

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

LYNCOLN ROBERTO RODRIGUES DOS SANTOS

**CNC *ROUTER* DE BAIXO CUSTO ASSOCIADO COM
CONFIABILIDADE E PRECISÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2021

LYNCOLN ROBERTO RODRIGUES DOS SANTOS

**CNC *ROUTER* DE BAIXO CUSTO ASSOCIADO COM
CONFIABILIDADE E PRECISÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à disciplina TCC2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves

LONDRINA

2021



TERMO DE APROVAÇÃO

CNC ROUTER DE BAIXO CUSTO ASSOCIADO COM CONFIABILIDADE E PRECISÃO

por

LYNCOLN ROBERTO RODRIGUES DOS SANTOS

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado(a) em 23 de agosto de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O(a) candidato(a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

(Janaína Fracaro de Souza Gonçalves)
Prof.(a) Orientador(a)

(Cláudia Santos Fiuza Lima)
Membro titular

(Roger Nabeyama Michels)
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me capacitado em todas etapas de aprendizado.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná e todo corpo docente. Aos professores que participaram de alguma forma do trabalho de conclusão de curso, em especial a orientadora.

A empresa Insight Energy Serviços Eletromecânicos e seus colaboradores, onde adquirei interesse pelo tema do trabalho.

Ao meu pai, Roberto Rodrigues dos Santos, que sempre me ajudou a desenvolver projetos acadêmicos.

A minha mãe, Salete Aparecida Coutinho dos Santos, pelo incentivo na minha formação acadêmica. Em especial por evitar minha reprovação na primeira série do ensino fundamental, após me ensinar a ler em casa.

Ao meu irmão, que sempre me incentiva a evoluir.

A minha noiva, por todo carinho, atenção e apoio durante a etapa de desenvolvimento do projeto.

E todos que participaram da minha formação, de forma direta ou indireta.

RESUMO

SANTOS, Lyncoln. **CNC Router de baixo custo associado com confiabilidade e precisão**. 2021. 37. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Devido à queda do custo de fabricação ou compra de CNC *Routers* com tolerâncias aceitáveis, diversas empresas optam por adquiri-las ao invés de terceirizar a fabricação das peças. Além disto, muitas pessoas tem optado por iniciar microempresas para venda de peças fabricadas em CNC *Routers*. O presente trabalho apresenta a construção de uma CNC *Router* de três eixos, com o uso de eixos retificados, fusos trapezoidais, motores de passo e *Spindle*. A máquina ferramenta é utilizada para fabricação de peças em 2D, 2,5D e alguns casos de 3D. Ao longo do trabalho são abordados comparativos entre as peças comumente utilizadas para fabricação destas máquinas associando o baixo custo com confiabilidade e precisão mecânica e elétrica. Montou-se a CNC *Router* com estrutura em metalon e alumínio. Apresentaram-se também testes de validação e as falhas encontradas até atingir o pleno funcionamento da máquina. Validou-se a máquina com erros máximos de 0,3 mm.

Palavras-chave: Máquinas CNC. *Spindle*. Usinagem. Três eixos. Testes de precisão.

ABSTRACT

SANTOS, Lyncoln. **Construction of a low cost CNC milling machine associated with precision and accuracy.** 2019. 37. Completion of course work - Federal Technology University - Paraná. Londrina, 2021.

Due to the lower cost of manufacturing or purchasing CNC Routers with acceptable tolerances, many companies choose to purchase them instead of outsourcing parts manufacturing. In addition, many people have chosen to start micro-enterprises to sell parts manufactured on CNC Routers. The present work presents the construction of a three axis CNC milling machine, using the rectified axes, trapezoidal spindles, stepper motors and Spindle. The machine tool is used to manufacture 2D, 2.5D and some 3D cases. Throughout the work, comparatives will be discussed between the parts commonly used to manufacture milling machines, associating the low cost with reliability and mechanical and electrical precision. A CNC Router with structure in metalon and aluminuim was assembled. Validation tests were also presented and the failures found until the machine was fully operational. the machine was validated with maximum errors of 0,3 mm.

Keywords: CNC machines. Spindle. Machining. Three axes. Precision tests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Subdivisão dos processos de fabricação	14
Figura 2 – Primeira fresadora.....	15
Figura 3 – Divisão dos processos de usinagem	18
Figura 4 – Motor de Passo NEMA.....	20
Figura 5 – Sistemas de controlo mais utilizados	21
Figura 6 – Arduino Uno	22
Figura 7 – CNC Shield	23
Figura 8 – CNC Router de 3 eixos	24
Figura 9 – Etapas do processo de fabricação de peças em CNC <i>Routers</i>	24
Figura 10 – Formas geradas em chapas ou blocos de materiais.....	25
Figura 11 – Limitações da fresadora de 3 eixo em usinagem de forma 3D	25
Figura 12 – Máquina CNC de 8 cabeças com 4 eixos	25
Figura 13 – Fresadora CNC com 5 eixos	26
Figura 14 (a), (b), (c) e (d) – Mecanismos de transmissão de movimentos	27
Figura 15 – Eixo retificado, mancais e <i>pillow blocks</i>	29
Figura 16 – Guias lineares	29
Figura 17 – Trilho telescópico para gavetas.....	30
Figura 18 – Pórtico associado com Metalon.....	30
Figura 19 – Eixo retificado com suporte e <i>pillow blocks</i> abertos	31
Figura 20 (a) e (b) – Ferramentas de corte.	32
Figura 21 – Fresa 2 cortes retos	33
Figura 22 (a), (b), (c), (d) e (e) – CNC <i>Routers</i>	35
Figura 23 – Etapas do processo de fabricação da fresadora	37
Figura 24 – Simulação dos deslocamentos do eixo retificado Y	43
Figura 25 – Tensão de vonMises do eixo retificado Y	43
Figura 26 – Modelamento CAD da CNC <i>Router</i>	45
Figura 27 – Base do eixo Y	46
Figura 28 – Eixo Y + base do eixo X	46
Figura 29 – Sistema de transmissão	47
Figura 30 – Eixo X + base eixo Z	47
Figura 31 – Eixo Z.....	48
Figura 32 – Diagrama do sistema eletrônico	48
Figura 33 – Corte de metalon.....	49
Figura 34 – Furação das peças.....	50
Figura 38 – Esquadros magnéticos.....	51
Figura 41 – Preparação para montagem.....	51
Figura 42 (a), (b), (c) e (d) – Montagem da CNC <i>Router</i>	52

Figura 43 – Projeto CAD para verificação da precisão da máquina	53
Figura 44 – MDF usinado	53
Figura 45 (a) e (b) – CNC Router construída x CNC Router Distritec	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicação dos fusos de acordo com os tipos de roscas	28
Quadro 2 – Comparativo entre Tupia e Spindle	32
Quadro 3 – Falhas apresentadas durante o funcionamento	55

TABELAS

Tabela 1 – Estudo de mercado de CNC <i>Routers</i>	34
Tabela 2 – Custo Previsto	38
Tabela 3 – Fresas adquiridas	38
Tabela 4 – Características necessárias para dimensionamento dos motores	39
Tabela 5 – Torque requerido do motor	42
Tabela 6 – Verificação da precisão da máquina.....	54
Tabela 7 – Máquina construída x Distritec	56
Tabela 8 – Máquina melhorada x Distritec	57

LISTA DE SIGLAS

DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normalização)
CN	Comando Numérico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CAD	Computer Aided Desing (Desenho assistido por computador)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Manufatura assistida por computador)
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Fa	Força axial para movimentação dos eixos
Fc	Força necessária para o processamento do material
Fm	Força requerida do motor
T	Torque de levantamento de carga
P	Carga a ser movimentada
dp	Diâmetro primitivo do fuso
μ	Coeficiente de atrito entre o parafuso e a porca
L	Passo do fuso
α	Ângulo radial do fuso
μ_c	Coeficiente de atrito no rolamento axial
dc	Diâmetro primitivo do colar axial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVO.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 JUSTIFICATIVA	17
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1 USINAGEM.....	18
4.2 MOTORES DE PASSO.....	19
4.3 COMANDO NUMÉRICO.....	20
4.4 COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO	20
4.5 CONTROLADOR CNC	22
4.6 MÁQUINA FERRAMENTA CNC	23
4.7 ROUTER VERSUS FRESADORA CNC	26
4.8 MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO.....	27
4.9 GUIAS LINEARES	29
4.10 FERRAMENTA DE CORTE	31
4.11 ESTRUTURA DE FRESADORAS CNC	33
5 DESENVOLVIMENTO DA CNC ROUTER.....	34
5.1 ESTUDO DE MERCADO	34
5.2 DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES DA MÁQUINA	35
5.3 CUSTO DE FABRICAÇÃO DA FRESADORA	37
5.4 DIMENSIONAMENTO DOS MOTORES.....	39
5.4.1 Dimensionamento do eixo X.....	40
5.4.2 Dimensionamento do eixo Y.....	40
5.4.3 Dimensionamento do eixo Z.....	41
5.4.4 Dimensionamento dos motores	41
5.5 DIMENSIONAMENTO DOS EIXOS RETIFICADOS.....	42

5.6	DIMENSIONAMENTO DO FUSO TRAPEZOIDAL	44
5.7	RESOLUÇÃO LINEAR DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO.	44
5.8	PROJETO CAD	45
5.8.1	Base eixo y	46
5.8.2	Eixo Y + base do eixo X.....	46
5.8.3	Sistema de transmissão	47
5.8.4	Eixo X + base eixo Z	47
5.8.5	Eixo Z	48
5.9	SISTEMA ELETRÔNICO	48
5.10	FABRICAÇÃO	49
5.11	ENSAIO DE VALIDAÇÃO	52
5.12	CONFIABILIDADE DO EQUIPAMENTO.....	54
5.13	COMPARAÇÃO COM MÁQUINA COMERCIAL SEMELHANTE ..	55
6	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

A Cultura *Maker* ou Movimento *Maker*, começou a ser aderida no final da década de 1960. Esta, é baseada na extensão da filosofia “faça você mesmo”, que visa incentivar a execução de serviços práticos por pessoas comuns, contemplando: concertos, modificações e criações de objetivos com as próprias mãos.

Atualmente a cultura é bastante utilizada para iteração entre alunos e professores, desde a educação infantil até o ensino médio, abrangendo desde simples atividades artesanais até projetos de robótica. Acredita-se que a ideologia trás espaço para prática do conhecimento através da experimentação, ativando a criatividade e conhecimentos indispensáveis para o mercado de trabalho, como por exemplo: proatividade e condições técnicas para manipulações de ferramentas e tecnologias (LYCEUM, 2021).

Com o objetivo de adquirir as vantagens proporcionadas pela cultura *Maker*, buscou-se um projeto de construção de máquina, sendo optado pela CNC *Router*. Esta máquina trabalha com a remoção de cavaco de blocos até a obtenção da geometria requerida. Realiza-se a fabricação de peças através de processos de fabricação mecânica, que acontecem com e sem remoção de cavaco.

Segundo a norma DIN 8580 de 1985, os processos de fabricação mecânica são divididos em seis grupos: formação de origem (grupo 1); conformação (grupo 2); Separação (grupo 3); união (grupo 4); revestimento (grupo 5); e modificação das propriedades dos materiais (grupo 6). O grupo 3, no qual se enquadra a CNC *Router*, é classificado processos nos quais a ferramentas de corte possui ou geometria definida, ou indefinida. A subdivisão está apresentada na Figura 1 (COSTA, 2006).

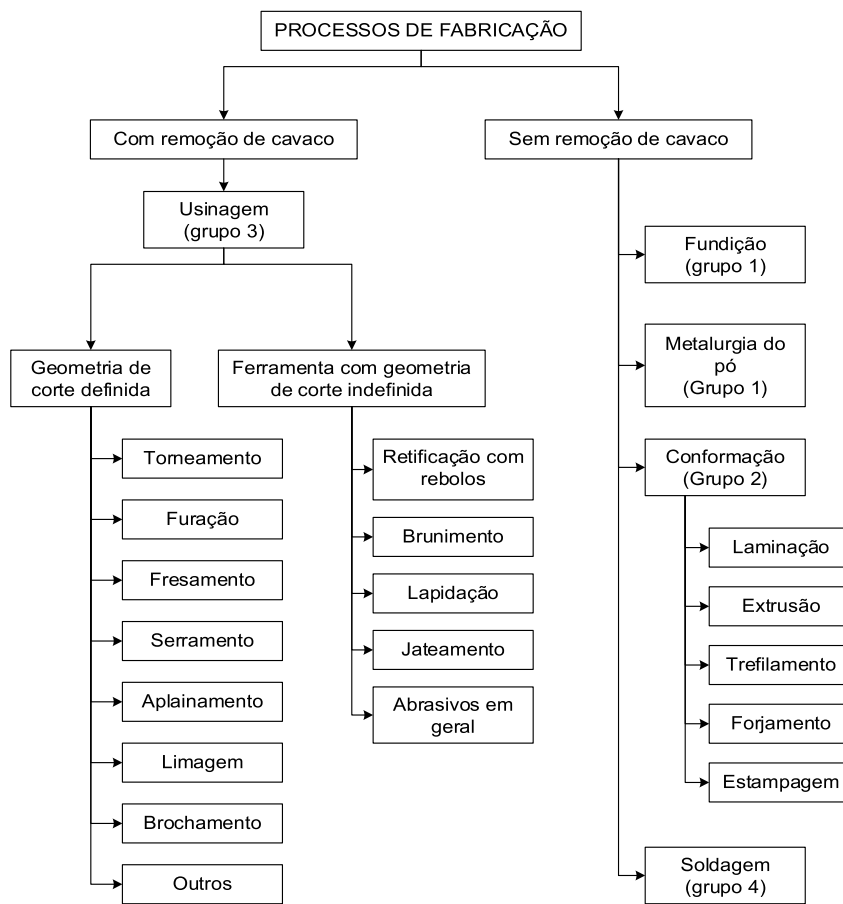


Figura 1 – Subdivisão dos processos de fabricação
Fonte: Adaptado de COSTA, 2006.

