 23) e pelo deslocamento (Figura 24).

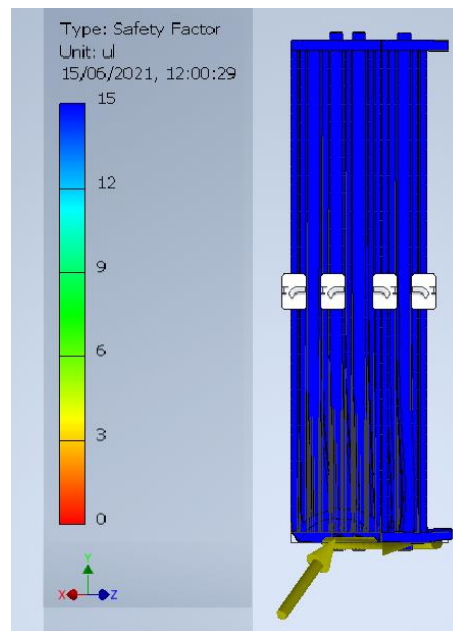


Figura 22 - Coeficiente de segurança eixo Z.

Fonte: O próprio autor.

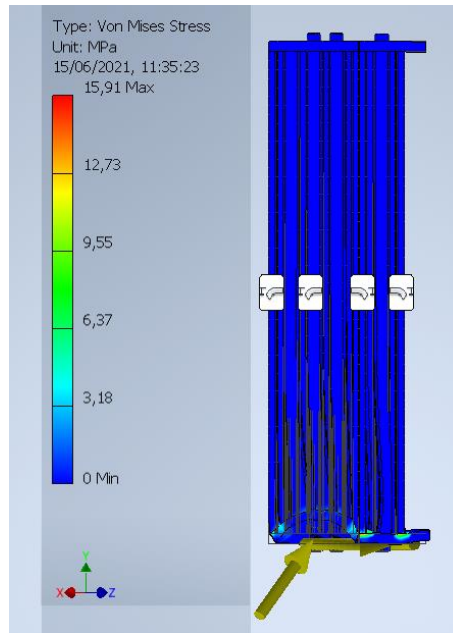


Figura 23 - Tensão de von Mises eixo Z.

Fonte: O próprio autor.

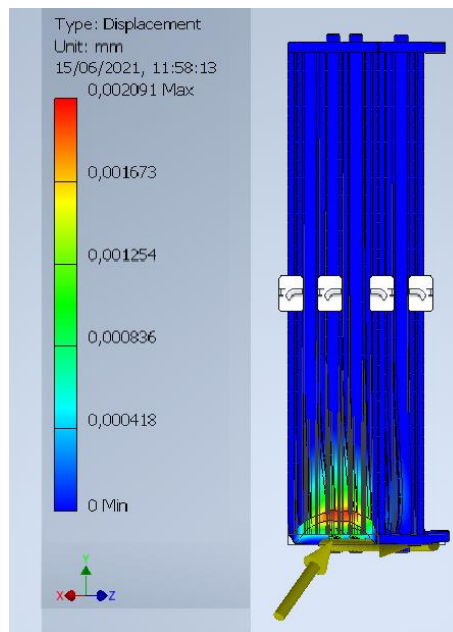


Figura 24 - Deslocamento eixo Z.

Fonte: O próprio autor.

As Figuras 25, 26 e 27 apresentam o coeficiente de segurança para o eixo X, a Tensão de von Mises e o deslocamento, respectivamente.

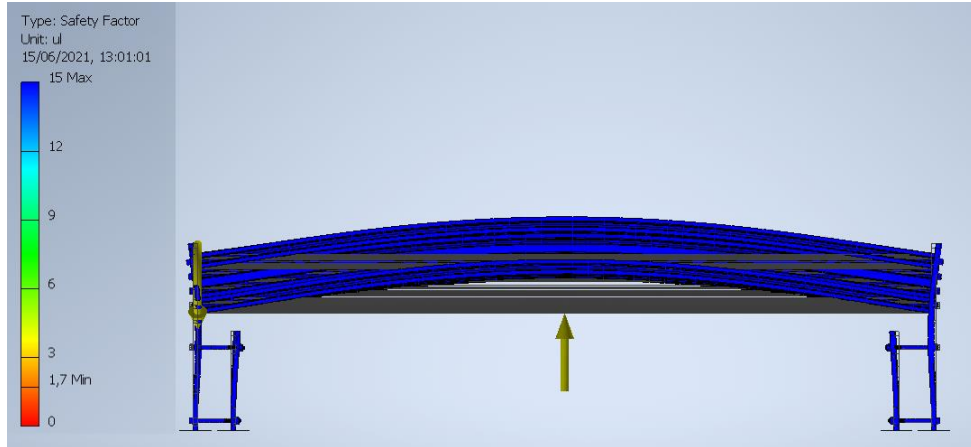


Figura 25 - Coeficiente de segurança eixo X.

Fonte: O próprio autor.

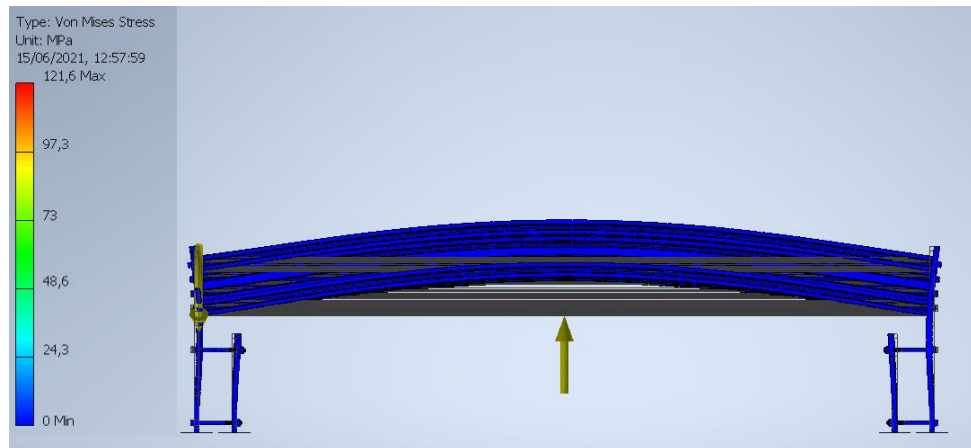


Figura 26 - Tensão de von Mises eixo X

Fonte: O próprio autor

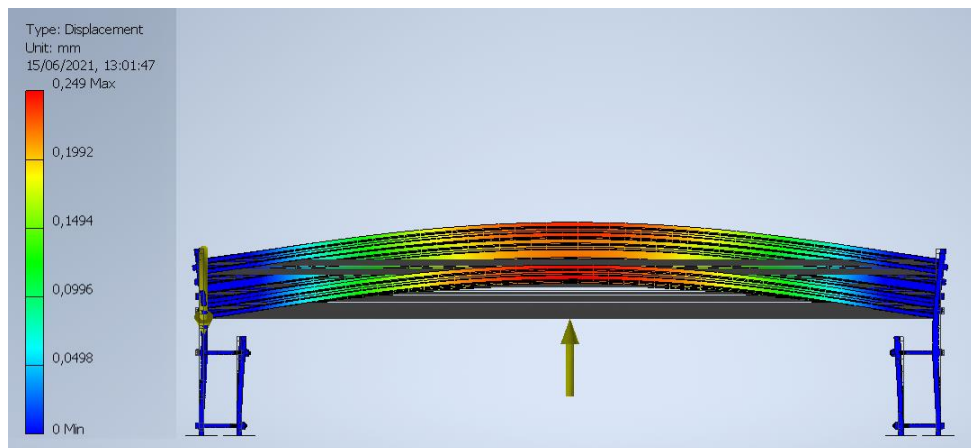


Figura 27 - Deslocamento eixo X

Fonte: O próprio autor

Como esperado os valores mais significativos foram encontrados no eixo Y. Este eixo é o responsável por receber todo o restante do sistema. Contudo, as cargas usadas para

simulação são superiores as reais e ainda assim os valores encontrados não são significativos e tampouco despertam preocupação. As Figuras 28, 29 e 30 expõem os valores encontrados para o coeficiente de segurança, a Tensão de von Mises e o deslocamento, respectivamente.

