



PROJETO DE GRADUAÇÃO II

Título do Projeto :

PROJETO BÁSICO DE UMA FRESADORA CNC DE BAIXO CUSTO

Autor :

VICTOR ALMEIDA BARROS

Orientador :

BRUNO CAMPOS PEDROZA

Data : 12 de janeiro de 2018

VICTOR ALMEIDA BARROS

**PROJETO BÁSICO DE UMA FRESADORA CNC
DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador:

Prof. BRUNO CAMPOS PEDROZA, D.Sc.

Niterói - RJ

2018

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

B277 Barros, Victor Almeida

Projeto básico de uma fresadora CNC de baixo custo / Victor Almeida Barros. – Niterói, RJ : [s.n.], 2018.

53 f.

Projeto Final (Bacharelado em Engenharia Mecânica) –
Universidade Federal Fluminense, 2018.

Orientador: Bruno Campos Pedroza.

1. Projeto de máquina. 2. Fresadora. 3. Usinagem. 4. Máquina -
ferramenta. I. Título.

CDD 621.815



PROJETO DE GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO

Título do Trabalho:

PROJETO BÁSICO DE UMA FRESADORA CNC DE BAIXO CUSTO

Parecer do Professor Orientador da Disciplina:

- Grau Final recebido pelos Relatórios de Acompanhamento:

- Grau atribuído ao grupo nos Seminários de Progresso:

Parecer do Professor Orientador:

(Comentar a relevância, contribuição e abrangência do trabalho. Se a participação dos alunos no grupo não se processou de forma homogênea, durante o desenvolvimento do trabalho, compete ao Prof. Orientador diferenciar o grau de cada aluno, de forma a refletir a sua atuação no desenvolvimento do projeto.)

Nome e assinatura do Prof. Orientador:

Prof.: Bruno Campos Pedroza, D. Sc.

Assinatura:

Parecer Conclusivo da Banca Examinadora do Trabalho:

Projeto Aprovado sem restrições

Projeto Aprovado com restrições

Prazo concedido para cumprimento das exigências: / /

Discriminação das exigências e/ou observações adicionais:



PROJETO DE GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO (continuação)

Aluno : Victor Almeida Barros

Grau : 9.0 (nove e zero)

Composição da Banca Examinadora :

Prof.: Bruno Campos Pedroza, D. Sc.

Assinatura :

Prof.: Juan Manuel Pardal, D. Sc.

Assinatura :

Prof.: Daniel Henrique Nogueira Dias, D. Sc.

Assinatura :

Data de Defesa do Trabalho : 12/01/2018

Departamento de Engenharia Mecânica, / /

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à toda minha família, minha mãe Flávia, pai Luís Custódio, irmã Luísa, irmão Rayluan, avós, tios, padrinhos, primos e namorada Vanessa.

Dedico ao Fernando Mota, grande amigo que a UFF me proporcionou, sem ele este trabalho não seria possível ser concluído.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os profissionais que contribuíram para minha formação, em especial aos professores Bruno Campos Pedroza, Maria da Penha Cindra Fonseca, Stella Maris Pires Domingues, Luiz Carlos da Silva Nunes, Leonardo Santos de Brito Alves, Roney Leon Thompson e Luiz Eduardo Bittencourt Sampaio. Agradeço ao Alex Souza, funcionário exemplar do Laboratório de Tecnologia Mecânica, por auxiliar os alunos.

Agradeço ao AeroDesign, todos os voluntários que tornam possível realizar este evento, possibilitando experiência e aprendizado a competidores de todo Brasil. Agradeço a todos os meus colegas da equipe BlackBird, por terem me proporcionado lembranças que marcarão para sempre meus tempos de universitário, em especial ao Gabriel Relvas e João Carlos, com quem pude contar para tornarmos a BlackBird a melhor equipe possível. Ao querido piloto Mauro Lopes que nunca mediu esforços para nos ajudar e ensinar a construir nossos aeromodelos. Aos meus veteranos, Divino e Brenno, que me ensinaram a amar o AeroDesign.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma fresadora CNC, máquina-ferramenta de usinagem computacional com três eixos independentes de funcionamento. A fresadora é utilizada para usinagem de peças com geometrias complexas, por ter seu acionamento automatizado assistido por computadores. Ao longo do trabalho são abordados diversos aspectos construtivos de mecânica e eletrônica, utilizando critérios claros de engenharia para seleção dos componentes físicos e virtuais, configurando a versão final da máquina.

Mantendo o objetivo de projetar e construir uma máquina com mínimo custo que atenda as necessidades do laboratório de AeroDesign da universidade, para assim diminuir os custos da equipe com terceirização de serviços de usinagem.

***Palavras-Chave:** fresadora; cnc; usinagem; comando numérico.*

ABSTRACT

The present work presents the development of a CNC milling machine, a tool computational machining with three independent axes of operation. The milling machine is used for machining parts with complex geometries, because its automated drive is assisted by computers. During the work several constructive aspects of mechanics and electronics are approached, using engineering criteria to select the physical and virtual components, reaching the final version of the machine. Maintaining the goal of designing and building a machine with minimum cost that reaches the needs of the university's AeroDesign lab, to reduce the costs of the team with outsourcing of machining services.

Key-Words: *Milling machine; cnc; machining; numeric control.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.1 – Fresadora CNC F1, .f. 14*
Figura 1.2 – I Competição SAE BRASIL AeroDesign 1999, .f. 15
Figura 1.3 – Classificação geral 2005, .f. 16
Figura 1.4 – Avião do projeto 2015 da BalckBird, .f. 17
Figura 1.5 – Perfil da asa usinada à laser, .f. 18
Figura 2.1 – Processo de Fresamento de Topo, .f. 22
Figura 2.2 – Organograma de Usinagem, .f. 22
Figura 2.3 – Vista explodida do motor de passo, .f. 24
Figura 2.4 – Conjunto Arduino, .f. 25
Figura 2.5 – Diagrama de blocos, .f. 25
Figura 2.6 – Etapas de fabricação CAD/CAM, .f. 27
Figura 3.1 – Protótipo preliminar, .f. 29
Figura 3.2 – Testes sem eixo Z; a) Mascote BalckBird; b) Logo Escola de Engenharia, .f. 29
Figura 3.3 – Testes com eixo Z, .f. 30
Figura 3.4 – Protótipo preliminar usinando madeira compensado, .f. 30
Figura 3.5 – Resultado dos cortes; a) Batman; b) Perfil aerodinâmico, .f. 31
Figura 4.1 – a) Fuso esférico; b) Fuso trapezoidal, .f. 32
Figura 4.2 – a) Trilho com patins; b) Eixo cilíndrico com rolamentos axiais, .f. 33
Figura 4.3 – Trilho telescópico de gaveta 300mm, .f. 33
Figura 4.4 – Micro retífica Dremel 3000, .f. 34
Figura 4.5 – Desenho do motor de passo 17PM-K301V, .f. 34
Figura 4.6 – Curva de torque por pps(pulse per second) motor passo 71PM-K301V, .f. 35
Figura 4.7 – Modelo 3D de uma fresadora em perfil de alumínio estrutural, .f. 38
Figura 6.1 – SketchUCam, .f. 40
Figura 6.2 – Universal Gcode Sender, .f. 41
Figura 6.3 – Etapas computacionais para usinagem na fresadora, .f. 41
Figura 7.1 – Fresadora CNC, .f. 42
Figura 7.2 – Modelo 3D da Fresadora CNC, .f. 42
Figura 7.3 – Teste com relógio comparador, .f. 44
Figura 7.4 – Teste de perpendicularidade com retângulo, .f. 45
Figura 8.1 – Primeira usinagem na fresadora CNC, .f. 46
Figura 8.2 – Comparação de resultado, .f.47

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.1: Posição da BlackBird de 2011 a 2016, f. 17*
Tabela 4.1: Especificações do motor de passo 17PM-K301V, f. 35
Tabela 4.2: Especificações do motor de passo 17PM-K301V, f. 35
Tabela 4.3: Parâmetros de Corte, f. 37
Tabela 4.4., Parâmetros de Corte f. 37
Tabela 5.1: Stepper motor driver Pololu, f. 39
Tabela 7.1: Custo de peças para versão definitiva, f. 43
Tabela 7.2: Coleta de dados do teste com relógio comparador, f. 44
Tabela 10.1: Parâmetros de Corte, f. 52
Tabela 10.2: Configuração do Universal Gcode Sender, f. 53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO, P. 14

- 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO, P. 15
- 1.2 OBJETIVO, P. 19

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, P. 20

- 2.1 METODOLOGIA, P. 20
- 2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, P. 20
- 2.3 USINAGEM E PARÂMETROS DE CORTE, P. 21
- 2.4 ARDUINO E PERIFÉRICOS, P. 24
- 2.5 ELEMENTOS DE MÁQUINA, P. 26
- 2.6 SOFTWARE, P. 26

3 PROJETO PRELIMINAR, P. 28

4 PROJETO MECÂNICO, P. 32

- 4.1 TRANSMISSÃO, P. 32
- 4.2 GUIAS LINEARES, P. 33
- 4.3 FERRAMENTA DE CORTE, P. 33
- 4.4 MOTOR, P. 34
- 4.5 PARÂMETROS DE CORTE, P. 36
- 4.6 SELEÇÃO DE MATERIAL PARA A ESTRUTURA, P. 37

5 COMPONENTES ELETRÔNICOS, P. 39

6 SOFTWARE, P. 40

7 RESULTADO, P. 42

- 7.1 CUSTOS, P. 43
- 7.2 ENSAIO METROLÓGICO, P. 43

8 TESTES EXPERIMENTAIS, P. 46

9 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS, P. 48

10 APÊNDICE, P. 51

- 10.1 APÊNDICE 1, P. 52
- 10.2 APÊNDICE 2, P. 53

1 INTRODUÇÃO

A automação dos meios de produção se reflete em grandes benefícios para o mundo contemporâneo, revolucionando a dinâmica dentro das fábricas, empresas e até nas residências. Graças aos avanços tecnológicos o custo de implementação da automação vem sendo cada vez menor. Hoje já é possível adquirir módulos de automação residencial e industrial por valores muito abaixo do que eram praticados nas décadas passadas.