Os processos de fabricação são continuamente desenvolvidos e aperfeiçoados com o objetivo de relacionar o aumento da produtividade, com qualidade igual ou superior, com a diminuição do consumo de mão de obra, atendendo as necessidades das empresas e indústrias. Como mostrado na Figura 1, as fresadoras se classificam em processo de usinagem, nos quais existe remoção de material (cavaco) até a obtenção da geometria desejada (DIN 8580, 2003). Além disso, a ferramenta de corte possui geometria definida.

A primeira fresadora foi desenvolvida em 1818 por Eli Whitney com o objetivo aumentar a produtividade na fabricação de rifles devido a guerra civil que ocorria em seu país, EUA. A fresadora não possuía motor, sua movimentação (eixos x,y e z) era realizada de forma manual através do giro de volantes que trabalhavam sobre parafusos com rosca sem fim, também conhecidos por fusos.

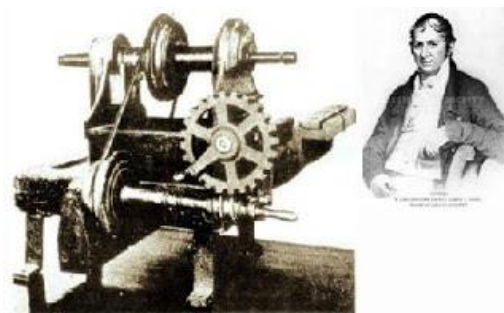


Figura 2 – Primeira fresadora
Fonte: TECMECANICO, 2011.

A primeira fresadora que utilizou de outros meios para movimentação do eixo árvore também foi desenvolvida por um norte-americano, Robert Johnson no ano de 1820. A força provinha de um moinho d'água, a água movia a roda e a transmissão de movimento ocorria através de correias e polias.

Em 1848, a empresa “Robbins e Lawrence” fabricou a fresadora mais robusta e precisa até então, contemplando guias, manivelas com fusos e porcas. A força utilizada para movimentação do eixo derivava ou de moinhos ou de motores a vapor.

Contudo, somente em 1862 o incremento de ajuste de velocidade, rotação e diversos outros acessórios foi feito pelo engenheiro Joseph R. Brown, fundador da fábrica “Brown e Sharpe”, famosa até os dias atuais. A tecnologia dos acessórios adicionados por Brown em fresadoras está presente nas fresadoras até os dias de hoje.

A utilização de motores para movimentação dos eixos, primordial para o controle numérico, iniciou-se a partir de 1970, e cresceu ao menos a rapidez e a precisão das peças fabricadas.

Segundo Stoetarau (2004), as máquinas-ferramentas tiveram seus sistemas mecânicos desenvolvidos até a década de 70, possuindo somente elementos eletrônicos básicos. Contudo, o desenvolvimento tecnológico ocorreu apenas nas três décadas seguintes, decorrendo uma verdadeira revolução do projeto, incluindo a utilização de ferramentas como CAD (Computer Aided Design) e CAM (Computer Aided Manufacturing) para comandar máquinas-ferramentas numericamente.

Atualmente, estes modelos de máquinas CNC podem ser adquiridos por valores muito inferiores, contrastando décadas passadas. Por esta razão, tornaram-se atrativas para uso doméstico e micro empresarial. O presente trabalho trata-se da construção de uma fresadora CNC *Router* associando baixo custo com confiabilidade e precisão, elétrica e mecânica.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Construir uma *CNC Router* de baixo custo concomitantemente com confiabilidade e precisão mecânica e elétrica que, por meio de desenhos elaborados em ferramentas CAD, seja capaz de usinar pelo menos madeiras.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

As *CNC Routers*, podem ser fabricadas de diversas formas diferentes, dependendo principalmente da sua aplicabilidade. Visto isto, estipularam-se os objetivos específicos, apresentados a seguir.

- Fabricar uma estrutura que, com pequenas alterações na forma de fixação do material e da ferramenta de corte, permita impressão 3D, corte e gravação a laser e outros;
- Utilizar softwares livres, possibilitando o uso comercial da máquina;
- Projetar, fabricar e analisar a precisão da *CNC Router*.

3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de máquinas CNC de baixo custo torna sua utilização mais atrativa para empresários, de pequeno porte em diante, e fãs da cultura *Maker*. Isto acontece devido ao valor que pode ser agregado as peças fabricadas, fazendo com que a máquina tenha baixo tempo de retorno do investimento inicial.

A construção destas máquinas, na qual exige particulares com sua aplicação, pode ser realizada com diversos tipos de mecanismos. Compreender a operação destes, bem como o custo associado, agrega noções do funcionamento de máquinas presentes mercado de trabalho, bem como adaptações que podem ser realizadas para melhoria de seu funcionamento.

O setor metal mecânico abrange diversas empresas que possuem em sua linha de produção, máquinas CNC. Desta forma, a construção da máquina e a experiência adquirida durante sua operação, garantem conhecimentos bastantes esperados no mercado de trabalho.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo objetiva fundamentar o trabalho, apresentando os principais conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento CNC *Router*. Serão abordados: motores de passo, comando numérico, comando numérico computadorizado, mecanismos de transmissão de movimentos, guias lineares, ferramentas de corte e noções de custo.

As principais referências utilizadas foram trabalhos de conclusão de curso, artigos científicos e dissertações de mestrados.

4.1 USINAGEM

Processos de fabricação mecânica são subdivididos entre, processos com remoção de cavaco e processos sem remoção de cavaco (vide Figura 1). A usinagem, processo em que ocorre remoção de material da peça até a peça adquirir a forma desejada, se classifica no grupo 3 definido pela DIN 8580. Além disso, existe uma subdivisão para os processos, em geometria de corte definida e indefinida (Figura 3), baseadas na geometria final gerada pelo processo.

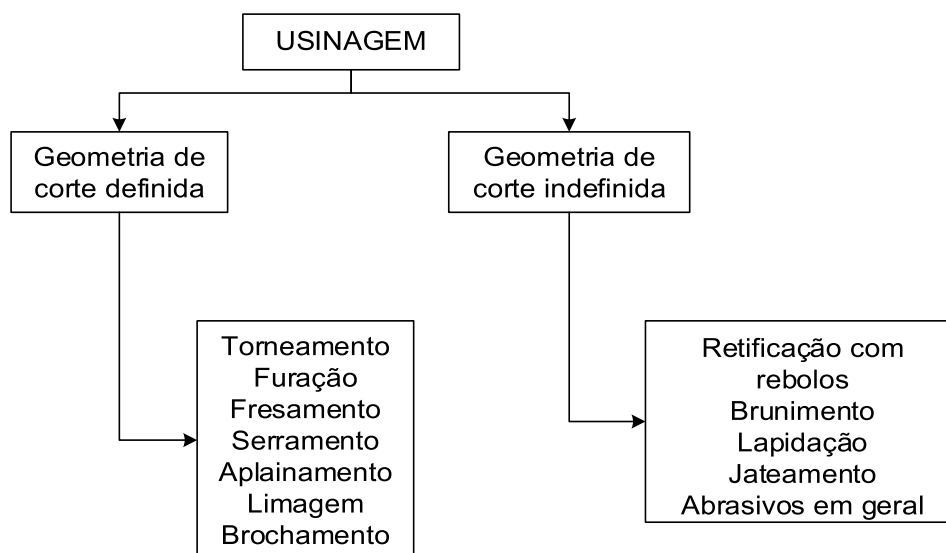


Figura 3 – Divisão dos processos de usinagem
Fonte: Adaptado de COSTA, 2006.

Dentre os processos apresentados acima, os processos com geometria de corte definida são os mais comuns nas fábricas, ou seja, máquinas como: tornos, furadeiras, fresadoras, serras, plainas e limas. A utilização mais comum entre as

máquinas com geometria de corte indefinida são os jatos de abrasivos, utilizados para preparação superficial de peças por meio da remoção de impurezas como: graxa, óleos e gorduras, seguido da aplicação de proteção anticorrosiva, com tinta. A utilização do jateamento, simplifica o processo, tornando desnecessário tratamentos mecânicos com ferramentas manuais. Além dos processos mencionados, existem processos de usinagem não convencionais, como: jato d'água, fluxo abrasivo ultrassom, eletroerosão, eletroquímica, laser, plasma e feixe de elétrons (LYRA, 2010).

Ainda se tratando dos processos de fabricação com geometria de corte definida, verificou-se a partir dos anos 2000 até os dias de hoje, a necessidade de fabricar microestruturas 3D com geometrias complexas, utilizando ferramentas de corte com diâmetro inferior a 1 mm. Assim, surgiu um novo termo para fabricação dessas peças, a microusinagem. No Brasil, a microusinagem é composta de microtorneamento, microfresamento, microfuração e microerosão (RODRIGUES, s/d).

Este processo exige baixas tolerâncias da máquina, a menor tolerância encontrada até o momento está na ordem de 0,001 mm, alcançada por poucas empresas.

4.2 MOTORES DE PASSO

Os motores de passo são utilizados para movimentar a ferramenta de corte nos três eixos, x, y e z. Motores de passo comumente são fabricados com resolução de 200 PPR (passos por rotação), equivalente a $1,8^\circ$ por passo, ou seja, são necessários 200 pulsos para que o motor de passo complete uma volta (360°). O deslocamento pode ser reduzido se utilizadas relações de redução entre as polias do eixo do motor e a polia que transmite o movimento para o parafuso de potência. A Figura 4, representa um motor de passo NEMA.

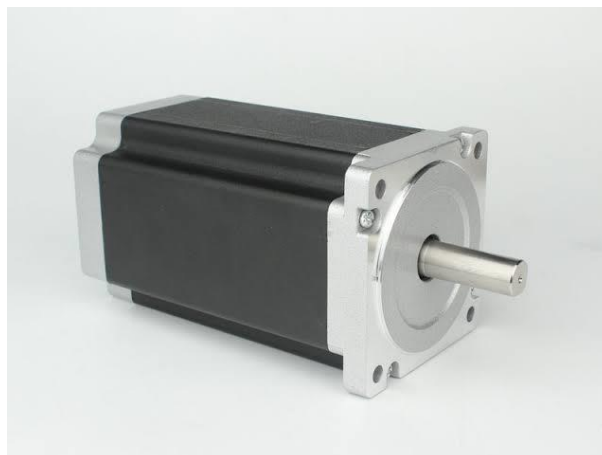


Figura 4 – Motor de Passo NEMA
Fonte: KALATEC, 2019.

4.3 COMANDO NUMÉRICO

Comando numérico é conceituado pela capacidade de um equipamento em receber dados, compilar e transmitir a máquina para que a operação de usinagem aconteça (LACERDA, s/d).

As primeiras máquinas por comando numérico foram desenvolvidas entre as décadas de 1940 e 1950 devido à alta demanda de fabricação de peças durante a segunda guerra mundial (MACHADO, 2019). O objetivo do desenvolvimento contemplava o aumento da qualidade superficial das peças e a redução do tempo de fabricação e conseqüentemente, do custo.

Nos sistemas CN o programa era inserido na máquina ferramenta em discos de armazenamento (disquetes, cartão ou cinta perfurada) e não havia possibilidade de alterar quaisquer parâmetros da programação, o programa podia ser somente iniciado ou parado (TAVARES; FONSECA, 2012).

4.4 COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO

O comando numérico computadorizado (CNC) diferentemente do comando numérico (CN), permite ao operador da máquina realizar modificações no programa e definir parâmetros de corte, características do bloco de material, edições no programa criado e outros, além de iniciar e pausar ou finalizar a operação. Isto acontece devido

ao fato de que máquinas CNC são providas de um microcomputador como parte integrante do equipamento para controlar a máquina (SOUZA, 2018).

Os deslocamentos da máquina ferramenta estão baseados em interpolação linear ou circular, sendo realizados com um conjunto de posições intermediárias de um intervalo. Os sistemas de controlo são: ponto a ponto, paraxial e contínuos, sendo que os sistemas paraxial e contínuo são os mais utilizados (TAVARES; FONSECA, 2012).

Basicamente, o sistema paraxial ou de controlo de percurso é definido por sistemas em que o deslocamento da ferramenta acontece somente de forma paralela aos eixos, ou seja, os eixos se movimentam um de cada vez. Já o sistema de controle contínuo ou de trajetória, assegura melhor precisão e visibilidade da trajetória da ferramenta (MACHADO, 1990), ver Figura 5.

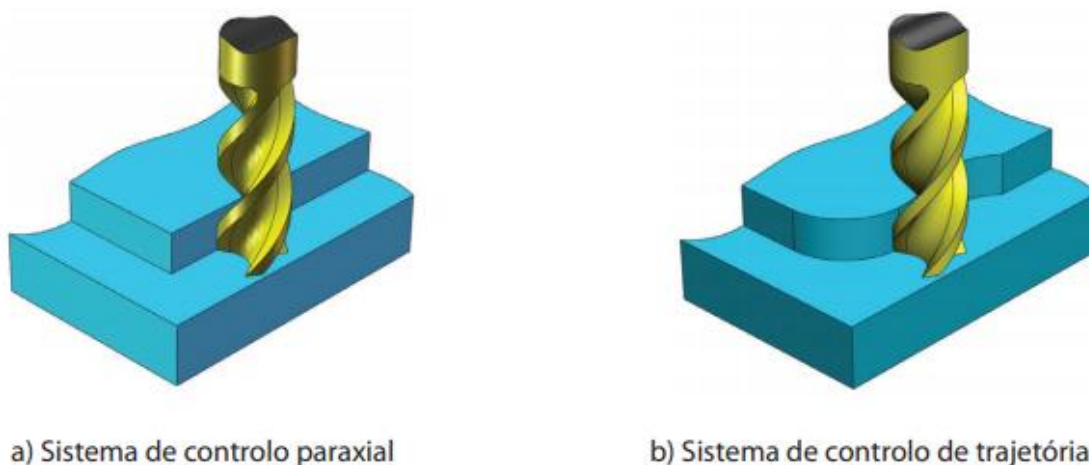


Figura 5 – Sistemas de controlo mais utilizados
Fonte: RELVAS, 2018

A utilização de comandos CNC foi implementada a partir da década de 70, utilizando a tecnologia de microprocessadores (Machado, 1990). A partir de então a tecnologia implementada nas máquinas CNC continuou a ser desenvolvida e aperfeiçoada.