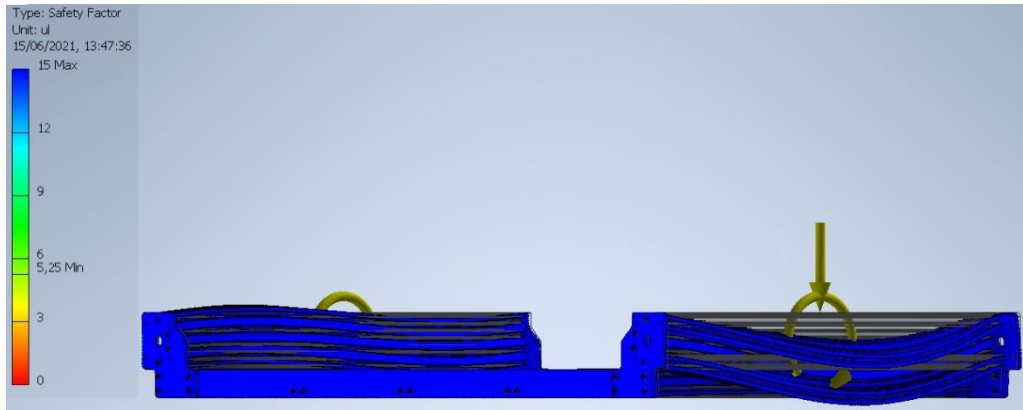


Figura 28 - Coeficiente de segurança eixo Y

Fonte: O próprio autor

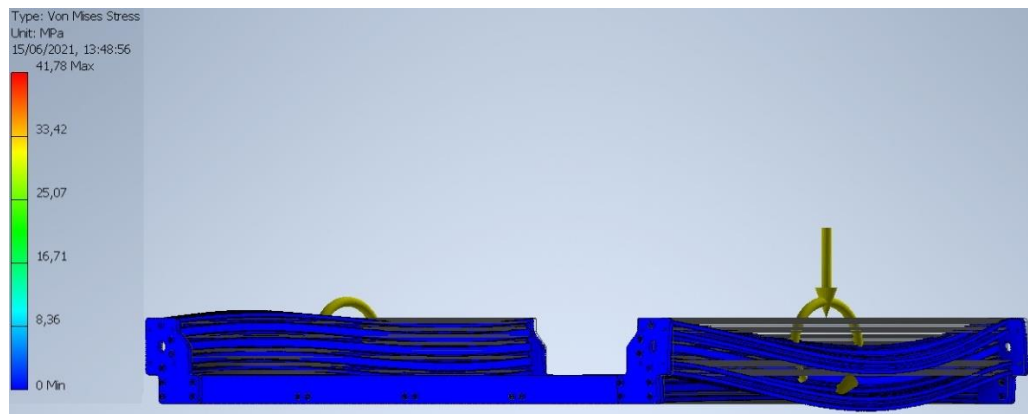


Figura 29 - Tensão de von Mises eixo Y

Fonte: O próprio autor

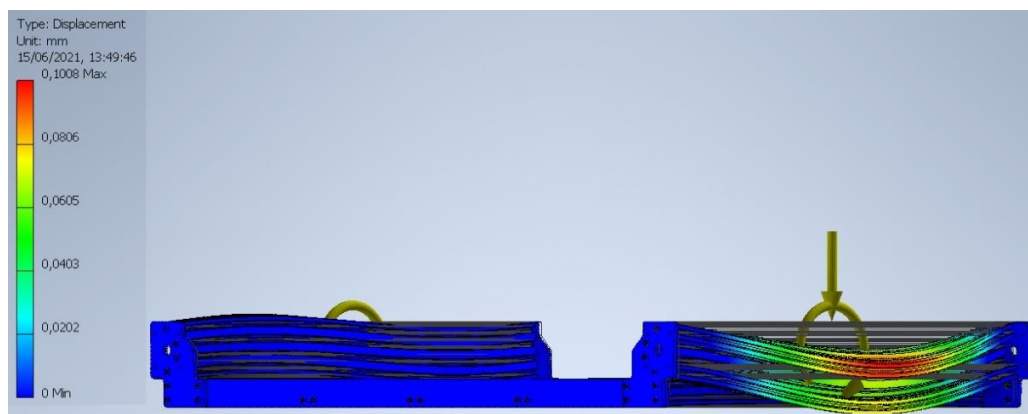


Figura 30 - Deslocamento eixo Y

Fonte: O próprio autor

3.2 Parte eletrônica

O sistema eletrônico de uma máquina CNC pode ser seccionado em módulos: placa controladora, drivers de potência, motores de passo, fonte de energia, dentre outros.

3.2.1 Placa controladora

Responsável por processar os dados enviados pelo computador, coordenando os movimentos executados pela máquina, tais como: direção, sentido e módulo de deslocamento. Recebe comandos externos através de abotoadores, como parada, pausa e retorno ao trabalho.

Como relatado anteriormente, o Grbl foi desenvolvido para funcionar em microcontroladores Atmega328. O Arduino Uno (Figura 31) é uma das placas que possuem este microcontrolador e ainda possui uma ampla comunidade de suporte, além de oferecer placas de circuito que podem ser facilmente acopladas e que facilitam em muito a montagem.



Figura 31 - Arduino Uno.

Fonte: O próprio autor.

A placa possui quatorze portas digitais de entrada e saída, das quais seis possuem PWM (*Pulse Width Modulation*) e conta, ainda, com seis entradas analógicas e 32kB de memória. A configuração de qual porta recebe determinada função é pré-configurada pelo Grbl. Sendo muito complicada edição do firmware e reconfiguração das portas.

Os fios podem ser ligados diretamente aos drivers e botões através do Arduino, no entanto esta ligação facilita a aparição de mal contatos e erros. Para promover maior facilidade na montagem e menor probabilidade de falhas optou-se por utilizar um *Shield*, o qual não passa

de uma placa que é facilmente acoplada em cima do Arduino e que expande as suas capacidades e facilita as conexões.

Para este projeto foi eleita a CNC *SHIELD* V3 (Figura 32), que permite o acoplamento de até quatro *drivers* de potência, chaves fins de curso, e botões para pausa e parada.



Figura 32 - CNC *SHIELD* V3.

Fonte: O próprio autor

Há também uma conexão destinada ao circuito de alimentação, contudo não será utilizada no projeto, visto que a alimentação será feita diretamente aos *drivers* de potência.

3.2.2 *Drivers* de potência

Drivers de potência são necessários quando as especificações de alimentação de um dispositivo são maiores do que as do sistema que o controla. Trabalham ampliando sinais elétricos de baixa potência em sua entrada em pulsos elétricos de maior potência em sua saída.

São necessários para o funcionamento dos motores de passo e foram escolhidos para o projeto o modelo DM542 (Figura 33) e suas características podem ser vistas no Quadro 3.

