

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRENO CONDE SANTOS BORBA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE MÁQUINA CNC *ROUTER* PARA
PROTOTIPAGEM E PRODUTOS**

LONDRINA

2022

BRENO CONDE SANTOS BORBA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE MÁQUINA CNC *ROUTER* PARA
PROTOTIPAGEM E PRODUTOS**

Design and construction of a CNC router machine for prototyping and products

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Janaina Fracaro de Souza Gonçalves.

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BRENO CONDE SANTOS BORBA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE MÁQUINA CNC ROUTER PARA
PROTOTIPAGEM E PRODUTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 25/Novembro/2022.

Janaina Fracaro de Souza Gonçalves
Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Londrina

Cláudia Santos Fiuza Lima
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Londrina

Roger Nabeyama Michels
Doutorado em Agronomia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Londrina

LONDRINA

2022

Dedico este trabalho a Deus.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi fruto de um esforço próprio, mas integralmente suportado pelas pessoas ao meu redor. Sem os benefícios da presença positiva do meu pai, da minha mãe, do meu irmão e da minha irmã com certeza minha trajetória seria diferente e provavelmente menos sucedida. Por isso que considero a presença de vocês nobre essencial todos os dias.

Da capacitação no ensino superior, agradeço a todos os professores e à orientadora que contribuíram fundamentalmente na construção dos meus conhecimentos técnicos, interpretações da engenharia e suas aplicações que hoje resultam em uma vantagem pessoal e profissional.

Aos meus amigos e colegas de escola, da universidade, esportes e do trabalho empresarial que permaneceram ao meu lado refletindo comigo ideias e visões de mundo que tornaram a caminhada da vida interessante e intrigante.

A todos aqueles que indiretamente fizeram parte.

E ao Edital DIRGRAD/DIREC 10/2022 que tornou esta proposta de trabalho viável.

A persistência é muito importante. Você não deve desistir, a menos que seja forçado a desistir.

(ELON MUSK, 2018)

RESUMO

Motivado pelas vantagens da construção caseira de *Router CNC*, a elaboração da máquina capaz de confeccionar produtos ou protótipos é bastante viável visto a tendência de crescimento do mercado destas, portanto, ocorre valorização das já existentes e aumento no preço de compra. Diversas empresas, já estão optando por adquiri-las via projeto e construção própria, invés de obtê-las com preços elevados. O presente trabalho estabelece os motivos e a metodologia eficiente para dimensionar, projetar e construir a *Router CNC* com escolha adequada de eixos retificados, fusos trapezoidais, motores de passo e *spindle*. Foi estabelecido etapas necessárias para a efetivação do projeto, primeiramente o projeto CAD assegurado com simulação por elementos finitos é o ponto inicial da confiabilidade. Foram abordados em experimentos e resultados, a validação para garantir precisão e possíveis falhas durante o funcionamento, garantindo orçamento reduzido utilizando de plataformas de eletrônica livre.

Palavras-chave: usinagem. fresamento. *spindle*. eixos. eletrônica. confiabilidade.

ABSTRACT

Motivated by the advantages of home construction of CNC Router, the development of the machine capable of making products or prototypes is quite feasible given the trend of market growth of these, so there is appreciation of existing ones and increase in the purchase price. Several companies are already opting to acquire them via design and construction, instead of obtaining them at high prices. The present work establishes the reasons and the efficient methodology to dimension, project and build the CNC Router with the adequate choice of rectified axes, trapezoidal spindles, stepper motors and spindle. It was established necessary steps for the effectiveness of the project, first the CAD design secured with finite element simulation is the starting point of reliability. In experiments and results, validation was addressed to ensure accuracy and possible failures during operation, ensuring reduced budget using free electronics platforms.

Keywords: machining. milling. *spindle*. linear axes. electronics. reliability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de processos de fabricação.....	14
Figura 2 – Fresamento com mesa móvel.	15
Figura 3 - Formação do cavaco e exemplos de mecanismos de formação.	19
Figura 4 - Variáveis de entrada e saída do processo de torneamento.	20
Figura 5 - Esquema do Motor de Passo.	22
Figura 6 - Transmissões por Correia, Corrente ou Engrenagens.	23
Figura 7 - Engrenagem de dentes retos.	24
Figura 8 - Correia Dentada.....	24
Figura 9 - Tipos de Roscas e Aplicação.....	25
Figura 10 - Guia Linear de Esfera sobre trilho.....	27
Figura 11 - Rolamento de esferas.	28
Figura 12 - Ferramentas de Corte.	29
Figura 13 - Ferramentas de Corte.	30
Figura 14 - Ferramentas de Corte.	30
Figura 15 - Máquina de 1959.....	32
Figura 16 - Centro de Usinagem moderno.	32
Figura 17 - Router CNC.....	33
Figura 18 - Arduino.	34
Figura 19 - Eixos X, Y e Z.....	35
Figura 20 - Ponto Zero M, Ponto de Referência da Máquina R, Ponto de Referência da Ferramenta N e Ponto Zero da Peça W.	36
Figura 21 - CNC Router 5 Eixos.	37
Figura 22 - Eixos Retificados.	41
Figura 23 - Trilho Telescópico.....	42
Figura 24 - Conjunto Pillow Block e Eixo Retificado.....	43
Figura 25 - Detalhamento Rosca Trapezoidal.	45
Figura 26 - Diagrama de Blocos componentes eletrônicos.....	46
Figura 27 - Portas no Arduino UNO.	47
Figura 28 - Protoboard com Arduino.....	47
Figura 29 - CNC Shield.....	48
Figura 30 - CNC Shield com Três Drivers.....	48
Figura 31 - Simulação de carga apoiada em um eixo.	50
Figura 32 – Base estrutural com eixo e fuso.	50
Figura 33 - Simulação de carga apoiada em um eixo.	52
Figura 34 - Simulação terceira proposta e baixo deslocamento.	53
Figura 35 – Estrutura vertical com eixo e fuso.	54
Figura 36 - Estrutura Z.	55
Figura 37 - Ilustração do motor no Eixo Y.....	57
Figura 38 - Ilustração do motor no Eixo X.....	58
Figura 39 - Ilustração do motor no Eixo Y.....	59
Figura 40 - Projeto CAD completo.	63
Figura 41 - Processo de Corte.....	64
Figura 42 – Base estrutural soldada sem eixos.....	65
Figura 43 - Pintura.....	65
Figura 44 -Eixo Z, <i>Spindle</i> e Motor NEMA 17.	66
Figura 45 - Arrastador.....	66
Figura 46 - Solda e Acabamento Superficial.....	67

Figura 47 - Projeto completo.....	67
Figura 48 - Diagrama Eletrônico do Projeto.....	68
Figura 49 - Processos de CNC.....	69
Figura 50 - Vista superior e inferior da peça teste.....	70
Figura 51 - MDF usinado.....	71
Figura 52 - Montagem com medidas concêntricas.....	72
Figura 53 - Medida do diâmetro.....	72
Figura 54 - Vantagem da Dobra.....	76
Figura 55 - Proposta de melhoria.....	77
Figura 56 - Processo de usinagem.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo Distritec.....	39
Tabela 2 - Conjunto, comprimento e massa	56
Tabela 3 - Tipos de Motores	60
Tabela 4 - Força requerida em cada eixo.	61
Tabela 5 - medidas virtuais e reais (em milímetros).....	73
Tabela 6 - Custos de fabricação e instalação	74
Tabela 7 - Trabalho atual e Distritec.	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo de Motores	21
--	-----------

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	16
2.1	Objetivos Específicos	16
3	JUSTIFICATIVA	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1	Usinagem	18
4.1.1	Parâmetros de entrada e saída	20
4.2	Motores de Passo	21
4.3	Elementos de Máquinas	23
4.3.1	Transmissão de movimento	23
4.3.2	Guia Linear	25
4.3.3	Mancal.....	27
4.3.4	Ferramenta de corte	28
4.4	Comando Numérico Computadorizado	31
4.4.1	Controlador CNC	34
4.5	Máquina e ferramenta CNC	35
5	METODOLOGIA	38
5.1	Projeto mecânico	39
5.1.1	Estudo de mercado	39
5.1.2	Componentes da montagem – estrutura, eixo, guia e mancal	40
5.1.3	Componentes da montagem – transmissão e motor	43
5.1.4	Componentes da montagem – eixo do instrumento de corte	45
5.1.5	Componentes da montagem - eletrônica.....	46
7	PROJETO CAD	49
7.1	Base estrutural	49
7.2	Estrutura vertical	51
7.3	Estrutura eixo Z	54
7.4	Dimensionamento dos motores de passo	55
7.5	Dimensionamento do fuso trapezoidal	62
7.6	Montagem final	63
8	CONSTRUÇÃO MECÂNICA E INSTALAÇÃO ELETRÔNICA	64
9	TESTES EXPERIMENTAIS	69
10	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74

10.1	Custos	74
10.1	Análise do equipamento	76
11	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS.....	80
	APÊNDICE A – CHAPA VERTICAL CORTE A LASER E DOBRA	83
	APÊNDICE B – CORTE ENTRE-CHAPAS PARA SOLDA.....	84

1 INTRODUÇÃO

O clássico movimento de realizar trabalhos manuais relacionados a métodos de construção, modificação ou reparação de diversos objetos sem a direta necessidade da mão de obra especializada, aparenta ser mais antigo do que parece. O matemático e engenheiro James Watt é uma das raízes mais sólidas do conceito de criação em caseira, pois, na década de 1790, dedicou o próprio quarto a diversas ferramentas e projetos, transformando em oficina caseira (SCIENCE MUSEUM, 2020).

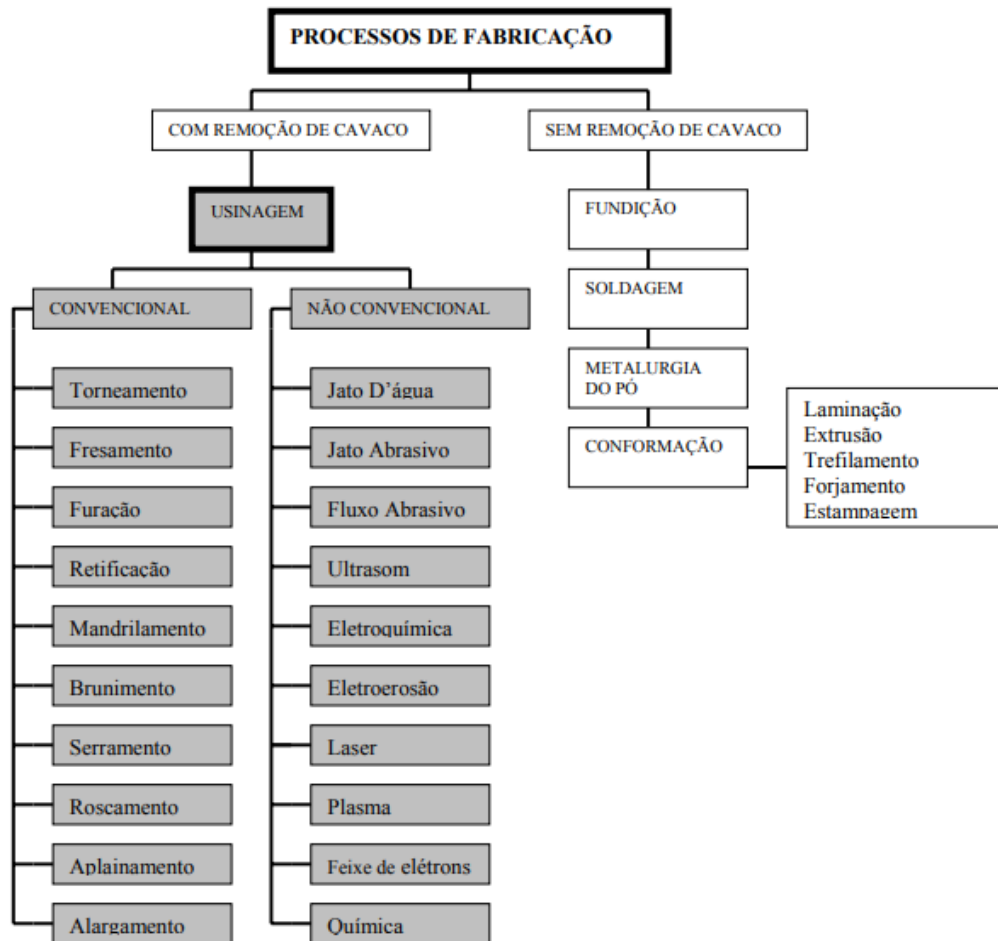
Já no século 19, em 1859, Samuel Smiles publicou um livro *Best-Seller* nomeado 'Autoajuda', no qual inseriu o conceito de aprendizado por autodidatismo como um dos maiores prazeres humanos sem a tradicional necessidade de educação externa. Posteriormente, no contexto social e cultural, praticar atividades construtivas de criação própria passa a ser também necessidade diante das dificuldades econômicas e antagonismos da primeira e segunda guerra mundial. O termo DIY, *Do It Yourself*, traduzido como "faça você mesmo", se desenvolveu neste ambiente de dedicação aos projetos em casa como um passatempo e gera até hoje incontáveis criações e fabricações, dentre elas ferramentas, máquinas e estruturas.

Compreende-se que vários processos de fabricação de engenharia podem ser utilizados na manufatura de um produto, o processo a ser escolhido depende de fatores como forma, material, quantidade, tolerâncias e custos (COSTA, 2006).

Convencionalmente, os processos de fabricação são divididos em 2 grupos, com remoção de cavaco e sem remoção de cavaco.

A Figura 1 demonstra diversos tipos de fabricação, convencionais e não convencionais, dentre eles, o processo de usinagem é reconhecido como o processo mais popular do mundo. Segundo Costa (2006), a usinagem pode ser descrita como "Operação que ao conferir à peça a forma, as dimensões, o acabamento ou ainda a combinação qualquer destes itens, produzem cavacos".

Figura 1 - Tipos de processos de fabricação

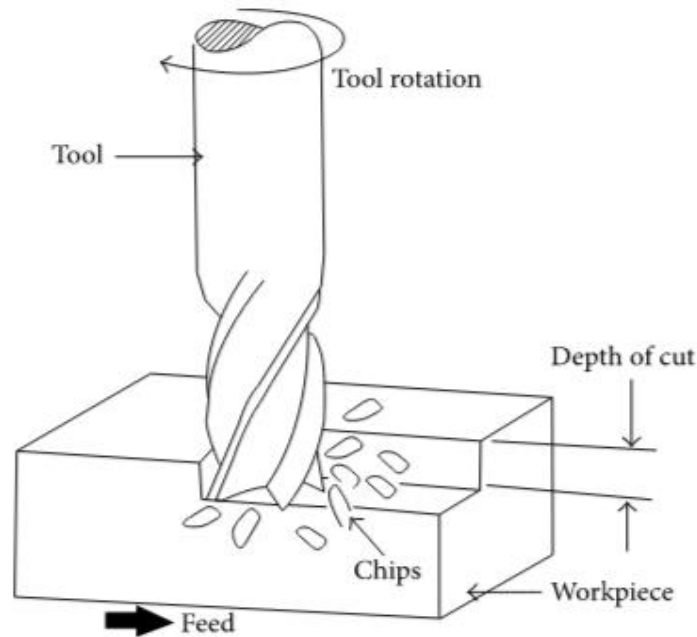


Fonte: COSTA (2006).

Dentre os processos convencionais de usinagem, cita-se torneamento, aplainamento, furação, alargamento, rebaixamento, mandrilamento, serramento, brochamento, roscamento, limagem, rasqueteamento, tamboramento, retificação, brunimento, espelhamento, polimento, lapidação, lixamento, jateamento, afiação, denteamento e fresamento (COSTA, 2006).

O fresamento é uma das principais formas de usinagem industrial mecânica, conhecida pela versatilidade na produção de diversas geometrias, elevada taxa de remoção de material devido à ferramenta de corte (fresa). Demonstrado da Figura 2, nota-se que a operação pode ocorrer com a ferramenta rotativa estática no plano, enquanto a mesa realiza os movimentos longitudinais e transversais. E outro caso inverso, no qual a peça na mesa é estática e a ferramenta de corte realiza os movimentos aos pontos de desbaste desejado (MACHADO, 2009).

Figura 2 – Fresamento com mesa móvel.



Fonte: NURHANIZA (2016).

No contexto industrial, engenheiros e inventores foram motivados pela necessidade de desenvolvimento tecnológico na indústria metalmeccânica desde o final do século XVIII ao século XX. Em 1797, Henry Maudslay desenvolveu o primeiro torno de avanço automático, sendo possível, por exemplo, usinar roscas com passo definido. Em 1892, a primeira fresadora universal de J. R. Brown, usinando canais com brocas helicoidais, dentre outros avanços (MACHADO, 2009).

A busca de processos de fabricação mais rápidos e automatizados devido à necessidade de aumento de produção, otimização do custo e da qualidade, pareados ao avanço tecnológico computacional do século XX nas operações de desenvolvimento de produto nas indústrias influenciou para processos mais dinâmicos de confecção de peças, o Comando Numérico Computadorizado (CNC) nas máquinas operatrizes (REBEYKA, 2008).

Utilizado até os dias de hoje, o método CNC permite construir produtos de geometrias complexas e precisas, gastando o menor tempo de projeto e fabricação. Dessa forma, se beneficiando da cultura DIY, a elaboração de uma máquina capaz de operar criando produtos ou protótipos de geometrias variáveis faz-se bastante conveniente até hoje, este trabalho cita a máquina *Router* ou popularmente Tupia, conhecida para realizar confecções (usinagem) em espécies de madeiras, utilizando-se de *Computer Numeric Control*, ou Comando Numérico Computadorizado.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo construir uma máquina *Router* de baixo custo, comandada numericamente por computador, capaz de realizar desbaste em espécies de madeiras com finalidade de elaborar produtos ou protótipos.

2.1 Objetivos Específicos

1. Dimensionar e projetar via desenho assistido por computador os componentes mecânicos (elementos de máquinas) de uma máquina CNC *Router*, considerando ótimo custo-benefício.
2. Validar o funcionamento com casos práticos visando eficiência e precisão, possibilitando o uso comercial.