Segundo Soeterau (2004, p.6), desde a revolução industrial até meado da década de 1970, as máquinas-ferramentas tiveram sua evolução de cunho puramente mecânico, incorporando apenas elementos básicos de eletrônica. Porém, o avanço tecnológico nas décadas seguintes permitiu uma nova revolução nas máquinas, com a introdução de metodologias voltadas para a orientação de objetos assistidos por computador, os softwares CAD's, aplicadas diretamente às máquinas de fabricação, o CAM.

As máquinas CNC's são as mesmas dos tradicionais processos de fabricação, porém operadas por computadores sob supervisão de um técnico. A usinagem, segundo Chiaverini (1986, p. 194), processo de fabricação em que porção do material da peça é removido por ação de uma ferramenta de corte, teve grande influência nessa modernização. Um exemplo é a fresadora, tradicionalmente operada por técnicos, que vêm sendo substituídos pelos computadores. A figura 1.1 mostra um exemplo de fresadora CNC comercializada pela Protoptimus, vendida para ser montada em domicílio.

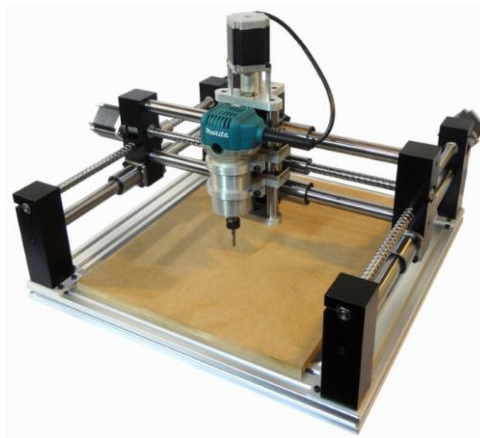


Figura 1.1 – Fresadora CNC F1
Fonte: Catálogo Protoptimus

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A *SAE International*, foi fundada em 1905, em Nova Iorque, e é uma das principais formuladoras de normas e padrões relativas aos setores automotivo e aeroespacial, congregando mais de 100 mil engenheiros. Em 1991 a *SAE International* anunciou sua primeira filial, a SAE BRASIL.

Dentre suas diversas atividades, a SAE promove um calendário anual de programas estudantis rico em competições para os futuros engenheiros. Como a competição Fórmula SAE, automobilística de velocidade, e Baja SAE, voltado para carros que enfrentam terrenos *off-road*.

O SAE BRASIL *AeroDesign* é uma dessas competições, no caso aeronáutica, com objetivo de consolidar os conhecimentos das diversas áreas adquiridos no decorrer do curso, projetar o avião com critérios claros de engenharia capaz de decolar com o máximo de carga possível. Destinada aos alunos de cursos ligado à mobilidade, como engenharias, física e ciências aeronáuticas.

A competição ocorre nos Estados Unidos desde 1986 e, em 1999, passou a constar também no calendário de Programas Estudantis da SAE BRASIL. Em sua primeira edição contou com apenas 10 equipes inscritas. A figura 1.2 registra os competidores em 1999.



Figura 1.2 – I Competição SAE BRASIL *AeroDesign* 1999
Fonte: Curso Introdução ao Projeto de Aeronaves (2009)

Na primeira etapa da competição as equipes devem projetar suas aeronaves seguindo todos os critérios estabelecidos no regulamento. Ao concluir esse trabalho devem enviar seus

relatórios divididos nos seguintes assuntos: aerodinâmica, estabilidade, controle, estruturas, cargas, desempenho, eletrônica e desenhos.

A segunda etapa é presencial e ocorre no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, em São José dos Campos no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ao longo de quatro dias. O primeiro dia é destinado às apresentações orais para uma banca de engenheiros da Embraer, explicando todas as decisões da equipe no projeto, embasadas em testes, simulações e cálculos.

Nos outros três dias da competição ocorrem as baterias de voos. As três primeiras são eliminatórias e só continua na competição quem tiver voado em pelo menos uma dessas baterias. As demais são classificatórias e as equipes são pontuadas com a quantidade de carga paga levantada em voo e se suas projeções no relatório correspondem com o desempenho desses voos.

Em sua 5ª edição, em 2003, a competição já contava com 48 equipes inscritas. Dentre elas estava estreando a UFFO, equipe da UFF Niterói, na classe regular orientada pelo professor Raul Pessolani. Em 2005, com 46 equipes inscritas, a UFFO alcançou a 4ª colocação geral carregando 7,760 kg de carga paga, como pode ser observado na figura 1.3.

Class	Nº da Equipe	EQUIPE	Universidade	Classe	Projeto	Peso máximo carregado
1	14	UAI-SÔ-FLY	UFMG	REGULAR	64,37	9,08
2	47	TUCANO	UNIV. FED. DE UBERLÂNDIA	REGULAR	44,69	8,97
3	62	KEEP FLYING	ESCOLA POLITÉCNICA DA USP	REGULAR	48,24	7,75
4	22	UFFO	UNIV. FED. FLUMINENSE	REGULAR	38,59	7,76
5	21	DRACO VOLANS	UNIV. DE BRASÍLIA - UNB	REGULAR	43,99	8,04
6	61	UIRÁ	UNIFEI - UNIVERSIDADE FED. DE ITAJUBÁ	REGULAR	47,92	7,91
7	43	CAR-KARÁ	UNIV. FED. DO RIO GRANDE DO NORTE	REGULAR	48,35	7,37
8	13	ANHANGUERA	CEFET-PR	REGULAR	39,70	6,19
9	24	AUDASES	UNESP - BAURU	REGULAR	54,44	4,97
10	37	VENTURI	CEFET - RJ	REGULAR	47,40	6,32

Figura 1.3 – Classificação geral 2005

Fonte: <http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/sae-brasil-aerodesign>

Nos anos de 2009 e 2010 houve um hiato na participação da UFF na competição, mas em 2011 a equipe ressurgiu como BlackBird e, nos últimos anos, vem superando seu desempenho, mostrando a capacidade dos alunos em inovar e aperfeiçoar seus projetos. Competindo com quase 70 equipes universitárias do Brasil e algumas estrangeiras, a BlackBird se consagra melhor do estado do Rio de Janeiro desde 2013. Na tabela 1.1 está

registrado as colocações da BlackBird desde 2011. E na figura 1.4 o avião de 2015 que carregou mais de 10kg de carga paga na competição, um recorde para a equipe BlackBird.

Tabela 1.1: Posições da *BlackBird* de 2011 a 2016

Ano:	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Colocação:	34°	42°	26°	19°	13°	16°

Fonte: <http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/sae-brasil-aerodesign>



Figura 1.4 – Avião do projeto 2015 da *BlackBird*

Fonte: Autor (2015)

Para atender as normas e requisitos do regulamento da competição, as técnicas de construção vêm sendo constantemente aprimoradas, permitindo a construção de protótipos cada vez mais sofisticados.

Primeiramente, é feito um estudo acerca dos melhores materiais no mercado com custo cabível ao orçamento da equipe. Em seguida, são realizados testes de bancada com os materiais selecionados para conhecer seu comportamento sob esforços que simulam a aeronave em voo e em momentos críticos como o pouso.

Atualmente, os protótipos são fabricados com estruturas em madeira balsa e compensado, compósitos de *honeycomb* de fibra de aramida ou espuma *divinycell*. Para reforçar as áreas com maior solicitação é feito laminação sanduíche combinado com fibras de carbono, vidro ou *kevlar*, mantendo o menor peso possível.

Em seguida, com os materiais já selecionados, as inúmeras peças que compõem a aeronave são usinadas. Nessa fase é exigido elevado grau de precisão, para assim, obter

resultados fiéis às projeções da equipe. Nos últimos anos foram utilizados métodos de usinagem avançada, como serviços de corte a laser e fresagem computacional. Esses serviços foram terceirizados para a empresa Foco Design Ltda, localizada no Rio de Janeiro. Uma empresa com vasto portfólio e experiência em criação e soluções de design.

A figura 1.5, ilustra a etapa de construção da asa da aeronave, onde todos os perfis e são feitos de madeira balsa e cortados a laser.



Figura 1.5 – Perfis da asa usinados à laser
Fonte: Autor (2015)

Para garantir o padrão de qualidade exigido pela competição, e considerando a necessidade de baixar os custos da equipe, decidiu-se construir uma fresadora CNC de baixo custo que atenda às necessidades da BlackBird.

Esta alternativa irá baratear e melhorar o domínio de fabricação da equipe. Além de facilitar o acesso à máquina, uma vez que a fresadora esteja ao alcance dos integrantes para realizar testes e experimentos.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem objetivo de projetar e construir uma fresadora CNC de baixo custo para atender a equipe *BlackBird AeroDesign* da UFF. Com isto, espera-se, substituir a terceirização de usinagem em fresadoras e máquina de corte a laser, diminuindo custos com usinagem e permitindo a utilização destes recursos em outras áreas importantes para o desenvolvimento do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa na literatura especializada com objetivo de identificar trabalhos acadêmicos, tais como, artigos, trabalhos de conclusão de cursos e dissertações de mestrado que tratem do assunto objeto deste trabalho, ou seja, desenvolvimento de fresadora CNC de baixo custo.