A revolução tecnológica na usinagem CNC, chamada de usinagem *iMachining*, expõe uma programação que determina automaticamente os melhores parâmetros de corte em função do material a ser usinado e das características físicas do equipamento (Marcarenhas, 2014), proporcionando menor consumo de tempo para mesma operação de corte com mesma qualidade, reduzindo o custo de fabricação.

4.5 CONTROLADOR CNC

O controlador CNC, composto por *hardware* e *software*, é responsável pela comunicação do computador com os motores, gerando o processamento do material. A comunicação entre o computador e o controlador de CNC *Routers* é realizada através de códigos, sendo o mais comum o G-code.

O Arduino é um hardware amplamente utilizado em construções de máquinas CNC (Figura 6). Isto acontece devido a plataforma ser livre e possuir a biblioteca como o Grbl, que permite configurações rápidas e extremamente eficientes.

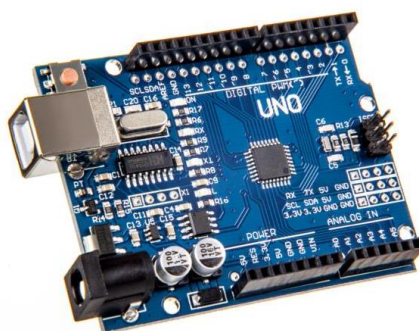


Figura 6 – Arduino Uno
Fonte: Autoria própria, 2021

A ligação da placa *Arduino* com os periféricos (*drivers*, motores, sensores de fim de curso, *spindle*, outros) pode ser realizada em placa protoboard, seguida da fabricação de uma placa impressa. Contudo, foi desenvolvida a placa CNC Shield (Figura 7) que fornece toda configuração necessária para conexão dos periféricos, simplificando o processo. Além da placa *Arduino* e do upload do *software* Grbl, é necessário utilizar um *software* para comunicação serial, conhecido como terminal serial. Os *softwares* disponíveis são: *bCNC*, *Universal G-code Sender* (UGS), *Easel*, *Grblweb*, *GrblPanel*, *GrblControl*, *SourceRabbit GCode Sender*, *Python Streaming Scripts*, outros (KURPUKOV, 2018).

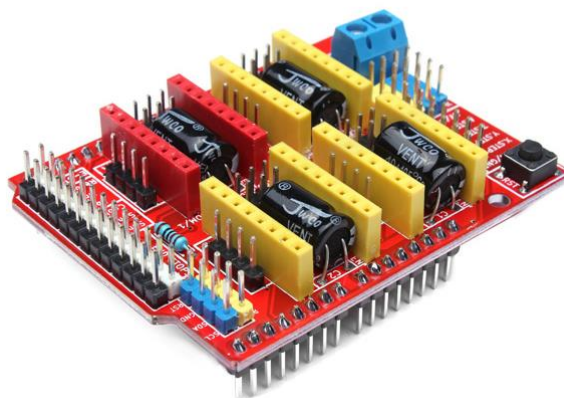


Figura 7 – CNC Shield
Fonte: FILIPEFLOP, 2021

O *Ultimate CNC*, recentemente desenvolvido, também se comunica com o *Grbl* e possui alguns adicionais que tornam seu uso mais vantajoso, como: auto nivelamento, leitura de imagens em formatos diversos (PNG, JPG, GIF, BMP, STL, SVG), criação de geométricas simples (círculos, retângulos e triângulos) e conversão para o código *G*, personalização da interface do programa com temas, *bluetooth* com baixo consumo de energia, *touchscreen*, outros.

Dentre os programas apresentados, inicialmente foi escolhido o uso do UGS, visto que é compatível com qualquer sistema operacional e possui interface simplificada.

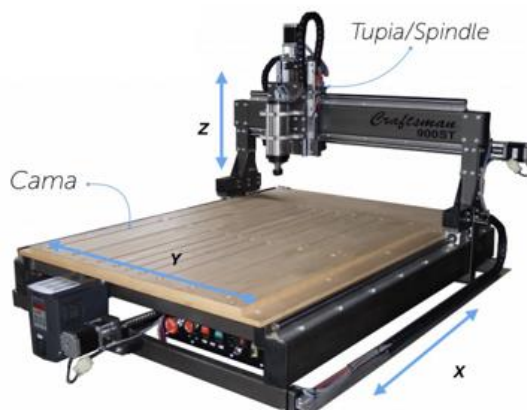
4.6 MÁQUINA FERRAMENTA CNC

A finalidade de uma máquina ferramenta CNC é fabricar uma peça a partir de um bloco de material, utilizando um conjunto de especificações definidos via softwares. A dureza da ferramenta deve ser superior à do material de fabricação, permitindo a remoção de material (Lyra, 2010).

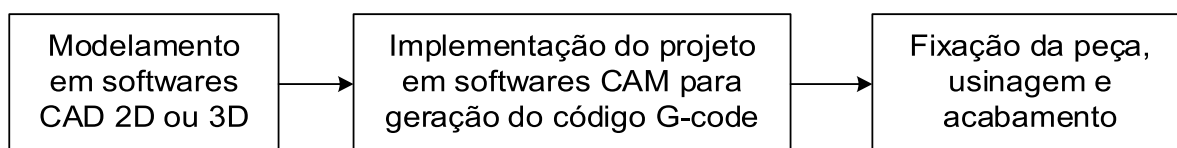
O desenvolvimento de máquinas ferramentas é realizado de acordo com a aplicação desejada, que depende ao menos de: tipo de material que irá ser usinado, dimensões externas (área útil) e produtividade requerida.

A *CNC Router*, possuem no mínimo 3 eixos denominados x, y e z (Figura 8). As etapas de fabricação de peças por meio destas máquinas estão expressas na

Figura 9, contemplando: modelamento em softwares CAD; compilação em softwares CAM para geração de código G-code; fixação do material, usinagem e acabamento.



**Figura 8 – CNC Router de 3 eixos
Brasília Fab Lab, 2017**



**Figura 9 – Etapas do processo de fabricação de peças em CNC Routers
Fonte: Autor.**

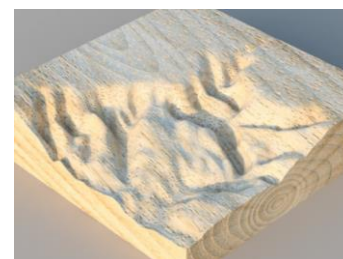
Quando a máquina possui três eixos, é possível usinar geometrias em 2D, 2,5D e em 3D em chapas e blocos de materiais. A forma 2D consiste no corte de material com profundidade constante. A forma 2,5D apresenta diferentes profundidades de corte na mesma superfície. A forma 3D apresenta superfícies complexas, também com diferentes profundidades, porém com áreas planas diminuídas (Figura 10).



a) Forma 2D



b) Forma 2,5D



c) Forma 3D

Figura 10 – Formas geradas em chapas ou blocos de materiais
Fonte: Adaptado de Brasília Fab Lab, 2017.

Contudo, as fresadoras CNC de 3 eixos possuem limitações devido a geometria da ferramenta de corte quando necessário usinar em 3D (Figura 11).

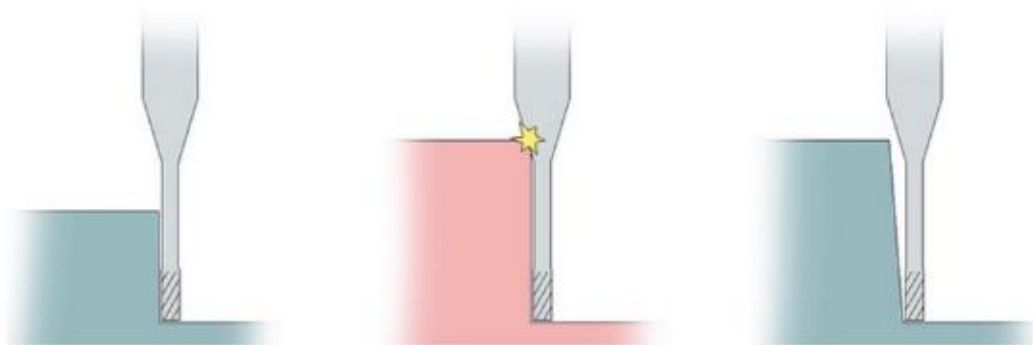


Figura 11 – Limitações da fresadora de 3 eixo em usinagem de forma 3D
Fonte: Brasília Fab Lab, 2017

As limitações para usinagem 3d, tornou necessário o desenvolvimento de novas fresadoras, contendo um ou dois eixos adicionais denominados A e B, respectivamente (Figura 12 e Figura 13).

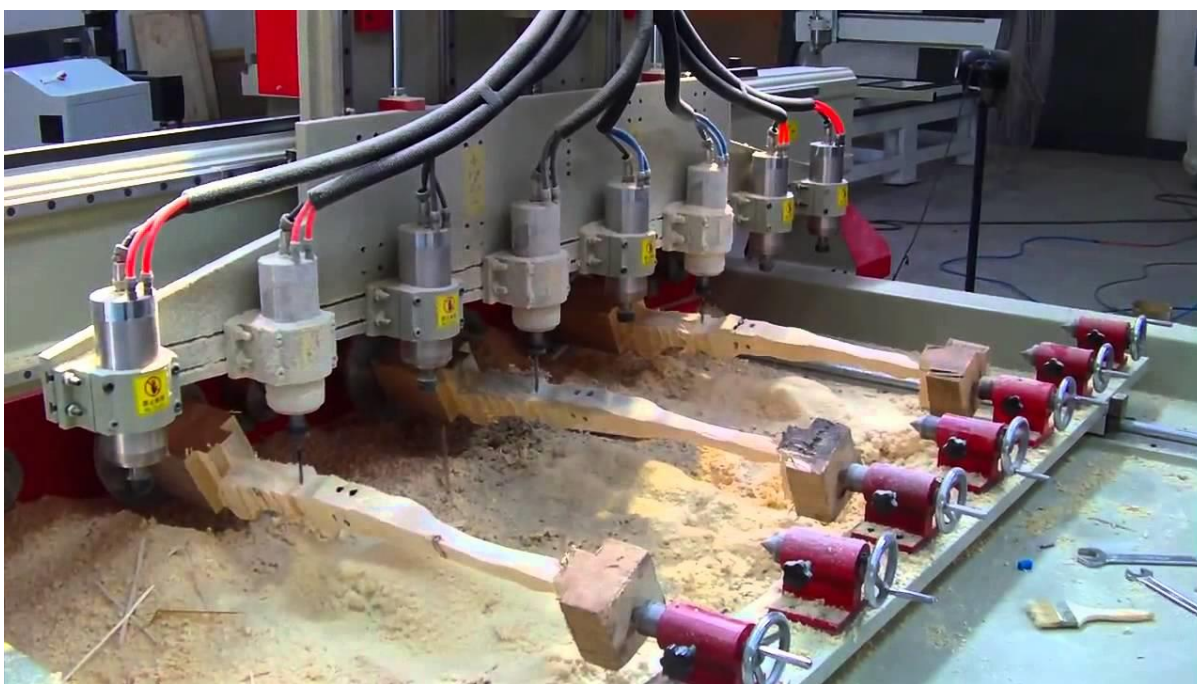


Figura 12 – Máquina CNC de 8 cabeças com 4 eixos
Fonte: SILVA, 2015



Figura 13 – Fresadora CNC com 5 eixos
Fonte: MECÂNICA INDUSTRIAL, 2019

4.7 ROUTER VERSUS FRESADORA CNC

Embora as máquinas CNC *Router* e fresadora CNC sejam frequentemente confundidas, elas são diferentes. *Router* é o nome atribuído a máquina ferramenta que processa matérias primas como: madeiras, plásticos, borrachas, acrílicos e outros.

O vínculo com o termo CNC, representa que todas operações da máquina serão realizadas por comandos numéricos computadorizados. Além disto, CNC *Routers* possuem pórticos móveis, que movimentam a ferramenta ao longo dos três eixos, enquanto a mesa de trabalho fica parada (SOUZA; ULBRICH, 2013).

O funcionamento das fresadoras, tanto manuais quanto CNC, é baseado na movimentação da mesa de corte, enquanto a ferramenta fica parada (SOUZA; ULBRICH, 2013). Cabe salientar que apesar da definição apresentada, existem fresadoras CNC, conforme definição de fabricantes, que funcionam da mesma forma que as CNC *Router*, porém possuem recursos de alta precisão e eficiência, sendo usadas principalmente para processamento de chapas metálicas.

4.8 MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO

O sistema de movimentação dos eixos de uma fresadora CNC pode ser composto de diversos componentes sendo que, os mais utilizados são fusos trapezoidais, fusos de esferas, correias dentadas, correntes e pinhões (Figura 14). Existem mecanismos nos quais são utilizadas combinações das opções apresentadas.



(a) Correia dentada e polia
Fonte: SOLUÇÕES INDUSTRIAIS, 2019



(b) Fuso trapezoidal
Fonte: REVISTA MANUTENÇÃO, 2017








(c) Fuso de esferas
Fonte: KALATEC AUTOMAÇÃO, 2018



(d) Corrente e pinhão
Fonte: MERCADO LIVRE, 2021

Figura 14 (a), (b), (c) e (d) – Mecanismos de transmissão de movimentos

É importante ressaltar que o sistema ‘correia dentada e polia’, com relação 3:1, costuma ser utilizado para aumento de torque. Os parafusos de potência, conhecidos como fusos possuem alguns tipos de roscas (perfil de filete), sendo caracterizados de acordo com o tipo de aplicação, descritas no Quadro 1.

TIPOS DE ROSCAS (PERFIS)		APLICAÇÃO
	Triangular	Parafusos e porcas de fixação na união de peças. Ex.: Fixação de roda de carro.
	Trapezoidal	Parafusos que transmitem movimento suave e uniforme. Ex.: Fusos de máquinas.
	Quadrado	Parafusos que sofrem grandes esforços e choques na transmissão. Ex.: Prensas e morsas.
	Redondo	Parafusos de grandes diâmetros sujeitos a grandes esforços. Ex.: Equipamentos ferroviários.
	Dente de serra	Parafusos que exercem grande esforço em um só sentido. Ex.: Macacos de catraca.