3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento das máquinas CNC ou até mesmo aquisição de fornecedores especializados se torna um investimento inicial cada vez mais visado diante a cultura de fazer com as próprias mãos, mercado de produtos de madeiras, gravações, peças de geometrias variáveis, etc. Segundo Market Watch (2022), o mercado de Router CNC terá rápido crescimento até 2029, fortificando a tendência dos empresários e *payback* dos investidores.

A aplicação dos conhecimentos particularmente envolvidos na elaboração desta máquina estimula ao construtor, ou leitor deste trabalho a compreender todos fenômenos envolvidos na teoria da usinagem, métodos de desbaste, ferramentas de corte, diversidade de equipamentos, elementos de máquinas, resistência dos materiais, troca de calor dos componentes, segurança do trabalho, programação, engenharia de produtos, engenharia econômica, dentre diversas outras áreas da engenharia mecânica. Favorecendo, portanto, o preparo profissional, seja empreendedor ou atuante.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente, é realizada a pesquisa na literatura especializada que abrange trabalhos acadêmicos de conclusão de curso, artigos científicos e dissertações de mestrado com conhecimentos necessários para o desenvolvimento da *Router* CNC de custos acessíveis a uma pessoa física. Capacitar-se do funcionamento genérico de cada um dos elementos necessários para a atuação plena, segura e eficiente da máquina de fresamento em questão, é importante para concluir a esperada viabilidade econômica. É estabelecido, portanto, os parâmetros e especificações de engenharia dos componentes e fatores da montagem final, como a matéria-prima, base, parâmetros de corte, motores, transmissores de movimentos, guias, controlador Arduino e software.

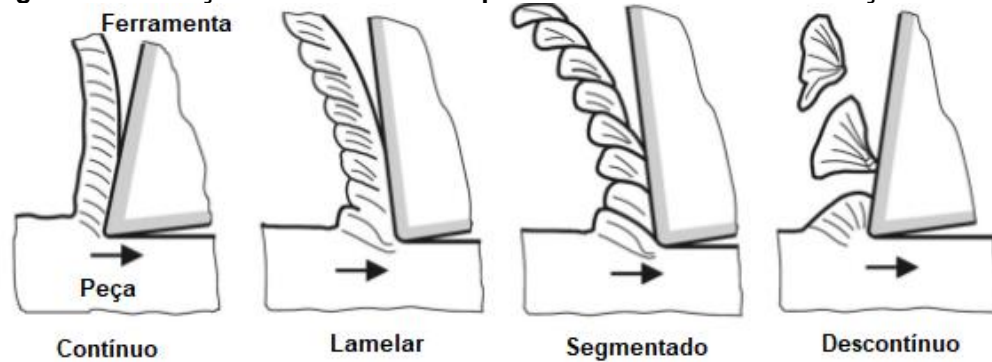
Dentre os arquivos utilizados como fonte de contribuição, cita-se também documentos científicos que abordam especificamente temas de placa de controle Arduino, elementos de máquinas, usinagem e controle numérico, referenciados no decorrer da metodologia.

4.1 Usinagem

Conforme mencionado na introdução, o processo de usinagem faz parte do grupo de fabricação convencional, em que as operações de corte se utilizam da energia mecânica e cisalhamento no contato físico de ferramenta e peça para remoção de cavaco, entende-se cavaco por: “porção de material da peça retirada pela ferramenta é caracterizada por apresentar forma geométrica irregular” (FERRARESI, 1977).

Diante disso, há a subdivisão da usinagem, entre geometria de corte definida, de arestas cortantes de formato conhecido, como torneamento, furação, fresamento, serramento, aplainamento, limagem e brochamento. E geometria de corte indefinida, de partículas abrasivas com formatos aleatórios e minúsculas arestas de corte, como rebolos, brunimento, lapidação, jateamento, etc.

Figura 3 - Formação do cavaco e exemplos de mecanismos de formação.



Fonte: RODRÍGUEZ (2018).

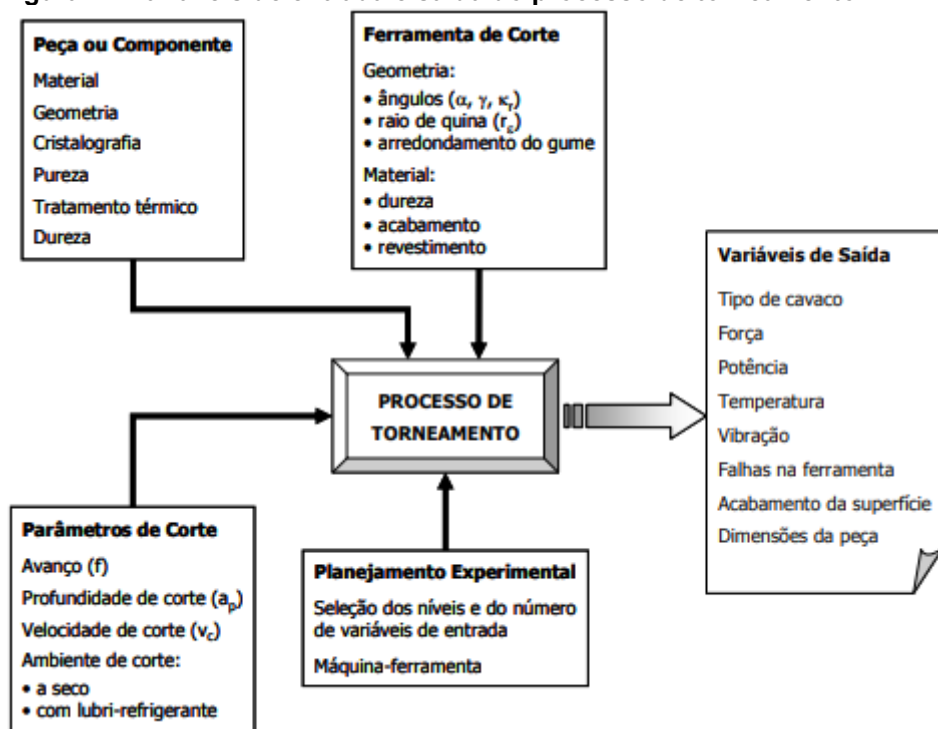
Apesar da enorme popularidade e presença global nas fábricas, empregando dezenas de milhões de pessoas (TRENT, 1985), a usinagem (como exemplo, processos de torneamento, furação, fresamento, serramento, dentre outras), são bastante imprevisíveis, pois, definir todos os parâmetros envolvidos com precisão pode ser um paradoxo, devido a simultaneidade entre complexidade e simplicidade. Pois, as condições ideais de corte são complexas e dependentes de uma série de condições, mas, uma vez determinadas, o cavaco se forma corretamente, otimizando as produções de peças com menor custo possível nas especificações da forma, tamanho e acabamento, tornando-a simples (MACHADO, 2009).

4.1.1 Parâmetros de entrada e saída

No processo de fabricação de usinagem, existem variáveis de entrada, passíveis de modificação e intervenção, e as variáveis de saída, consequências incontornáveis das condições iniciais (SOUZA, 2016).

A Figura 4 resume as relações de entrada e saída intrínsecas ao processo de usinagem, aplicáveis ao processo de fresamento de topo, condições deste projeto.

Figura 4 - Variáveis de entrada e saída do processo de torneamento.



Fonte: SOUZA (2016).

Como forma de atingir a citada simplicidade no processo e reduzir a complexidade, trabalha-se no aproveitamento da ferramenta de corte e otimizar a taxa de remoção do material a partir da variável de entrada, trabalhando diretamente no reconhecimento do material da peça, ferramenta, geometria da ferramenta, parâmetros de corte e máquina-ferramenta.

4.2 Motores de Passo

Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que se utilizam da energia elétrica fornecida para gerar movimentos mecânicos a partir de variações angulares, portanto o rotor ou eixo do motor rotaciona com estes passos angulares. Os impulsos elétricos fornecidos ao dispositivo influenciam diretamente na velocidade de rotação do rotor (BRITES e SANTOS, 2008).

Previstos para atuar em situações em que o ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo são relevantes, pois o motor de passo não é usado para situações de necessidade de força ou torque e sim condições especiais onde controlar os movimentos precisamente é essencial, agregando ao deslocamento da ferramenta de corte nos três eixos, x, y e z. Caso desejado, a velocidade de deslocamento pode ser reduzida através do esquema de polias, a serem indicadas no tópico de elementos de máquinas.

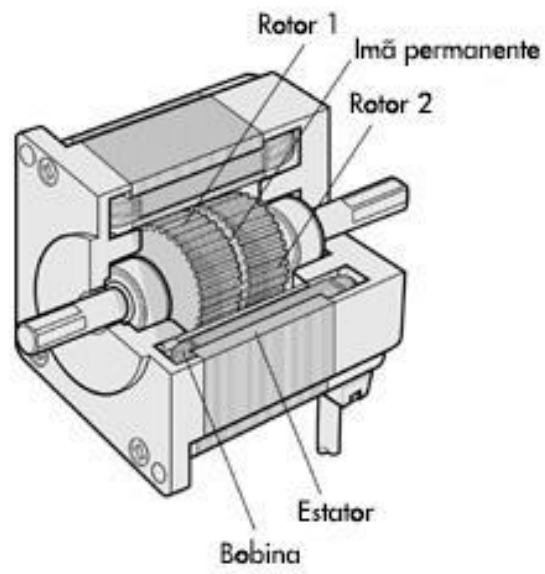
Quadro 1 - Comparativo de Motores

Comparativo de Motores	Motor de Corrente Contínua	Motor de Passo	Servo-Motor
Velocidade	Alta	Baixa	Média
Controle	Fácil	Médio	Complexo
Precisão	Zero	Alta	Muito Alta
Durabilidade	Média	Ótima	Média
Manutenção	Sim	Não	Sim

Fonte: Adaptado de BRITES e SANTOS (2008).

O comparativo ilustrado na Tabela 1 demonstra a forma que o motor de passo é vantajoso em comparação ao motor de corrente contínua e servomotor ao trazer benefícios em parâmetros de baixa velocidade, estabilidade na posição fixa, facilidade de controle média, necessitando apenas um *driver*, precisão, durabilidade, logo ausência de necessidade de manutenção (BRITES e SANTOS, 2008).

Figura 5 - Esquema do Motor de Passo.



Fonte: ORIENTALMOTOR (2022).

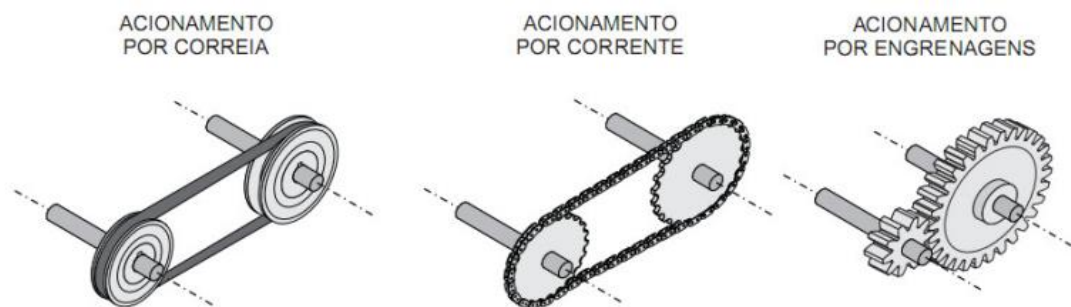
4.3 Elementos de Máquinas

O objetivo majoritário de um projeto mecânico consiste em dimensionar e dar formas geométricas aos elementos de máquinas para direcionar os pré-requisitos de obtenção destas peças, que podem ser compradas ou direcionadas aos processos de manufatura. Tais elementos de máquinas, são definidos como partes elementares de uma máquina ou mecanismo, portanto, este conjunto é composto por uma quantidade de itens, podendo ser maior ou menor, dependendo da complexidade do projeto (NORTON, 2013). Os principais grupos são classificados como elementos de fixação, que conectam ou mantêm unidas partes (parafusos, porcas, rebites, etc.), os elementos de transmissão (rolamentos, correias, engrenagens, acoplamentos, etc.) e elementos de apoio (suportes, pés, mancais, etc.).

4.3.1 Transmissão de movimento

Um determinado maquinário em funcionamento requer o trabalho de vários sistemas e trocas de energias, pressupõe na engenharia a necessidade de elementos de transmissão mecânica que conferem tais transferências de potência, energia e movimento a outros sistemas, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Transmissões por Correia, Corrente ou Engrenagens.

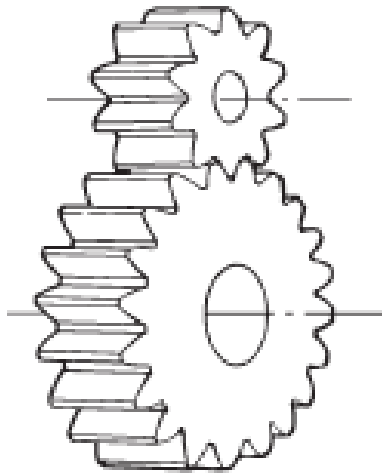


Fonte: BARBOSA (2011).

Os sistemas de transmissão que variam as rotações entre dois eixos são os variadores, é comumente citado as formas de variar a rotação do eixo por engrenagens, correias e atritos.

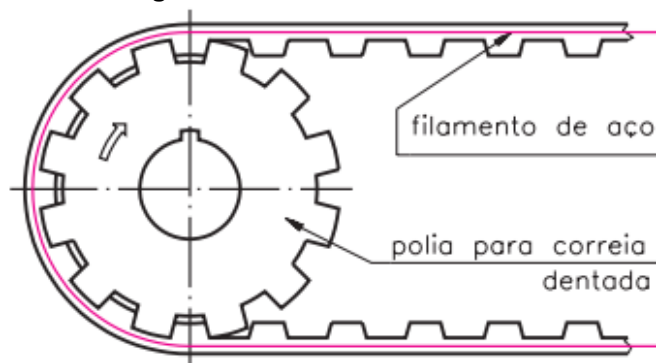
Dentre os diversos mecanismos capazes de operar como transmissão, cita-se as engrenagens, geralmente reconhecidas por rodas dentadas, é importante ressaltar que a diferença entre diâmetro das engrenagens define a proporção de velocidade rotacional e torque almejado (Figura 7). As correias, sejam contínuas ou dentadas, transmitem movimento de rotação entre eixos por intermédio de polias, fixadas ao eixo por pressão, parafuso ou chavetas (Figura 8), (BARBOSA, 2011).

Figura 7 - Engrenagem de dentes retos.



Fonte: Universidade da Babilônia (2022).

Figura 8 - Correia Dentada.

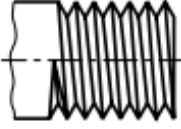

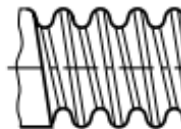

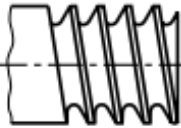


Fonte: SENAI (2000).

As roscas, consequentes do conjunto de filetes em torno da superfície interna ou externa, podem ser são componentes de transmissão de movimento de peças, como exemplo, um parafuso que movimenta a mandíbula móvel da morsa (SENAI, 2000), convertendo movimento giratório em linear. É de interesse do projeto,

determinar o perfil ideal dos filetes de roscas possíveis catalogados para cada caso, conforme demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Tipos de Roscas e Aplicação.

TIPOS DE ROSCAS (PERFIS) PERFIL DE FILETE	APLICAÇÃO
 triangular	Parafusos e porcas de fixação na união de peças. Ex.: Fixação da roda do carro.
 trapezoidal	Parafusos que transmitem movimento suave e uniforme. Ex.: Fusos de máquinas.
 redondo	Parafusos de grandes diâmetros sujeitos a grandes esforços. Ex.: Equipamentos ferroviários.
 quadrado	Parafusos que sofrem grandes esforços e choques. Ex.: Prensas e morsas.
 rosca dente-de-serra	Parafusos que exercem grande esforço num só sentido Ex.: Macacos de catraca

Fonte: SENAI (2000).

4.3.2 Guia Linear

As guias costumam operar também como um elemento de apoio de máquina, apresentam função de manter a direção de movimento da peça devido à integração entre componentes do sistema, colaborando na redução de ruído e atrito durante toda a operação. Dentre os tipos possíveis, é comum usar guias de peças cilíndricas ou prismáticas para movimentos retilíneos, bem como serem de deslizamento ou de rolamento. Geralmente, as guias de deslizamento sofrem elevado atrito, ocasionando o desgaste natural das superfícies envolvidas apesar da lubrificação, e tal fenômeno gera a indesejada folga no sistema. Como forma de contorno do problema, as

denominadas réguas de ajuste, também de geometria variável, compensam as folgas geradas a partir de roscas e porcas.

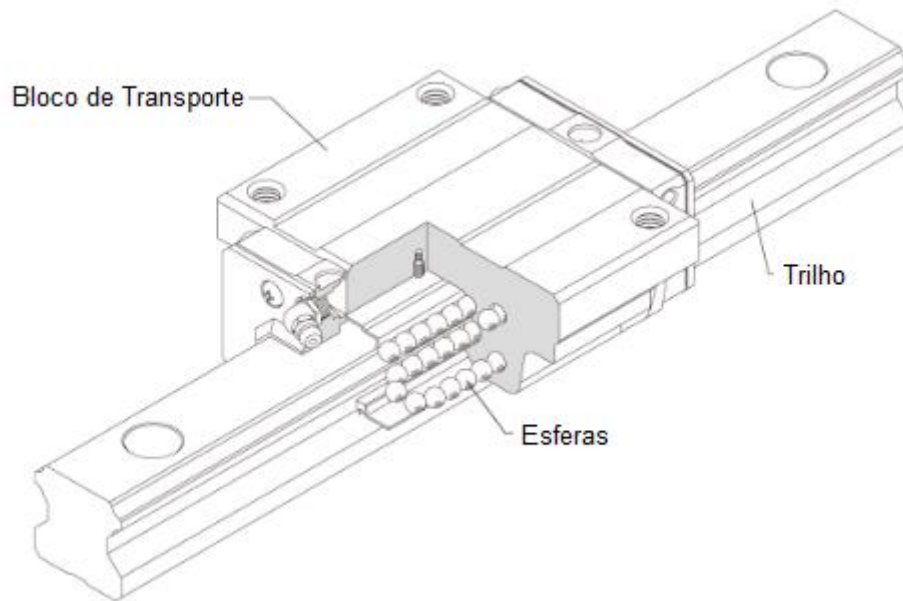
Os principais tipos existentes de guias lineares de contato são: guias lineares com rolamentos de rolos, caracterizados por baixa precisão, baixa rigidez, e baixo desempenho em altas acelerações devido aos rolos deslizarem invés de rolarem, provocando desgaste acentuado.