Quadro 3 - Especificações do Driver DM542

Especificações Driver DM542	
Tensão de Entrada	20 a 50 VDC
Frequência Máxima	200KHz
Corrente de saída	1 a 4,2A
Micro passos	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 5, 10, 20, 25, 40, 50, 100, 125
Resolução decorrente	0,45A
Dimensões	118x75,5x34mm
Peso	240g

Fonte: O próprio autor.

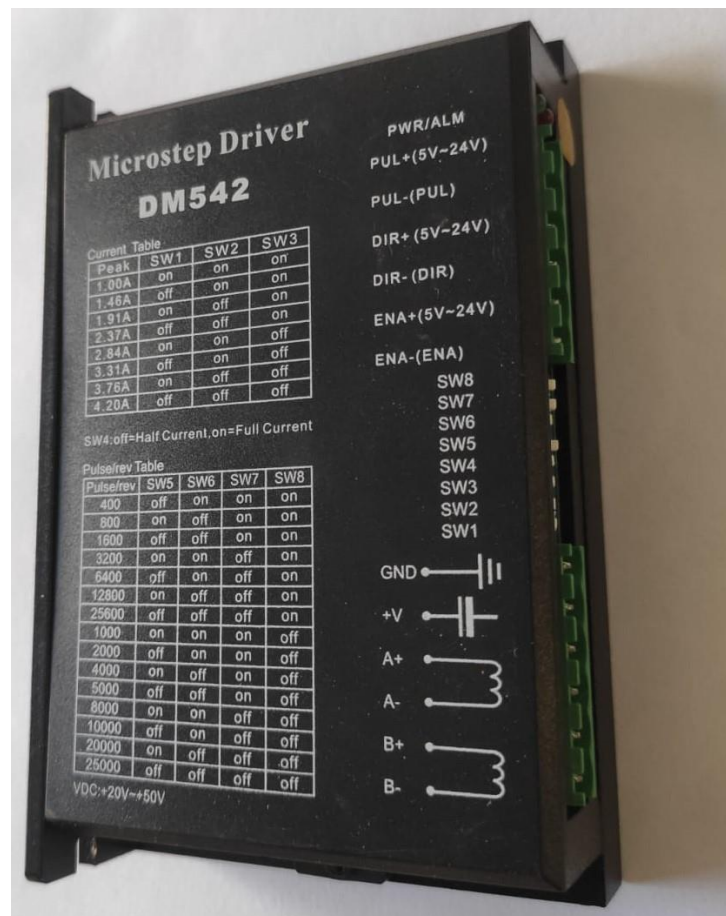


Figura 33 - Driver DM542.

Fonte: O próprio autor

3.2.3 Motores de passo

Motores de passo do tipo híbrido mostraram-se os mais apropriados para a aplicação em uma máquina de comando numérico computadorizado. Fazer o dimensionamento dos motores é essencial para o bom funcionamento da máquina e para explorar totalmente o seu potencial.

Com o objetivo de facilitar nos cálculos foi desenvolvida uma tabela (Tabela 2) para dimensionamento dos motores acoplados em fusos trapezoidais.

Tabela 2 - Dimensionamento de motores de passo

MEMORIAL DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DE MOTOR DE PASSO E USINAGEM			
DADOS DE ENTRADA		RESULTADOS CALCULADOS	
Forças Envolvidas no Sistema		Inércia da Carga e Mesa	
Massa total das cargas e da mesa (Kg)	20	Inércia da Mesa (Kg.m ²)	3,24228E-05
Coefficiente de Força Específica de Corte (MPa)	31,4	Inércia do Fuso (Kg.m ²)	3,23066E-06
Largura de Corte (mm)	6	Inércia Total (Kg.m ²)	3,56534E-05
Espessura de Corte (mm)	3		
Especificação do Fuso Trapezoidal e da Castanha		Requisitos do Motor	
Diâmetro (mm)	8	Força Necessária para Movimentar o Sistema (N)	761,4
Comprimento Total (mm)	1030	Torque Requerido pelo Sistema (N.m)	1,61045487
Passo do fuso (mm)	2	Velocidade Requerida do Motor pelo Sistema (RPM)	312,5
Avanço do Fuso (mm)	8		
Diâmetro primitivo (mm)	6,700962	Dados Extraídos do Catálogo do Motor	
Coefficiente de Atrito da Rosca (%)	32%	Torque Disponível no Eixo para a Velocidade Requerida (N.m)	2,74
Densidade do Material (Kg/m ³)	7800	Inércia do Rotor do Motor de Passo (Kg.m ²)	0,00003
Fator de Serviço de Torque almejado	1	Passos do Motor/Giro	200
		Passos Intermediários	4
Parâmetros de Usinagem		Crítérios de Projeto	
Potência do Spindle (kw)	0,8	Relação de Inércia do Sistema	1,188448062 APROVADO
Coefficiente de Eficiência do Spindle (%)	60%	Fator de Serviço de Torque	1,701382666 APROVADO
Velocidade de avanço desejada (mm/min)	2500	Resolução de Parada (mm)	0,01
		Potência de corte Requerida (Kw)	0,03925 APROVADO

Informe nas janelas em azuis os valores pedidos para fazer o dimensionamento dos motores de passo e verificar a potência do spindle.

Fonte: O próprio autor.

Para a sua utilização, é necessário a inserção de alguns parâmetros, dentre eles: parâmetros de usinagem como profundidade de corte e avanço, características do fuso e propriedades do material que se pretende usinar. Chegou-se à conclusão que para os dados inseridos era necessário um motor de passo que possuísse ao menos 1,61 N.m de torque à uma rotação de 312,5 rpm.

Em posse dos dados foi escolhido o modelo J-5718HB5401 (Figura 34) da empresa SHANGHAI ZHENGJI.

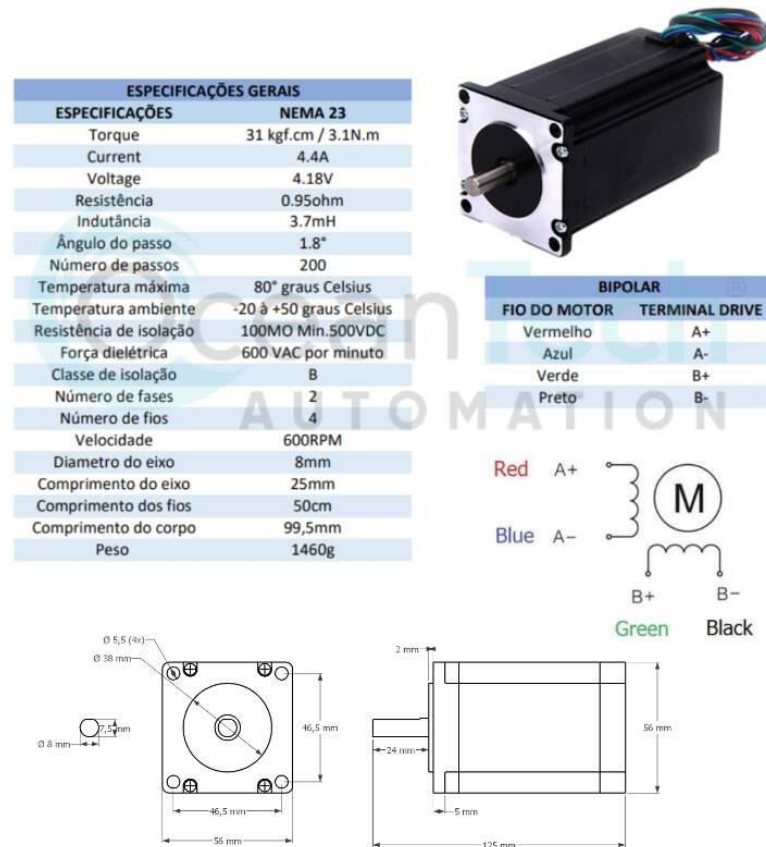


Figura 34 - Motor de Passo.