Quadro 1 – Aplicação dos fusos de acordo com os tipos de roscas
Fonte: Gordo e Ferreira, 2012

Para que a transferência de movimento ocorra, existem peças que completam o conjunto. No caso dos fusos estas peças são nomeadas de castanha, enquanto no caso das correias, são nomeadas de polias.

Dessa forma, é perceptível que a potência de entrada é dissipada devido a existência de atrito entre os fusos e as castanhas, e ao escorregamento entre as correias e as polias dentadas, fenômeno inevitável em qualquer tipo de transmissão (MELCONIAN,2008).

De acordo com REPRAPBR, quando comparado polia com fuso, é evidenciado que a polia tem capacidade de produzir maior velocidade, enquanto que os fusos possuem maior força e precisão. Dessa forma, embora as polias sejam mais acessíveis (baratas), o sistema de transmissão por fusos é mais atraente, visto que o valor gasto em caso de fuso trapezoidal gerará aproximadamente 5,5 % do custo total do projeto.

O sistema de correia e polias, associado ao fuso trapezoidal ou de esferas, costuma ser utilizado quando é requerido aumento do torque disponibilizado pelo motor. No caso de relação 3:1 com eficiência de 95% (MARCO, 2021), por exemplo, 20 dentes na polia menor que é acoplada no eixo do motor e 60 dentes na polia maior acoplada ao fuso, seria possível aumentar em até 2,85 vezes o torque do motor.

O fuso de esferas garante maior eficiência e melhor precisão, além de altas velocidades de rotação. Confrontando os fusos de esferas com os trapezoidais, tem-

se que o torque necessário para um mesmo corte é apenas 1/3 e a eficiência chega em até 90%, enquanto os trapezoidais apresentam um máximo de 50% (AVASISTEM, 2019).

4.9 GUIAS LINEARES

As guias lineares são elementos utilizados para eliminar folgas e garantir alinhamento e suavidade na movimentação dos eixos de máquinas. São utilizadas em diversas aplicações de elementos de máquina, sendo que o eixo retificado (Figura 15) e o trilho com patins (Figura 16) são os mais comuns.



Figura 15 – Eixo retificado, mancais e *pillow blocks*
Fonte: OCOMPRA, 2017



Figura 16 – Guias lineares
Fonte: AUTOMACAOLINEAR, 2019

Além disso, alguns projetos de fresadoras que visam somente redução de custos, utilizam trilhos telescópicos de gavetas (Figura 17), apresentando mais folgas que as opções citadas anteriormente, mas custos absurdamente inferiores.



Figura 17 – Trilho telescópico para gavetas
Fonte: AMFER FERRAGENS, 2019

Outra forma de guia, que está sendo utilizada recentemente, são pórticos associados com Metalon. De forma análoga ao sistema de eixos retificados, o pórtico é o *pillow block* e o eixo é o Metalon. Este sistema possui custo muito menor quando comparado com os eixos retificados e guias lineares. Além disso, caso o projetista queira aumentar a área útil da máquina, basta aumentar somente o tamanho da peça de Metalon (Figura 18).



Figura 18 – Pórtico associado com Metalon
Fonte: Autoria própria, 2021

O mecanismo de transmissão de movimentos e as guias devem trabalhar em conjunto. Na montagem do conjunto é necessário garantir alinhamento exato, pois máquinas CNC desalinhadas forçam os motores desnecessariamente além de perder

a precisão de corte e gerar vibração excessiva, exigindo uma melhor fixação do material a ser usinado.

Em casos onde o comprimento do eixo possui tamanho suficiente para gerar flexão, deve-se utilizar eixos retificados com suporte, combinados com pillow blocks abertos, objetivando evitar a flexão do eixo e conseqüentemente garantindo o alinhamento do conjunto (Figura 19).

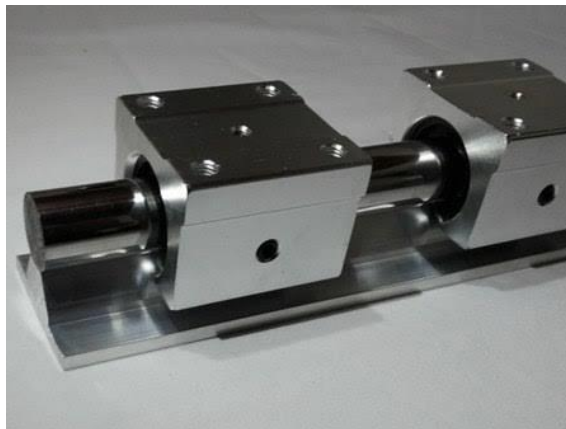


Figura 19 – Eixo retificado com suporte e pillow blocks abertos
Fonte: PRECIOD, 2015

4.10 FERRAMENTA DE CORTE

É a ferramenta de corte da matéria prima, na qual as características estão ligadas diretamente com o tipo de material que se deseja usinar. As CNC *Routers*, de baixos custos, costumam utilizar tupias, retificas, micro retificas ou *spindles*, sendo que a única ferramenta fabricada especificamente para usinagem CNC é o *spindle*.

A adaptação das outras ferramentas ocorre quando já estão disponíveis ou se almeja redução de custos, no entanto isso diminui a confiabilidade do projeto, visto que o sistema de refrigeração a ar destas ferramentas conta com canais de ventilação que podem ser obstruídos com o cavaco gerado durante a usinagem. Ademais, a dificuldade de fixação e o nível de ruído elevado também são pontos negativos de adaptação de outras ferramentas.

O dimensionamento das ferramentas, baseia-se principalmente em sua rotação de trabalho, potência, torque, dimensões, massa e sistema de arrefecimento, que pode ser a água, a óleo ou a ar.

Existe um grande impasse entre a tupia e o *kit spindle*, apresentados na Figura 18, como escolha para fresadoras CNC caseiras. No Quadro 2, é possível verificar algumas características que tornam o uso do *spindle* mais benéfico e proveitoso. Vale apresentar que estas características foram providas pelo autor, conforme experiência de uso de ambas ferramentas.

Observações	Kit spindle, fonte, suporte e pinças	Tupia laminadora elétrica
Custo	Alto	Médio
Nível de ruído	Médio	Alto
Vibração	Baixa	Média
Precisão	Alta	Média
Fixação	Fácil (kit acompanha o suporte)	Média (depende do modelo)
Facilidade de controle da rotação	Alta	Baixa

Quadro 2 – Comparativo entre Tupia e Spindle
Fonte: Aatoria própria, 2019

A facilidade de controle da rotação foi atribuída desta forma devido ao controle do *kit spindle* ser realizado por um potenciômetro que pode ser fixado em ponto estratégico devido aos seus cabos serem conectados na fonte, enquanto que a tupia manual possui o potenciômetro acoplado em sua carcaça, o que exigiria adaptações para mudança e dificulta alterações na rotação durante o fresamento.



(a) Tupia manual

Fonte: DUTRA MÁQUINAS, 2019



(b) Kit Spindle, suporte, fonte e pinças

Fonte: BEGIN 3D, 2019

Figura 20 (a) e (b) – Ferramentas de corte.

A fixação da fresa na ferramenta de corte é realizada na pinça. Para isto, basta atentar-se ao diâmetro da haste da fresa, local onde é fixada a fresa na pinça, que

pode ser diferente do diâmetro de corte da fresa. Na Figura 21 é possível visualizar que o diâmetro de corte da fresa é $\varnothing 2$ mm, enquanto que o diâmetro da haste da fresa é $\varnothing 3,175$ mm ($\varnothing 1/4"$), o que torna necessário o uso de uma pinça de $\varnothing 3,175$ mm para fixação da fresa. Outra informação em que se deve atentar é o comprimento de corte, que no caso é 12 mm.

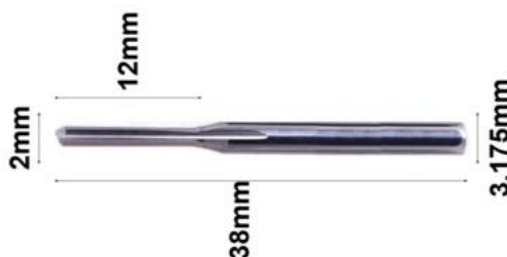


Figura 21 – Fresa 2 cortes retos
Fonte: MERCADO LIVRE, 2015

4.11 ESTRUTURA DE FRESADORAS CNC

Estruturas de fresadoras CNC caseiras, costumam ser fabricadas em madeira, visto que é o material que exige a menor quantidade de ferramenta para ser trabalhado. Contudo, madeira absorve umidade e pode comprometer a rigidez do equipamento conforme o tempo de utilização.

A utilização de madeira para estrutura é recomendada somente quando será utilizada a própria fresadora CNC para fabricar novas peças que serão utilizadas na montagem final da máquina. Existem projetos, por exemplo, que após a montagem inicial da máquina em madeira, as peças são usinadas em chapas de alumínio composto (ACM), que possuem maior duração e são imunes a umidade, alta resistência e leveza.

Além disto, nos últimos dois anos, estão sendo apresentados projetos que utilizam Metalon para fabricação da estrutura, bem como a utilização de metalon como guias. Entretanto, a utilização deste material requer ferramentas mais brutas como: máquina de solda, esmerilhadeira, furadeira, outros. Contudo, é necessário comprar e saber manipular estas ferramentas.

5 DESENVOLVIMENTO DA CNC ROUTER

5.1 ESTUDO DE MERCADO

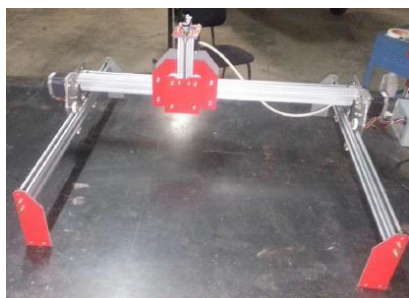
A princípio, levantou-se informações em trabalhos acadêmicos, livros e sites de vendas sobre CNC *Routers*. Após pesquisas, percebeu-se a necessidade de desenvolver uma máquina de baixo custo analisando confiabilidade e precisão, e deixando a estrutura mais robusta e durável.

Na Tabela 1 são apresentadas as principais características a ser analisadas no momento de compra de uma CNC *Router*. Neste momento é necessário saber qual o material em que se deseja trabalhar e suas dimensões máximas. Com exceção das máquinas da Distritec, as demais foram desenvolvidas em trabalhos de conclusão de curso. Na Figura 22 é possível visualizar as máquinas associadas a Tabela 1.

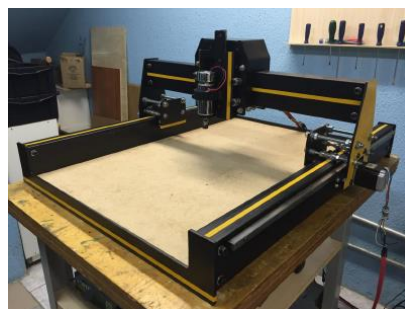
Tabela 1 – Estudo de mercado de CNC *Routers*.

Referência	Área útil (CxLxP) mm	Mecanismos	Guias	Ferramenta de corte	Torque estático do motor de passo	Custo
TCC – Polastrini.	500x500x100	Correia e polia	Trilho e rolamentos	Micro retifica	5 kgf.cm	R\$ 822,46
TCC – Pereira; Hadas.	400x700x60 (estimado)	Cremalheira e pinhão	Guias lineares	<i>Spindle</i>	15 kgf.cm	R\$ 4.920,56
TCC – Barros	250x250x30	Barra roscada	Trilho telescópico	Micro retifica	1,7 kgf.cm	R\$ 418,31
Distritec	500x500x60	Correia	Eixo retificado	Retifica ou tupia	12 kgf.cm	R\$ 11.700,00
Distritec	800x700x60	Correia	Eixo retificado	<i>Spindle</i> profissional	12 kgf.cm	R\$ 13.990,00

Fonte: Autor, 2019.



(a) Fonte: POLASTRINI, 2015



(b) Fonte: PEREIRA; HADAS, 2016



(c) Fonte: BARROS, 2017



(d) Fonte: DISTRITEC, 2019



(e) Fonte: DISTRITEC, 2019

Figura 22 (a), (b), (c), (d) e (e) – CNC Routers

5.2 DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES DA MÁQUINA

A definição dos componentes a serem utilizados na máquina foi realizada, após a etapa anterior, que contemplou a análise das máquinas já construídas. Para isto, estipulou-se o gasto de R\$ 3.000,00.

Para o mecanismo de transmissão de movimentos, adotou-se a utilização de fusos trapezoidais. Apesar de serem menos eficientes, devido ao coeficiente de atrito ser maior do que o de fusos esféricos, custam 5 vezes menos. Além disto, a utilização

de fusos esféricos implicaria em utilização de mais de 30 % do valor disponível para o projeto. Embora, as polias sejam de custo baixo (menor que 10% do custo do projeto), sua utilização foi descartada devido à capacidade reduzida de transmissão de forças.

Como guias, os trilhos telescópicos foram descartados diretamente, pois apresentam muita folga quando comparado aos demais mecanismos. Ao comparar o custo do eixo retificado com o custo da guia linear, é definido o uso de eixos retificados, por apresentarem custo médio, enquanto as guias apresentam custo alto.

Para a escolha da ferramenta de corte, foram analisadas suas características. O custo de uma Tupia manual 530 W *Makita* com pinça de 6 mm e três fresas é de R\$ 419,70 (DUTRA MÁQUINAS, 2019) enquanto o custo de um Kit *Spindle* CNC, fonte 500 W e um jogo de treze pinças completo de 1 mm até 7 mm com variação de 0,5 mm é de R\$ 700,00 (MERCADO LIVRE, 2019), porém como apresentado o *Spindle* se apresenta mais vantajoso. (Os valores das ferramentas foram encontrados em sites nacionais).

Com as peças determinadas, iniciou-se o desenvolvimento do projeto em programas CAD, para melhorar a visualização da máquina e conseqüentemente o entendimento do funcionamento, tais como: dimensionais útil, mecanismos de transmissão de movimentos, ferramentas e softwares a serem utilizados na construção da máquina.