Guias de rolos lineares recirculantes, sejam de bucha ou esferas com blocos, apresentam vantagens de capacidade de carga, rigidez aprimorada, precisão e vida útil superior. Neste caso, estas guias são aplicadas também em velocidades superiores e acelerações de até 500 m/s^2 (BOSCHREXROTH, 2020).

Guias de atrito são de custo mais inferior, pois aplicadas a sistemas que não exigem tanto movimento ou ajuste, operam em baixa velocidade e geram muito atrito.

Tratando de guias sem contato, desgaste ou manutenção, é comum o uso de rolamentos de ar, com levitação, gerando atritos muito pequenos no ponto de vista da tribologia. Guias eletromagnéticas, utilizando o princípio da levitação magnética, dentre outras possibilidades que cabe ao usuário, engenheiro ou projetista considerar peculiarmente para ter boa performance em propriedades de rigidez, velocidade, aceleração, capacidade de carga, precisão, facilidade de montagem, manutenção e custo (SINADRIVES, 2021).

Figura 10 - Guia Linear de Esfera sobre trilho.



Fonte: Adaptado de THK (2022).

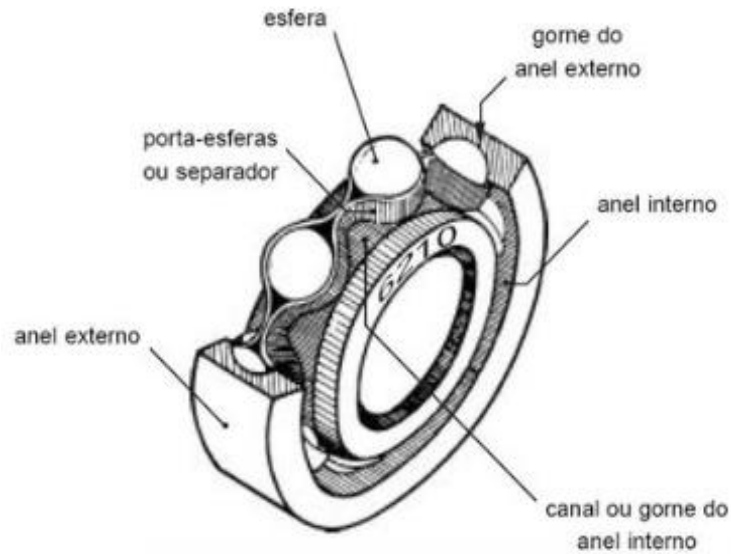
4.3.3 Mancal

Definidos como suportes ou até mesmo guias de um eixo, os mancais podem ser de deslizamentos ou de rolamentos, é relevante ressaltar que, entre os contatos do eixo e do mancal, há atrito e desgaste.

Os mancais de deslizamentos apresentam buchas cilíndricas ocas e fixas acopladas a um suporte, envoltas do eixo, podem ser feitas de bronze ou metais leves. O uso de lubrificantes nestas partes permite reduzir o atrito, porém, devem ser usados em máquinas e sistemas de baixa rotação devido à constante exposição à fricção, gerando superaquecimento elevado (BARBOSA, 2011).

Os mancais de rolamentos podem ser utilizados nas aplicações de velocidades altas, ou acelerações, geralmente constituídos de partes móveis como rolamentos esféricos, cilíndricos, cônicos ou de agulhas, atribuídos em série circular e entre dois anéis concêntricos, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Rolamento de esferas.



Fonte: IFES (2011).

4.3.4 Ferramenta de corte

Trabalhos de fabricação mecânica naturalmente costumam exigir elevada precisão e qualidade superficial, como consequência, uma variedade considerável de ferramentas de corte estão disponíveis no mercado. Cabe se atentar a diferentes características que levam ao resultado de qualidade, precisão e durabilidade. Tais características são, dureza, pois deve ter capacidade de não deformar elasticamente diante a elevada pressão e temperatura durante a remoção do cavaco. Resistência mecânica para absorver a energia e não atingir o ponto de fratura bem como a resistência ao desgaste para aumentar a durabilidade consequente a constante abrasão, adesão e oxidação da ferramenta de corte. Evidentemente, diferentes tipos de materiais de construção mecânica dispõem de diferentes combinações de propriedades, portanto, é conveniente deparar-se com materiais de elevada dureza perderem resistência mecânica.

A escolha final do arranjo de ferramentas de cortes disponíveis na máquina está diretamente relacionada ao tipo de matéria prima a ser confeccionada. Variam-se em aço carbono (em torno de 1%), para baixa velocidade e temperatura, associadas ao baixo custo para uma vida útil reduzida, estão inseridos no contexto de brocas, rimas, fresagem, torneamento, discos serrilhados, abrasivos, etc. Aço de alta velocidade, ou *high speed steel*, permitindo maior velocidade de corte, dureza e resistência ao calor, contextualizadas em brocas, rimas, cortadores, punções, lâminas, etc. Metal duro, feitas a partir de partículas de carboneto, apresentam elevada dureza, podendo operar em altíssima velocidade, destinados para insertos de corte, cortadores retos, brocas, lâminas serrilhadas e discos, etc. Dentre as diversas ferramentas de corte, é possível abranger para as de cerâmicas, policristalino, monocristalino e nitreto de boro cúbico (MACHADO, 2015).

Figura 12 - Ferramentas de Corte.



Fonte: Wolf Gruppe (2022).

Em situações e condições de operação de fresamento de custos relativamente mais econômicos, conjuntos de motores e ferramentas de corte como tupias, retíficas, micro retíficas ou *spindles* são citados, aplicados em máquinas de usinagem CNC, tornos, fresadoras, routers, dentre outras. O *spindle* é um fuso eixo que rotaciona a ferramenta de corte para o efeito da remoção matéria prima, com grande capacidade de torque e potência e bom controle de velocidade de rotação por programas de

computador, enquanto que para tupias, o controle de velocidade é feito por voltagem, necessitando um regulador.

Figura 13 - Ferramentas de Corte.



Fonte: TECMAF (2022).

Figura 14 - Ferramentas de Corte.



Fonte: Makita (2022).

4.4 Comando Numérico Computadorizado

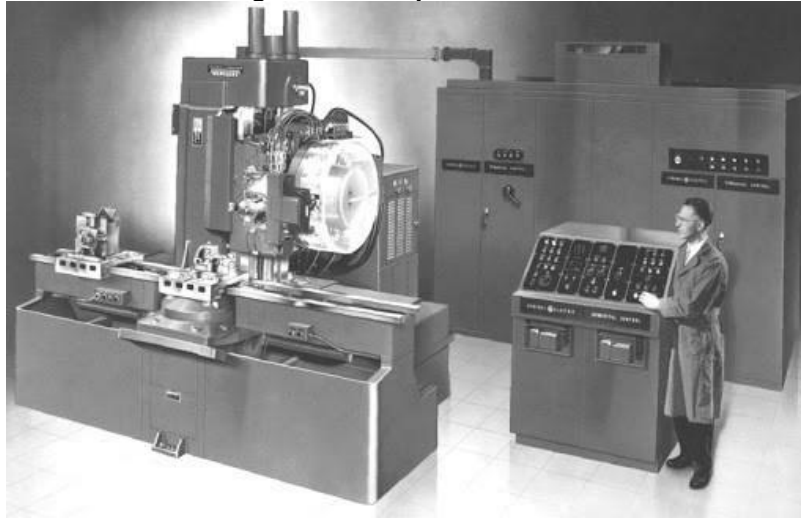
A operação de usinagem convencional concentra diversas informações no operador e executor do trabalho diante da necessidade de receber uma ordem de produção e desenho para interpretar, decidir, executar, controlar e informar o trabalho a ser realizado, estando diretamente relacionada à experiência do executor.

Na migração de comando numérico, informações como planos de fixação, lista de ferramentas, dispositivos, instrumentos de medição, condição da peça, dados de corte, sequência de movimentos, etc. são fornecidos previamente, cabendo ao operador somente executar e informar sobre o serviço, pois o programador antecedente é responsável pelas decisões das condições de usinagem (REBEYKA, 2008).

O equipamento eletrônico recebe informações, compila e transmite em forma de comando para a máquina, permitindo que realize o processo na sequência programada. Em sua evolução, o comando numérico computadorizado se diferencia por apresentar um computador interno que traduz as informações para as máquinas, ou seja, a troca de hardware por controlador de software, ampliando as atividades dos equipamentos. Portanto, os CNC podem operar máquinas, tipos de usinagem e ferramentas mais complexas, a partir do interpolador, no qual exerce interpolações lineares, circulares, parabólicos e *spline* (curva sutil).

Esta tecnologia CNC evoluiu no século XX dentro do contexto de fabricação e otimização da produtividade, em 1959 era apresentada a primeira máquina de fresamento (fresadora) automatizando a troca da ferramenta de corte (GENG, 2015). Atualmente, as máquinas CNC possuem tecnologia aprimorada e podem ser utilizadas, inclusive, em impressoras de extrusão 3D.

Figura 15 - Máquina de 1959.



Fonte: RML Máquinas e Equipamentos (2020).

Figura 16 - Centro de Usinagem moderno.



Fonte: ROMI (2022).

Diversas máquinas são capazes de se beneficiar com o comando numérico computadorizado, como exemplo, fresadoras, routers, tornos, dobradeiras automáticas, eletroerosão, furadeiras, retificadoras, impressoras *surface mount device*, dentre outras.

Um roteador (*router*) de controle numérico computadorizado é capaz de cortar madeira, compósitos, metais, plásticos, vidros e espumas. Devido a maior facilidade de manuseio/preparação diante a cultura *DIY*, podem ser utilizadas para esculturas, decorações, painéis, molduras, móveis, projetos, marcenarias ou indústria. Por utilizarem do processo de usinagem fresamento, se assemelham muito as fresadoras CNC, a sua configuração na maioria, é composta de controlador CNC dedicado, motores para os eixos, motores de passo, alimentador elétrico, fusos, mesa de trabalho, ferramenta de corte, mancais e guias lineares.

Figura 17 - Router CNC.



Fonte: Adaptado de SourceRabbit (2019).

4.4.1 Controlador CNC

Composto por hardware e software, os controladores são responsáveis pela intermediação de computadores e controladores das ferramentas de corte diante instruções especificadas por códigos, associado a norma ISO 6983 de 1982 (SMID, 2003).

Popularmente conhecida, o *G-code* ou código G correlaciona o texto de códigos de comando com as operações e condições da máquina, portanto, é necessária uma plataforma, como o Arduino, de prototipagem eletrônica *open source*.

O Arduino, demonstrado na Figura 16, é amplamente utilizado em máquinas CNC. Segundo Renna (2013), o Arduino é “unidade de processamento capaz de mensurar variáveis do ambiente externo, transformadas em um sinal elétrico correspondente, através de sensores ligados aos seus terminais de entrada”.

De forma prática, o desenho detalhado de uma peça assistida por computador (*Computer Aided Design – CAD*) passa por vetorização em linhas de códigos G e interpretadas por um compilador, definindo, como visto anteriormente, a trajetória que a ferramenta de corte prescreve para desbaste.

Ainda nesta operação, deseja-se um *firmware*, para auxiliar o software na execução das funções de entrada e saída, oferecendo todas as instruções necessárias. O *firmware/software* GRBL interpreta os códigos de comando numérico computadorizado com precisão e confiabilidade num acesso de plataforma livre.

Figura 18 - Arduino.

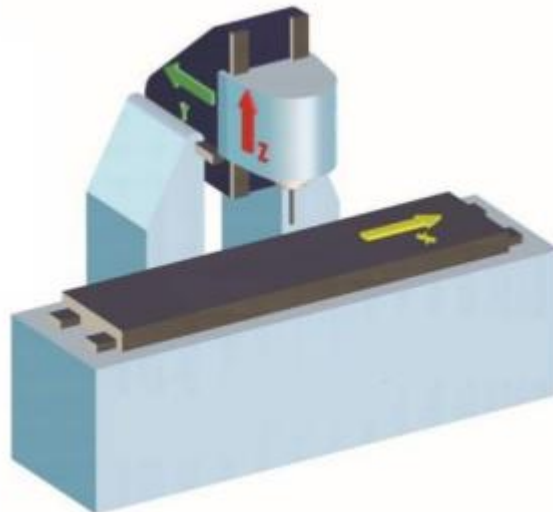


Fonte: SANTOS (2021).

4.5 Máquina e ferramenta CNC

Conforme introduzido anteriormente, a função mais evidente da máquina CNC é controlar os movimentos dos eixos de forma automática, precisa e consistente a partir de duas formas definidas de eixos físicos, os eixos lineares e os eixos rotativos (ETEC, 2022). Os eixos lineares, de caminhos retilíneos são os clássicos X, Y e Z, movimentados pelos eixos rotativos de caminho circular ou angular, a figura abaixo representa como os controladores de servo motores direcionam a mesa CNC (REBEYKA, 2008).

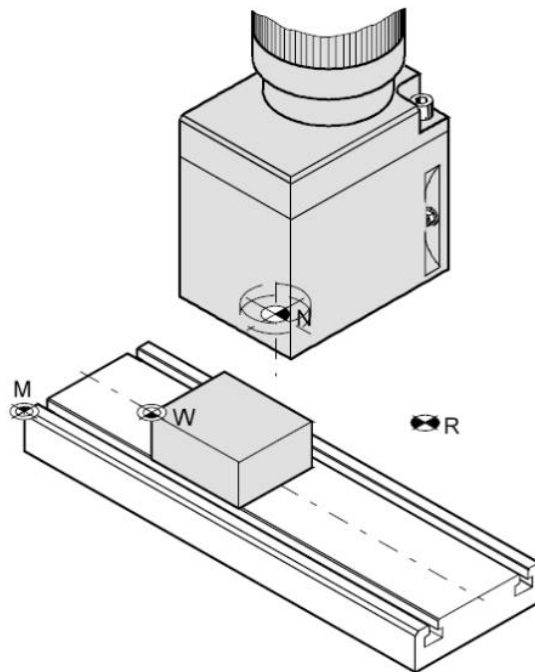
Figura 19 - Eixos X, Y e Z.



ETEC (2022).

Note que o plano de operação da mesa corresponde aos eixos X-Y e ambas perpendiculares ao eixo Z, geralmente eixo motriz e positivo ao afastar da mesa. Deve-se estabelecer pontos de referência para auxílio de usinagem, como o ponto zero da máquina, o ponto de referência da máquina, da ferramenta e o ponto zero da peça, conforme demonstrado na Figura 20 abaixo.

Figura 20 - Ponto Zero M, Ponto de Referência da Máquina R, Ponto de Referência da Ferramenta N e Ponto Zero da Peça W.



Fonte: ETEC (2022).

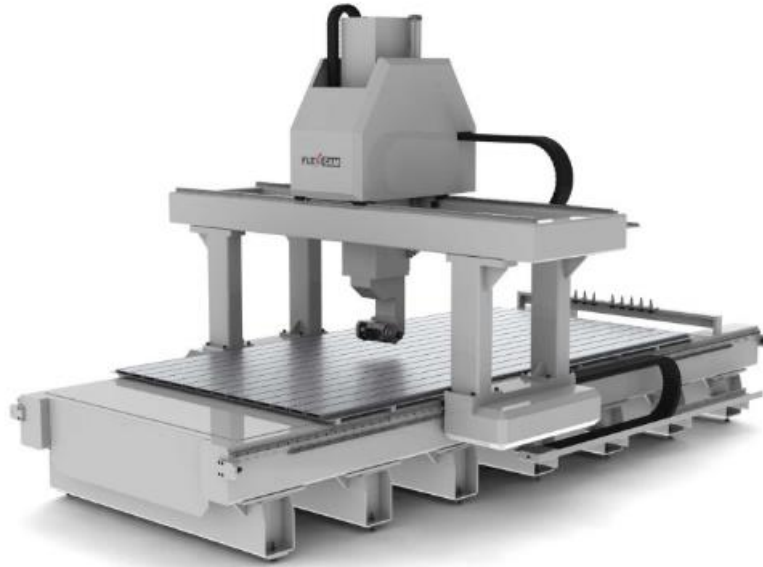
A *Router CNC* possui capacidade de movimentar nos três eixos ao mesmo tempo, portanto, é considerada de três eixos, esta utiliza do anterior modelamento computacional da peça desejada em *Computer Aided Design - CAD* para implementar o projeto no software de *Computer Aided Manufacturing – CAM* e início da fabricação.

É comum encontrar a gama de máquinas CNC com opções de 3 eixos, 4 eixos, 5 eixos e até 6 eixos, vale compreender que estes eixos estão ligados a complexidade de movimento da ferramenta de corte na peça de trabalho, viabilizando confecção de peças de geometrias mais complexas e mais não-euclidianas (ETEC, 2022). O recurso angular é útil a partir do momento em que o quarto eixo permite a rotação da peça, comumente chamada de eixo A e permite a usinagem dos quatro planos de cada lado da peça, favorecendo maior precisão e não necessidade de troca de lados manualmente (REBEYKA, 2008).

O quinto eixo é composto pelas coordenadas X, Y, Z, A e agora, a direção B, permitindo todas as direções em uma única operação, favorecendo peças complexas e precisas.