Fonte: Ocean Tech (2020).

De posse dos motores de passo é possível acertar os *switchs* do *driver* de potência para a corrente necessária e os micro passos desejados. Para trabalhar com 4,2 A e 800 pulsos/revolução é necessário deixar os *switchs* 5, 7 e 8 na posição “on” e os demais na posição “off” (Figura 35).

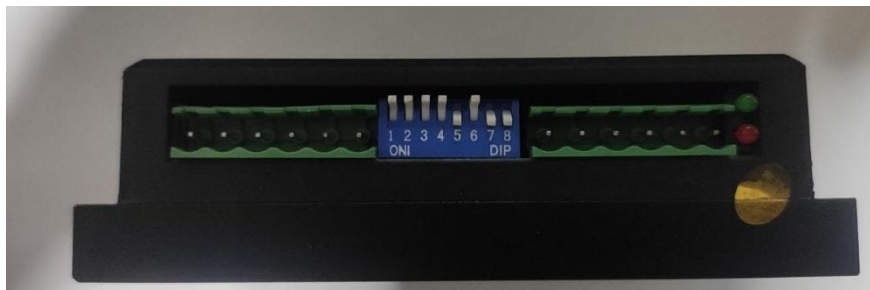


Figura 35 - Driver configurado

Fonte: O próprio autor

A tabela será disponibilizada no Google Drive assim como os arquivos .pdf com os desenhos do projeto. O link para os arquivos pode ser acessado através do QR code localizado no apêndice.

3.2.4 Alimentação elétrica

A fonte de alimentação é o mecanismo utilizado para suprir toda a demanda energética necessária para o pleno funcionamento do projeto. É necessário fazer um levantamento de todas as tensões e correntes para fazer a escolha dos componentes.

Há três entradas para fontes de alimentação:

- Fonte 24 V: nível de tensão para o funcionamento do da refrigeração e para as bobinas do motor.
- Fonte *Spindle*: fonte com tensão de saída variável para alimentação do spindle.
- Fonte 5 V: Fonte para alimentação do Arduino e do Raspberry Pi.

A fonte de 24 V é a única que requer um dimensionamento, já que as demais vieram junto com os dispositivos e possuem os requisitos necessários. Para o funcionamento de apenas 1 motor são requeridos 4,2 A, logo para o funcionamento do conjunto são necessários 16,8 A e 200 mA para o funcionamento do cooler. Por questão de segurança e de forma a garantir a corrente necessária, foi estabelecida uma margem de segurança de 20 %, então, foi considerada uma corrente mínima de 20 A.

Foi adotada uma fonte chaveada de 24 V com capacidade de 20 A, totalizando 480 W de potência (Figura 36).



Figura 36 - Fonte Chaveada

Fonte: Ocean Tech (2020)

3.2.5 Conectores

A entrada de energia da rede (220 Vac) é feita através de um conector tipo C14 macho, seguindo a norma IEC 60320, acoplado a um fusível de 10 A em série com a fase para garantir a proteção do sistema.

Para as conexões dos motores e sensores foram utilizados conectores circulares do tipo Mike com porca, a representação do plug C14 e de um conector mike de 3 vias pode ser visto na Figura 37.



Figura 37 - Plug C14 e conector Mike

Fonte: O próprio autor

4 FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Com a modelagem 3D foi possível estabelecer todos os parâmetros e componentes da máquina. Desta forma, tornou-se fácil a construção e a montagem do protótipo, pois o usuário passa a contar com um manual completo e em escala real do projeto e pode, por ele, se orientar.

Para a confecção das peças planas foram utilizadas diversas ferramentas. A marcação dos furos e recortes exteriores foram realizados com a ajuda de uma máquina CNC plasma oferecida gratuitamente pela empresa GSV Montagem Industrial sediada em Goianésia – Goiás. O trabalho de corte das peças pode ser visto na Figura 38 e, de forma mais detalha, no apêndice com o relatório de corte gerado pela máquina de corte.

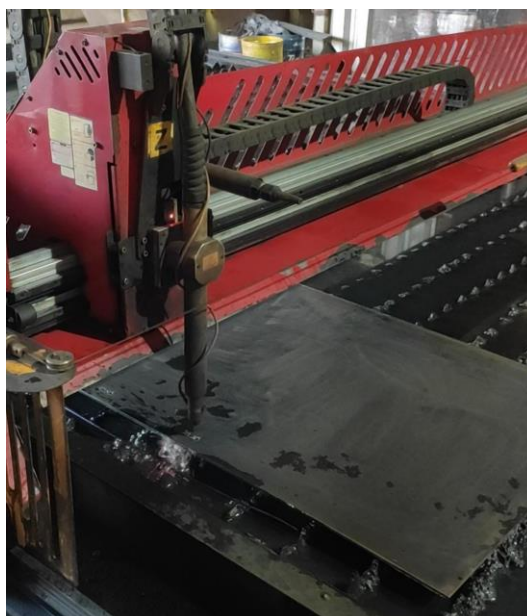


Figura 38 - Corte das peças planas.

Fonte: O próprio autor.

Posteriormente foi necessário utilizar uma furadeira de bancada para refazer todos os furos com as dimensões do projeto (Figura 39).



Figura 39 - Furos feitos na furadeira de bancada.

Fonte: O próprio autor.

O processo de fabricação dos furos que posteriormente iriam receber rosca requereu mais trabalho, pois não puderam ser marcados na máquina de plasma. Logo foi necessário fazer a marcação (Figura 40) com a utilização do paquímetro, seguida pela marcação do local do furo com o auxílio de um punção (Figura 41).



Figura 40 - Marcação dos furos.

Fonte: O próprio autor.



Figura 41 - Marcação do furo com punção.

Fonte: O próprio autor.

Posteriormente foram feitos os furos e rosca com um macho padrão métrico M5 (Figura 42).



Figura 42 - Fabricação da rosca M5.

Fonte: O próprio autor.

Após todo o processo de adequação das peças e do processo de fabricação foi realizada uma montagem com o intuito de verificar se havia alguma inconsistência no projeto. A primeira disposição dos elementos pode ser vista na Figura 43.

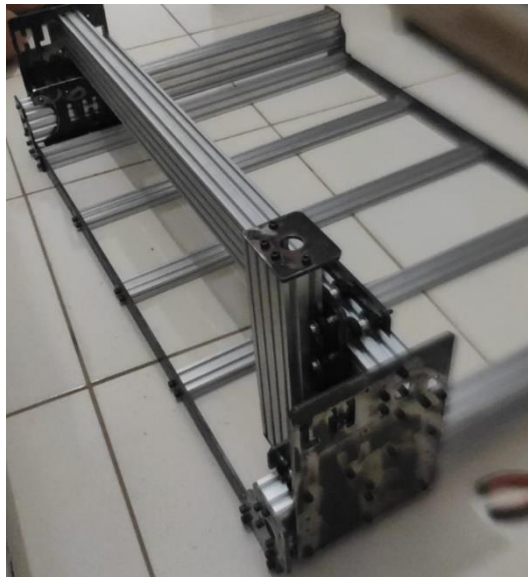


Figura 43 - Primeira montagem da Máquina.