Nisto foi estabelecido a forma de construção da máquina, que se iniciará com a fabricação das peças bases dos eixos, da mesa de corte em madeira, da estrutura em perfil metálico e dos mecanismos de transmissão de movimentos com eixos retificados e fusos trapezoidais. Após a montagem inicial dos equipamentos e o funcionamento da fresadora, as peças em madeiras serão fabricadas com chapas nylon, e substituídas visto que sua durabilidade é maior. Somente a placa de sacrifício será mantida em madeira.

A plataforma de controle selecionada foi o Arduino UNO, amplamente utilizado em sistemas de controle devido à enorme quantidade de informações presente nas literaturas. Será utilizado o pacote Grbl juntamente com o software UGS para movimentação dos eixos.

As etapas a serem seguidas para fabricação da fresa apresentadas na Figura 12 e Figura 23.

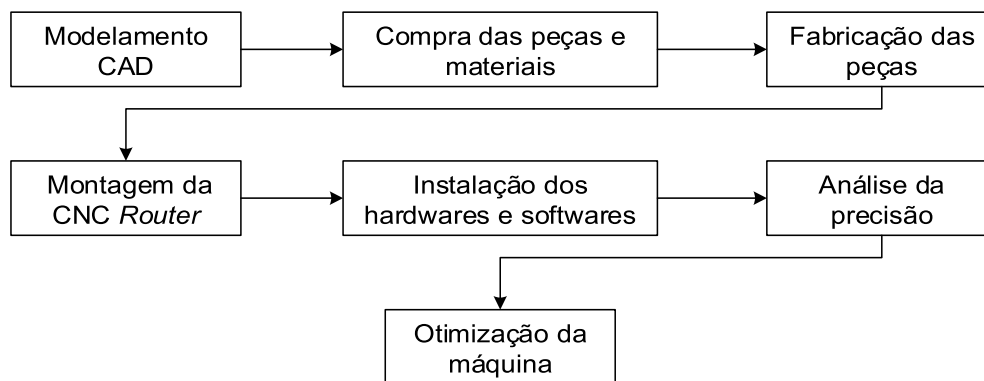


Figura 23 – Etapas do processo de fabricação da fresadora
Fonte: Autoria própria, 2021

A otimização da máquina irá contemplar melhorias que podem ser realizadas para aumento de área útil, fixação do material a ser processado, sistema de zeramento do eixo, fabricação de estrutura para fresadora e coifa.

5.3 CUSTO DE FABRICAÇÃO DA FRESADORA

O projeto de forma que seja encontrado o ponto de equilíbrio entre precisão e confiabilidade do equipamento.

Tabela 2 – Custo Previsto

Descrição	Peça	Quantidade	Total
Ferramenta de Corte	Spindle 500 W, suporte, fonte e pinças	01	R\$ 865,00
Elétrica	Motores de passo 0,52 N.m (5,3 kgf.cm)	03	R\$ 195,00
Elétrica	Fonte de alimentação 10 A	01	R\$ 0,00
Eletrônica	Kit CNC Shield V3 + Arduino Uno + 3 Driver A4988	01	R\$ 140,00
Mecânica	Pillow blocks fechado 16 mm	12	R\$ 349,00
Mecânica	Suporte para eixo guia linear 16 mm	12	R\$ 189,00
Mecânica	Sistema fuso trapezoidal Tr8-8 300 mm + mancal + acoplamento	01	R\$ 112,00
Mecânica	Sistema fuso trapezoidal Tr8-8 500 mm + mancal	01	R\$ 139,90
Mecânica	Sistema fuso trapezoidal Tr8-8 700 mm + mancal	01	R\$ 166,00
Mecânica	Eixos retificados 2 x Ø16 mm x 300 mm, 2 x Ø16 x 500 mm e 2 x Ø16 x 700 mm.	01	R\$ 240,00
Estrutura	Base dos motores de passo	03	R\$ 59,00
Estrutura	Barra de Metalon 30 x 50 mm #16	01	R\$ 184,00
Estrutura	Eletrodo revestido E6013 Ø1,5 mm	10	R\$ 20,00
Estrutura (Eixo X e Z)	Placas de alumínio 188 x 200 x 3 mm e 180 x 270 x 3 mm	03	R\$ 160,50
Estrutura	Discos de corte e acabamento para esmerilhadeira	03	R\$ 30,00
Estrutura	Parafusos, arruelas e porcas	01	R\$ 150,00
Custo Total			R\$ 2999,40

Fonte: Autoria própria, 2021

Conseguiu-se atingir o valor total de R\$ 2999,40 para a compra de peças, estando abaixo do valor estipulado para o projeto, de R\$ 3.000,00. Cabe salientar que foi estipulado este custo para fins de comparação do custo de peças individuais, com o custo total do projeto. Os valores gastos com as fresas, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Fresas adquiridas

Fresa	Fresa de topo com 2 cortes Ø6 mm	1	R\$ 100,00
Fresa	Fresa de topo com 2 cortes Ø3 mm	1	R\$ 27,00
Fresa	Fresa Vbit 22 mm x 90°	1	R\$ 150,00

Fonte: Autoria própria, 2021

A fresa de topo, de Ø3 mm e Ø6 mm serão utilizadas para facear, criar ranhuras e corte externo das peças. A fresa Vbit será utilizada para gravação.

5.4 DIMENSIONAMENTO DOS MOTORES

O dimensionamento dos motores é baseado em duas características da máquina: comprimentos úteis da CNC Router e massa a ser transportada por eixo (FIEBIG, 2018). Ambas informações foram obtidas por meio do projeto realizado no software CAD (Tabela 4). Cabe salientar que o comprimento útil não é equivalente ao tamanho dos eixos e/ou fusos, isto acontece devido aos comprimentos necessários para montagem das demais peças.

Tabela 4 – Características necessárias para dimensionamento dos motores

Eixo	Comprimento útil	Massas deslocadas
X	220 mm	2,96 kg
Y	400 mm	7,20 kg
Z	120 mm	1,62 kg

Fonte: Autor, 2021

O cálculo realizado para o dimensionamento, engloba dois conceitos: força axial e força de corte. A força axial, equação (1) é baseada no esforço requerido para movimentar a ferramenta de corte sem usinagem, enquanto que a força de corte, equação (2), ocorre quando se inicia o processo de usinagem (FIEBIG, 2018).

$$F_a = M * g + f + M * a \quad (1)$$

Onde M é a massa carregada pelo eixo em questão, g é a aceleração da gravidade definida em $9,81 \text{ m/s}^2$, f é a força de atrito e a é a aceleração requerida para movimentação.

$$F_c = K_{s1} * b * h^{1-z} \quad (2)$$

Onde K_{s1} é constante do material, b é a largura de corte que geralmente é equivalente ao diâmetro da fresa, h é a espessura removida no eixo z, e z é constante

adimensional de parâmetros de usinagem. Para o MDF, principal material de trabalho da CNC Router, os valores de K_{s1} e z são definidos como 2,35 e 0,29, nesta ordem (NÉRI, 2003).

Encontradas as duas forças para funcionamento da máquina, deve-se realizar o somatório destas (3), e por fim, escolher qual motor de passo, disponível no mercado, tem força superior a força encontrada.

$$F_m = F_a + F_c \quad (3)$$

Onde F_m é a força requerida do motor.

5.4.1 Dimensionamento do eixo X

O dimensionamento do eixo X, obtido pelo somatório das força axial e da força de corte, está apresentado nos cálculos a seguir, onde utilizam-se as equações (1), (2) e (3).

$$F_{ax} = 2,96 * 9,81 + 2,96 * 1 = 32,00 \text{ N}$$

$$F_{cx} = 2,35 * 3 * 2^{1-0,29} = 11,53 \text{ N}$$

$$F_{mx} = 32,00 + 23,06 = 43,53 \text{ N}$$

Portanto, a força requerida para o funcionamento do eixo X é de 43,53 N.

5.4.2 Dimensionamento do eixo Y

O dimensionamento do eixo Y, também contempla o somatório da força axial com a força de corte. Os cálculos, utilizando as equações (1), (2) e (3), estão apresentados a seguir.

$$F_{ay} = 7,20 * 9,81 + 7,20 * 1 = 77,83 \text{ N}$$

$$F_{cy} = 2,35 * 3 * 2^{1-0,29} = 11,53 N$$

$$F_{my} = 77,83 + 11,53 = 89,36 N$$

Portanto, a força requerida para o funcionamento do eixo Y é de 89,36 N.

5.4.3 Dimensionamento do eixo Z

No dimensionamento do eixo Z, utilizou-se somente a equação (2), que permite encontrar a carga axial (F_z) que deve ser suportada pelo motor, apresentado a seguir.

$$F_z = 1,62 * 9,81 + 0 + 1,62 * 1$$

$$F_z = 17,51 N$$

Portanto, a força requerida para o funcionamento do eixo Z é de 17,51 N.

5.4.4 Dimensionamento dos motores

O dimensionamento dos motores, realizou-se de forma que, fossem instalados motores iguais em todos eixos. Decidiu-se isto, devido ao custo ser menor em compras de maiores quantidades de peças. Utilizou-se para o projeto, o motor de passo NEMA 17hs2408, com eixo de 5 mm e torque de 0,52 N.m. Desta forma, se o motor for acoplado diretamente ao fuso, é fornecida a força de 52 N, considerando 50% de eficiência dos fusos trapezoidais (AVASISTEM, 2019).

A necessidade de aumento do torque no eixo Y, tornou necessária, ou a compra de motores mais potentes (mais caros), ou a utilização do sistema de polia e correia dentada, apresentado na subseção 4.8. Considerando o acoplamento de uma polia de 60 dentes no fuso, e uma polia de 20 dentes no eixo do motor, será alcançada redução do torque requerido. Considerando 5% de perdas (MARCO, 2021), o torque requerido é reduzido em 2,85 vezes, apresentados na Tabela 5. Encontraram-se os

valores de torque requerido pelo produto da força requerida com o diâmetro do eixo do motor.

Tabela 5 – Torque requerido do motor

Eixo	Sem sistema de redução		Com sistema de redução	
	Torque	Coefficiente de segurança	Torque	Coefficiente de segurança
X	0,44 N.m	1,18	0,15 N.m	3,47
Y	0,89 N.m	0,58	0,31 N.m	1,68
Z	0,18 N.m	2,88	0,06 N.m	8,67

Fonte: Autor, 2021

O coeficiente de segurança é obtido pela divisão do torque disponibilizado pelo motor (0,52 N.m), pelo torque requerido. Os dados destacados em vermelho, representam os eixos nos quais a máquina não funcionaria, com os dados preestabelecidos e com o motor selecionado. Contudo, cabe salientar que a operação da máquina reduzindo o diâmetro da fresa e a espessura de remoção de material do eixo z, proporcionam menores cargas aos motores, aumentando o coeficiente de segurança e conseqüentemente, a vida útil dos motores.

5.5 DIMENSIONAMENTO DOS EIXOS RETIFICADOS

O dimensionamento dos eixos retificados é importante para que não haja flexão do eixo. Para isto, realizaram-se simulações no SOLIDWORKS. Os demais eixos foram adquiridos com diâmetro equivalente, tomou-se esta decisão, devido à redução de custo proveniente da compra de peças em atacado. Fabrica-se eixo retificado em liga de aço cromo quando requer-se maior resistência e vida útil.

Para execução da simulação, realizaram-se as seguintes considerações: eixo de diâmetro \varnothing 16 mm; extremidades do eixo retificado engastadas (setas verdes); força gravitacional atuando no centro do eixo (seta vermelha); força peso da estrutura que corre sobre o eixo y (7,2 kgs), dividida entre os quatro *pillow blocks* (setas rosas), e aplicadas na posição central do eixo, com distância de 152 mm; e condição de malha fina.

A simulação apresentou deslocamentos máximos de 0,0473 mm, conforme apresentado na Figura 24. Vale ressaltar que a curvatura apresentada na figura é

meramente visual, sendo necessário avaliar a escala apresentada para ter noções dos deslocamentos.

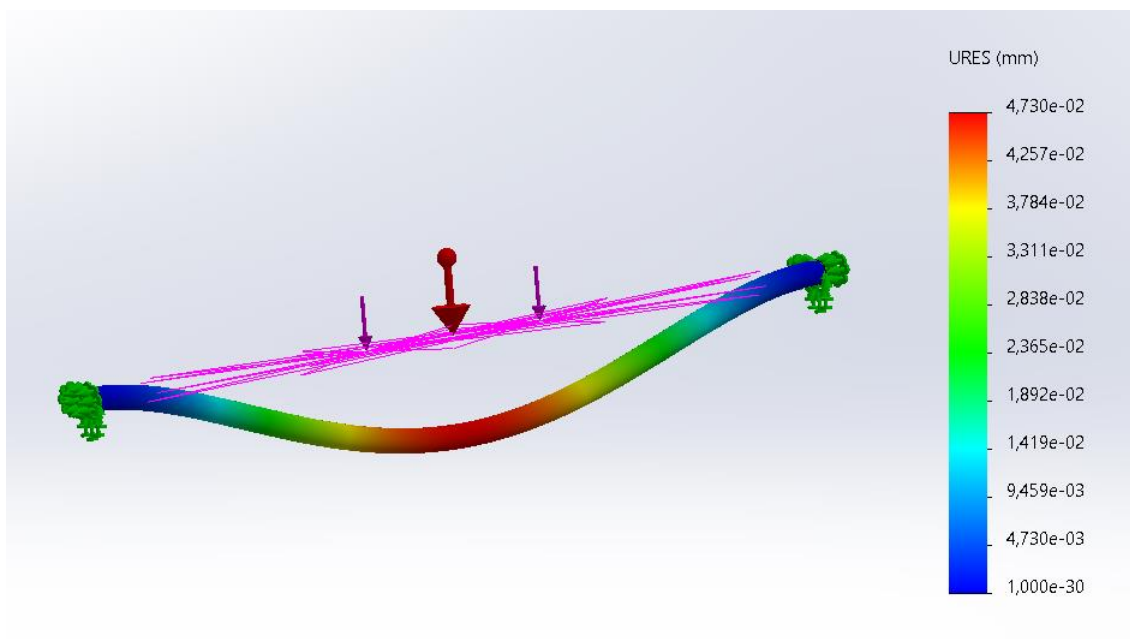


Figura 24 – Simulação dos deslocamentos do eixo retificado Y
 Fonte: Autoria própria, 2021

De acordo com a tensão de vonMises (Figura 25), como é imaginado, a carga colocada sobre o eixo em simulação não é suficiente para que haja sua ruptura.