Atualmente, a usinagem de fresamento pela *Router* CNC é muito popular e relativamente simples nos casos de três eixos, como citados acima, que são capazes de usinar em dois eixos, dois eixos e meio ou três eixos. Porém, neste terceiro caso, há a limitação de profundidade de corte, advindo a *Router* CNC nos eixos adicionais, conforme a Figura 21.

Figura 21 - CNC Router 5 Eixos.



Fonte: FlexiCam (2022).

5 METODOLOGIA

A construção da máquina CNC de pequeno porte com área útil pequena, ou até mesmo média, capaz de efetuar desbaste de tipos de madeira apresenta diversos componentes devidamente citados no tópico de revisão bibliográfica. A determinação de motores, ferramentas, elementos de máquinas e eletrônicos, leva em consideração os custos envolvidos a fim de atingir o objetivo de criar a máquina com bom custo-benefício e desempenho. As etapas de construção visam a forma mais eficaz, inteligente, segura e direta do sistema, bem como oferecer um passo a passo para possível expansão dos recursos e permitir a confecção de projetos maiores ou mais complexos.

O projeto consiste também em garantir a construção com utilização de plataformas de livre acesso como mencionadas no tópico de controladores. Segundo Goodich (2012) e Fachim (2013), a utilização de plataformas livres como o Arduino é de uso simples ao público, permitindo automatização dos processos sem mão de obra especializada.

Dessa forma, fica evidente que a escolha dos itens busca a facilidade na elaboração e utilização prática, comparado às máquinas já disponíveis no mercado.

O projeto segue a metodologia estabelecida em três etapas macro, ou etapas pais, no qual cada etapa macro é dividida em etapas micro, ou etapas filhas, para roteirizar sem complexidade os passos necessários. Primeiramente, executa-se a macro projeto mecânico, a partir dos conhecimentos de engenharia mecânica, deve-se levar em conta uma série de informações técnicas, teóricas e práticas que aqui estarão reunidas e integradas. Estudo de mercado, definição dos componentes da montagem que compõem a *Router*, verificação de custos, dimensionamentos dos elementos de máquinas, projeto mecânico CAD 3D a partir do *software SolidWorks* (SKA, 2016), detalhamento bidimensional do projeto e definição do material de construção mecânica.

A segunda etapa, projeto elétrico, refere à escolha da eletrônica livre com confiabilidade, portanto, esta etapa busca, definição e seleção dos motores de acionamento, fonte de energia elétrica, conexões, segurança e placas necessárias para atender às premissas do projeto mecânico.

Por fim, a terceira etapa macro, os testes experimentais são realizados para certificar do funcionamento mecânico, elétrico, programação, utilizando-se de um

desenho simplificado para dar introdução ao processo de corte, sempre permeando a segurança da operação. As etapas filhas serão estruturadas durante este tópico de metodologia.

5.1 Projeto mecânico

Nesta etapa, serão tratados assuntos que envolvem a definição dos componentes mecânicos.

5.1.1 Estudo de mercado

Diversos trabalhos acadêmicos, livros e fornecedores de CNC *Routers* levantam informações sobre custos de construção da máquina ferramenta, bem como o custo final. O desenvolvimento da máquina dentro deste contexto e da cultura *DIY* é bastante favorável diante desta gama de conteúdo disponível. Aqui, diversas informações estarão reunidas e serão analisadas permitindo ao criador, construir máquinas complexas como esta, de forma objetiva. A etapa de estudo de mercado levanta algumas das principais características que devem ser levadas em consideração na compra de uma CNC *Router*.

A Tabela 2 abaixo menciona alguns modelos disponíveis referentes a marca Distritec (2022).

Tabela 1 - Comparativo Distritec

Nome	Área Útil (mm ³)	Torque Motor de Passo (kgf.cm)	Custo (R\$)
RC1207	1200X800X60	19	R\$ 19.000,00
RC2030	2000X2900X100	19	R\$ 34.800,00
RC1315	1300X1500X100	19	R\$ 29.760,00
RC1007	1000X700X60	12	R\$ 13.990,00
RC0505	500X500X60	12	R\$ 11.700,00

Fonte: Próprio Autor.

Alguns exemplos de variedade disponível no mercado de *Router CNC*.

5.1.2 Componentes da montagem – estrutura, eixo, guia e mancal

O primeiro passo consiste na determinação da estrutura da máquina, este é o ponto inicial que leva em mente a área útil de trabalho que se deseja obter, o tipo de material a ser utilizado e dimensionamento razoável para evitar gastos desnecessários, aqui, é considerado três opções de estruturas, madeira, alumínio e aço. Estruturas compostas de madeira apresentam desvantagens como alta inflamabilidade, necessitando tratamento de produtos químicos para evitar este caso, suscetível a pragas como fungos e insetos e dilatação em umidades elevadas, podendo ocasionar defeitos de precisão geométrica durante a usinagem na máquina, portanto, esta opção é descartada visando a qualidade e durabilidade do projeto final. Estruturas de alumínio apresentam grande flexibilidade de valores comparados a outros materiais como o aço, carregando inúmeras vantagens práticas, esta opção pode ser considerada reconhecendo a menor resistência mecânica em relação ao aço. Por fim, a terceira opção consiste no aço carbono, mais especificamente o metalon, tipo de tubo de aço bastante utilizado na arquitetura, civil e indústria. As características mais relevantes são a alta resistência a corrosão e oxidação, agravando a durabilidade do projeto com segurança e custos razoáveis. A opção do metalon exige muitas vezes processos adicionais de manuseio e montagem como solda, furadeiras, esmerilhadeiras, exigindo um cuidado atento adicional para sua utilização, por fim, esta escolha é sensata no projeto visando a qualidade estrutural do sistema, respeitando sempre a possibilidade de melhoria de outros componentes, como por exemplo, motores de passo ou rotativos mais potentes.

O projeto CAD 3D da estrutura inicia com a base retangular fixa que sustentará o plano X-Y, paralelamente com o fuso trapezoidal permitirá o movimento da ferramenta apenas no eixo Y, deslocadas em dois eixos com mancais próprios (a serem discutidos adiante). Tal base, pode ser apoiada por quatro pés nos vértices, sempre garantindo a planicidade. Na sequência, a estrutura secundária e móvel corresponde ao sustento de eixos, mancais, fusos trapezoidais, motores e ferramentas de corte. Nesta, permite o movimento da ferramenta no eixo X e vertical Z.

O segundo passo é definir o eixo a ser utilizado, que permite o deslocamento do sistema. É importante ressaltar que esta aplicação exige um eixo de dimensão controlada, de bom acabamento superficial e sem defeitos. Dentre os diversos tipos de eixos disponíveis no mercado, a aplicação de usinagem enquadra corretamente a opção de eixo de aço carbono 1045 que passa pelo processo de retificação, disponível amplamente no mercado. Durante o processo de retificação, a superfície do eixo se livra de sujeira, oxidação ou depósitos que podem prejudicar o movimento X-Y-Z da máquina. O diâmetro definido de eixo a considerar, deve atender aos requisitos de deslocamento máximo de flexão consequente da força peso previsto dos componentes apoiados nos mancais. Para fins práticos e precisos, o *software SolidWorks Simulation* realiza a simulação das cargas aplicadas baseadas nas condições de contorno do sistema e traz o valor numérico de flexão máxima possível, o valor deve ser analisado e considerar se afetará o processo de usinagem.

Figura 22 - Eixos Retificados.



Fonte: Mercado Livre (2022).

O terceiro passo é definir os guias lineares e/ou mancais necessários da máquina. Os guias, conforme visto anteriormente, podem ser elementos de apoio mantendo a direção de movimento, dessa forma, há a disponibilidade de diferentes tipos de trilhos, rolamentos ou blocos no mercado. Os trilhos telescópicos, utilizados também em gavetas, são imensamente comuns e econômicos, porém, o deslocamento é suscetível a consideráveis folgas, não sendo recomendado a este projeto.

Figura 23 - Trilho Telescópico.



Fonte: Mercado Livre (2022).

Para manter a prioridade de qualidade do sistema e de usinagem dos produtos, deve-se atentar aos elementos de máquinas problemáticos, pois, componentes desalinhados, mal instalados, subdimensionados, não escolhidos corretamente forçam os motores, as brocas de corte, prejudicando a precisão de desbaste, gerando vibração excessiva, aquecimento excessivo, má qualidade do produto e até possível quebra.

A guia linear e elemento de apoio do tipo *Pillow Block* ou, rolamento linear *pillow block* fechado é uma opção do mercado bastante favorável, que em conjunto com o eixo retificado, apresenta folgas mínimas e garante a uniformidade de movimento do sistema.

Figura 24 - Conjunto Pillow Block e Eixo Retificado.



Fonte: Mercado Livre (2022).

5.1.3 Componentes da montagem – transmissão e motor

Todo subconjunto levantado até este momento corresponde às condições iniciais para que seja possível dimensionar com segurança a parte de fato relativa ao movimento. Os motores são escolhidos com base na massa a ser transportada referente a estrutura X-Z e elementos acoplados somados à força de corte necessária.

Segundo Rafael Fiebig (2018), o dimensionamento da força necessária, ou carga axial, em cada eixo de transmissão F_{xyz} é proporcional a massa a ser deslocada M_{xyz} , aceleração da gravidade g_z , aceleração requerida de movimentação a e força de atrito f .

Dessa forma:

$$FA_{xyz} = M_{xyz} * (g_z + a) + f \quad (1)$$

No qual é sugerido gravidade local de $9,81 \text{ m/s}^2$ e força de atrito desprezível.

Na sequência, a força de corte FC_{xyz} , proporcional a constante específica do material K_{S1} , largura do corte b , espessura do corte h e constante adimensional z , que traduz os parâmetros relativos à usinagem (NÉRI, 2003).

Dessa forma:

$$FC_{xyz} = K_{S1} * b * h^{(1-z)} \quad (2)$$

No qual pode-se considerar os parâmetros de usinagem para material MDF, *medium density fiberboard* ou fibras de média densidade, como K_{S1} igual á 2,35 e z igual a 0,29.

Por fim, é possível estimar a força FT_{xyz} necessária em cada motor, com a equação (3) final.

$$FA_{xyz} + FC_{xyz} = FT_{xyz} \quad (3)$$

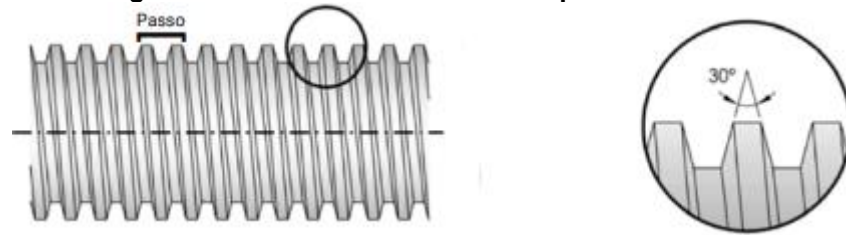
O fuso trapezoidal como transmissor de movimento rotativo para linear é coerente neste projeto, são barras formadas por roscas e passos contínuos com ângulo de 30°, apesar do elevado atrito, transmitem elevado torque (ATI BRASIL, s.d). Por ser um elemento de máquina de fácil acesso no mercado, cabe ao projeto sem elevados custos, e traz benefícios de grande capacidade de carga, sem recuo ou movimentação independente da parada (cooperando na precisão geométrica de usinagem), fácil montagem e acionamento simples por motores de passo.

Segundo Robert Norton (2013), o torque necessário para levantar a carga em parafusos de roscas ACME de avanço com ângulo radial podem ser determinadas pela equação (4).

$$T_{lev.} = \frac{P * d_p}{2} * \frac{(\mu * \pi * d_p + L * \cos \alpha)}{(\pi * d_p * \alpha + \mu * L)} + \mu_c * P * \frac{d_c}{2} \quad (4)$$

No qual, P é a carga a ser levantada, d_p diâmetro primitivo, μ_c o coeficiente de atrito do fuso com a porca, L o passo, α o ângulo radial, μ o coeficiente de atrito no rolamento axial e d_c o diâmetro médio do colar axial.

Figura 25 - Detalhamento Rosca Trapezoidal.



Fonte: ATI Brasil (2022).

Cabe, durante a execução do projeto, dimensionar o fuso trapezoidal, em caso prático, pode-se encontrar as disponibilidades de diâmetros do mercado e definir o torque de levantamento requerido. Provavelmente, devido a massa da CNC Router ser relativamente leve para projetos mecânicos, fusos trapezoidais de diâmetros pequenos atenderão com segurança.

5.1.4 Componentes da montagem – eixo do instrumento de corte

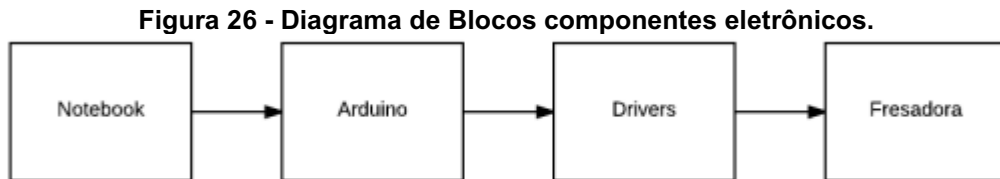
Dentre as diversas opções disponíveis de fusos, ou eixos rotativos, da ferramenta de corte, levantadas no referencial teórico, para o desbaste adequado do material que compõe o consequente produto deste projeto, cabe levantar alguns parâmetros como rotação, potência, torque, tamanho, troca de calor, dentre outros. É comum se deparar com as seguintes opções: tupia, retífica, micro retífica e spindle.

Existem inúmeros projetos envolvendo tais quatro opções de fusos rotativos, normalmente, a opção mais barata no mercado é micro retífica, portanto, perde no parâmetro potência. Neste projeto, será utilizado o motor spindle de alta potência, capaz até mesmo de usinar outros materiais além da madeira, aliado à alta velocidade de rotação, possuindo refrigeração, na maioria dos casos, por ventoinha. A vantagem de controle de rotação é bastante considerada diante a capacidade de controlar por potenciômetro localizado externamente à região de usinagem, enquanto eu uma tupia manual, possui o potenciômetro localizado no próprio corpo, dificultando alterações na rotação durante o processo de fresamento.

A fresa é a peça rotativa que entra em contato com a matéria prima, conforme demonstrado no referencial teórico. Diversas fresas poderão ser utilizadas no processo, variando entre desbaste, furação, acabamento superficial, gravação, etc.

5.1.5 Componentes da montagem - eletrônica

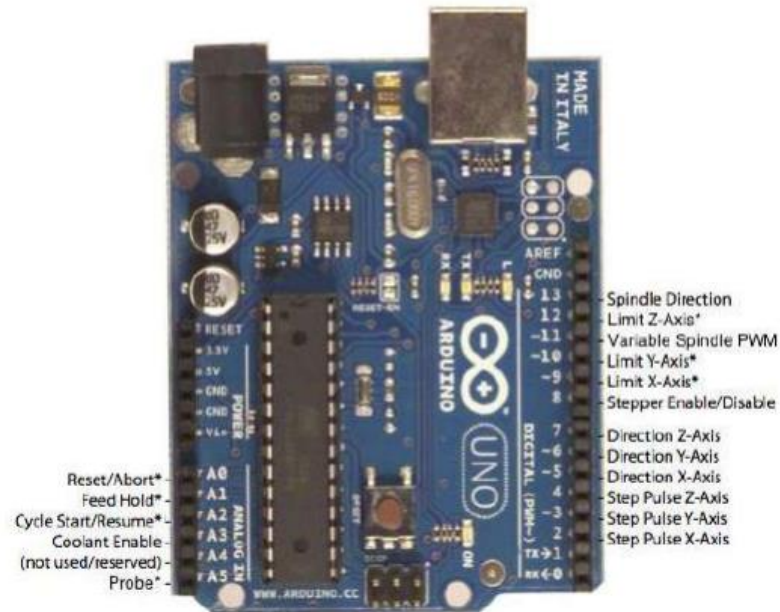
Compreender o funcionamento da eletrônica pode parecer complexo inicialmente, com base na fundamentação teórica, a Figura 27 demonstra o panorama inicial de como foi adotado neste projeto atual.



Fonte: BARROS (2018).

Dessa forma, cabe a escolha de um Arduino capaz de atender aos periféricos da máquina e possuir a biblioteca livre Grbl, como o Arduino Uno, de baixo custo e amplo acesso ao suporte de desenvolvedores. Possuindo quatorze portas digitais de entrada e saída, podendo ser seis saídas em PWM (*Pulse Width Modulation*), seis pinos de entrada analógica, 32 KB de memória *Flash* de microcontrolador ATmega328, tensão de entrada recomendada de 7 V a 12 V (AD ROBÓTICA, s/d). Compõe de entrada USB para receber informações do *G-Code*, acionando as portas digitais para controle dos eixos X, Y e Z. O diagrama elétrico de portas usado pelo firmware no Arduino Uno, é demonstrado na Figura 28.

Figura 27 - Portas no Arduino UNO.

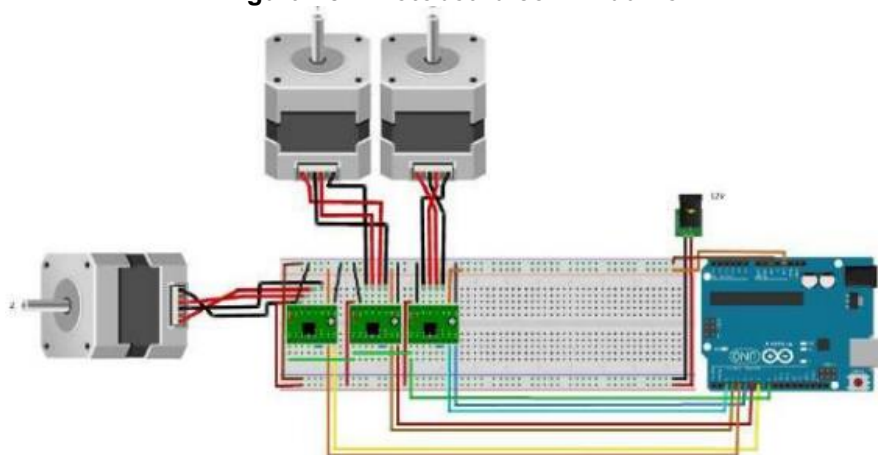


* - Indicates input pins. Held high with internal pull-up resistors.