Uma vez concluída a pesquisa, foi desenvolvido um projeto preliminar cujo objetivo foi entender o funcionamento dos diversos elementos necessários para o controle da fresadora CNC e comprovar a viabilidade do trabalho proposto.

Em seguida, a partir do estudo dos trabalhos identificados na etapa anterior, foi estabelecido as especificações básicas para a fresadora. Entre estas especificações, pode-se citar: matéria-prima e dimensões básicas das peças que serão usinadas, parâmetros de corte, dimensões básicas da fresadora, especificação dos atuadores elétricos e dos dispositivos para transmissão de movimento, da placa de controle e seus *drives* e, o *software* que deverá comandar a fresadora.

Na etapa seguinte, após aquisição no mercado da placa de controle, dos *drives*, e dos motores de passos, foram realizados experimentos com objetivo de entender o funcionamento destes elementos.

Dando prosseguimento ao trabalho, após seleção e aquisição de diversos elementos mecânicos utilizados para transmissão de movimento, foi montada a fresadora CNC, juntamente com os dispositivos eletrônicos necessários ao seu funcionamento. Para validar o projeto, foram realizados diversos testes.

Finalmente, após análise dos testes de validação do protótipo construído, foram apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para fundamentar este trabalho, foi realizada uma vasta busca na literária especializada a respeito de temas relacionados a placa de controle Arduino, elementos de máquina, usinagem e controle numérico. Em paralelo, materiais específicos ao desenvolvimento de máquinas fresadoras CNC. Foram encontrados diversos artigos científicos sobre construção de fresadoras de pequeno porte, apostilas sobre arduino, usinagem, normas e manuais. Além

dessas, as fontes que mais contribuíram para o projeto foram dissertações de mestrados, com conteúdo sobre desenvolvimento, automação e controle de CNC's.

Dentre as referências encontradas, está a dissertação de um ex-aluno de mestrado do PGMEC UFF, Marcelo Torres de Queiroz (2007), onde é apresentado a automação de uma mesa coordenada de uma máquina fresadora CNC, contribuindo para entendimento do emprego das estratégias de automatização em máquinas CNC. O trabalho de conclusão de curso (TCC) de Alan Fachim (2013) UFRGS, cujo objetivo foi projetar uma fresadora CNC com Arduino, permitiu o entendimento do esquema eletrônico necessário para utilização do Arduino. A dissertação do Ricardo César Alves Silveira (2007) UFMG, focado no desenvolvimento de um equipamento mecânico com CNC, descreve didaticamente a construção de uma máquina fresadora ao longo do desenvolvimento do projeto.

As buscas para chegar aos trabalhos citados foram feitas de forma exclusivamente digital, em sites como Google Academics, Periódicos Capes e bibliotecas virtuais de universidades como UFF, USP e UFMG. Não havendo restrições nas buscas quanto ao período cronológico do trabalho.

2.3 USINAGEM E PARÂMETROS DE CORTE

A fabricação por usinagem conta com diversos processos convencionais, que consistem na remoção de matéria prima para obtenção da geometria final. Dentre esses processos, será adotado neste trabalho o de fresamento de topo. Nele é utilizado uma ferramenta multicortante que executa o movimento de corte, enquanto a peça pode ou não executar o avanço (CHIAVERINI 1986). A figura 2.1 ilustra o processo.

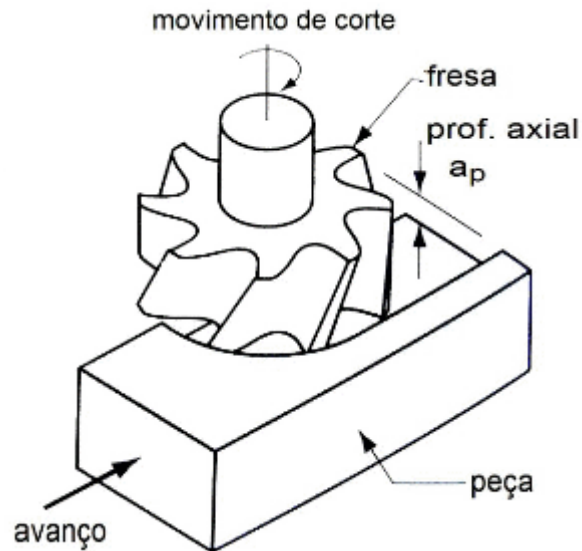


Figura 2.1 – Processo de Fresamento de Topo
 Fonte: <https://goo.gl/images/9b4lmz> (Acessado: 07 dez. 2015)

A figura 2.2 ilustra todas as variantes de processo de usinagem que influenciam no resultado final da operação (SOUZA, 2016).

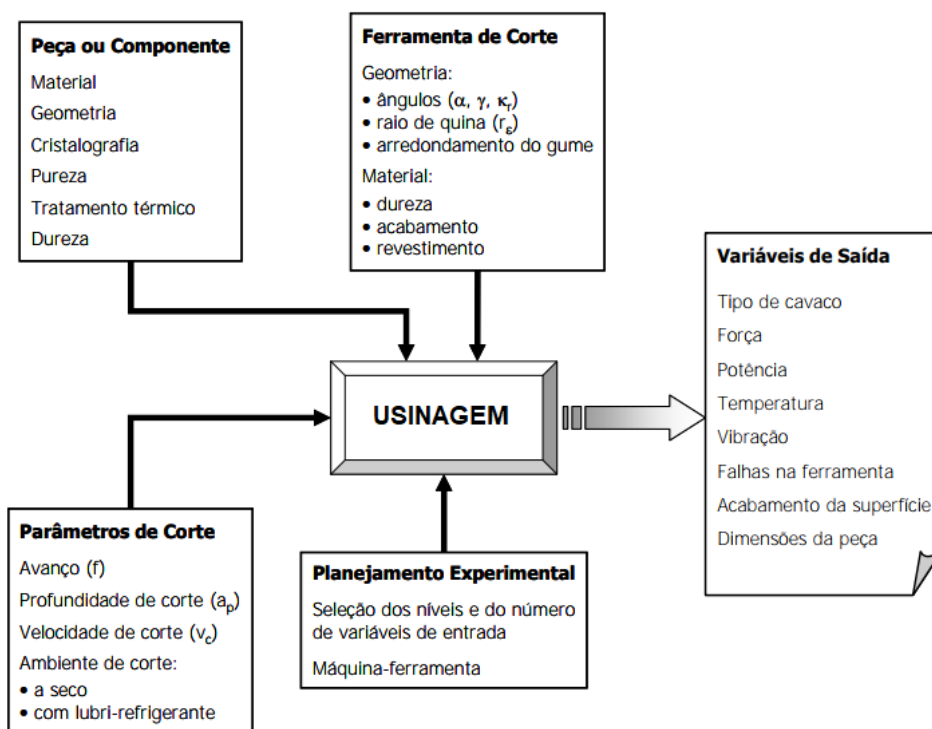


Figura 2.2 – Organograma de Usinagem
 Fonte: Souza (2016)

Os cálculos dos parâmetros de corte são importantes para o projeto, pois serão fundamentais para o dimensionamento da estrutura da fresadora. Além de auxiliar na

identificação de possíveis inconsistências para projeto da máquina e seu propósito. A equação 2.1 para cálculo da velocidade de corte, equação 2.2 para potência do motor, equação 2.3 para potência de operação e equação 2.4 para potência requerida. Todas foram retiradas de Cunha (2003).

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

$$P_{motor} = \tau \cdot \omega \text{ [W]} \quad (2.2)$$

$$P_{operação} = \frac{a_p \cdot D \cdot f \cdot K_e}{75 \cdot 1000 \cdot 60} \text{ [W]} \quad (2.3)$$

$$P_{requerida} = \frac{P_{operação}}{\eta_{transmissão} \cdot \eta_{motor}} \text{ [W]} \quad (2.4)$$

onde:

D = Diâmetro da fresa [mm].

N = Velocidade de rotação da ferramenta de corte [rpm].

τ = Torque do motor de passo [Nm].

ω = Velocidade angular do motor de passo [rad/s].

K_e = Pressão específica de corte [kg/mm²].

a_p = Profundidade de usinagem [mm].

f = Avanço [mm/min].

$\eta_{transmissão}$ = Rendimento dos mecanismos de transmissão.

η_{motor} = Rendimento do motor.

2.4 ARDUINO E PERIFÉRICOS

A plataforma de controle escolhida foi Arduino UNO, devido ao seu vasto portfólio, bibliografia rica e seu conceito *opensource*. Segundo Renna (2013), o Arduino é uma “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”. O mesmo possui um micro controlador *Atmel AVR* e utiliza linguagem de programação baseada em C/C++.

Para realizar os movimentos da mesa coordenada foi selecionado os motores de passo, Segundo Brites & Santos (2008), o motor de passo é um dispositivo eletromecânico que converte pulso elétrico em movimento mecânico, rotacionando em pequenos incrementos chamados passo. “O ponto forte de um motor de passo não é a sua força (torque), tampouco sua capacidade de desenvolver altas velocidades [...], mas sim a possibilidade de controlar seus movimentos de forma precisa”

Sua composição é feita de um rotor de ferro no eixo e diversas bobinas ao seu redor com função de eletroímãs, como pode ser visto na figura 2.3. Assim quando acionado e a corrente energiza os locais desejados causa um campo eletromagnético, assim mantém o eixo do motor na posição desejada.