Fonte: O próprio autor.

Com a parte mecânica finalizada foi possível dar início à montagem eletrônica e fabricação do chicote, desta forma foram unidos os fios dos motores ao chicote (Figura 44) com o auxílio de ferro de solda e estanho, e posteriormente foram isolados com o uso de tubo termo retrátil.

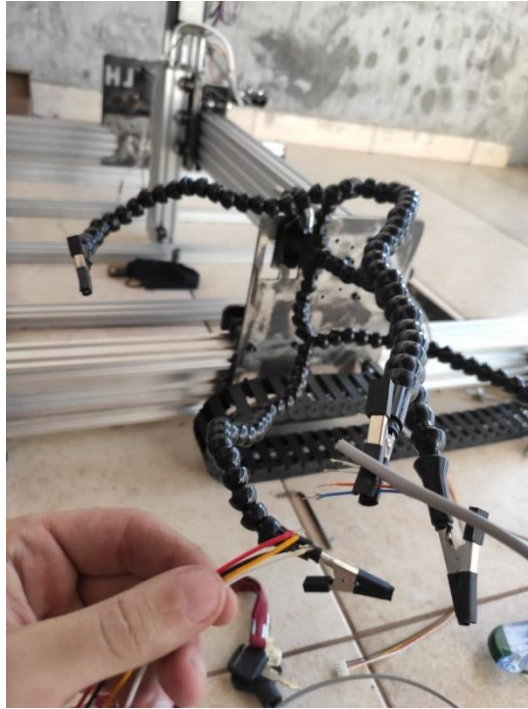


Figura 44 - Fabricação do chicote.

Fonte: O próprio autor.

Após soldar todos os conectores mikes nos fios e assegurar que o comprimento está correto para o pleno funcionamento da máquina, o chicote se encontra finalizado (Figura 45).



Figura 45 - Chicote finalizado.

Fonte: O próprio autor.

A próxima etapa da construção do protótipo se dá pela desmontagem de toda a estrutura e preparação das peças em aço para pintura. Após a desmontagem foi realizado um lixamento com lixa #150 em todas as peças e limpadas com desengordurante, o resultado do processo pode ser visualizado na Figura 46.



Figura 46 - Peças preparadas para o processo de pintura.

Fonte: O próprio autor.

Foi escolhida uma tinta preta para os componentes metálicos e o processo de pintura pode ser conferido na Figura 47

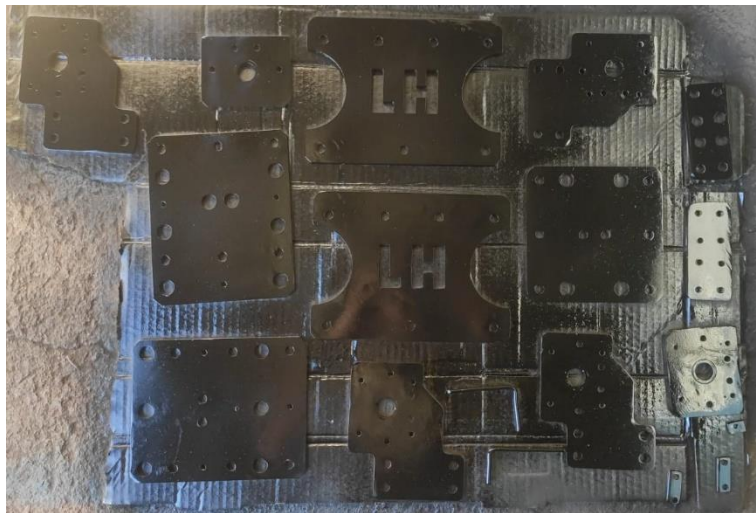


Figura 47 - Peças pintadas.

Fonte: O próprio autor.

O processo de fabricação do protótipo ocorreu dentro do esperado e o resultado foi satisfatório e bem próximo ao modelamento 3D. A comparação da execução e do projeto pode ser visto na Figura 48.

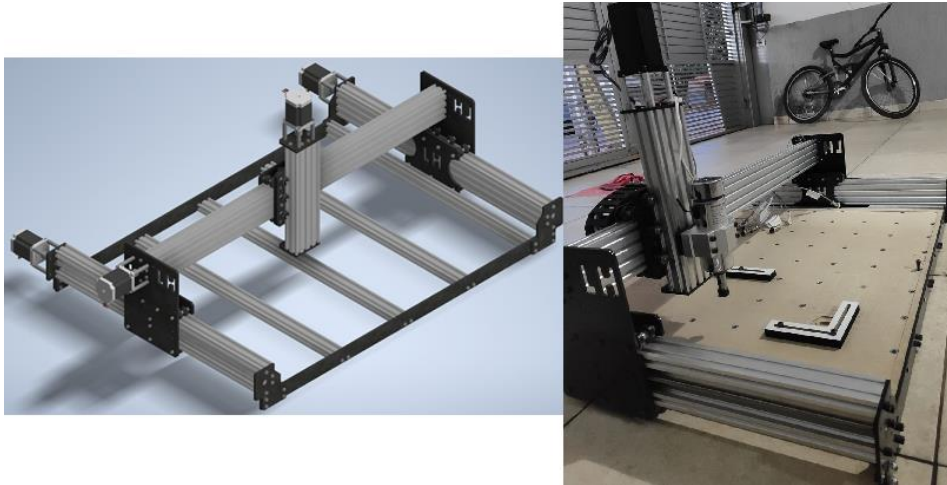


Figura 48 - Comparação projeto e protótipo.

Fonte: O próprio autor.

Com a finalidade de verificar o nivelamento da mesa foi realizado um teste com caneta no lugar da fresa, desse modo obteve-se um desenho (Figura 49) e pode-se constatar o desnivelamento, que de fato já era previsto e pode ser facilmente contornado.

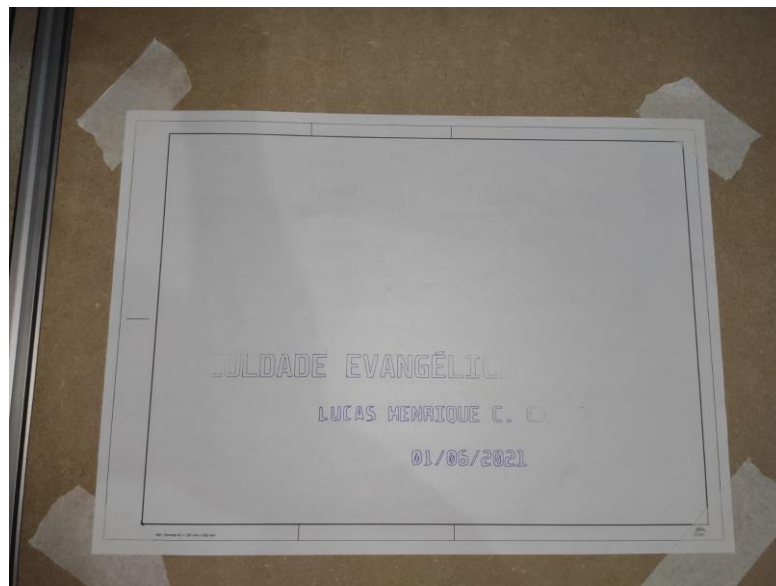


Figura 49 - Desenho que constatou o desnivelamento.

Fonte: O próprio autor.