Fonte: POLASTRINI (2016).

A ligação do Arduino pode ser feita por fios ligados aos periféricos eletrônicos na placa protoboard, porém, tal conexão não seria muito confiável diante da complexidade de contatos.

Figura 28 - Protoboard com Arduino.



Fonte: POLASTRINI (2016).

Felizmente, foi desenvolvida a placa *CNC Shield*, são placas de circuitos que facilitam o controle de periféricos simultâneos com organização, e isto refere-se a grande operabilidade.

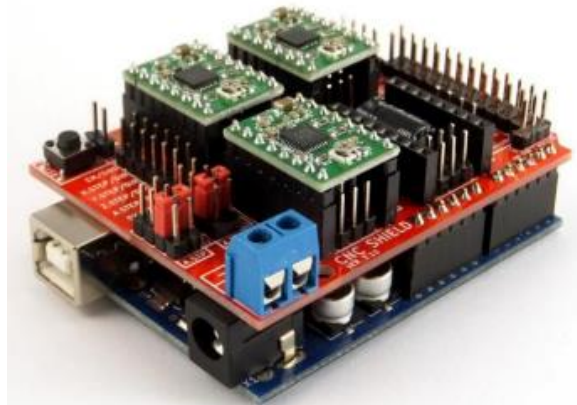
Figura 29 - CNC Shield.



Fonte: SANTOS (2021).

Os *Drivers* de potência são capazes de transformar os sinais elétricos de baixa potência de entrada em maior potência na saída, seu uso é bastante utilizado em dispositivos que utilizam corrente e tensão maior do que o próprio controle do sistema. Geralmente, drivers de potência podem acompanhar o conjunto eletrônico *CNC Shield* e Arduino Uno.

Figura 30 - CNC Shield com Três Drivers.



Fonte: BARROS (2018).

Para suprir toda demanda energética, é necessário a fonte de alimentação para o funcionamento pleno. A priori, deve ser levantado toda eletrônica necessária e considerar as tensões e correntes elétricas dos periféricos, para ser levantado a fonte necessária. De forma resumida, são levantados dados do Arduino Uno, *CNC Shield*, Drivers, motores e demais possíveis componentes.

7 PROJETO CAD

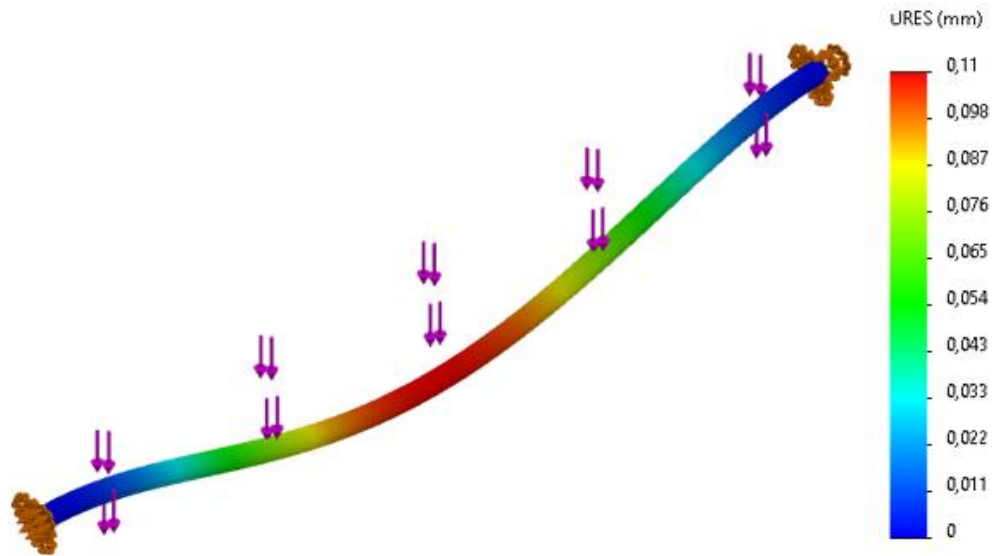
Para a construção deste projeto, determinar a área útil que deseja é um passo necessário no dimensionamento dos componentes, pois, na máquina, haverá regiões em que não necessariamente ocorrerá desbaste devido ao espaço ocupado nos próprios componentes, como a estrutura, os mancais, etc. Dessa maneira, a escolha de número de eixos e seu respectivo comprimento, fusos trapezoidais, número de guias lineares, mancais, torque mínimo necessário dos motores são variáveis intrínsecas da premissa área útil de usinagem.

Desenvolveu-se um projeto auxiliado por computador pelo *software CAD SolidWorks* (SKA, 2022) considerando uma *CNC Router* de área útil intermediária de 500X400 milímetros e com estrutura forte e rígida. Devido ao seu tamanho intermediário, o peso deve ser otimizado afim de evitar uma máquina de movimento árduo ou operação de corte lenta.

7.1 Base estrutural

A base principal está relacionada a uma boa estabilidade da mesa, optou-se pelo uso de barras retangulares de metalon de seção transversal 50 x 30 x 0,9 mm, preço mais barato que alumínio estrutural. Para a compra na medida precisa do material com o fornecedor, o comprimento exato da barra é dimensionado e detalhado em prancha, bem como indicado a posição dos furos para fixação de dois eixos retificados e um fuso trapezoidal para transmissão do movimento. A base estrutural referente ao eixo Y possui 760 mm por 676 mm, com eixos lineares retificados de 16 mm de diâmetro e 700 mm de comprimento, bem como fuso trapezoidal de 8 mm de diâmetro, passo de 8 mm e comprimento de 700 mm. Conforme demonstrado na Figura 31, a simulação em elementos finitos é realizada para o eixo considerando o peso a ser deslocado (a ser calculado no tópico 7.4 de dimensionamento dos motores de passo) dado pela Tabela 3, 8,12 kg são deslocados e apoiados neste eixo, o parâmetro de saída a ser analisado é a deflexão que, se for um valor considerável, prejudicará o processo. Além disso, o projeto prevê alguns tipos de operação na construção, como o corte do aço com certa precisão por esmerilhadeira e necessidade de junção das barras por solda.

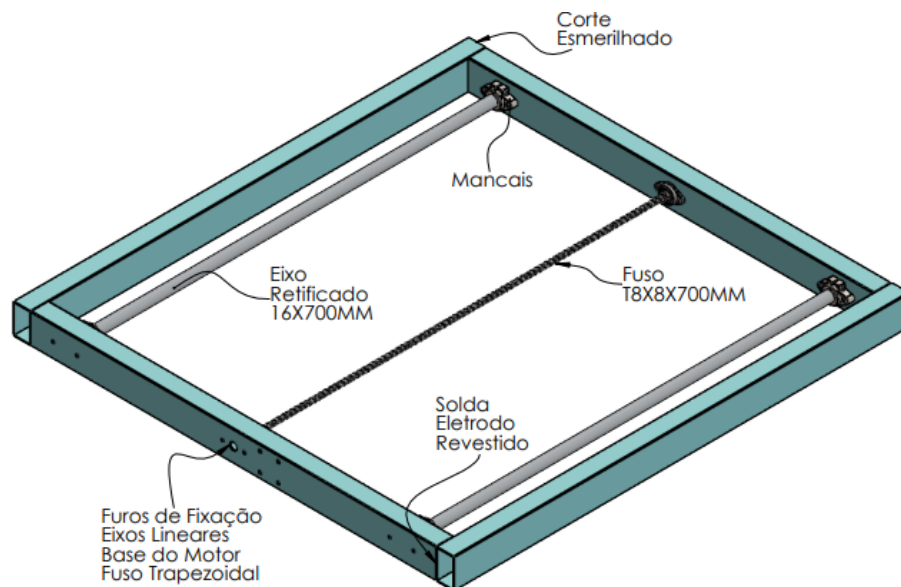
Figura 31 - Simulação de carga apoiada em um eixo.



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com a Figura 31 acima, o deslocamento máximo para esta massa e, gravidade de $9,8 \text{ m/s}^2$, é de $0,11 \text{ mm}$ em cenário crítico de massa localizado estaticamente no centro do eixo, tal deflexão é equivalente a um fio de cabelo espessura média (LOPES, E. 2004). A seguir, a representação CAD da base.

Figura 32 – Base estrutural com eixo e fuso.



Fonte: Próprio Autor.

7.2 Estrutura vertical

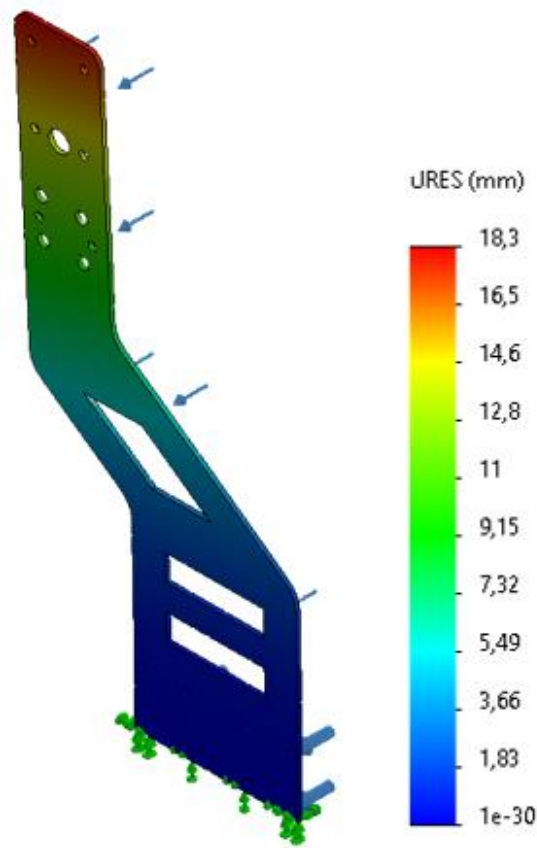
Os componentes do eixo de deslocamento X levam em conta o fator peso, de extrema importância pois estarão totalmente apoiados nos dois eixos lineares da base Y, assim como o motor de passo acoplado no fuso precisa de torque suficiente pra deslocar essa massa. Consequentemente, o dimensionamento da estrutura vertical deve ser enxuto para evitar excessos de massa.

A primeira consideração foi barra metálica vertical, porém, nota-se que perderia área útil de usinagem para a seção transversal da barra, bem como o peso. A segunda proposta são chapas metálicas de aço carbono 1045 de 3 mm de espessura, a proposta é leve, porém, conforme o estudo de elementos finitos na Figura 33, é demonstrado os motivos de seu impedimento. Na terceira proposta, duas chapas de aço carbono são projetadas com alívios de massa e espessuras de 4,25 mm (bitola 8) suficientes para suportar os esforços do sistema, devido à altura de 450 mm, considera-se projetar uma dobra que aumenta consideravelmente a rigidez do sistema, e para a segura estabilização durante o deslocamento horizontal da massa do *spindle* e seus componentes ao longo do eixo X, o elemento entre-chapas é projetado. Os *pillow blocks* e mancais do eixo e fuso serão instalados por fixação de parafuso e porcas. Finalmente, a barra (conforme ilustrada na Figura 35) é uma proposta leve para a transmissão de potência no eixo X.

Note que a fixação será por solda da chapa metálica onde a barra atravessa um corte na chapa vertical para permitir a solda pelo lado externo, melhorando fixação. A correta avaliação e escolha do material para a construção deve ser tratada com atenção pois, é importante tornar a montagem viável com os equipamentos caseiros. No cenário onde a chapa vertical do eixo X seja de aço inoxidável, e o metalon, de aço carbono, a solda mais indicada seria TIG (*Tungsten Inert Gas*), processo de soldagem comum entre estes diferentes materiais.

No projeto, as furações da chapa vertical comportam a fixação estável dos mancais dos eixos e do fuso, bem como a fixação do motor de passo. Aqui, é considerado eixo retificado de 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento, fuso trapezoidal de 8 mm de diâmetro, passo 8 mm e comprimento de 650 mm.

Figura 33 - Simulação de carga apoiada em um eixo.

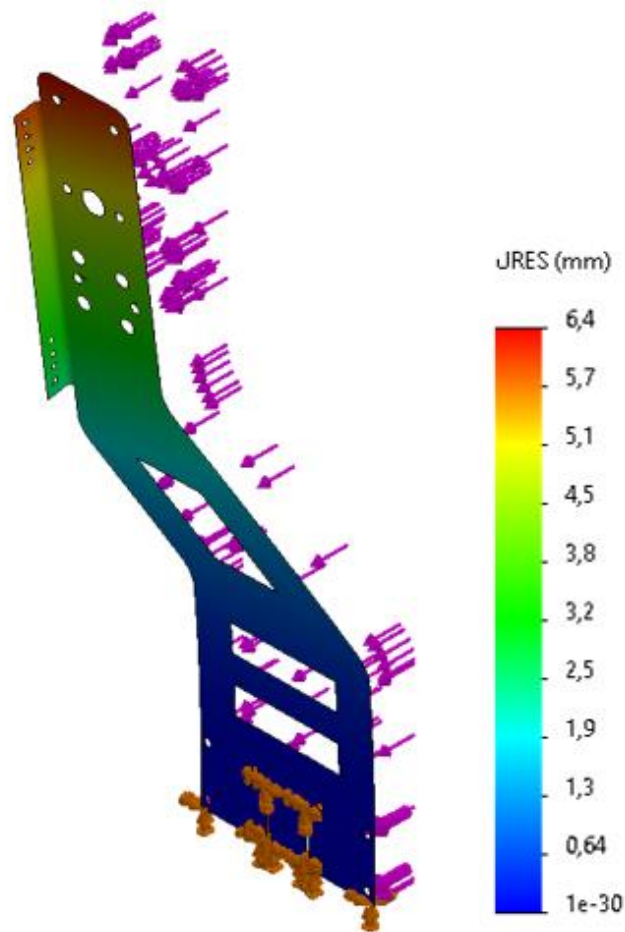


Fonte: Próprio Autor.

O estudo de elementos finitos da Figura 35 demonstra o deslocamento da segunda proposta do projeto vertical (chapa metálica de aço carbono 1045 de 3 mm). Para a simulação foi considerado uma força arbitrária e mensurável aplicando na face da chapa de 60 N. Enquanto que a condição de contorno para fixação é de geometria fixa na parte inferior da chapa, próximo às soldas entre chapas e fixação de parafusos dos *pillow blocks*.

O deslocamento máximo resultante é 18,3 mm na parte superior máxima, indicando a possível grande instabilidade no sistema durante sua operação, colaborando também para grandes vibrações. Visando maior confiabilidade, a proposta 3 corresponde ao cenário ideal, conforma Figura 34 abaixo.

Figura 34 - Simulação terceira proposta e baixo deslocamento.



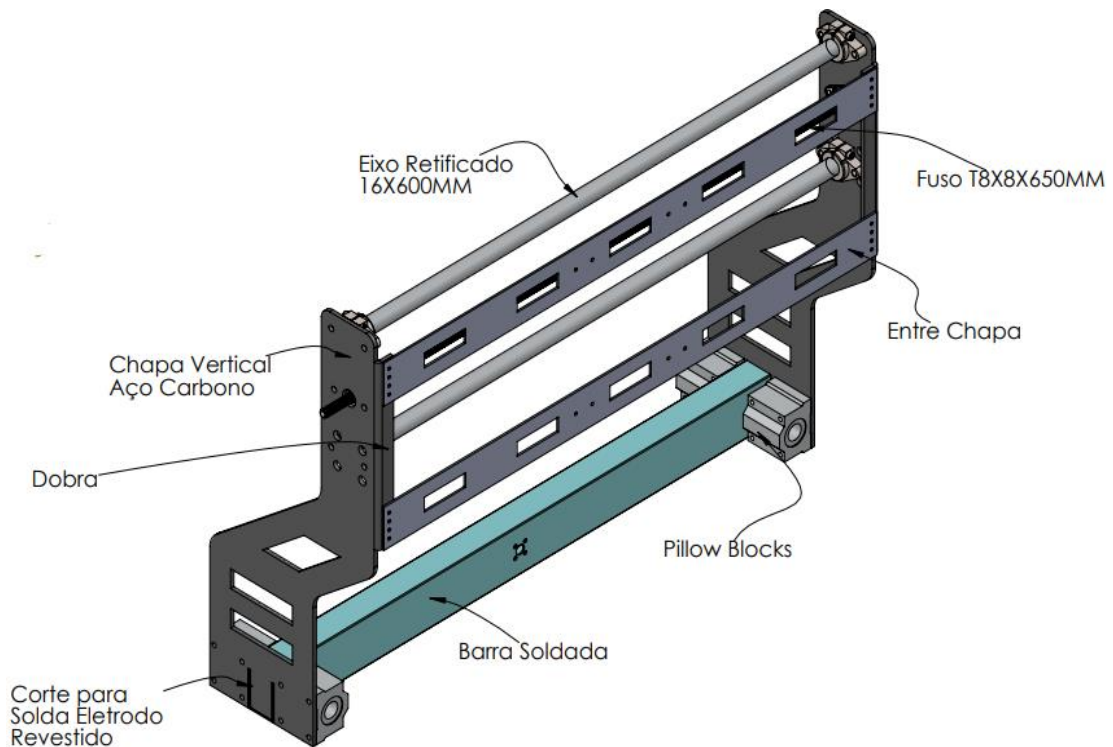
Fonte: Próprio Autor.

Com os mesmos parâmetros de simulação anterior de 60 N e fixação de geometria fixa inferior, a representatividade da proposta 3 é convincente, a dobra metálica aumenta até 3 vezes a rigidez da chapa vertical e, com deslocamento máximo de 6,4 mm em balanço, apresentando maior confiabilidade.