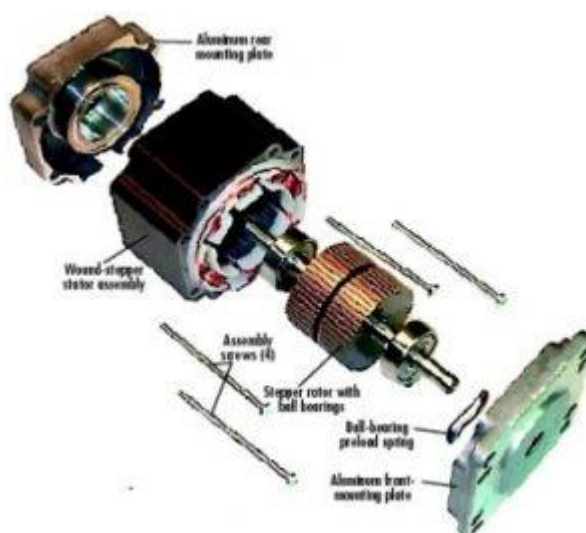


Figura 2.3 – Vista explodida do motor de passo

Fonte: <http://www.kalatec.com.br/motoresdepasso/> (Acessado: 7 de dezembro 2017)

Os hardwares diretamente responsáveis pelo controle dos motores são os *stepper motor drivers*. Há diversos modelos no mercado que foram avaliados no capítulo de projeto eletrônico.

A conexão entre os *driver* e o Arduino pode ser feita com o *CNC Shield*, fabricado pela *Protoneer*, acessório que permite economizar espaço e tempo de instalação. O *Shield* também apresenta opcionais onde pode-se ligar chaves fim de curso, controle de velocidade da ferramenta de corte, botões de *abort*, *stop* e *resume*.

Abaixo na figura 2.4 é possível observar o conjunto de hardware encarregado de controlar a máquinas. O arduino montado com o *CNC shield* e três *drivers* A4899.

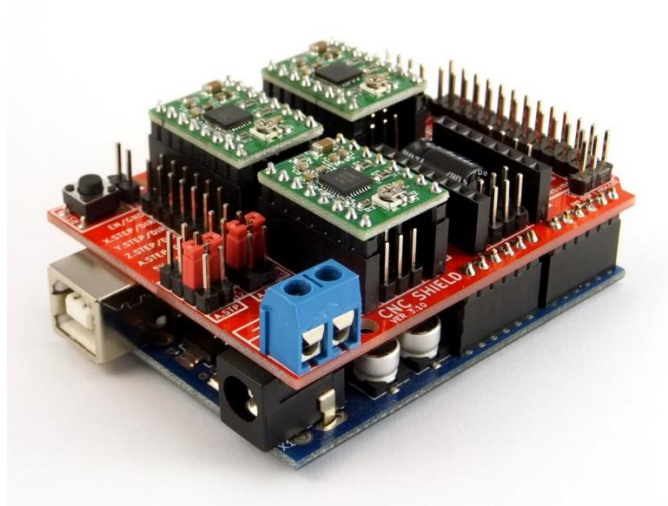


Figura 2.4 – Conjunto Arduino, CNC Shield e Drivers

Fonte: <https://blog.protoneer.co.nz/arduino-cnc-shield/> (Acessado: 7 dezembro 2017)

A figura 2.5 mostra a ordem de execução dos componentes eletrônicos que foi adotado neste trabalho.

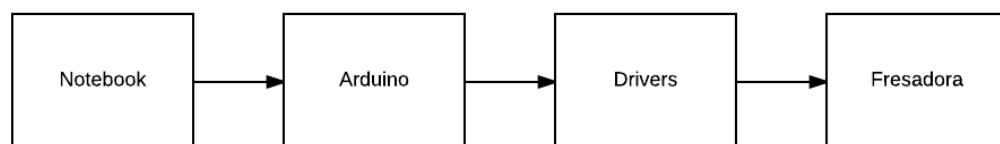


Figura 2.5 – Diagrama de blocos

Fonte: Autor (2017)

2.5 ELEMENTOS DE MÁQUINA

Para a construção da fresadora foi necessário aplicar os conhecimentos adquiridos na faculdade sobre elementos de máquina. Primeiro foi necessário selecionar um mecanismo que realize a transmissão do movimento dos motores para os elementos móveis da fresadora. Para isto, foram adotados fusos de transmissão que converte movimento rotativo em movimento linear. E para manter os conjuntos móveis em suas devidas trajetórias foi instalado guias lineares à fresadora.

O processo de seleção destes elementos, bem como o critério utilizado, está apresentado no capítulo de projeto mecânico.

2.6 SOFTWARE

Para a realizar a usinagem de uma peça em uma máquina CNC é necessário passar por diversas etapas computacionais. Primeiro é necessário dispor de um desenho detalhado do sólido desejado, para tanto é necessário ter conhecimentos de desenhos técnicos e ter domínio de algum software de desenho assistido por computador (*Computer Aided Design*, ou CAD).

Após ter o desenho detalhado da peça com suas respectivas dimensões, é necessário vetorizar esse desenho em linhas de códigos que serão interpretados pelo compilador. Esse código é chamado de *G-code* ou código G. Ele definirá, passo a passo, a trajetória que a ferramenta de corte deve seguir para obter a peça final. Alguns softwares CAD possuem extensões para converter o desenho em *G-code*.

Para operar o Arduino é necessário instalar o *firmware Grbl*, software livre encarregado de controlar os movimentos da máquina. Além de máquinas ferramentas, o *Grbl* também é utilizado para controle em impressoras 3D.

Para controlar o *Grbl* do *notebook* é necessário um software de *stream*, que irá carregar os *G-codes* e enviar para o *Grbl* no Arduino. Existe uma lista extensa de softwares para este cargo no *Github*, no presente projeto foi utilizado o *Universal G-code Sender*, feito em plataforma *Java*.

A figura 2.6 abaixo ilustra de forma resumida o processo chamado de CAD/CAM. Onde o desenho em CAD se torna real na confecção em CAM (*Computer Aided Manufacturing* ou Manufatura Auxiliada por Computador).

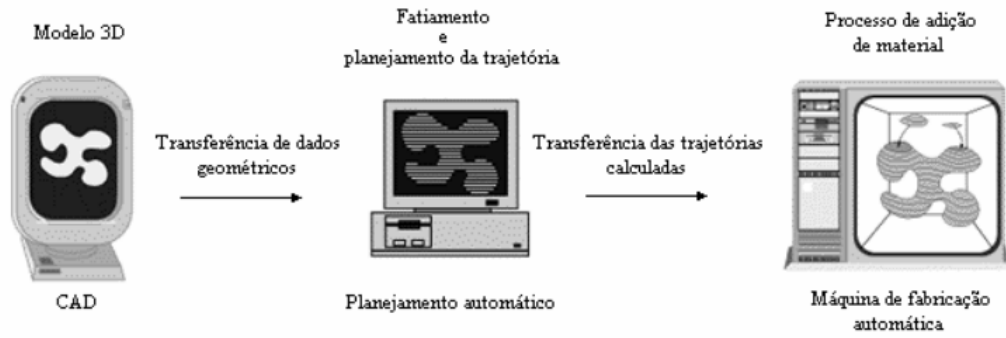


Figura 2.6 – Etapas de fabricação CAD/CAM
Fonte: DISSERTÇÃO UFMG - RICARDO SILVEIRA (2007)

3 PROJETO PRELIMINAR

Para garantir sucesso na montagem final da fresadora foi estabelecido um projeto preliminar, onde foi construído uma fresadora de capacidade e custo menor inferior à fresadora definitiva. Assim possibilitou entender melhor o projeto e aperfeiçoar os conhecimentos para a construção da versão final.

A primeira etapa foi a aquisição de um kit arduino, pois o projeto eletrônico foi onde inicialmente surgiram maiores dúvidas, devido à formação do autor não ser nesta área. Montado o conjunto eletrônico com os motores de passo, o primeiro teste foi verificar se o movimento nos motores condizia com os desenhos em CAD no computador. A primeira barreira foi configurar os motores no software, pois como eram motores reciclados de impressoras antigas, não foi possível encontrar nenhum manual sobre.

Após garantir o correto funcionamento nos motores, foi realizado os testes a fim de verificar movimentos coerente os desenhos. Primeiro simulando o corte de uma peça quadrada, onde primeiro o eixo X giraria uma certa quantidade de voltas no sentido horário para fazer o primeiro lado. Na sequencia o eixo Y repetiria o movimento para o segundo lado. Depois o eixo X voltaria a girar, porém no sentido oposto, a mesma quantidade de voltas. Por fim, o Y também em sentido anti-horário para concluir o último lado.

O mesmo foi feito com uma figura circular, desta vez os motores devem partir do repouso, acelerar até a velocidade máxima e depois desacelerar na mesma intensidade que acelerou até o repouso e então repetir o procedimento no sentido contrário. Isto é, motores devem em trabalhar MHS (Movimento Harmônico Simples), porém dessincronizados. Enquanto um chega ao repouso o outro estará em velocidade máxima e vice-versa.

Estes testes mostraram que os motores se comportam de acordo com o esperado, em seguida, avançou-se para a próxima etapa, ou seja, a de construção da mesa. A figura 3.1 mostra a mesa construída.