Existem formas de fazer o nivelamento da mesa por software, contudo é necessário refazê-la regularmente e demanda muito tempo, de forma a ser viável apenas para pequenas áreas de trabalho. Portanto, o ideal a se fazer é utilizar a própria máquina para realizar o aplainamento. Foi utilizada uma fresa de 12 mm com avanço de 1500 mm/min e um passe

lateral de 40%, com uma rotação estimada de 20000 rpm para aplainar a mesa, e parte do processo está representado na Figura 50.



Figura 50 - Aplainamento da mesa.

Fonte: O próprio autor.

Após finalizado o processo de aplainamento foi realizada a verificação utilizando o mesmo arquivo de desenho, e o resultado pode ser notado na Figura 51.



Figura 51 - Desenho após o aplainamento.

Fonte: O próprio autor.

O resultado foi bastante satisfatório e a máquina se mostrou pronta para fazer a fixação das buchas americanas na tábua de sacrifício. Os furos e o rebaixo foram feitos pela própria CNC (Figura 52).



Figura 52 - Furação para fixação das buchas.

Fonte: O próprio autor.

Foram realizados um total de 56 furos com 8mm de diâmetro e 15 mm de profundidade e 56 rebaixos de 1mm com 12mm de diâmetro. O resultado atendeu às necessidades e as buchas puderam ser fixadas conforme a Figura 53.

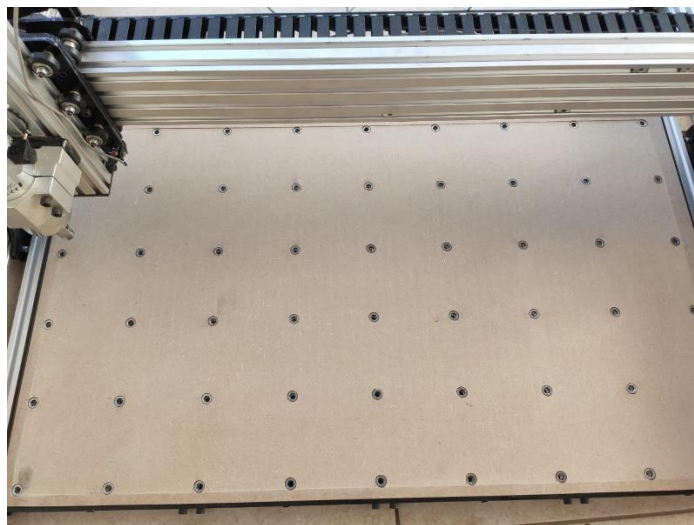


Figura 53 - Tábua de sacrifício com buchas americanas.

Fonte: O próprio autor.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Para a validação do projeto, verificação de estabilidade, acurácia e precisão, submeteu-se a máquina a alguns testes de usinagens em MDF. As peças usinadas serviram para analisar o desempenho da máquina ao desenvolver vários percursos retos, curvos e arredondados e verificar o esquadro da estrutura. A Figura 54 apresenta a usinagem de algumas geometrias que foram utilizadas como parâmetros de teste.



Figura 54 - Usinagem de corpos de teste.

Fonte: O próprio autor.

Utilizando os parâmetros de usinagens da tabela 3 obtiveram-se resultados bastante satisfatórios em dimensões e qualidade superficial do material, a Figura 55 apresenta a lateral de algumas das peças usinadas.



Figura 55 - Superfície das peças usinadas.

Fonte: O próprio autor.

Obteve-se durante a usinagem erros inferiores a 2 décimos de milímetro. A Figura 56 mostra a verificação com paquímetro de um quadrado com dimensão projetada de 60 mm. Um relatório de controle dimensional de todas as geometrias usinadas pode ser analisado mais à frente na seção de anexos.



Figura 56 - Controle dimensional quadrado 60x60mm.

Fonte: O próprio autor.

A velocidade de avanço máxima testada para usinagem foi de 3000 mm/min. Contudo a velocidade pode ser aumentada além deste valor, pois os motores de passo não perderam a sincronia de acionamento e não houve perda de passos e referência. Em testes de movimentação livre obteve-se valores próximo aos 5000 mm/min e se não houvesse pouco espaço para aceleração seriam possíveis velocidades ainda maiores.

O projeto requer pouca interação do usuário com ferramentas e a confecção de componentes é mínima, dando preferência a produtos de fácil acesso no mercado e com custos relativamente baixos. Os *softwares* utilizados para operação da máquina são todos de licença gratuita e multiplataforma, facilitando o acesso e permitindo que o usuário faça as suas próprias adaptações, não havendo a necessidade de seguir todo o projeto à risca.

A máquina desenvolvida está longe de ser uma opção acessível a todas as pessoas, todavia seu custo ainda é inferior aos custos de máquinas com precisão equivalentes disponíveis no mercado, reforçando que o projeto se mostra uma opção economicamente viável. Pode-se observar no Quadro os custos de alguns modelos e suas características comparadas ao projeto.

Quadro 1 - Comparação de preços entre máquinas CNC equivalentes

Máquina	Especificações	Valor (R\$)
Desenvolvida	Área útil: 790 mm (x), 470 mm (y), 100 mm (z). Motores de passo: Nema 23 de 3,1 N/m Incluso <i>Spindle</i> de 800 W e Computador	7.000,00
Rc0505	Área útil: 500 mm (x), 500 mm (y), 60 mm (z). Motores de passo: Nema 23 não especificado o torque Incluso somente micro retífica	10.300,00
Hobby 755	Área útil: 565 mm (x), 765 mm (y), 80 mm (z). Motores de passo: Nema 23 de 1,9 N/m Incluso <i>Spindle</i> de 500 W	10.850,00

Fonte: O próprio autor

6 CONCLUSÃO

O propósito do trabalho foi desenvolver uma fresadora CNC que pudesse ser facilmente replicada e detalhar elementos envolvidos nas etapas de projeto e fabricação da estrutura.

Dada a complexidade e a quantidade de áreas tecnológicas envolvidas, o projeto despertou durante o seu desenvolvimento vários desafios e a necessidade de adquirir novos conhecimentos, exigindo também integração do conhecimento obtido ao decorrer da graduação.

Por meio dos resultados obtidos o autor considera que o projeto desenvolvido atende com êxito e satisfação todos os objetivos propostos, possuindo uma resolução satisfatória, velocidades de avanço superiores a 2500 mm/min e uma excelente área de trabalho para o preço. O sistema ainda oferece suporte a várias modificações e pode se adaptar a diferentes usos.

Como ressalva, o autor reconhece a necessidade de projetar um sistema aspirador de partículas, pois durante a usinagem de MDF é gerado pó em quantidade excessiva e se torna prejudicial tanto para máquina, quanto para o operador.

REFERÊNCIAS

ALBERT, Alain. **Understanding CNC Routers**. FPIInnovations - Forintek Division, First Edition, 2004.

AZEVEDO, Américo Luiz de. **FUNDAMENTOS DO CNC PARA USINAGEM**. 1. ed. São José dos Campos: JAC, 2017. 176 p.

BELL, Charles. **Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer: PROPERLY MAINTAIN AND ENHANCE YOUR INVESTMENT IN PERSONAL FABRICATION**. [S. l.]: Apress, 2014. 509 p.

CHIAVERINI, Vicent. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 315 p. v. 2.

COMMUNITY. **Projects|OpenBuilds**. Openbuilds.com. Disponível em: <<https://openbuilds.com/projects/>>. Acesso em: 05 jan. 2021.

CONRADO, Rodrigo. **CNC Router Revolution 3 - ATIVIDADE MAKER**. Atividademaker.com.br. Disponível em: <<http://atividademaker.com.br/cnc-revolution-3>>. Acesso em: 23 abr. 2021.