O possível deslocamento total demonstrado na Figura 34 será nulo com a implementação do elemento entre-chapas (citado anteriormente na proposta 3), de aço carbono 1045 parafusadas em rosca M4, garantindo estabilidade.

O conjunto montagem da estrutura vertical dimensionado, é demonstrado abaixo.

Figura 35 – Estrutura vertical com eixo e fuso.

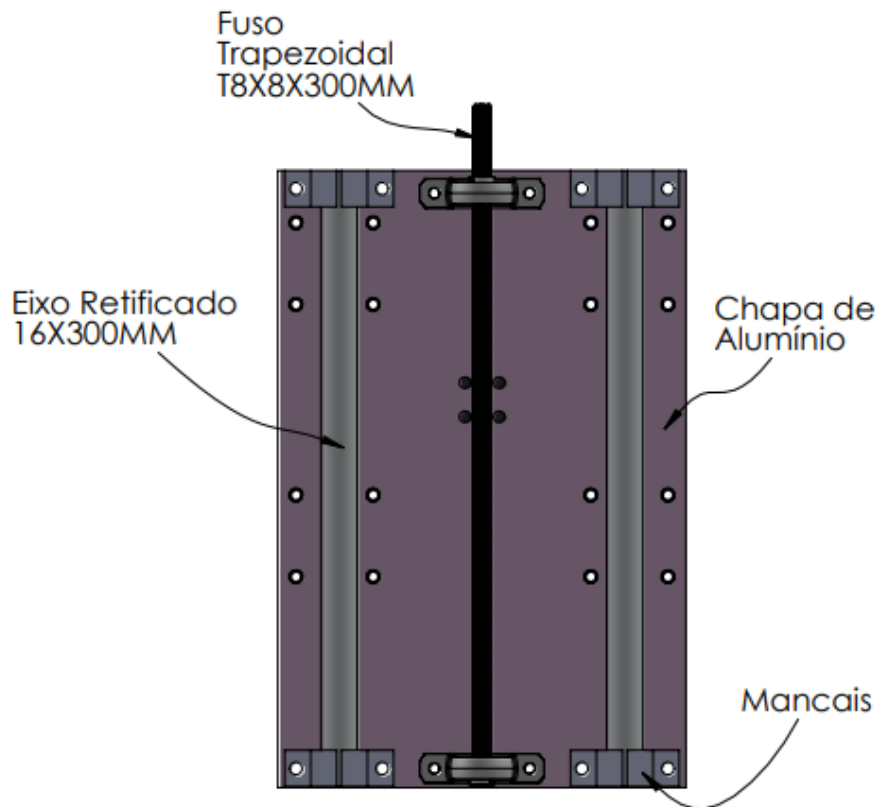


Fonte: Próprio Autor.

7.3 Estrutura eixo Z

Mantendo atenção ao fator peso, a estrutura do eixo z pode ser leve utilizando de um material de menor densidade e rigidez, uma placa de alumínio comercial de 3 mm de espessura é a opção resistente suficiente para manter a estrutura dos mancais com eixos lineares e guia linear, possuindo densidade de 1/3 (um terço) em relação ao aço (PEIXOTO, 2001). O comprimento dos componentes projetados para deslocamento bruto da ferramenta de corte z foram eixos lineares retificados de diâmetro 16 mm por 300 mm de comprimento, fuso trapezoidal de 8 mm de diâmetro, passo 8 mm e comprimento de 300 mm.

Figura 36 - Estrutura Z.



Fonte: Próprio Autor.

7.4 Dimensionamento dos motores de passo

Determinar os motores necessários para o projeto depende dos tópicos de base estrutural, estrutura vertical e estrutura do eixo z para estimar a massa a ser deslocada. Conforme visto no tópico 5.1.3 de transmissão e motor, o comprimento útil e a massa a ser transportada por eixo é um a das características no dimensionamento. Neste mesmo tópico, foi revisado o equacionamento de força axial e força de corte, a soma de ambas é o parâmetro essencial para determinar agora, o torque necessário.

Se, conforme projeto, temos a dimensão estrutural e matéria prima definida, é possível estimar o curso de deslocamento útil e a massa desses conjuntos. Note que o comprimento útil não é igual ao comprimento dos eixos e fusos escolhidos, pois há comprimentos 'perdidos' de mancal ou limitações de outras peças que compõem o conjunto. Conforme Tabela 3, é levantado as informações:

Conjunto / Eixo	Comprimento Útil (mm)	Massa (kg)
Base Estrutural / Y	520	8,12
Estrutura Vertical / X	390	3,0
Estrutura Eixo Z	120	1,62

Fonte: Próprio Autor.

Então, com o equacionamento, a força requerida em cada eixo é:

Dimensionamento eixo Y:

Da Equação 1,

$$FA_y = 8,12 * (9,81 + 1) + 0 = 87,8 \text{ N} \quad (5)$$

Da Equação 2,

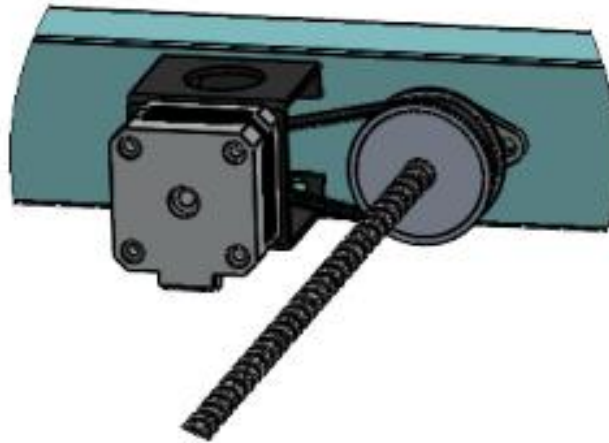
$$FC_y = 2,35 * 3 * 2^{(1-0,29)} = 11,53 \text{ N} \quad (6)$$

Da Equação 3,

$$FA_y + FC_y = FT_y = 99,33 \quad (7)$$

Logo, o motor instalado na base estrutural (eixo Y) conforme Figura 37 deve suportar a força calculada e deslocar o maior peso.

Figura 37 - Ilustração do motor no Eixo Y.



Fonte: Próprio Autor.

Dimensionamento eixo X:

Da Equação 1,

$$FA_x = 3,0 * (9,81 + 1) + 0 = 32,43 \text{ N} \quad (8)$$

Da Equação 2,

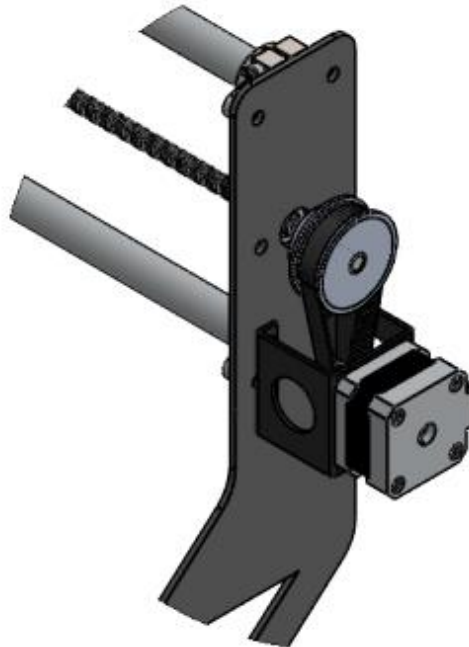
$$FC_x = 2,35 * 3 * 2^{(1-0,29)} = 11,53 \text{ N} \quad (9)$$

Da Equação 3,

$$FA_x + FC_x = FT_x = 43,96 \text{ N} \quad (10)$$

Logo, o motor instalado na estrutura vertical (eixo X) conforme Figura 38 deve suportar a força calculada e deslocar esta massa.

Figura 38 - Ilustração do motor no Eixo X.



Fonte: Próprio Autor.

Dimensionamento eixo Z:

Da Equação 1,

$$FA_z = 1,62 * (9,81 + 1) + 0 = 17,51 \text{ N} \quad (11)$$

Da Equação 2,

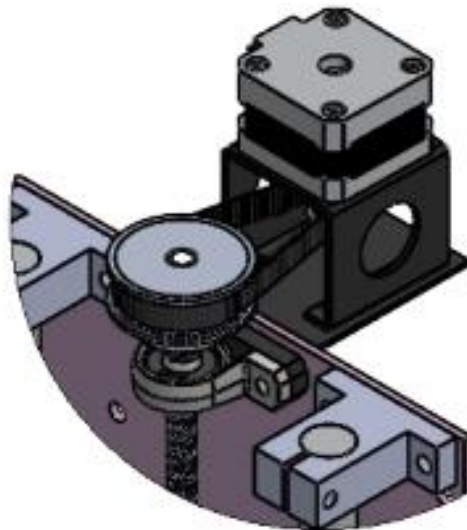
$$FC_z = 2,35 * 0 * 2^{(1-0,29)} = 0 \text{ N} \quad (12)$$

Da Equação 3,

$$FA_z + FC_z = FT_z = 17,51 \text{ N} \quad (13)$$

Logo, o motor instalado na estrutura vertical (eixo Z) conforme Figura 39 deve suportar a força calculada e deslocar a ferramenta de corte em sua profundidade.

Figura 39 - Ilustração do motor no Eixo Y.



Fonte: Próprio Autor.

As forças mínimas encontradas para cada eixo permitem a construção da Tabela 4 abaixo e a prosseguir com a escolha do torque requerido do motor. O modelo de transmissão fuso trapezoidal escolhido no projeto converte facilmente o movimento rotatório em linear, com eficiência de 70% (THK, 2022). Apesar de ser inferior ao fuso de esferas, de eficiência 90% (AVIASISTEM, 2019), o modelo é mais econômico na compra, podendo compensar no coeficiente de segurança do motor de passo.

Para dado de início, motor de passo NEMA possui diâmetro do eixo proporcional ao seu torque estático. Então, considerando motores de 5 kg.cm, 7,3 kg.cm e 12 kg.cm, compara-se a força disponível entre estes modelos.

Motor de Passo	Torque (N.m)	Diâmetro do Eixo (mm)	Força Disponível (N)
NEMA 17 42HS40	0,5	5	100,0
NEMA 17 42HS60	0,7	5	140,0
NEMA 23 HT23-397	1,2	6,35	189,0

Fonte: Próprio Autor.

Logo, a partir da Tabela 4, para eficiência do fuso trapezoidal de 70%, temos que, NEMA 17 42HS40-04 fornece 70 N, NEMA 17 42HS60 fornece 98 N e NEMA 23 HT23-397 fornece 132,3 N.

Relacionando a Tabela 5 para comparar com a força requerida em cada eixo, temos, a partir do dimensionamento anterior:

Tabela 4 - Força requerida em cada eixo.
Eixo **Força Requerida (N)**

Y	99,33
X	43,96
Z	17,51

Fonte: Próprio Autor.

Neste cenário, vemos que somente o motor de passo NEMA 17 42HS40 com força disponível de 70 N não atende ao projeto.

Aqui, considera-se somente a eficiência do sistema de transmissão por fuso trapezoidal, mas, note que outros fatores devem ser levados em consideração, como temperatura de operação, peso do próprio motor, sendo de 0,55 kg no modelo escolhido nos parágrafos abaixo (KALATEC, 2022). Bem como transmissão de potência do próprio motor ao fuso.

Ainda assim, o sistema por acoplamento por polia e correia dentada traz ao projeto menor torque requerido, pois para 60 número de dentes no fuso e 20 o número de dentes no motor, o torque pode ser reduzido em até 3 vezes (MARCO, 2021). Logo, conceder um fator de segurança no projeto visa trabalhar com confiabilidade diante variáveis que podem tanto diminuir o torque requerido, como aumentar (em situações de aumento de diâmetro da ferramenta de corte, previsto pelas equações acima).

Neste cenário, a escolha do motor NEMA 17 42HS60 é compatível com os requisitos do projeto e traz confiabilidade em operações de espessura de madeira ou densidade maiores.

7.5 Dimensionamento do fuso trapezoidal

Foi citado durante o projeto CAD de base estrutural, estrutura vertical e estrutura do eixo z, a utilização fuso trapezoidal de 8 mm de diâmetro e de passo. No mercado, este diâmetro é o menor disponível, motivo pelo qual foi optado. A partir da Equação 4, dimensionamos o fuso trapezoidal para este diâmetro afim de garantir que o torque de levantamento de carga é atendido pelo motor.

Então, se P , carga a ser levantada for 8,12 kg (maior no eixo de deslocamento Y), d_p , diâmetro primitivo de 7,25, coeficiente de atrito do fuso com a porca μ_c de 0,20, passo L de 8 mm, α o ângulo radial de 30° , μ_c o coeficiente de atrito no rolamento axial de 0,20 e d_c o diâmetro médio do colar axial de 10 mm.

$$T_{lev.} = \frac{8,12 \cdot 0,2}{2} * \frac{(0,2 * \pi * 0,00725 + 0,008 * \cos 30)}{(\pi * 0,00725 * 30 + 0,2 * 0,008)} + 0,2 * 8,12 * \frac{0,01}{2} \quad (14)$$

Então,

$$T_{lev.} = 0,0217 \text{ N.m} \quad (15)$$

Representando um valor muito pequeno, não sendo um ponto crítico no projeto, o fuso de diâmetro TR8X8 atende ao projeto. A escolha de fusos por parte do projetista depende de características físicas como dimensões da *Router*, peso dos componentes, lubrificação e coeficiente de atrito. Com esses parâmetros estipulados, evita-se com que imprevistos críticos possam acontecer, como aumento de temperatura ou desgaste anormal. Ao longo da utilização prática da máquina, fenômenos de utilização aparecerão e este dimensionamento monitora as condições do elemento em caso de avaria por parte deste componente.

Note que podemos aumentar a velocidade de operação até 20% no deslocamento a partir do tipo de lubrificação nas roscas (ATI, 2022).

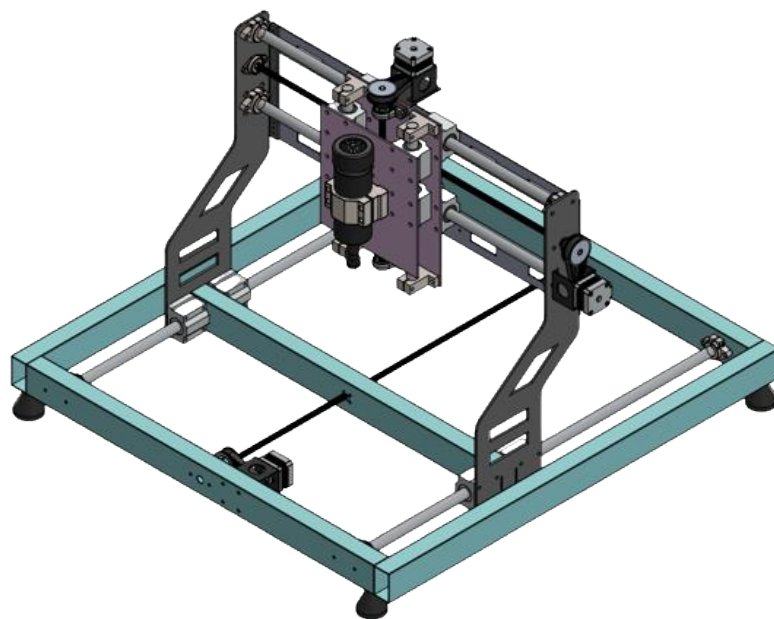
7.6 Montagem final

Realizado o dimensionamento de elementos de máquinas e projeto CAD durante as etapas de projeto estrutural, estrutura vertical, estrutura do eixo z, a montagem final é o momento em que criamos vínculo entre os componentes até então, permitindo durante os recursos da plataforma, definir amplitude de movimento de deslocamento da ferramenta para assertar a área útil de usinagem, bem como possível interferência entre componentes não antes previstos.

A máquina projetada possui peso aproximado de 13 kg em sua totalidade, nos próximos tópicos, será abordada a construção e validação utilizando de técnicas de construção mecânica.

Para comportar a necessidade dimensionada aos motores de passo, uma fonte de alimentação 12 V é instalada na placa CNC *Shield* que recebe os drivers digitais 2MD420 de tecnologia 32 bits, melhor indicado para categoria NEMA 17. Na escolha do driver, é necessário atentar-se a alimentação. Para este caso, 5 a 25 V são suficientes. A alimentação geral deve fornecer 110 V de corrente alternada para alimentação das placas e ligação direta ao motor *Spindle*. É possível criar a comunicação com o Arduino via cabo USB conectado ao *notebook*.

Figura 40 - Projeto CAD completo.



Fonte: Próprio Autor.

8 CONSTRUÇÃO MECÂNICA E INSTALAÇÃO ELETRÔNICA

Todos os componentes da CNC Router são construídos pelo autor conforme projeto CAD em tópico anterior. Veja que é necessário comprar barras de metalon, chapas metálicas, fusos e eixos, elementos de fixação como mancais, parafusos, porcas, arruelas, vira macho e machos para rosquear e todos periféricos, disponíveis no mercado. Instrumentos de medição e de construção são elementos obrigatoriamente necessários para este processo, esmerilhadeira, furadeira, parafusadeira, máquina de solda a eletrodo revestido, trena, régua, paquímetro, caixa de ferramentas gerais e equipamentos de segurança compõem um cenário utilitário e seguro ao construtor caseiro.

Barras de metalon são cortadas na esmerilhadeira de 5 polegadas seguindo as dimensões do desenho técnico e compor a base estrutural. Na sequência, é feito as furações com a furadeira e broca. Pode ser utilizado a técnica de um ponto guia, marcado para facilitar a penetração da broca.