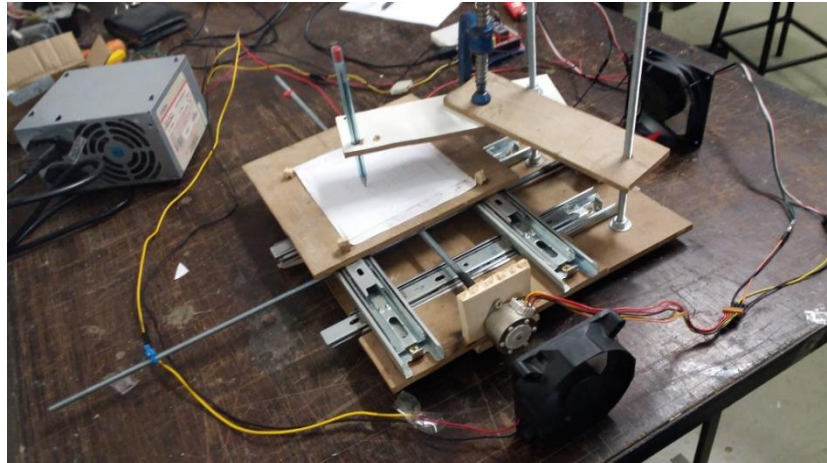


Figura 3.1 – Protótipo preliminar
Fonte: Autor (2016)

Com a mesa concluída foram feitos testes à fim de observar se a máquina desenhava como esperado. Após calibrá-la e verificar as dimensões, foi obtido êxito nesta etapa preliminar. Na figura 3.2 são apresentados alguns resultados preliminares.

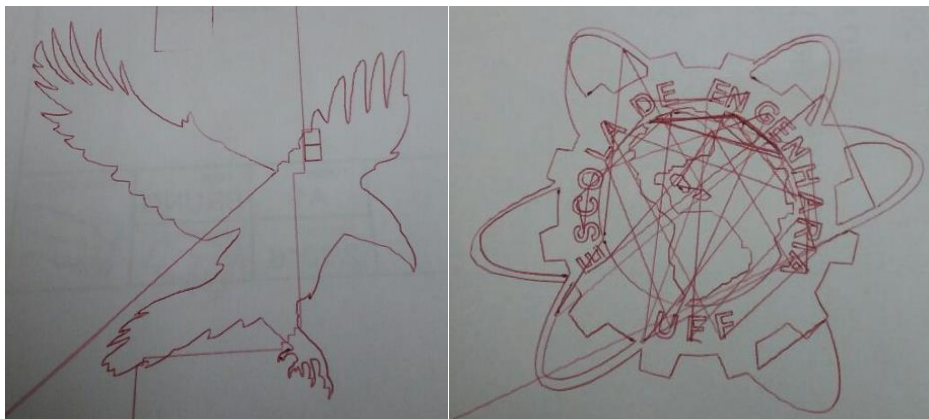


Figura 3.2 – Testes sem o eixo Z; a) Mascote *BlackBird*; b) Logo Escola de Engenharia
Fonte: Autor (2016)

Como foi possível verificar nos resultados, a mesa tem condições de operar em duas dimensões. O próximo passo foi construir o eixo Z, responsável por afastar e aproximar a ferramenta de corte do plano XY. Abaixo o resultado do primeiro teste com o eixo Z operando.

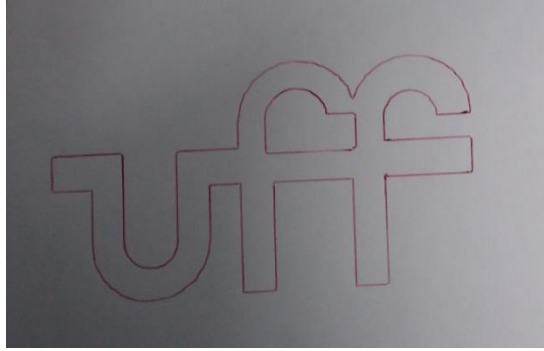


Figura 3.3 – Testes com eixo Z
Fonte: Autor (2016)

A caneta enfim foi substituída pela ferramenta de corte, uma micro retífica da marca Dremel. Finalmente, em 23 de janeiro de 2017, o protótipo preliminar estava concluído e trabalhando. Abaixo fotos do protótipo e do resultado.



Figura 3.4 – Protótipo preliminar usinando madeira compensado
Fonte: Autor (2017)



Figura 3.5 – Resultado dos cortes; a) *Batman*; b) Perfil aerodinâmico
Fonte: Autor (2016)

Na figura 3.5 é possível observar à esquerda o resultado da usinagem em madeira balsa de 1/4”, após este corte foi observado o desgaste na fresa e adquirido uma nova. À direita, usinagem em madeira compensado de 4mm.

Com o protótipo preliminar concluído, foi dada sequência as próximas etapas do projeto, estudos mais aprofundados para o desenvolvimento da versão final.

4 PROJETO MECÂNICO

Neste capítulo será apresentado os componentes mecânicos da máquina, bem como seus critérios de seleção e configuração final. Também será apresentado os cálculos dos parâmetros de corte a fim de verificar o dimensionamento da estrutura frente os esforços sofridos durante a operação de usinagem.

4.1 TRANSMISSÃO

Dentre as fresadoras CNC's encontradas no mercado, a maioria possui sistema de transmissão por fuso trapezoidal ou fuso de esferas. Permitem folgas mínimas com pouca resistência ao movimento. Porém, fogem do propósito do projeto por serem caras.



Figura 4.1 – a) Fuso esférico; b) Fuso trapezoidal
Fonte: <http://blog.misumiusa.com/> e <http://3dlab.com.br>(2017)

Outro sistema de transmissão encontrada nos modelos comerciais é por correia. Este é barato e permite transmissão mais veloz, o que faz necessário um motor mais potente e apresentar menor precisão dimensional.

Por fim, a transmissão por barra roscada se mostrou a mais adequada. Este apresenta as vantagens dos fusos e são mais baratos, porém com folgas indesejadas. Para isso é necessário muito cuidado na instalação, fixando as porcas aos conjuntos móveis de forma a minimizar esta folga e lubrificação abundante. A rosca selecionada foi de diâmetro 6 mm e passo 1 mm, segundo norma NBR ISO 724.

4.2 GUIAS LINEARES

Podem ser incorporadas por diversos mecanismos, o mais convencional é o eixo cilíndrico retificado ou o trilho com patins. Estes garantem trajetória retilínea com pouca folga.



Figura 4.2 – a) Trilho com patins; b) Eixo cilíndrico com rolamentos axiais
Fonte: <http://kalatec.com.br>(2017)

O neste trabalho foram os trilhos telescópicos, mesmos utilizados em gavetas, por ser a opção mais barata. Porém, em contraposição, apresentam mais folgas que as outras opções.



Figura 4.3 – Trilho telescópico de gaveta 300mm
Fonte: <https://goo.gl/images/P2DCV6> (Acessado: 7 dezembro 2017)

4.3 FERRAMENTA DE CORTE

Para seleção da ferramenta de corte é levado em consideração os aspectos que simulam de uma fresadora. As principais opções estão apresentadas abaixo.

Motor spindle de alta potência com controlador PWM (*Pulse Width Modulation*), é utilizado nas versões comerciais do mercado; Tupia laminadora manual, ferramenta de

marcenaria utilizado para acabamento, e; micro retífica, utilizada em trabalhos manuais, que é a opção mais barata, porém com baixa potência.

A opção mais indicada para o projeto, com melhor custo/benefício, é a tupa. Porém no presente trabalho será utilizado a micro retífica já adquirida pelo laboratório, excluindo assim um gasto do orçamento.



Figura 4.4 – Micro retífica Dremel 3000

Fonte: <https://goo.gl/images/TsV3CS> (Acessado: 7 dezembro 2017)

4.4 MOTOR

Para a geração de movimento nos conjuntos móveis da fresadora foi utilizado um motor de passo modelo 17PM-K301V da marca NMB Corporation (Minebea Group Company). Foram adquiridos em uma loja virtual, proveniente de um leilão de peças eletrônicas. É possível ver o desenho do motor com suas dimensões na figura 4.5 e na um gráfico de torque por velocidade na figura 4.6.