GARDEN CITY. **Garden City Machine**. Gardencitymachine.com. Disponível em: <<https://www.gardencitymachine.com/site/full-5-axis-machining-capability>>. Acesso em: 15 abr. 2021.

GELSON LUZ. **Aço ASTM A36 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. Gelson Luz. Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a36-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>>. Acesso em: 23 abr. 2021.

GITHUB. **Grbl**. GitHub. Disponível em: <<https://github.com/grbl/grbl>>. Acesso em: 15 abr. 2021.

HOWTOMECHATRONICS. **G-code Explained | List of Most Important G-code Commands**. HowToMechatronics. Disponível em: <<https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/>>. Acesso em: 22 abr. 2021.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **TEORIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. 3. ed. rev. e atual. São Paulo: Blucher, 2015. 407 p.

MADISON, J. **CNC Machining Handbook: Basic Theory, Production Data, and Machining Procedures**. Norwalk: Industrial Press Inc., 1996.

NEWFANGLED ARTSOFT. **MACH3 Software De Controle CNC**. Machusporte.com.br. Disponível em: <encurtador.com.br/csMX2>. Acesso em: 23 abr. 2021.

NORTON, Robert L. Projeto de Máquinas: **UMA ABORDAGEM INTEGRADA**. 4. ed. [S. l.]: Bookman, 2013. 1055 p.

PEARCE, J. M. **Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware.** Science Magazine, v. 337, n. 6100, p. 1303–1304, 2012.


SHAPLA, Adriano et al. **Fresadora.** Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2010. Disponível em: Acesso em: 16 de nov. de 2020.

SHOCK METAIS. **Tabelas de medidas, pesos e informações técnicas - Shockmetais.** Shockmetais.com.br. Disponível em: <<https://shockmetais.com.br/tabelas/aluminio/pmec>>. Acesso em: 23 abr. 2021.

STOETERAU, R. L. **Introdução ao Projeto de Máquina Ferramentas Modernas.** Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

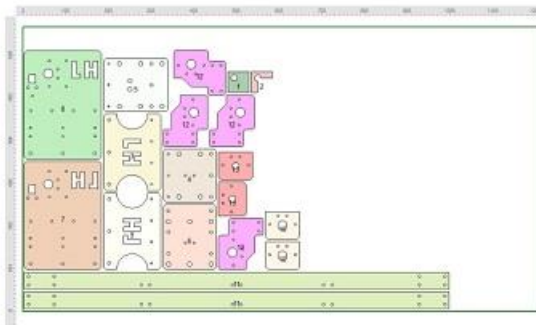
ANEXOS

Anexo A – RELATÓRIO DE CORTE CNC PLASMA


	Relatório de Trabalho	Máquina Metalique_EasyMak
	Trabalho CNC	
22/05/2021 07:06:46		Página: 1 / 4 Rev. 3.1.0

Especificações da chapa

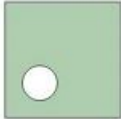
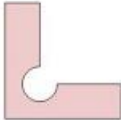



Chapa nº	1	Nome do Arquivo	CNC		
Código da chapa		Descrição			
Material	Aço	Chapa (Kg)	30.003	Tempo do corte comum	00:00:00
Espessura (mm)	4.75	Peso das peças (Kg)	12.173	Quant. de peças	19
Dimensão da chapa (mm x mm)	1210 x 665	Sucata (Kg)	17.83	Número de corte(s)	1
Dimensão utilizada (mm)	995 x 605.2	Sucata %	59.427	Tempo de corte (hh:mm:ss)	00:35:08
Notas				Dim Ref.	RX+3 RX-3 RY+3 RY-3




ID	Código da peça	Descrição	Dimensão (mm x mm)	Perímetro (mm)	Área	Peso das peças (Kg)	Quant. de peças	Tempo de corte (hh:mm:ss)
1	.ICORTE CNC 10 1PÇ		50 x 50	247.12	2323.29	0.087	1	00:00:26 (00:00:26)
10	.JPÇ CNC REV 2PÇ		80 x 64.8	413.93	4689.08	0.175	2	00:01:41 (00:00:50)
11	.IPEÇA CNC 1 2PÇ		995 x 40	2333.89	39404.16	1.469	2	00:08:05 (00:04:02)
12	.IPEÇA CNC 2 4PÇS		104.8 x 120	616.78	8830.08	0.329	4	00:05:16 (00:01:19)
13	.IPEÇA CNC 3 2PÇ		80 x 64.8	395.08	4668.15	0.182	2	00:01:39 (00:00:49)
2	.ICORTE CNC 11 1PÇ		50 x 50	220.34	1144.37	0.043	1	00:00:22 (00:00:22)
3	.ICORTE CNC 12 1PÇ		180 x 134.86	1149.53	18444.66	0.688	1	00:02:07 (00:02:07)
4	.ICORTE CNC 4 1PÇ		125 x 125	756.83	15006.02	0.56	1	00:01:40 (00:01:40)
5	.ICORTE CNC 5 1PÇ		125 x 153	907.08	18231.13	0.68	1	00:01:58 (00:01:58)
6	.ICORTE CNC 6 1PÇ		125 x 153	896.4	18285.7	0.682	1	00:01:59 (00:01:59)
7	.ICORTE CNC 7 1PÇ		180 x 253.94	1669.82	43064.21	1.606	1	00:03:34 (00:03:34)
8	.ICORTE CNC 8 1PÇ		180 x 253.94	1685.53	43044.58	1.605	1	00:03:37 (00:03:37)
9	.ICORTE CNC 9 1PÇ		180 x 134.86	1149.53	18444.66	0.688	1	00:02:07 (00:02:07)


	Relatório de Trabalho	Máquina Metalique_EasyMak
	Trabalho CNC	
22/05/2021 07:06:46		Página: 2 / 4 Rev. 3.1.0


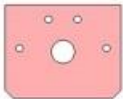
Lista de peças detalhada

ID		Código da peça		Peças	
	1	.ICORTE CNC 10 1PÇ		1 / 1	
	Pedido			Data de Entrega	
	Material	Aço		Espessura (mm)	4.75 mm
	Dimensão (mm x mm)	50 x 50		Área da peça (mm²)	2323.28
	Descrição				
	Notas				
	2	.ICORTE CNC 11 1PÇ		1 / 1	
	Pedido			Data de Entrega	
	Material	Aço		Espessura (mm)	4.75 mm
	Dimensão (mm x mm)	50 x 50		Área da peça (mm²)	1144.37
	Descrição				
	Notas				
	3	.ICORTE CNC 12 1PÇ		1 / 1	
	Pedido			Data de Entrega	
	Material	Aço		Espessura (mm)	4.75 mm
	Dimensão (mm x mm)	180 x 134.86		Área da peça (mm²)	18444.66
	Descrição				
	Notas				
	4	.ICORTE CNC 4 1PÇ		1 / 1	
	Pedido			Data de Entrega	
	Material	Aço		Espessura (mm)	4.75 mm
	Dimensão (mm x mm)	125 x 125		Área da peça (mm²)	15006.02
	Descrição				
	Notas				
	5	.ICORTE CNC 5 1PÇ		1 / 1	
	Pedido			Data de Entrega	
	Material	Aço		Espessura (mm)	4.75 mm
	Dimensão (mm x mm)	125 x 153		Área da peça (mm²)	18231.13
	Descrição				
	Notas				

	Relatório de Trabalho		Máquina Metalique_EasyMak	
	Trabalho CNC			
22/05/2021 07:06:46			Página: 3 / 4	Rev. 3.1.0