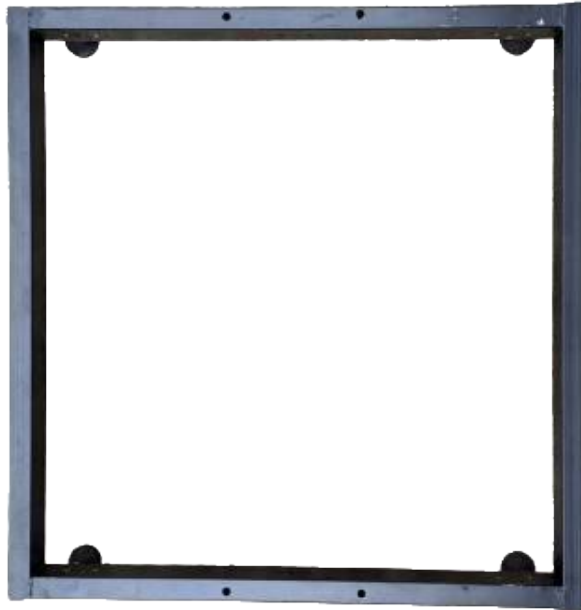
Figura 41 - Processo de Corte.



Fonte: Próprio Autor.

A seguir, o processo de soldagem das barras prontas é feito com eletrodo revestido na máquina inversora NOLL, modelo I-200B e eletrodo E6013 Ø 1,5 mm ou 2,0 mm. Com o equipamento de esquadro, o posicionamento garante ser 90° e então cria-se os pontos de fixação para depois fazer o cordão de solda. É vantajoso que seja feita a pintura das peças metálicas com função anticorrosiva.

Figura 42 – Base estrutural soldada sem eixos.



Fonte: Próprio Autor.

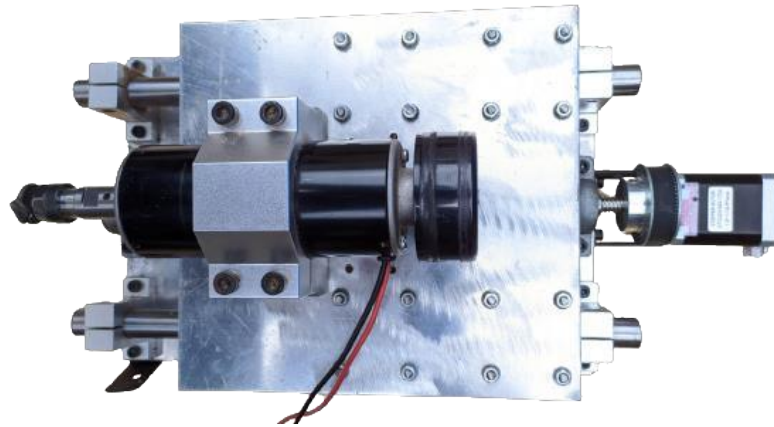
Figura 43 - Pintura.



Fonte: Próprio Autor.

Com a finalização dos elementos de fixação da base estrutural, é possível portanto anexar os eixos e o fuso trapezoidal fixados com parafusos e porcas. Todos componentes da estrutura do eixo Z são parafusados, dispensando processo de solda ou pintura, uma vez que a chapa deste conjunto é de alumínio.

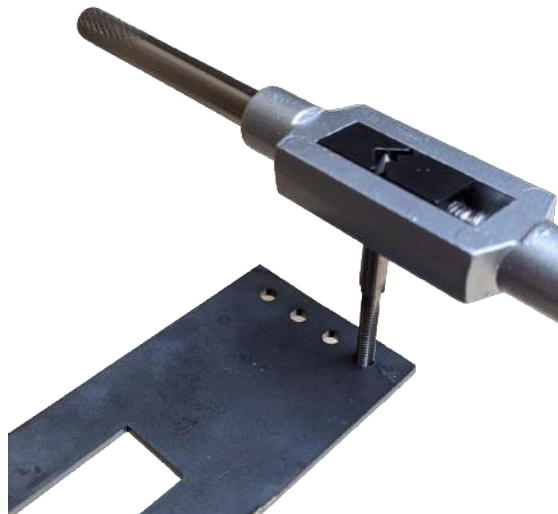
Figura 44 -Eixo Z, Spindle e Motor NEMA 17.



Fonte: Próprio Autor.

A estrutura vertical corresponde a chapa metálica vertical com dobra que deve ser fixada por parafusos M4 no entre-chapas. Os furos que receberão M4 foram cortados a laser no diâmetro 3,3 mm e a rosca de passo 0,7 mm é feita com a ferramenta macho e vira macho.

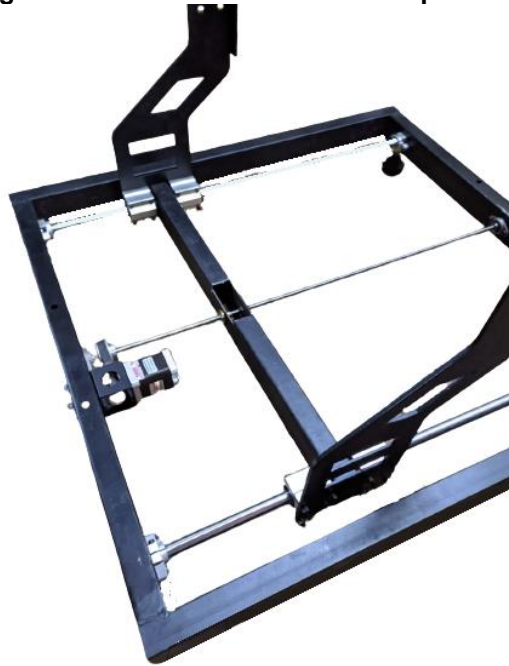
Figura 45 - Arrastador.



Fonte: Próprio Autor.

Na sequência, o processo de solda é necessário para fixar o metalon entre as chapas. Foi realizado um encaixe cortado no laser para o metalon receber o cordão de solda com maior precisão. Dessa forma, é encaixado a base estrutural com a estrutura vertical.

Figura 46 - Solda e Acabamento Superficial.



Fonte: Próprio Autor.

Dessa forma, os eixos e fusos do eixo X são instalados e juntamente com a estrutura Z, a montagem final é estabelecida.

Figura 47 - Projeto completo.

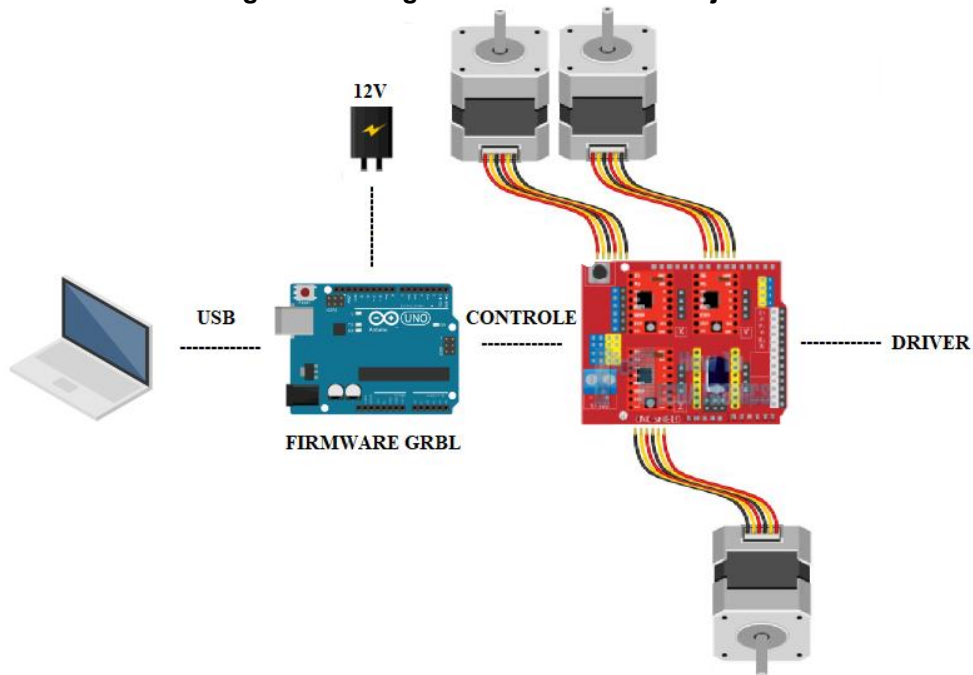


Fonte: Próprio Autor.

Com todo projeto mecânico montado, cabe verificar se todos componentes apresentam boa rigidez e linearidade em seus deslocamentos ao longo do eixo retificado dentro dos *pillow blocks* para não sair do paralelismo com os fusos trapezoidais, verificar as castanhas e evitar desgaste excessivo do sistema e dos motores NEMA.

A montagem eletrônica é instalada seguindo o diagrama de conexão dos motores e alimentação demonstrados na Figura 48 abaixo.

Figura 48 - Diagrama Eletrônico do Projeto.



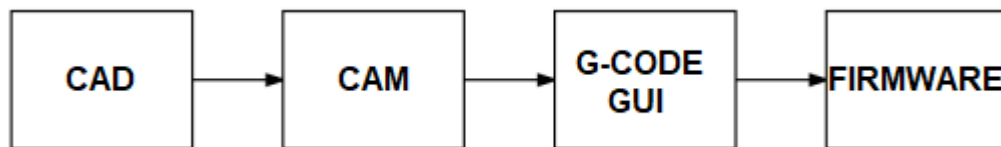
Fonte: Próprio Autor.

Durante a configuração da eletrônica, é necessário estar atento as voltagens e amperagens das ligações, bem como limitar a voltagem de referência vinculada aos motores e *Drivers*, para finalmente iniciar a instalação dos *softwares* que permitem a relação ao arduino.

9 TESTES EXPERIMENTAIS

Existem diversos programas disponíveis para trabalhar com o CNC. Algumas opções são pagas e outras, gratuitas, dependendo de cada usuário. O *Software SolidWorks* utilizado neste trabalho para projeto CAD converte também, o produto a ser usinado em CAM, convertendo o produto em código G para ser interpretado. Porém, este programa de engenharia não interpreta esse código e não converte em instruções para a máquina. Então, é necessário a instalação de plataformas livres (neste trabalho) para a validação do projeto. Além do *software* de controle, é comum também a utilização de *software* de simulação, que interpreta esse código G e simula os caminhos da ferramenta prevenindo possíveis erros durante a operação real.

Figura 49 - Processos de CNC.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 49 demonstra o fluxo de processos de *software* de CNC, note que as etapas G-CODE GUI (*graphic user interface*) ou interface gráfica do usuário e *firmware* fazem parte do controle.

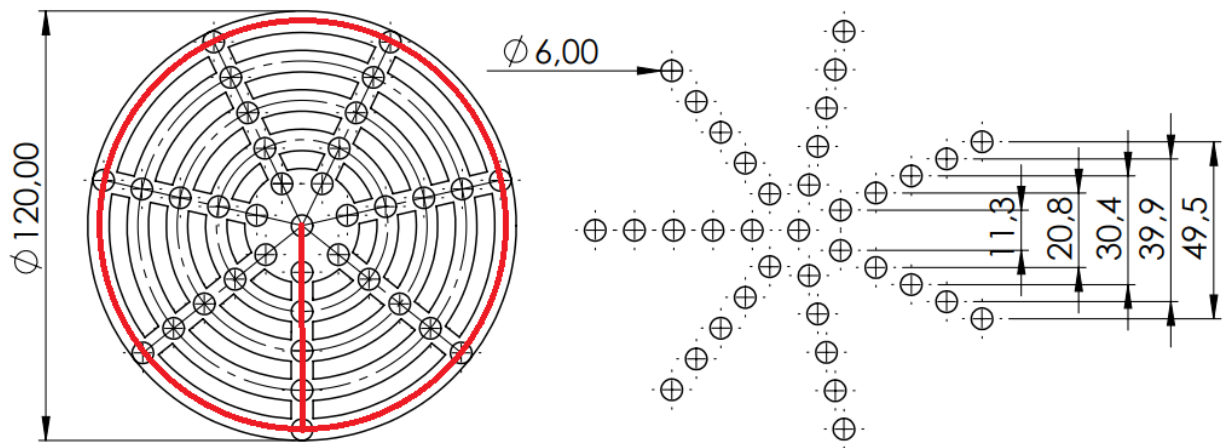
O programa utilizado para controlador é o *Universal G-Code Sender*, capaz de dar *feedback* em tempo real da posição da ferramenta, faz estimativa de duração do tempo e demais informações.

Para validar toda a instalação, submeteu-se a máquina ao controle manual do operador com controle por *Jog Controller* dos eixos XY e Z e verificado o deslocamento físico da fresa com o passo (*step size*) fornecido no *software* em milímetros.

Com a verificação do deslocamento dos cursos, foi constatado um leve desalinhamento da castanha do fuso trapezoidal no eixo X e Y, ajustes de parafusos e uso de lubrificante próprio foi suficiente para permitir o deslocamento linear livre da ferramenta.

Para a validação de precisão de usinagem, realizou-se o desenho da Figura 50 de circunferências de 6 milímetros de diâmetro distribuídos por simetria circular ao longo de cavidades rebaixadas concêntricas entre si. A peça, portanto, apresenta área bruta de 120 x 120 mm.

Figura 50 - Vista superior e inferior da peça teste.



Fonte: Próprio Autor.

Neste desenho teste, as geometrias circulares de 6 mm de diâmetro estão precisamente tangentes às arestas circulares concêntricas, permitindo avaliar o comportamento da ferramenta ao trabalhar em percursos curvos e arredondados indicado em vermelho.

Ainda na Figura 50 (lado direito), demonstrou os furos da vista inferior distribuídos pela linha radial que permite avaliar o comportamento linear da fresa, inclusive diagonal, demonstrado pela reta em vermelho.

Então a peça bruta é posicionada no centro da máquina, região onde os eixos estão sujeitos a carga centralizada e conseqüentemente maiores condições de vibração.

Realizou-se o teste na velocidade 1200 mm/min para eixo Y e X e 300 mm/min para eixo Z, aceleração de 10 mm/s², com fresa de 6 mm de diâmetro para a peça fixada por parafusos na mesa de sacrifício. O resultado é mostrado na Figura 51 abaixo.

Figura 51 - MDF usinado.

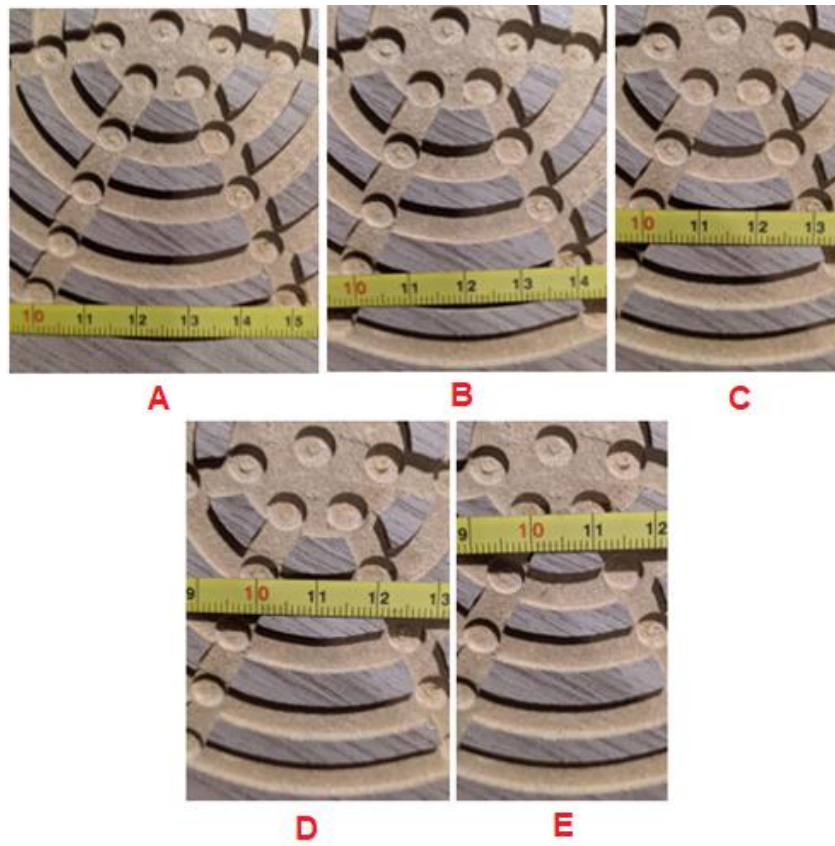


Fonte: Próprio Autor.

De imediato foi observado algumas rebarbas nos furos que podem ser retiradas, não observou grandes defeitos de usinagem na região central da *router* e os furos de 6 milímetros permaneceram centralizados aos traçados circulares e retilíneos, indicando um resultado plausível.

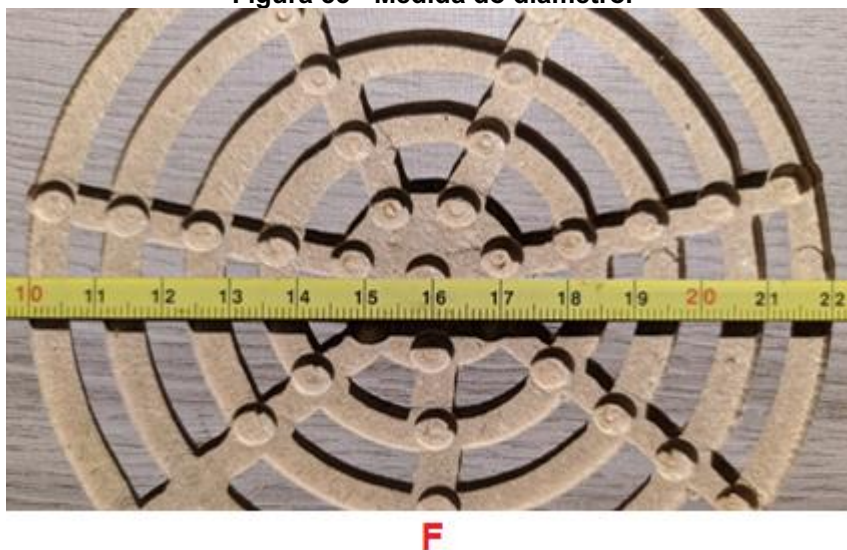
A Figura 51 representa uma fotografia do diâmetro e a Figura 52 representa cinco fotografias com as medidas mensuradas pela trena de fita de aço de resolução de 1 mm, de acordo com ABNT NBR 10123:1987 de instrumentos de medição.