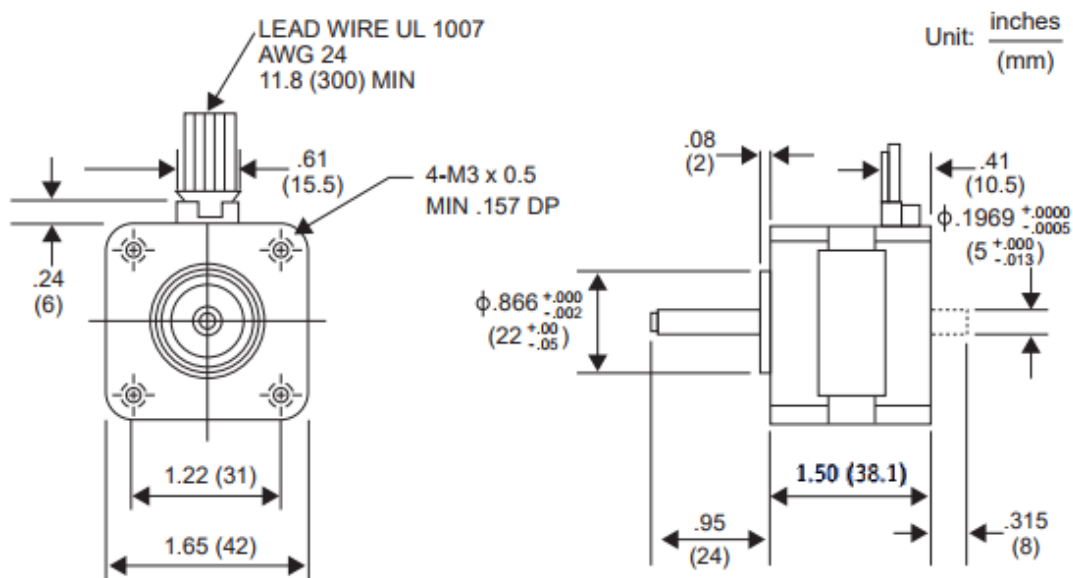


Figura 4.5 – Desenho do motor de passo 17PM-K301V

Fonte: Catálogo NMB Corporation

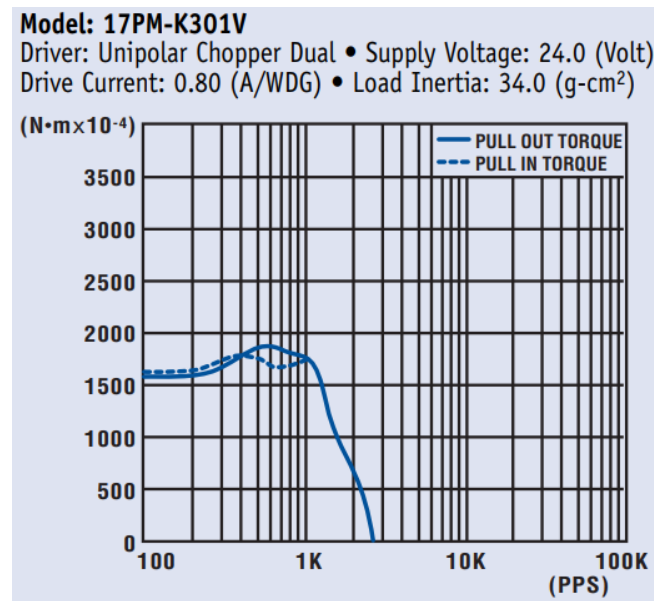


Figura 4.6 – Curva de torque por pps (pulses per second) motor de passo 17PM-K301V
 Fonte: Catálogo NMB Corporation

As especificações eletrônicas estão dispostas nas tabelas 4.1 e 4.2 abaixo.

Tabela 4.1 – Especificações do motor de passo 17PM-K301V

Passo	1,8°
Precisão do passo	±5%
Temperatura máxima	80° C
Temperatura ambiente	-20° C à +50° C
Resistência de isolamento	100MΩ Min., 500VDC
Rigidez dielétrica	500VAC por 1 min

Fonte: Adaptado Catálogo NMB Corporation

Tabela 4.2 – Especificações do motor de passo 17PM-K301V

Voltagem Nominal	Corrente Nominal	Resistência do Enrolamento	Torque Estático	Indutância	Inercia do Rotor	Peso
4.8 V	0.8 A	6 Ω	1.7 g.cm	7.1 mH	45 g.cm ²	250 g

Fonte: Adaptado Catálogo NMB Corporation

Para não correr o risco de queimar os motores, foram instalados ventiladores 12V, os mesmos utilizados em fontes e circuitos de computadores. Esta medida permite, se necessário, aumentar a alimentação dos motores.

4.5 PARÂMETROS DE CORTE

Com as equações apresentadas no capítulo de Fundamentação Teórica é possível determinar de forma empírica os parâmetros de corte da fresadora. Porém, para realização dos cálculos é necessário determinar os valores que dos parâmetros iniciais, isto é, diâmetro da fresa, velocidade de corte, rotação da fresa, velocidade de avanço, entre outros.

Primeiramente foi escolhido a fresa com diâmetro de 2 mm, por ser a maior dentre as opções que possibilita cortes de seções estreitas das peças e ser menos frágil que fresas de diâmetros inferiores. Segundo o manual do fabricante da micro retífica, sua rotação varia de 5000 à 35000 rpm, para fim de cálculos foi considerado 25000 rpm. Resultando assim em uma velocidade de corte igual à 157m/min.

Para determinar o avanço de corte, primeiro foi necessário avaliar no manual do motor de passo, onde consta o gráfico de torque por pps (*pulse per second* ou passos por segundo), ver figura 4.6 no subcapítulo motor. É possível observar que o torque máximo dos motores acontece em aproximadamente 400 pps. A conversão de pps em rpm é feita segundo a equação 4.1, abaixo. Vale salientar que a rosca dos mecanismos de transmissão tem passe de 1mm por revolução.

$$N = \frac{PPS}{\text{passos}/\text{revolução}} \cdot 60 \text{ [rpm]} \quad (4.1)$$

Seguindo a metodologia de Cunha (2003) e com o auxílio de uma planilha eletrônica Excel foi realizado um tratamento de dados que está registrado no apêndice 1. Na tabela 4.3 está selecionado os principais valores da planilha quando a velocidade de avanço é 120m/mm e o motor apresenta potência máxima. Para fim de dimensionamento, a propriedade utilizada nos cálculos foi referente à alumínio e ligas leves. Isto é, foi utilizado como pressão específica 50 kg/mm², informação retirada do Cunha (2003).

Tabela 4.3: Parâmetros de Corte

Velocidade do motor	120 rpm
Torque do motor	0,18 Nm
Potência do motor	2,262 W
Velocidade de avanço	120 mm/min
Potência requerida	2,0625 W
Excedente de potência	0,1974 W ou 8,73%

Fonte: Autor (2017)

Para tanto os resultados acima foram considerados as seguintes condições apresentadas abaixo:

Tabela 4.4: Parâmetros de Corte

Passos por rotação do motor	200
Profundidade de corte	0,8 mm
Número de dentes da fresa	6
Eficiência do motor	0,95
Eficiência do conjunto de transmissão	0,8

Fonte: Autor (2017)

A eficiência do conjunto de transmissão foi escolhida de forma arbitrária, uma vez que não foi encontrado esta especificação em outro trabalho e para não ignorar este atributo foi escolhido 0,8.

4.6 SELEÇÃO DE MATERIAL PARA A ESTRUTURA

Outra etapa relevante do projeto foi a seleção do material para compor a estrutura da fresadora. Uma vez que esta deve suportar esforços decorrentes da usinagem. A opção mais prática seria o perfil de alumínio estrutural, pois são fáceis de montar, leves e resistentes. Na figura 4.7 um modelo de fresadora feito com perfil de alumínio estrutural.



Figura 4.7 – Modelo 3D de uma fresadora em perfil de alumínio estrutural
Fonte: <http://tekkno.com>(Acessa: 7 dezembro 2017)

Outra opção para compor a estrutura é o aço carbono, mais resistente e barato que o alumínio. Além de poder ser soldado no Laboratório de Tecnologia Mecânica da UFF, onerando menos o projeto. Porém a opção que se mostrou mais viável financeiramente, foi madeira MDF, pois pode ser adquirido de graça na marcenaria da universidade e sua montagem é simples.

Simulações estáticas feitas no software *SolidWorks* mostraram que a estrutura proposta está superdimensionada. Uma vez que, segundo a simulação, a estrutura não sofre qualquer avaria sob aplicação de cargas semelhantes à que é realizado durante a usinagem.

5 COMPONENTES ELETRÔNICOS

O presente capítulo tem missão de apresentar todos os componentes eletrônicos exigidos pelo projeto e demonstrar seus critérios de seleção. A alimentação do conjunto foi feita por uma fonte de computador Positivo de 156 W de potência em 12V.

Os componentes diretamente responsáveis pelo controle dos motores de passo são chamados de *stepper motor driver*. Há diversos modelos no mercado, a maioria desenvolvidos pela Pololu *Robotics & Eletronics*. A seguir uma tabela comparativa apresentado as principais especificações:

Tabela 5.1 – Stepper motor driver Pololu

Nome	Valor (USD)	Voltagem máxima de operação (V)	Corrente máxima por fase (A)	Resolução máxima de <i>microsteps</i>
DRV8825	10,45	45	2,2	1/32
A4988	7,45	35	2	1/16
DRV8880	6,95	45	1,6	1/16
DRV8834	5,95	10,8	2	1/32
A4988 Black	8,99	35	2	1/16

Fonte: <https://www.pololu.com/search/compare/120> (Acesso: 7 dezembro 2017)

Como primeiro critério de seleção os drivers com resoluções inferiores foram excluídos, restando o DRV8825 e DRV8834 com 1/32 de resolução. Apesar do DRV8834 ser quase metade do preço, ele opera em no máximo 10.8V, abaixo do necessário para controlar os motores de passo.

O DRV8825 foi eleito o mais adequado. Apesar de ser o mais caro, a diferença de preço vale sua maior resolução e garantirá mais precisão na usinagem.

6 SOFTWARE

Para a operação da fresadora CNC é necessário percorrer uma sequência de etapas computacionais, desde a modelagem até a usinagem. Este capítulo tem objetivo de descrever os softwares utilizados e as operações realizadas.

A primeira etapa é escolher um software onde será realizado a modelagem 3D das peças que serão usinadas na fresadora. O presente trabalho fez de duas formas esta etapa, uma contando com o CAD *Sketchup* e outra o *AutoCAD* com o *Inkscape*.

O *Sketchup*, da *Trimble*, é uma ferramenta gratuita e intuitiva, onde o usuário pode desenhar peças em 3D. Existe uma extensão para o *Sketchup*, chamada *SketchUCam*, que permite introduzir os parâmetros de corte da fresadora e gerar o G-code.