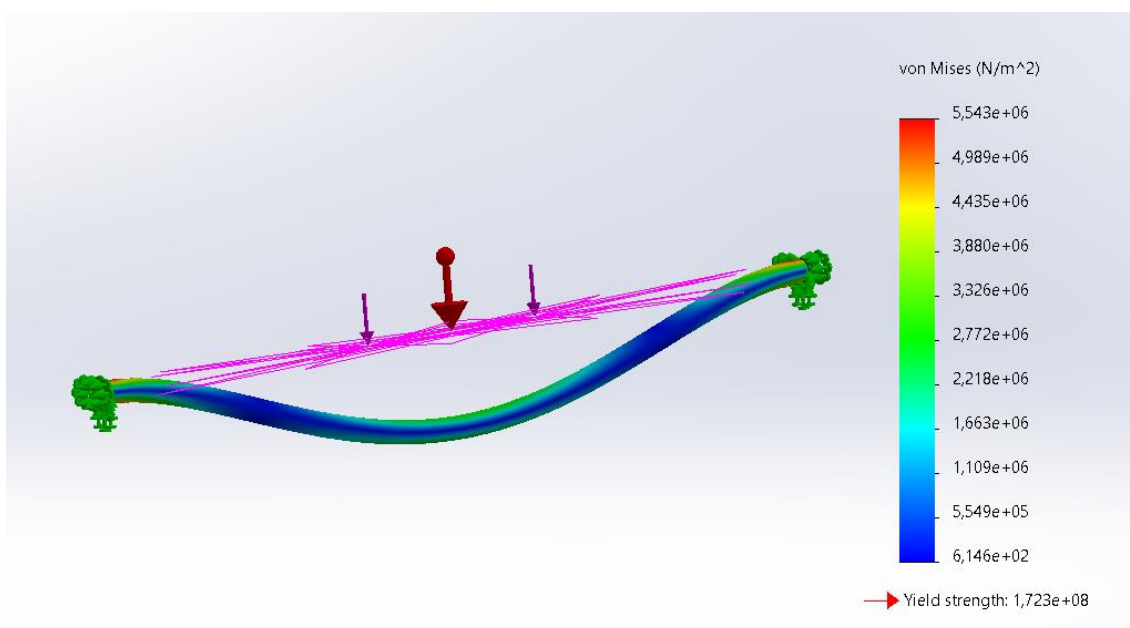


Figura 25 – Tensão de vonMises do eixo retificado Y
 Fonte: Autoria própria, 2021

5.6 DIMENSIONAMENTO DO FUSO TRAPEZOIDAL

O fuso trapezoidal com o menor diâmetro facilmente encontrado no mercado, é o fuso de 8 mm. Visto que a carga que deve ser movimentada é relativamente leve, a proposta é verificar se este fuso atende e caso necessário dimensionar outro.

Define-se o torque de levantamento de carga (NORTON, 2013), para rosca ACME com ângulo radial pela equação (4).

$$T = P * \frac{dp}{2} * \frac{\mu * \pi * dp + L * \cos \alpha}{\pi * dp * \cos \alpha - \mu * L} + \mu_c * P * \frac{dc}{2} \quad (4)$$

Onde: P é a carga a ser movimentada, de 7,2 kg; dp é o diâmetro primitivo do fuso trapezoidal, arbitrado 7,5 mm; μ é o coeficiente de atrito entre o parafuso e a porca, considerado 0,20; L é o passo do fuso, de 8 mm; α é o ângulo radial do fuso trapezoidal, de 30°; μ_c é o coeficiente de atrito no rolamento axial, considerado 0,20; e dc é o diâmetro médio do colar axial, considerado 10 mm.

De acordo com os dados considerados, obtém-se que o torque requerido para movimentar uma carga de 7,2 kg com o fuso trapezoidal com diâmetro e passo de 8 mm, é de $T = 0,0239 \text{ N.m}$, representando menos de 5% do torque do motor.

5.7 RESOLUÇÃO LINEAR DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO

A resolução linear do sistema de transmissão de movimento é associada com a revolução do motor de passo, o passo do fuso e a relação de redução. A resolução linear (S) é dada em passos por milímetro, ou seja, quantas voltas são necessárias para que o sistema linear se mova 1 milímetro. Está, é dada pela equação (5).

$$S = \frac{D * R}{P} * RR \quad (5)$$

Onde D é a constante do motor que define quantos passos são necessários para seu eixo girar uma vez, R é a quantidade de micropassos do controlador, P é o passo do fuso e RR é a razão de redução do sistema de correia dentada e polia.

De acordo com o catálogo do motor escolhido, cada passo gira o motor 1,8 °, ou seja, são necessários 200 passos para uma rotação completa do eixo do motor.

Selecionou-se 2 micropassos durante a conexão dos cabos da *CNC Shield*. Utilizaram-se fusos com passo de 8 mm em todos os eixos. Por fim, selecionou-se a redução 3:1. Desta forma, a resolução linear do sistema de transmissão de movimento é 150 passos/mm.

5.8 PROJETO CAD

O projeto auxiliado por computador, em ferramentas CAD, é uma maneira digital de criar produtos antes de projetá-los no mundo real. Alguns *softwares* CAD, permitem simular montagem de todas as peças do produto, de forma que erros podem ser facilmente corrigidos durante a elaboração do projeto. Realizou-se o projeto da *CNC Router* no SolidWorks (Figura 26).

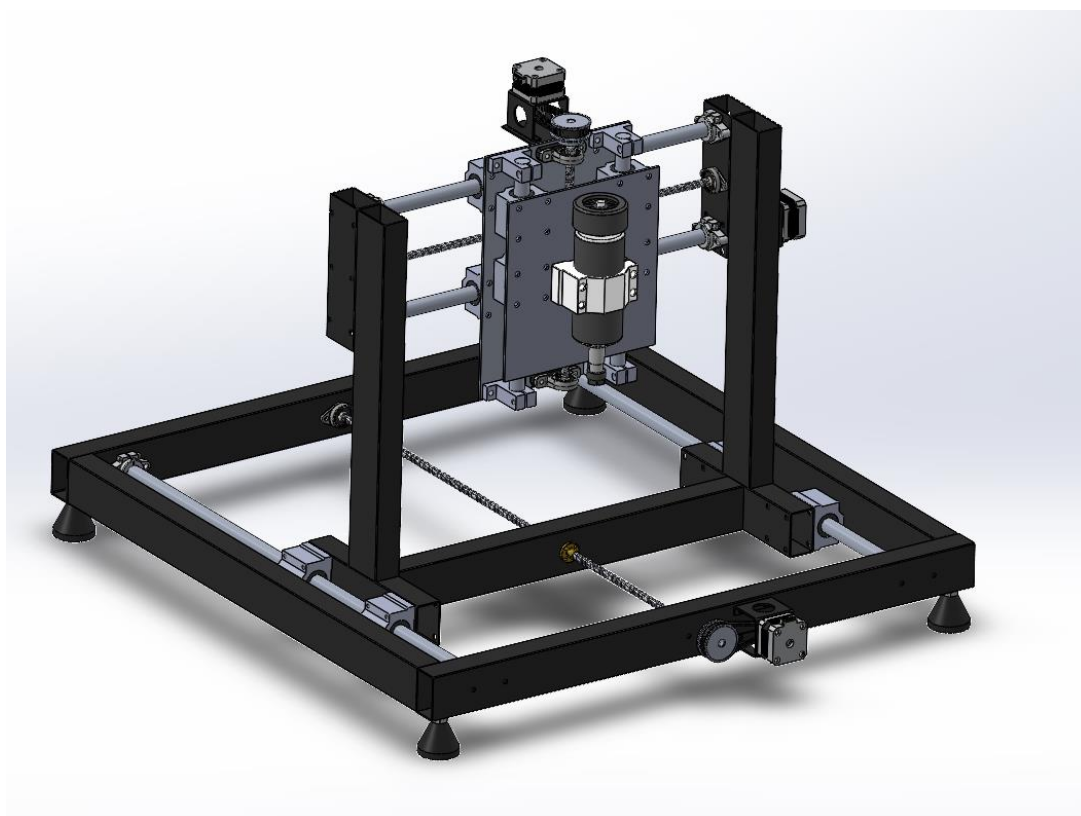


Figura 26 – Modelamento CAD da CNC Router
Fonte: Autoria própria, 2021

O projeto foi dividido em 5 partes principais, sendo nomeados: base eixo Y, eixo Y + base eixo X, Sistema de transmissão, eixo X + base eixo Z e eixo Z.

5.8.1 Base eixo y

A base do eixo y ou base da fresadora é composta por peças de metalon, mancais, eixos retificados e fuso (Figura 27).



Figura 27 – Base do eixo Y
Fonte: Autoria própria, 2021

5.8.2 Eixo Y + base do eixo X

O conjunto eixo Y + base do eixo X, além de peças de metalon, mancais, eixos retificados e fuso, possui os *pillow blocks* e a castanha (Figura 28). Vale lembrar que os *pillow blocks* são os pórticos dos eixos e a castanha (peça central de latão) é a peça na qual o motor, através do fuso controla a movimentação do eixo.

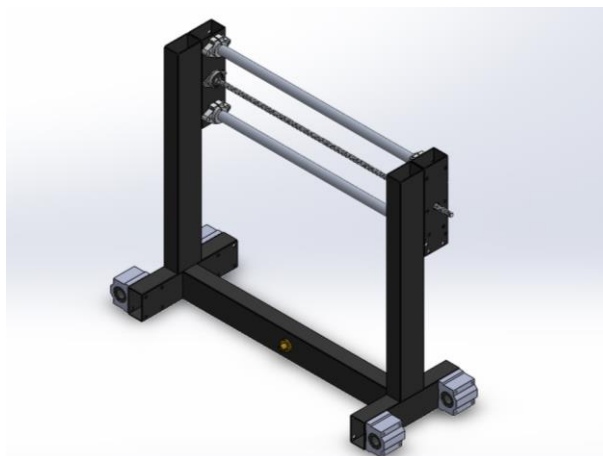


Figura 28 – Eixo Y + base do eixo X
Fonte: Autoria própria, 2021

5.8.3 Sistema de transmissão

O sistema de transmissão, é composto pela base para motor de passo NEMA 17, motor de passo e o conjunto micro motor redutor para elevação do torque do motor. Neste conjunto, todas as peças foram compradas, sendo necessária somente sua montagem.

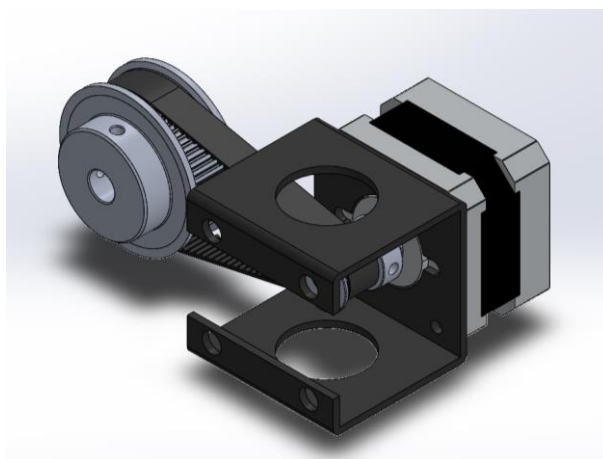


Figura 29 – Sistema de transmissão
Fonte: Autoria própria, 2021

5.8.4 Eixo X + base eixo Z

O 'eixo X + base do eixo Z' (Figura 30) é um conjunto composto por *pillow blocks*, mancais, fuso e eixos retificados comprados no mercado nacional, já as demais peças foram fabricadas. A base para castanha do fuso, pode ser obtida no mercado nacional, porém, preferiu-se fabricá-las para diminuir o custo total do projeto.

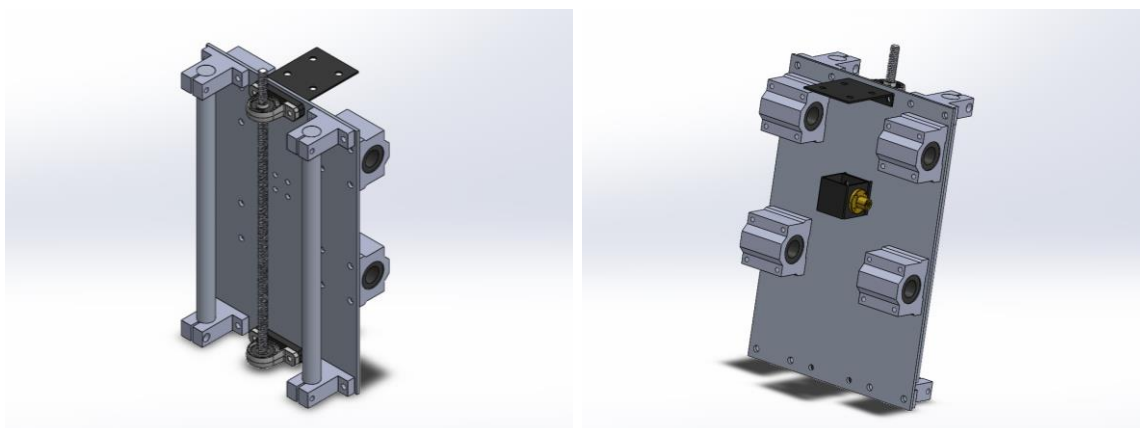


Figura 30 – Eixo X + base eixo Z
Fonte: Autoria própria, 2021

5.8.5 Eixo Z

O 'eixo Z' (Figura 31) é um conjunto que possui *pillow blocks*, castanha e a base do spindle comprados no mercado nacional. A placa de alumínio e a base da castanha foram fabricadas.