Figura 52 - Montagem com medidas concêntricas.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 53 - Medida do diâmetro.



Fonte: Próprio Autor.

Verificou-se portanto a precisão da máquina comparando o desenho cujo código G foi gerado a partir das medidas virtuais da Figura 50 e a peça produzida, as medidas A, B, C, D, E e F são as medidas reais. Dessa forma, a Tabela 6 fornece o comparativo abaixo.

Tabela 5 - medidas virtuais e reais (em milímetros)..

Medida	Virtual	Real	Média
A	49,5	50,0	49,75
B	39,9	40,0	39,95
C	30,4	30,0	30,2
D	20,8	20,0	20,4
E	11,3	11,0	11,15
F	120,0	120,0	120,0

Fonte: Próprio Autor.

A variação das medidas mostrou estar entre 0 e 0,25 mm, sendo importante ressaltar a possível variação da trena utilizada nas medidas, para a velocidade relativamente alta utilizada de 1200 mm/min o projeto da máquina foi considerado aceitável e as variações não afetam a estética do produto final, agregando à confiabilidade para uma taxa de produção maior.

10 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos referentes aos custos totais do projeto que visam manter a acessibilidade comparado ao mercado de *routers* de áreas úteis semelhantes e possíveis falhas a serem monitoradas.

10.1 Custos

Tabela 6 - Custos de fabricação e instalação

Descrição	Quantidade	Valor Total (R\$)
Metalon 50X30 6 MT	1/2	37,00
Aço 1045 + Laser + Dobra	4	125,10
Alumínio + Laser	2	160,5
Eletrodo Revestido E6013	10	20,0
Disco de Corte	3	30,0
Paraf., Arruelas e Porcas	1	100,0
Suporte Guia Linear	12	189,0
Base Motor	3	60,0
Pillow Block 16 MM	12	349,0
Eixo Linear Liso 700 MM	2	112,0
Eixo Linear Liso 600 MM	2	96,0
Eixo Linear Liso 300 MM	2	68,0
Fuso TR8X700	1	92,94
Fuso TR8X650	1	69,70
Fuso TR8X300	1	43,11
Arduino + CNC Shield	1	140,0
Conjunto Spindle 500W	1	800,0
Mor de Passo 42HS60	3	365,81
TOTAL		2858,16

Fonte: Próprio Autor.

Os custos totais estruturados na tabela anterior não incluem em alguns casos valores de fretes para aquisição *online* e custos de transporte para itens buscados em lojas físicas, além disso, é necessário a disponibilidade das diversas ferramentas utilizadas ao longo da construção e contabilizar possíveis perdas ou falhas imprevisíveis de ferramentas ou peças. Para a operação da máquina, o jogo de fresa de topo com diferentes tipos de cortes ou gravação são necessários dependendo do produto desejado. Notou-se também a necessidade de multímetro para ser possível configurar a tensão de referência que alimenta os motores na placa CNC *Shield*. Tais equipamentos externos podem adicionar ao custo se o criador não tiver posse.

Realizou-se a comparação de custos deste trabalho com máquinas CNC equivalentes produzidas nacionalmente, analisando área útil semelhante, torque do motor e tipos de mecanismos. A Tabela 2 no capítulo estudo de mercado, havia mostrado o modelo RC0505 da Distritec, agora, a ser comparado com este trabalho.

Tabela 7 - Trabalho atual e Distritec.

Modelo	Área Útil	Torque	Valor
Trabalho Atual	500X400X120	7,3 kg.cm	R\$ ± 2858,16
RC0505	500X500X60	12 kg.cm	R\$ 11.700,00

Fonte: Próprio Autor.

Pode-se observar na Tabela 4 que os custos para produção deste projeto são inferiores ao custo da máquina de área útil equivalente, sendo uma opção economicamente viável.

Este trabalho visa a prática da construção pela cultura *DIY*, note que exigiu o tempo e dedicação do usuário em montagem e configuração para refletir a confiabilidade do equipamento.

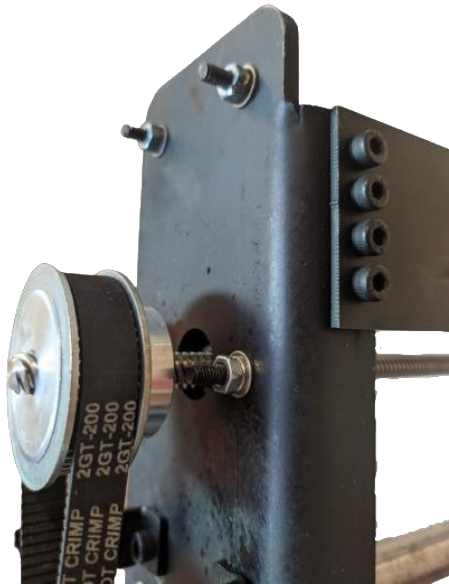
A montagem mecânica levou em média 48 horas contínuas desde preparação material para estrutura, montagem mecânica, eletrônica, configuração, testes e ajustes. O tempo pode ser reduzido com algumas melhorias a serem consideradas no próximo tópico.

10.1 Análise do equipamento

Com base nos resultados obtidos deste trabalho, cabe levantar alguns pontos. O projeto da estrutura com dobra metálica na estrutura vertical referenciado na Figura 54 demonstrou-se bastante satisfatório em relação a sua rigidez e durante o processo de corte, o conjunto não trepidou ou vibrou para avanços rápidos.

Hoje, o processo de terceirização do corte a laser e dobra CNC é bastante acessível à população, portanto, pode-se otimizar a instalação da estrutura eliminando o metalon soldado entre-chapas, evitando mais um tempo de solda e usufruindo de também chapa metálica com corte e dobra fixada por parafusos, porcas e arruelas de pressão nas chapas verticais já existente.

Figura 54 - Vantagem da Dobra.



Fonte: Próprio Autor.

A posição do motor NEMA 17 ficou na parte interna do quadro de metalon (vivenciado pela Figura 55), esteticamente é positivo quando coberto pela chapa de sacrifício, porém a área útil foi comprometida (aproximadamente 10 centímetros de motor). A solução para este caso seria trabalhar com fuso da base maior que 700 mm suficiente para atravessar o metalon e ser acionado pelo motor na parte externa.

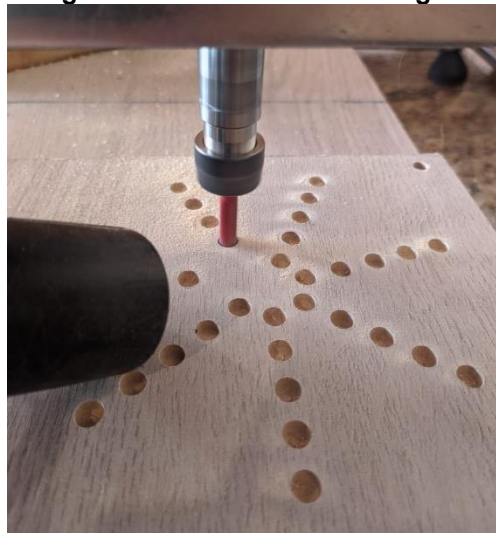
Figura 55 - Proposta de melhoria.



Fonte: Próprio Autor.

É usual usar materiais de madeira devido a facilidade de operação, neste projeto, os motores de 7,3 kg.cm são capazes de usinar superfícies de alumínio se considerados a equação de força de corte no desenvolvimento deste trabalho e o sistema de polias nos motores. A refrigeração para usinagem de superfícies metálicas deve ser maior nos motores e *spindle*, evitar o superaquecimento destes componentes colabora com a preservação e vida útil.

Figura 56 - Processo de usinagem.



Fonte: Próprio Autor.

Finalmente, a utilização de sensores de fim de curso são componentes essenciais para a profissionalização da Router. Diversos *softwares* operam com configurações vantajosas para máquinas de eletrônica mais robusta.

11 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de máquina capaz de gerar renda ou entretenimento ao executor torna esta atividade atraente. Diversos nichos de mercado podem ser explorados com a fabricação de produtos e formas pela metodologia deste trabalho. O projeto CAD mostrou ser a fase em que deve ser feito com cautela para evitar projetar peças que na futura instalação podem apresentar problemas. Como a simulação por elementos finitos da chapa vertical lisa mostrou o deslocamento acentuado quando sujeito a uma carga distribuída, foi possível antecipar esta falha e prevenir falha funcional total consequente deste componente. Ainda no projeto, a escolha dos motores foi considerada na estrutura cautelosamente, devido ao seu peso aumentar significativamente proporcional ao torque disponível.

Na etapa de instalação e construção, um fator bastante crítico é garantir o esquadro da base para não perder área útil ou forçar a caminhada dos *pillow blocks* nos eixos lineares paralelos. Por vezes o processo de solda pode forçar a peça a sair do esquadro.

O processo de ensaio de validação apresentou-se satisfatório em termos de funcionamento do sistema estrutural, qualidade dos componentes e configurações, permitindo o uso em escala maior de produção. Consequentemente, o levantamento bibliográfico deste trabalho consolidou a metodologia e permitiu a execução sem grandes divergências ou imprevisibilidades críticas. A primeira usinagem da máquina deste trabalho foi o resultado do ensaio, amparado pelos parâmetros corretos de *software*. Futuros protótipos ou produtos podem exigir parâmetros de velocidade, aceleração, ou passo diferentes, configuráveis pelo usuário e dentro da eletrônica livre, prevista no decorrer do trabalho como *GRBL*, *Arduino* e *Universal G-Code Sender*.

Dessa maneira, o usufruidor da cultura *DIY* pode repetir a metodologia com confiabilidade e baixo custo, previsto anteriormente. Perceba que comparativo da máquina construída e a máquina disponível no mercado mostrou grande diferença de custo e este trabalho não teve como ponto inicial a estética atraente da estrutura, mas é possível projetar e construir visando melhor aparência e *marketing* do conjunto.

Além disso, o trabalho é receptivo a melhorias para aumento da área útil com a mesma metodologia conforme citado nos resultados e discussões.

REFERÊNCIAS

- ATI BRASIL. **Fuso de Rosca Trapezoidal**. Artigos Técnicos Industriais. Acesso em: 15 de maio de 2022.
- BRITES, F. SANTOS, V. **Motor de Passo**. Niterói: UFF, 2008.
- BARBOSA, J. P. **Elementos de Máquinas**. São Mateus: IFSC, 2011.
- BARROS, Víctor. **Projeto básico de uma fresadora CNC de baixo custo**. Universidade Federal Fluminense, 2018.
- BOSCHREXROTH. **Guias Lineares**. Disponível em: <https://www.boschrexroth.com/pt/br/produtos/grupos-de-produtos/tecnologia-linear/topicos/guias-lineares/>. Acesso em 23 de abril de 2022.
- FLEXICAM. **Roteador CNC Stingray (5 Eixos)**. Disponível em: flexicam.com. Acesso em: 18 de maio de 2022.
- FIEBIG, R. UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO. p. 63, 2018.
- Fachim, A. (2013). **Projeto de fresadora CNC com plataforma livre Arduíno**. Trabalho de conclusão em Engenharia de Controle e Automação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/87332/000910181.pdf?sequence=1>
- FERRARESI, D., 1977. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo.
- GORDO, Nívia; FERREIRA, Joel. Mecânica: **Elementos de Máquinas**. São Paulo, 2012, 414p. Apostila do Telecurso 2000 – FIESP, CIESP, SESI, SENAI.
- GENG, H. **Manufacturing Engineering Handbook**, Second Edition. New York: McGraw Hill Education, 2015.
- Gears. University of Babylon. Disponível em: uobabylon.edu.iq. Acesso em: 16 de maio de 2022.
- LOPES, M. É. **Diâmetro de um Fio de Cabelo por Difração**. Londrina: UEL, 2004.

MARKET WATCH. **CNC Router Market Is Likely to Experience a Strong Growth During 2022-2027 with Top Countries Data**. 19 de Maio de 2022. Disponível em: <https://www.marketwatch.com/press-release/cnc-router-market-is-likely-to-experience-a-strong-growth-during-2022-2027-with-top-countries-data-new-report-spread-across-167-pages-2022-05-19>. Acesso em: 19 de maio de 2022.

MACHADO, Álisson Rocha, et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. Ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MAKITA. Disponível em: makita.com.br. Acesso em 18 de maio de 2022.

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

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

NURHANIZA, M, et al. **Analyzing the Effect of Machining Parameters Setting to the Surface Roughness during End Milling of CFRP-Aluminium Composite Laminates**. Hindawi. International Journal of Manufacturing Engineering. 2016.

NÉRI, A.C.; GONÇALVES, R.; HERNANDEZ, R.E., **Forças de corte ortogonal 90-0 em três espécies de madeira de eucalipto**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande. 1999.

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

RML MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. Disponível em rmlmaquinas.com.br. Acesso em 22 de maio de 2022.

ROMI. **Centro de Usinagem Vertical: LINHA ROMI D**. [S. I.], 2016. Disponível em: Romi.com. Acesso em: 14 de maio de 2022.

REBEYKA, C. **Comando Numérico Computadorizado**. Introdução Teórica. 2008.

RENNA, Roberto B. D.; BRASIL, Rodrigo D. R.; CUNHA, Thiago E. B.; BEPPU, Mathyan M.; FONSECA, Erika G. P. Tutoriais PET-Tele “**Introdução ao kit de desenvolvimento Arduino**”, Universidade Federal Fluminense, 2013.

RODRÍGUEZ, J. M. **Numerical Methods for the Modelling of Chip Formation**. Archives of Computational Methods in Engineering (2020). 2020.

SCIENCE MUSEUM. **A brief history of DIY, from the shed to the maker movement.** 23 de abril 2020. Disponível em: <https://www.sciencemuseum.org.uk/objects-and-stories/everyday-wonders/brief-history-diy>. Acesso em: 25 de março de 2022.

SILVA COSTA, Éder. **Processos de Usinagem.** Divinópolis: CEFET-MG, 2006.

SOUZA, André J. *Apostila “Processos de Fabricação por Usinagem”*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

SMID, P. **CNC Programming Handbook: A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming.** Norwalk, Industrial Press Inc., 2003.

SANTOS, L. **CNC Router de Baixo Custo Associado com Confiabilidade e Precisão.** UTFPR, Londrina. 2021.

SINADRIVES. Direct Drive Experts. Disponível em sinadrives.com. Acesso em 15 de abril de 2022.

SOURCERABBIT. Disponível em: sourcerabbit.com. Acesso em: 8 de maio de 2022.

SMID, P. **CNC Programming Handbook: A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming.** Norwalk, Industrial Press Inc., 2003.

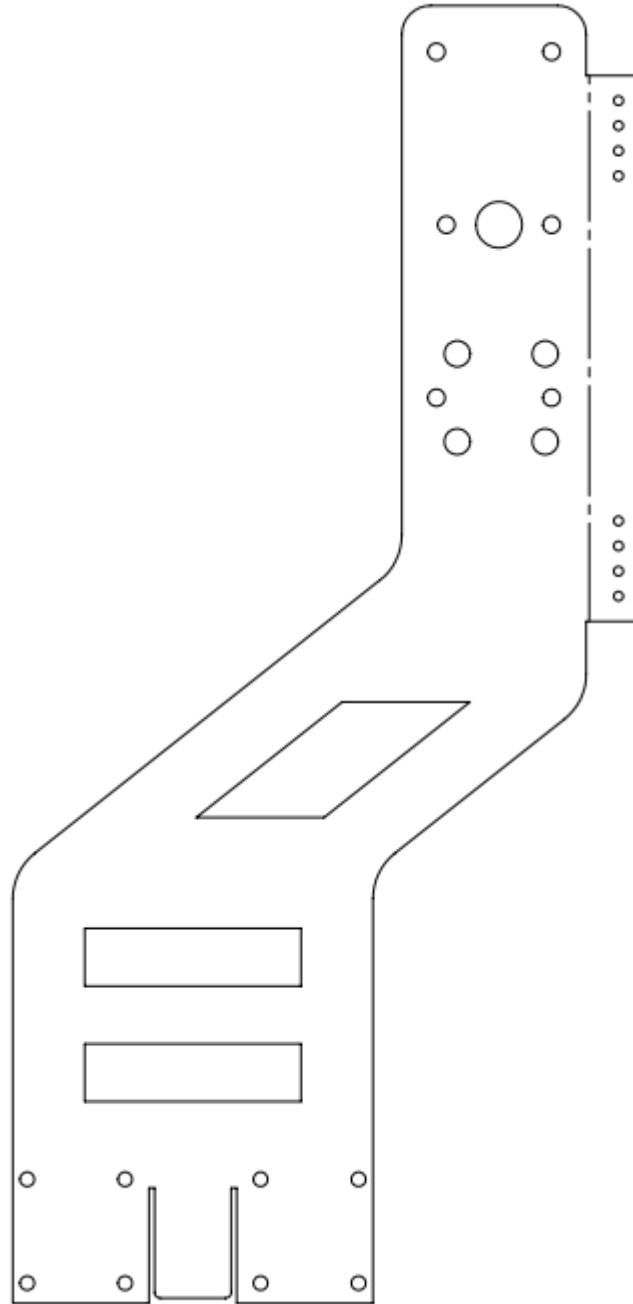
THK. **Precisão do fuso de esferas.** [S. l.], 2017a. Disponível em: https://tech.thk.com/pt/products/pdf/br_a15_011.pdf. Acesso em: 12 maio 2022.

TECMAF. Tecmaf. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://tecmaf.com.br/>. Acesso em: 15 de maio de 2020.

TRENT, E. M. **Metal cutting.** 2 ed. Londres: Butterworths & Co., 1984.

WOLFGRUPPE. **High Performance Drills and End Mills.** Disponível em: <https://www.wolf-gruppe.com/en/tools-tool-technology/products/solid-carbide-standard-tools/>. Acesso em: 09 de maio de 2022.

APÊNDICE A – CHAPA VERTICAL CORTE A LASER E DOBRA



APÊNDICE B – CORTE ENTRE-CHAPAS PARA SOLDA