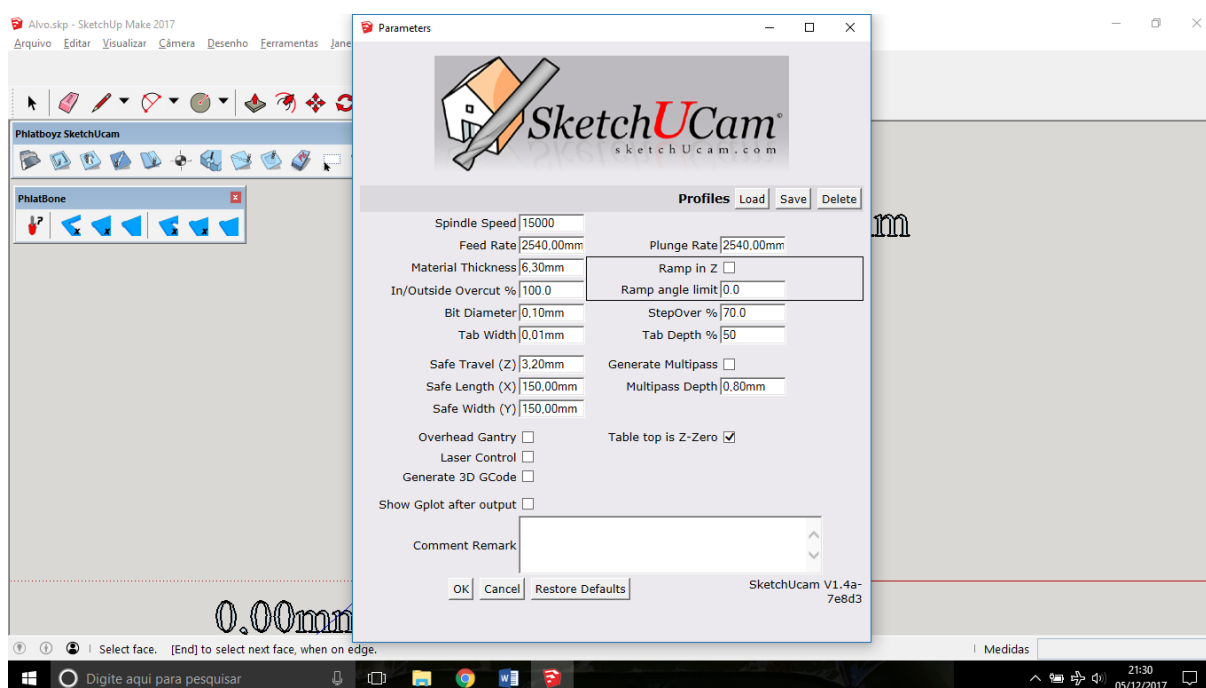


Figura 6.1 – SketchUCam
Fonte: Autor(2017)

Também é possível obter o G-code de um desenho através do site makercam.com. A plataforma virtual permite reproduzir o código através de figuras vetorizadas em extensão *svg*. A forma encontrada para usinar peças desenhadas no *AutoCAD* foi salvá-las em *dxf*, depois utilizar o *Inkscape* para converter para *svg* e gravar o G-code no makercam.com.

Sob posse do G-code, é possível avançar para a próxima etapa. Com um software controlador, responsável por fazer a comunicação com o *Grbl* (no *Arduino*), é compilado o G-code e executado os comandos na máquina. Na plataforma *GitHub* existe uma lista de

controladores gratuitos, neste projeto foi utilizado o *Universal Gcode Sender*, desenvolvido em *Java*.

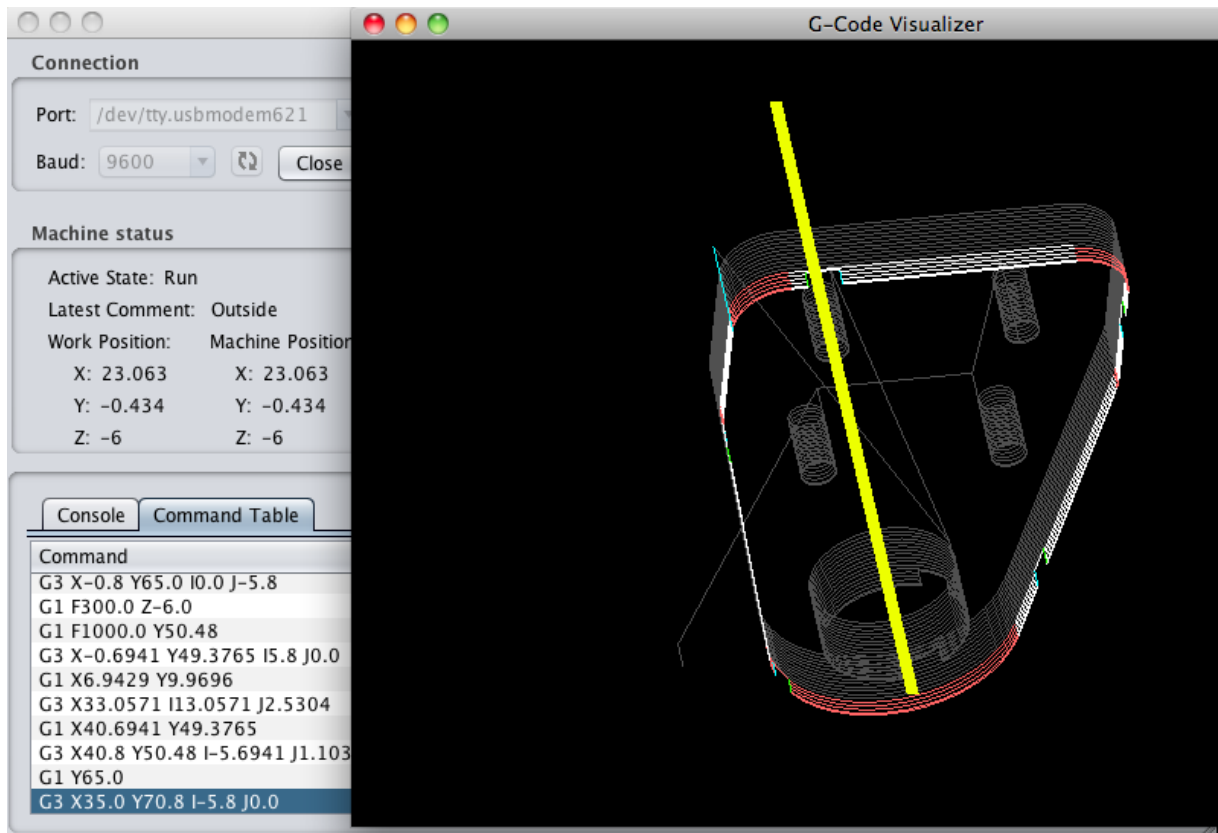


Figura 6.2 – Universal Gcode Sender
Fonte: github.com

Antes de carregar e executar um G-code no Universal Gcode Sender é necessário configurá-lo. O software já é instalado com uma configuração padrão, assim a maioria dos parâmetros não foi necessário ser alterado. O apêndice 2 apresenta os parâmetros em que a fresadora opera.

À fim de simplificação, a figura 6.3 mostra, como um esquema de blocos, a sequência de etapas para execução da usinagem.

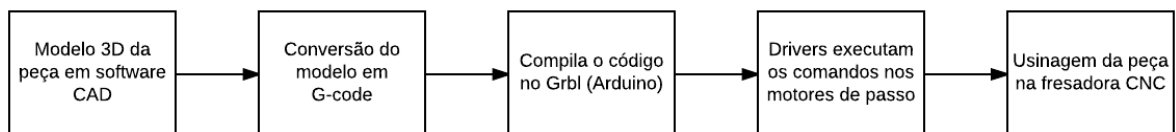


Figura 6.3 – Etapas computacionais para usinagem na fresadora
Fonte: Autor(2017)

7 RESULTADO

A versão final da fresadora CNC se mostra capaz de cumprir com os objetivos iniciais do projeto, isto é, atender a demanda de usinagem das peças da equipe *BlackBird*. A máquina tem resolução de $5\mu\text{m}$, visto que o passo da rosca é de 1mm e o motor de 200 passos por volta, com precisão de $\pm 0,25\mu\text{m}$.

Figura 7.1, duas fotografias da fresadora concluída.

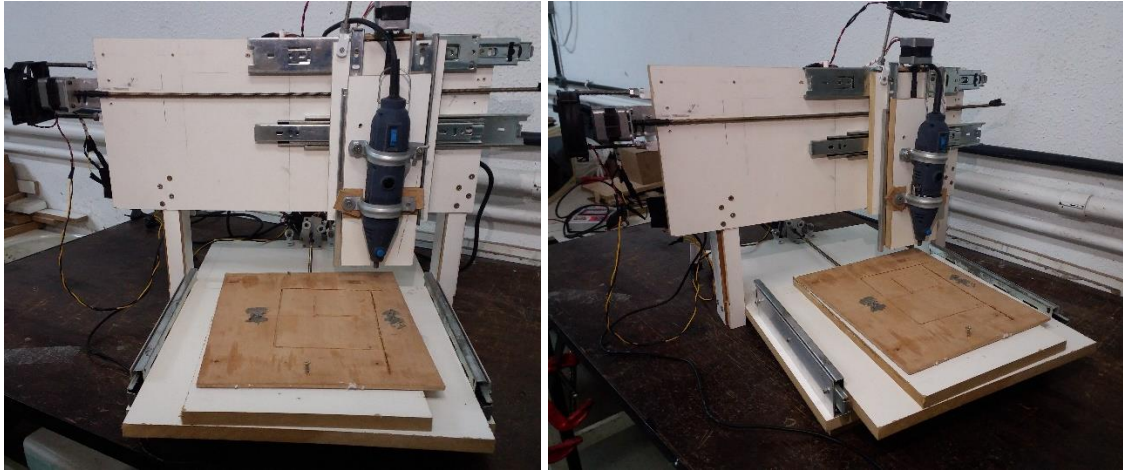


Figura 7.1 – Fresadora CNC
Fonte: Autor(2017)

Na figura 7.2 o modelo 3D do projeto, desenvolvido no software *SolidWorks*.