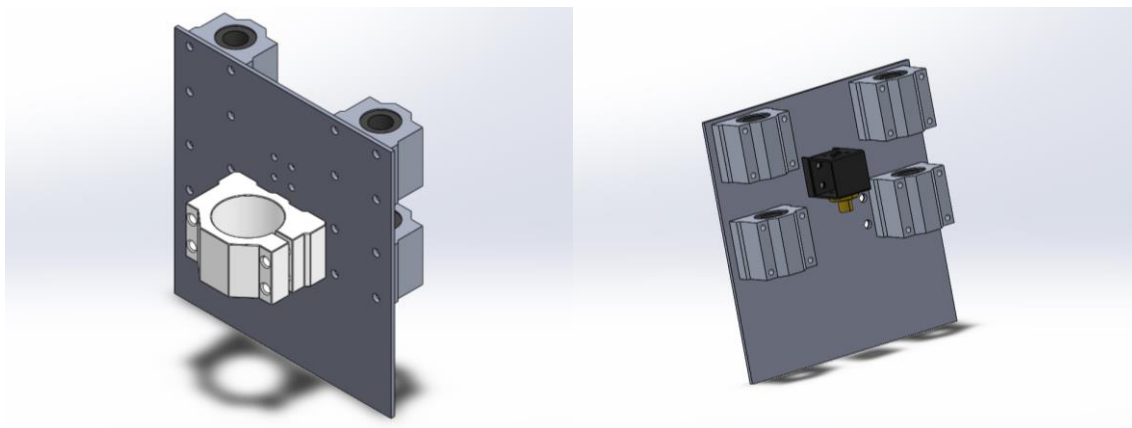


Figura 31 – Eixo Z
Fonte: Autoria própria, 2021

5.9 SISTEMA ELETRÔNICO

O sistema eletrônico é responsável pelo controle da máquina. Este, é composto pelos componentes mostrados na Figura 32.

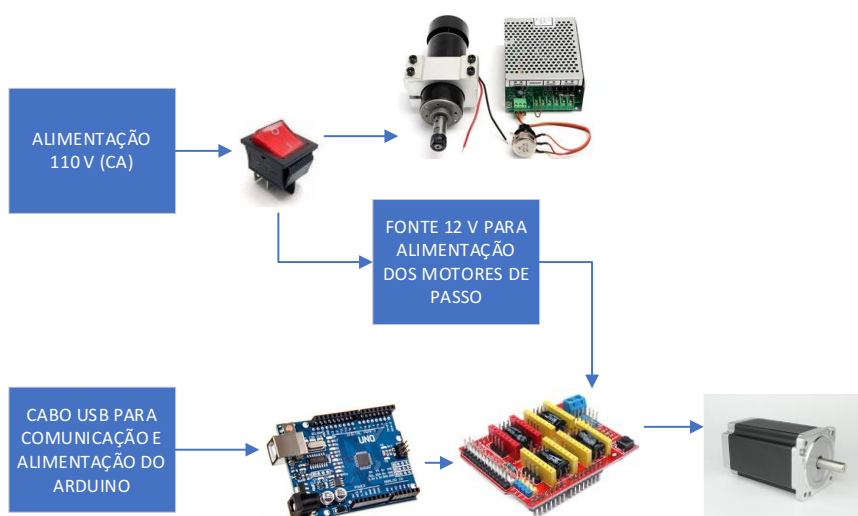


Figura 32 – Diagrama do sistema eletrônico
Fonte: Autoria própria, 2021

É importante explicar que o sistema eletrônico pode ser composto por mais peças, como por exemplo: sensores de fim de curso, que garantem maior segurança de operação; e sonda, peça responsável pelo zeramento do eixo Z. Além disto, o *spindle* pode ser conectado a placa *CNC Shield*. Contudo, não foram realizadas estas etapas.

5.10 FABRICAÇÃO

Todos componentes da *CNC Router*, com exceção dos que estão disponíveis no mercado nacional, foram fabricados pelo autor conforme projeto. Vale comentar que isto foi possível porque haviam equipamentos disponíveis para uso, como: esmerilhadeira, furadeira e máquina de solda. Além de instrumentos de medição, como: paquímetro, trena e escalas de aço inoxidável de 30 cm, 50 cm e 1 m.

Os cortes do metalon foram realizados conforme a Figura 33. Contudo, encontraram-se dificuldades em relação ao tamanho da esmerilhadeira (5”), sendo necessário rotacionar o metalon quatro vezes antes do corte completo do material. Isto pode ser resolvido, caso sejam utilizadas esmerilhadeiras de 9” ou policortes profissionais. Contudo, vale salientar que na medida em que o disco desgasta, é comum ter de utilizar o recurso de rotação do metalon.



Figura 33 – Corte de metalon
Fonte: Autoria própria, 2021

Após o corte completo das peças de metalon, iniciou-se a etapa de furação. Para esta etapa, utilizou-se a impressão do projeto CAD em escala real, seguido do corte e fixação na peça. Utilizou-se também de um marcador, que pode ser fabricado

com brocas quebradas ou similares, cuja usinagem pode ser realizada com rebolo de esmeril, com afiação suficiente para gerar reentrância no metalon.

O processo de marcação, é recomendado para não haver deslocamento do furo no momento da furação com a broca. Embora utilizou-se deste processo, a ferramenta correta para o serviço é a broca de centro.

As primeiras furações realizaram-se com brocas de diâmetro Ø1 mm, sendo substituídas até obtenção do furo com diâmetro equivalente ao projeto (Figura 34). Após o término da furação das peças de metalon, iniciou-se a soldagem da estrutura.



Figura 34 – Furação das peças
Fonte: Autoria própria, 2021

A soldagem da estrutura realizou-se pelo do processo de soldagem com eletrodo revestido na máquina inversora NOLL, modelo I-200 B. Embora o esforço estrutural é muito pequeno, devido a massa das peças, realizaram-se cordões completos em todas uniões do metalon, com o eletrodo revestido E6013 Ø1,5 mm.

A utilização dos esquadros magnéticos, bem como o esquadro comum, é bastante importante na etapa de soldagem, pois auxilia o posicionamento das peças, garantido o ângulo de 90° (Figura 35). Utilizar uma superfície plana também é bastante importante, para isto, posicionaram-se as peças sobre uma peça de porcelanato. Recomenda-se conferir o esquadro após pontear as peças, e só após verificação e limpeza da escória, finalizar o cordão de solda.



Figura 35 – Esquadros magnéticos
Fonte: Autoria própria, 2021

O acabamento, realizado após a soldagem, contemplou no esmerilhamento dos cordões de solda com o disco *flap*, seguido de limpeza com etanol (álcool de posto).

A pintura das peças, necessária para proteção anticorrosiva, realizou-se com a aplicação de tinta de fundo e tinta na cor preto fosco.

Após finalizada a fabricação de todas as peças, iniciou-se a preparação para montagem (Figura 36) e finalmente, a montagem da máquina.



Figura 36 – Preparação para montagem
Fonte: Autoria própria, 2021

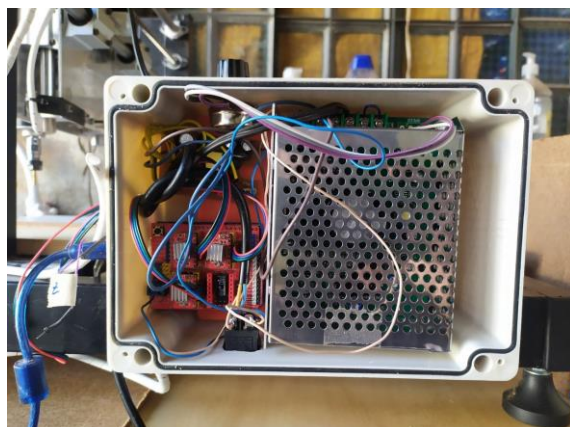
Durante a montagem utilizou-se somente parafusos (elementos de fixação não permanente), exposto na Figura 37. Realizou-se esta etapa, verificando a cada passo, o alinhamento do conjunto, necessário para não haver esforços excessivos do motor e/ou falhas de dimensionais na fabricação de peças.



(a) Montagem do eixo X e Z



(b) Montagem da estrutura



(c) Montagem do sistema eletrônico



(d) Finalização da montagem

Figura 37 (a), (b), (c) e (d) – Montagem da CNC Router
Fonte: Autoria própria, 2021

5.11 ENSAIO DE VALIDAÇÃO

O teste de precisão da CNC Router realizou-se de duas maneiras: execução de retângulos, para testar a precisão no sistema paraxial; e execução de círculos para testar a precisão no sistema de trajetória. O projeto CAD, utilizado para usinagem está apresentado na Figura 38.

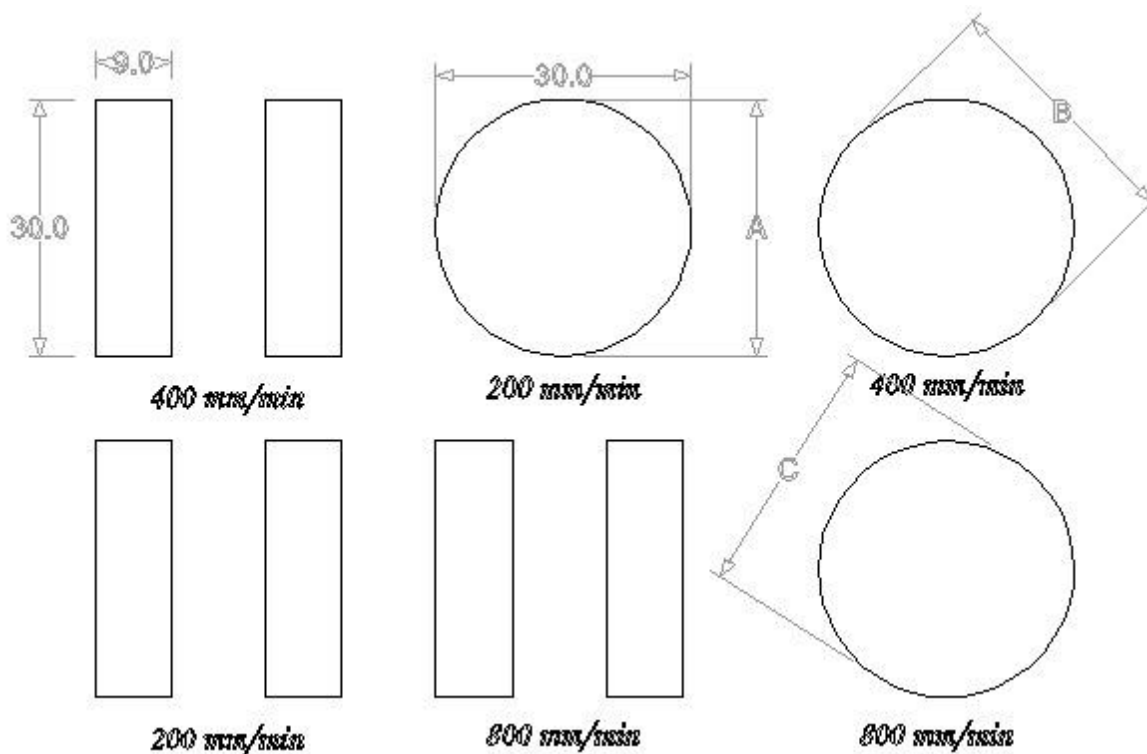


Figura 38 – Projeto CAD para verificação da precisão da máquina
Fonte: Autoria própria, 2021

Realizou-se o teste em três velocidades de avanço diferentes: 200 mm/min, 400 mm/min e 800 mm/min. Realizou-se a usinagem em MDF, com fresa de topo com diâmetro de 3 mm para o preenchimento, e fresa V-bit para gravação de texto (Figura 39). A peça encontrava-se fixada com parafusos.

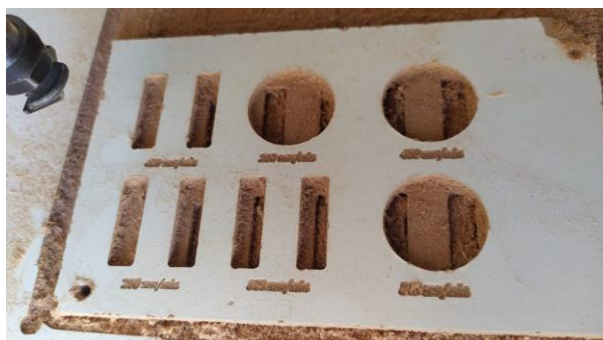


Figura 39 – MDF usinado
Fonte: Autoria própria, 2021

Ao término da usinagem sucedeu-se a limpeza da peça e medição mecânica com paquímetro com precisão de 0,1 mm. Vale ressaltar que os retângulos foram

projetados com $9,0\text{ mm}$ em x e 30 mm em y , enquanto as circunferências foram projetadas com o diâmetro de $\varnothing = 30\text{ mm}$.

Cabe salientar que utilizou-se erro de $0,01\text{ mm}$ durante a elaboração do código G, embora o paquímetro não tenha essa precisão.

Tabela 6 – Verificação da precisão da máquina

Controle	Velocidade	Eixo / posição	Corte		Média	Varição
Paraxial	200 mm/min	X	8,9 mm	8,9 mm	8,9 mm	0,1 mm
		Y	30,0 mm	29,8 mm		
	400 mm/min	X	8,9 mm	8,9 mm	8,9 mm	0,1 mm
		Y	29,8 mm	29,8 mm		
	800 mm/min	X	8,9 mm	8,7 mm	8,8 mm	0,2 mm
		Y	29,7 mm	29,7 mm		
Trajetória	200 mm/min	A	29,9 mm		29,9 mm	0,1 mm
		B	29,9 mm			
		C	29,9 mm			
	400 mm/min	A	29,9 mm		29,8 mm	0,2 mm
		B	29,7 mm			
		C	29,8 mm			
	800 mm/min	A	29,8 mm		29,8 mm	0,2 mm
		B	29,7 mm			
		C	29,9 mm			

Fonte: Autoria própria, 2021

Nota: Erro de $0,01\text{ mm}$ estipulado durante a elaboração do código G

A variação da medida está entre $0,1\text{ mm}$ e $0,3\text{ mm}$, sendo diretamente proporcional a velocidade dos motores de passo. É importante ressaltar que o uso de paquímetros com precisão de $0,01\text{ mm}$ para o procedimento de medição tornaria a proposta mais atraente. Todavia, a precisão da máquina para velocidades de até 800 mm/min é máxima em $0,3\text{ mm}$, o que torna satisfatório o projeto e desenvolvimento da CNC Router.