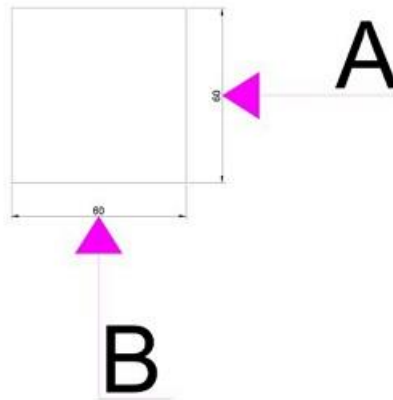
	ID	6	Código da peça	.\CORTE CNC 6 1PÇ	Peças	1 / 1
			Pedido		Data de Entrega	
			Material	Aço	Espessura (mm)	4.75 mm
			Dimensão (mm x mm)	125 x 153	Area da peça (mm²)	18285.7
			Descrição			
			Notas			
	ID	7	Código da peça	.\CORTE CNC 7 1PÇ	Peças	1 / 1
			Pedido		Data de Entrega	
			Material	Aço	Espessura (mm)	4.75 mm
			Dimensão (mm x mm)	180 x 253.94	Area da peça (mm²)	43064.21
			Descrição			
			Notas			
	ID	8	Código da peça	.\CORTE CNC 8 1PÇ	Peças	1 / 1
			Pedido		Data de Entrega	
			Material	Aço	Espessura (mm)	4.75 mm
			Dimensão (mm x mm)	180 x 253.94	Area da peça (mm²)	43044.58
			Descrição			
			Notas			
	ID	9	Código da peça	.\CORTE CNC 9 1PÇ	Peças	1 / 1
			Pedido		Data de Entrega	
			Material	Aço	Espessura (mm)	4.75 mm
			Dimensão (mm x mm)	180 x 134.66	Area da peça (mm²)	18444.66
			Descrição			
			Notas			
	ID	10	Código da peça	.\PÇ CNC REV 2PÇ	Peças	2 / 2
			Pedido		Data de Entrega	
			Material	Aço	Espessura (mm)	4.75 mm
			Dimensão (mm x mm)	80 x 84.8	Area da peça (mm²)	4689.08
			Descrição			
			Notas			
	ID	11	Código da peça	.\PEÇA CNC 1 2PÇ	Peças	2 / 2
			Pedido		Data de Entrega	
			Material	Aço	Espessura (mm)	4.75 mm
			Dimensão (mm x mm)	996 x 40	Area da peça (mm²)	39404.16
			Descrição			
			Notas			

	Relatório de Trabalho		Máquina Metalique_EasyMak	
	Trabalho CNC			
22/05/2021 07:06:46			Página: 4 / 4	Rev. 3.1.0

ID	12	Código da peça	.IPEÇA CNC 2 4PÇS	Peças	4 / 4
		Pedido		Data de Entrega	
		Material	Aço	Espessura (mm)	4,75 mm
		Dimensão (mm x mm)	104,8 x 120	Área da peça (mm²)	8830,08
		Descrição			
		Notas			
ID	13	Código da peça	.IPEÇA CNC 3 2PÇ	Peças	2 / 2
		Pedido		Data de Entrega	
		Material	Aço	Espessura (mm)	4,75 mm
		Dimensão (mm x mm)	80 x 84,8	Área da peça (mm²)	4868,16
		Descrição			
		Notas			

Anexo B – Relatório de Controle Dimensional

RELATÓRIO DE CONTROLE DIMENSIONAL				Relatório n° CD 001		
				Data: 08/06/2021		
				Folha: 1 de 4		
Equipamento: Router CNC			Componente: Peças para Verificação			
Material: MDF						
Instrumentos Utilizados: PAQUÍMETRO						
CONTROLE DIMENSIONAL						
	Peça A			Peça B		
COTA	ESPECIFICADO	ENCONTRADO	COTA	ESPECIFICADO	ENCONTRADO	
A	60mm	59,93mm	J	60mm	59,94mm	
B	60mm	59,90mm	K	60mm	59,85mm	
Usinagem com velocidade de corte de 2500mm/min, fresa de 6mm e profundidade de corte de 3mm por passada.						
CROQUI ESQUEMÁTICO						



Valor Médio	Desvio Padrão	Maior Erro	Erro Médio
59,905mm	0,04mm	0,15mm	0,095mm

LAUDO FINAL: APROVADO	
CONTROLE DA QUALIDE	FISCALIZAÇÃO
<p>Lucas Henrique Cristino Calixto Acadêmico de Engenharia Mecânica</p>	

RELATÓRIO DE CONTROLE DIMENSIONAL		Relatório n° CD 001
		Data: 08/06/2021
		Folha: 2 de 4
Equipamento: Router CNC	Componente: Peças para Verificação	

ANEXO A



Figura 1 - Cota quadrado A



Figura 2 - Cota quadrado B

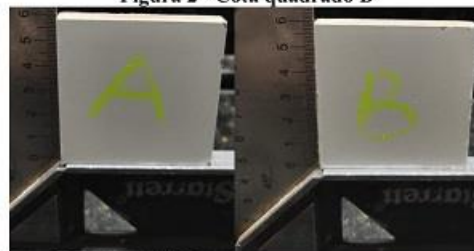
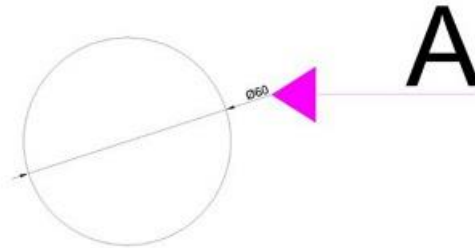


Figura 3 - Verificação do esquadro

Material: MDF	
Instrumentos Utilizados: PAQUÍMETRO	
CONTROLE DA QUALIDADE	FISCALIZAÇÃO
<p>Lucas Henrique Cristino Calixto Acadêmico de Engenharia Mecânica</p>	

RELATÓRIO DE CONTROLE DIMENSIONAL				Relatório n° CD 001		
				Data: 08/06/2021		
				Folha: 3 de 4		
Equipamento: Router CNC			Componente: Peças para Verificação			
CONTROLE DIMENSIONAL						
	Peça D				Peça E	
COTA	ESPECIFICADO	ENCONTRADO	COTA	ESPECIFICADO	ENCONTRADO	
A	60mm	59,91mm	J	60mm	59,85mm	
Usinagem com velocidade de corte de 2500mm/min, fresa de 6mm e profundidade de corte de 3mm por passada.						
CROQUI ESQUEMÁTICO						



Valor Médio	Desvio Padrão	Maior Erro	Erro Médio
59,88mm	0,04mm	0,15mm	0,12mm

LAUDO FINAL: APROVADO

CONTROLE DA QUALIDE	FISCALIZAÇÃO
<p>Lucas Henrique Cristino Calixto Acadêmico de Engenharia Mecânica</p>	

RELATÓRIO DE CONTROLE DIMENSIONAL		Relatório n° CD 001
		Data: 08/06/2021
		Folha: 4 de 4
Equipamento: Router CNC	Componente: Peças para Verificação	

ANEXO B



Figura 4 - Cota circunferência E



Figura 5 - Cota circunferência D

CONTROLE DA QUALIDADE	FISCALIZAÇÃO
<p>Lucas Henrique Cristino Calixto Acadêmico de Engenharia Mecânica</p>	

Anexo C – QR Code de Acesso aos Arquivos



QR code para acesso aos arquivos do projeto