5.12 CONFIABILIDADE DO EQUIPAMENTO

A confiabilidade da máquina está implícita em não haver desperdício de material, gerado por falhas operacionais. Durante o tempo de operação da máquina, foram evidenciadas algumas falhas, que podem ser sanadas. Estas, estão apresentadas no Quadro 3.

FALHAS APRESENTADAS	MOTIVO	AÇÕES	RESULTADO
Comunicação serial do Notebook com a placa Arduino	O sistema eletrônico estava dentro de uma caixa de papelão (temporária)	- Montagem do sistema eletrônico em caixa específica - Fixação da caixa na carcaça	Resolvido
Movimentação do eixo Y durante a usinagem	O parafuso utilizado para fixação do material, atravessou a mesa de sacrifício e impediu a passagem do metalon de ligação das laterais do eixo Y	- Utilização de parafusos com menor comprimento	Resolvido
Movimentação dos eixos	O parafuso de fixação do fuso no mancal do fuso afrouxou-se com o excesso de vibração	- Reaperto dos parafusos	Resolvido
Funcionamento dos motores	O cabo do motor do eixo Z encontrava-se curto e por vezes se deslocava do encaixe	- Montagem do sistema eletrônico em caixa específica - Reposicionamento da caixa de forma que o comprimento do cabo seja suficiente - Substituição dos cabos por maiores	Resolvido
Ruído excessivo na movimentação da máquina	Atrito causado pela falta de lubrificação dos fusos	- Limpeza dos componentes com pincel seco - Lubrificação dos conjuntos fuso e castanha	Resolvido

Quadro 3 – Falhas apresentadas durante o funcionamento

Fonte: Autoria própria, 2021

Além das falhas apresentadas, gerou-se afinidade com a máquina a ponto de que, conforme os sinais apresentados, sejam tomadas ações de prevenções a falhas, como por exemplo: em casos de vibração excessiva, sugere-se diminuir a espessura do passe do eixo z, e/ou aumentar a rotação do *spindle* e/ou diminuir a velocidade de avanço dos motores. A ação preventiva apresentada, diminui a vibração e conseqüentemente, aumenta a confiabilidade do torque realizado no parafuso.

A limpeza diária da máquina após sua utilização também é de bastante valia, visto que impede que sejam geradas maiores resistências de movimentação, nos *pillow blocks*, nas castanhas e no sistema de redução. Esta ação, zela pela vida útil dos motores.

A exposição da máquina ao tempo, além de deixa-la vulnerável a acúmulo de impurezas, favorece a entrada. Sendo assim, recomenda-se cobrir a máquina sempre que não estiver sendo utilizada.

5.13 COMPARAÇÃO COM MÁQUINA COMERCIAL SEMELHANTE

Realizou-se a comparação da máquina construída com a máquina da Distritec (Tabela 7). Para isto, além do valor gasto para compra das peças necessárias para fabricação da máquina, estipulou-se um custo de R\$/hora 8,97 para serviços de

usinagem, tornearia e solda (NATHALIA, 2021). Considerou-se também o gasto de 40 horas para construção e montagem da máquina. Desta forma, o custo de mão de obra atingiu R\$ 358,80.

Tabela 7 – Máquina construída x Distritec

Referência	Área útil (CxL) mm	Mecanismos	Guias	Ferramenta de corte	Torque estático do motor de passo	Custo
Máquina construída	220x400	Fuso trapezoidal	Eixo retificado	<i>Spindle</i>	5,3 kgf.cm	R\$ 3.358,80
Distritec	500x500	Correia	Eixo retificado	Retifica ou tupia	12 kgf.cm	R\$ 11.700,00

Fonte: Autoria própria, 2021

Ao analisar a Tabela 7 é possível verificar que embora a máquina construída possui aproximadamente 28,7% do custo da máquina, sua área útil representa apenas 35,2% e o torque do motor 44,2%. Já o mecanismo de transmissão de movimento adotado na máquina construída, apresenta maior confiabilidade e rigidez ao projeto. A Figura 40 apresenta as máquinas finalizadas.



(a) Máquina construída



(b) Distritec

Figura 40 (a) e (b) – CNC Router construída x CNC Router Distritec

Fonte: Autoria própria, 2021

Cabe salientar ainda que para aumentar a dimensão útil do eixo x para 420 mm, basta comprar dois eixos retificados de 700 mm, um fuso trapezoidal de 700 mm e uma barra de metalon de 6 m, que já poderia ser aproveitada para estrutura. O custo para compra destes materiais gira em torno de R\$ 380,00 e requer aproximadamente 20 horas para realização dos serviços (Tabela 8).

Tabela 8 – Máquina melhorada x Distritec

Referência	Área útil (CxL) mm	Mecanismos	Guias	Ferramenta de corte	Torque estático do motor de passo	Custo
Máquina com melhoria sugerida	420x400	Fuso trapezoidal	Eixo retificado	<i>Spindle</i>	5,3 kgf.cm	R\$ 3.918,20
Distritec	500x500	Correia	Eixo retificado	Retifica ou tupia	12 kgf.cm	R\$ 11.700,00

Fonte: Autoria própria, 2021

Caso realizada a melhoria sugerida, o custo aumentaria de 28,7% para 33,5%, enquanto que a área útil passaria de 35,2% para 67,2%.

6 CONCLUSÕES

Os testes da máquina realizaram-se também durante a etapa de montagem. Isto aconteceu devido a necessidade de prever seu funcionamento para evitar falhas de projeto.

A proposta de guias de pórticos associados com metalon apresenta bastantes vantagens, relacionando principalmente o melhor custo benefício entre área útil e economia. Contudo, enxergou-se esta possibilidade somente após a aquisição e início da montagem da máquina, inviabilizando desistência do projeto inicial. Entretanto, como a área útil da CNC *Router* ficou limitada a pequenos trabalhos (220x400 mm), realizar-se-á a construção de uma máquina utilizando o conjunto pórtico e metalon como guia, com área útil estimada em (1500 x 2000 mm).

As peças previstas durante o projeto apresentaram-se aprovadas durante o funcionamento da máquina. O ensaio de validação apresentou-se satisfatório, sendo necessário controlar a velocidade, caso haja necessidade de precisão abaixo de 0,3 mm. Contudo, construiu-se a máquina com o objetivo de fabricação de peças personalizadas em madeira, tornando esta precisão aprovada.

O comparativo entre a máquina construída e a máquina disponível comercialmente mostra que o resultado é satisfatório. Contudo, vale ressaltar que a melhoria de aumento do eixo x, traz resultados muito mais atrativos.

Para melhoria da máquina, recomenda-se otimização estrutural para aumento da área útil. Os motores utilizados, apesar de serem menos potentes do que os usuais nestes tipos de projetos, apresentaram-se totalmente satisfatórios para usinagem de madeiras.

Os conhecimentos adquiridos durante o desenvolvimento da máquina, tornou o projeto extremamente gratificante, pois superaram-se todas expectativas lançadas no início do projeto.

REFERÊNCIAS

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V. **DIN 8560: Manufacturing Process – Terms and Definitions.** Germany, 2003.

COSTA, Sílvia. **Disciplinas: processos de usinagem.** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2006.

TECMECANICO, 2011. **Fresadoras.** Disponível em: <<https://tecmechanico.blogspot.com/>>. Acesso em: 12 out. 2019.

TAVARES, João M.; FONSECA, Joaquim O. **Introdução ao controlo numérico computadorizado.** Universidade Do Porto. Portugal, 2012.

RELVAS, Carlos. **Controlo numérico computadorizado.** 4. ed. Porto, 2018 8 p.

MACHADO, Aryoldo. **Comando numérico aplicado as máquinas-ferramenta.** 4. ed. São Paulo: Ícone, 1990 461 p.

BRÁSILIA FAB LAB, 2017. **Entendendo a fresadora CNC.** Disponível em: <<https://medium.com/bsbfablab/>>. Acesso em: 12 out. 2019.

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de máquinas.** 9. ed. São Paulo: Érica, 2008.

GORDO, Nívia; FERREIRA, Joel. **Mecânica: Elementos de Máquinas.** São Paulo, 2012, 414p. Apostila do Telecurso 2000 – FIESP, CIESP, SESI, SENAI.

MASCARENHAS, Rafael, 2014. **A revolução tecnológica na usinagem CNC.** Disponível em: <<https://cad.cursosguru.com.br/>>. Acesso em 15 nov. 2019.

SILVA, Elson 2015. **Máquina 8 cabeças de 4 eixos cnc router com eixo rotativo.** Disponível em: <https://www.youtube.com>>. Acesso em 01 dez. 2019.

MECÂNICA INDUSTRIAL, s/d. **O que é uma fresadora de cinco eixos.** Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/>>. Acesso em 01 dez. 2019.

REVISTA MANUTENÇÃO, 2017. **TM2A disponibiliza gama variada e completa de Fusos e Porcas trapezoidais**. Disponível em: <<https://www.revistamanutencao.pt/>> . Acesso em: 15 nov. 2019.

KALATEC AUTOMAÇÃO, 2018. **Vamos falar sobre fusos de esfera**. Disponível em: <<http://fusodeesfera.com.br/>>. Acesso em 15 nov 2019.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS, s/d. **Correia dentada para máquinas**. Disponível em: <<https://www.solucoesindustriais.com.br/>>. Acesso em 16 nov.2019.

AVASISTEMA, s/d. **Fuso de esferas**. Disponível em: <<https://www.avasistema.com.br/>>. Acesso em 16 nov. 2019.

REPRAPBR, 2011. **Correias x barras roscadas**. Disponível em: <<http://reprapbr-ge.blogspot.com/>>. Acesso em 16 nov. 2019.

AUTOMACAOLINEAR, 2019. **Kit guias lineares CNC Router Revolution 3**. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1113841141-kit-guias-lineares-cnc-router-revolution-3-_JM>. Acesso em 16 nov. 2019.

OCOMPRA, 2017. **Eixo linear 20 + pillow block 20 + suporte Sh/sk 20 mm**. Disponível em: <<https://www.ocompra.com/brasil/item/eixo-linear-20-pillow-block-20-suporte-sh-sk-20-mm-857942227/>>. Acesso em 16 nov. 2019.

AMFER FERRAGENS, 2019. **Trilho telescópico**. Disponível em: <<https://produto.mercadolivre.com.br/>>. Acesso em 16 nov. 2019.

PRECIOD, 2015. **Guia linear 20 mm perfil de alumínio para rolamento aberto CNC**. Disponível em: <<http://preciod.com/br/>>. Acesso em 16 nov. 2019.

DUTRAMÁQUINAS, 2019. **Tupia manual 530 watts pinça de 6 mm com jogo de fresas**. Disponível em: <<https://www.dutramaquinas.com.br/>>. Acesso em 16 nov. 2019.

BEGIN 3D, 2019. **Kit Spindle CNC + fonte 500 W + pinças completo**. Disponível em: <<https://produto.mercadolivre.com.br/>>. Acesso em 16 nov. 2019.

PEIREIRA, Dhyogenes; HADAS, Maurílio. **Fresadora CNC didática**: otimização para projeto de baixo custo. UTFPR campus Curitiba, 2015.

POLASTRINI, Fernando. **Desenvolvimento de uma máquina CNC de baixo custo com software e hardware abertos**. Instituto Federal de Minas Gerais campus Formiga, 2016.

BARROS, Victor. **Projeto básico de uma fresadora CNC de baixo custo**. Universidade Federal Fluminense, 2018.

RODRIGUES, Roger. **Microusinagem**: Crescimento no Brasil e no mundo. Disponível em: < <https://www.nei.com.br/>>. Acesso em 29 nov. 2019.

SOUZA, Adriano Fagali; ULBRICH, Cristiane Brasil Lima. **Engenharia Integrada por Computador e sistemas CAD/CAM/CNC**. 2 ed. São Paulo, 2013.

FILIFELOP. **CNC Shield V3 para Arduino Impressora 3D**. Disponível em: < <https://www.filipeflop.com/produto/cnc-shield-v3-para-arduino-impressora-3d/> > Acesso em 27 jul. 2021.

AVASISTEM. **Fuso de Esferas - AVA LINEAR SYSTEM**. Disponível em: <<https://www.avasistema.com.br/fuso-de-esferas.php>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

FIEBIG, R. UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO. p. 63, 2018.

LYCEUM, R. **O que é Cultura Maker e qual sua importância na educação?** Disponível em: <<https://blog.lyceum.com.br/o-que-e-cultura-maker/>>. Acesso em: 16 ago. 2021.

MABORE. **Disco Flap R-822 4.1/2 60GR REF:66623313731 - NORTON**. Disponível em: <<https://www.mabore.com.br/disco-flap-r-822-412-60gr-ref66623313731-norton/p>>. Acesso em: 7 ago. 2021.

MARCO, F. DE. **EEK 444-Elementos de Máquinas II**, 2021.

NATHALIA. **Quanto ganha um Torneiro Mecânico 2021 - Salário Londrina, PR** [Salario.com.br](https://www.salario.com.br) - **Pesquise Salários, Mercado de Trabalho e Média Salarial**, 2021. Disponível em: <<https://www.salario.com.br/profissao/torneiro-mecanico-cbo-721215/londrina-pr/>>. Acesso em: 17 ago. 2021

NÉRI, A. C. PARÂMETROS DE CORTE NA USINAGEM DE MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO. p. 154, 2003.

NORTON, R. **Projeto de Máquinas**. 4. ed. [s.l.] bookman, 2013. v. Único

SOUZA, C. E. D. DE. Vantagens e desvantagens do controle numérico computadorizado (CNC). 22 dez. 2018.