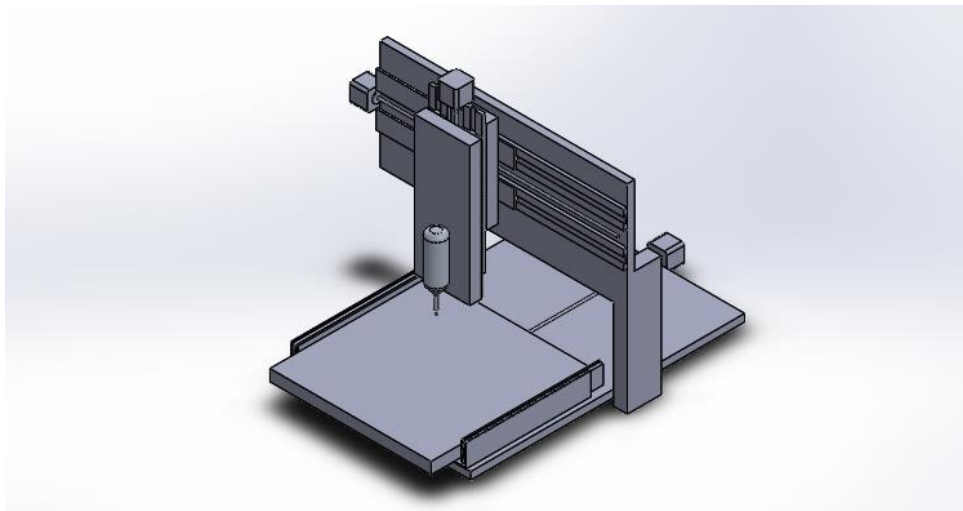


Figura 7.2 – Modelo 3D da fresadora CNC
Fonte: Autor(2017)

7.1 CUSTOS

Visto que o presente trabalho teve por objetivo construir uma fresadora CNC de baixo custo, a busca por peças, dispositivos e ferramentas mais baratas fizeram parte do principal propósito do projeto. Inclusive estando presente nos critérios de seleção dos componentes mecânicos e eletrônicos. Abaixo o custo discriminado das peças que compuseram a versão final da fresadora.

Tabela 7.1 – Custo de peças da versão definitiva

PEÇAS	CUSTO	PEÇA	CUSTO
1x Arduino	US\$10,14	2x Barra roscada M6x1	R\$5,20
1x CNC <i>Schild</i>	US\$1,46	6x Porca M6x1	R\$0,36
3x <i>Driver</i> DRV8825	US\$3,84	2x Solda plástica	R\$20,10
1x Fonte de Alimentação	R\$36,00	1x Cantoneira alumínio 1”	R\$13,87
6x Trilhos Telescópicos 300mm	R\$33,18	2x Abraçadeiras de alumínio 1”	R\$1,20
1x Micro retífica	R\$169,90	3x Motor de passo	R\$60,00
1x Cola adesivo instantâneo	R\$8,50	1x Kit fresa	US\$5,84

Fonte – Autor(2017)

O gasto com parafuso, arruela e a madeira não foram contabilizados, pois foram cedidos pela universidade. Também não foi contabilizado peças que foram compradas duplamente, com intuito de haver sobressalente e nem o gasto para construção da versão preliminar. Totalizando assim R\$418,31 para a construção da fresadora CNC deste projeto.

7.2 ENSAIO METROLÓGICO

Após a montagem da fresadora, foram realizar alguns ensaios para verificar diversos aspectos metrológicos. Com auxílio de um relógio comparador, cedido pelo Laboratório de Metrologia Dimensional e Computacional (LMDC), foi feito uma análise sobre o nivelamento do conjunto móvel no qual é fixado a peça a ser usinada.

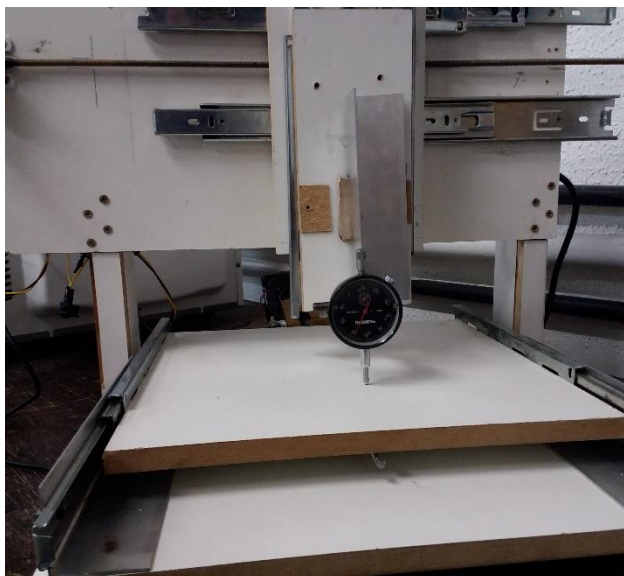


Figura 7.3 – Teste com relógio comparador
Fonte: Autor (2017)

O relógio foi fixado na bandeja do eixo Z e percorreu a área útil da fresadora com intervalos de medição de 50mm. Após a coleta de dados, todos foram subtraídos do menor valor encontrado, assim tendo como resultado final os dados em valores absolutos. Abaixo a tabela representa o espaço varrido na mesa em suas respectivas coordenadas, com erro de medição de $\pm 0,005\text{mm}$, média de 0,381mm e desvio padrão de 0,279mm.

Tabela 7.2 – Coleta de dados do teste com relógio comparador

250	0,21	0,28	0,29	0,34	0,44	0,72
200	0,16	0,18	0,22	0,29	0,46	0,70
150	0,04	0,07	0,10	0,29	0,33	0,62
100	0,01	0,05	0,12	0,23	0,35	0,62
50	0,00	0,17	0,24	0,40	0,50	0,70
0	0,46	0,51	0,66	0,83	0,98	1,15
	0	50	100	150	200	250

Fonte: Autor (2017)

Foi possível concluir que a diferença máxima no nivelamento da mesa foi de 1,15mm, um valor pequeno visto a dimensão da mesa de 250x250, porém alto quando comparado a espessura dos materiais que serão usinados. Então para que esta diferença não influencie na usinagem será inserido uma madeira de sacrifício entre a peça a ser usinada e a mesa X. Assim o garantindo que a peça será usinada por inteiro e a fresa não tocará a mesa X.

Para verificar a perpendicularidade dos eixos X e Y foi usinado um retângulo de lados 163mm e 121mm. Desta forma, respeitando o teorema de Pitágoras, a diagonal do retângulo deveria ter aproximadamente 203mm. Resultado constatado na medição das duas diagonais.



Figura 7.4 – Teste de perpendicularidade com retângulo
Fonte: Autor (2017)

Por fim é possível aferir que a fresadora possui uma precisão dimensional e tolerância metrológicas satisfatórias, deixando claro que atingiu os objetivos do trabalho.

8 TESTES EXPERIMENTAIS

Finalmente é possível realizar testes de usinagem e analisar sobre todo o trabalho realizado até aqui. A fresadora está completamente calibrada e configurada para mostrar sua função.

O primeiro teste foi a usinagem das gravuras do escudo do clube Flamengo de regatas e a mascote da equipe *BlackBird* em madeira MDF. Os resultados mostram que a sincronização dos motores está como desejado e permite gravar geometrias de qualquer complexidade. Como observado na figura 8.1.



Figura 8.1 – Primeira usinagem na fresadora CNC
Fonte: Autor (2017)

O segundo teste foi a usinagem de um perfil aerodinâmico em madeira compensado de 4mm. Na figura 8.2 é possível comparar o resultado obtido com a mesma geometria usinada um laminado de carbono de 10mm na Foco Design.



Figura 8.2 – Comparação de resultado
Fonte: Autor (2017)

Após comparação do resultado com a mesma peça usinada numa máquina industrial, foi possível constatar o êxito no projeto.

9 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O projeto teve objetivo de pôr em prática os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de engenharia mecânica com o desenvolvimento e construção de uma fresadora CNC. A demanda do projeto foi observada na necessidade da equipe de AeroDesign da universidade em usinar as peças que compõem os aeromodelos.

A fresadora CNC tem grande relevância para o laboratório, pois possibilita testes de fabricação e diminui custos com a terceirização do serviço de usinagem.

A máquina tem condição de operar com restrições, pois os trilhos telescópicos, que fazem papel de guia linear, apresentam folga que comprometem a precisão das peças. A opção que diminui a folga é o eixo cilíndrico retificado com rolamentos lineares, que podem ser adquiridos com aproximadamente R\$150.

Como sugestão para trabalhos futuros é interessante aplicar métodos de validação na usinagem, selecionar geometrias que possam ser verificadas com o desenho do CAD. Empregar metodologias para validar folgas nos conjuntos de transmissão e guias.

Sugestões de montar fresadoras mais sofisticadas, com área útil de trabalho maiores, mais graus de liberdade e construir uma impressora 3D, visto que a parte eletrônica de controles é exatamente igual à da fresadora CNC. Necessitando apenas buscar outro *software* e estudar sobre como construir a estrutura com as exigências mínimas para obter uma boa impressora 3D.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SOETERAU, Rodrigo L. “Introdução ao Projeto de Máquinas-Ferramentas Modernas”, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

CHIAVERINI, Vicente. “Tecnologia Mecânica Vol. II”, Editora McGraw-Hill, 2ª Edição, São Paulo, 1986.

QUEIROZ, Marcelo T. “Automação de Mesa Coordenada Destinada à Máquina Fresadora CNC” Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal Fluminense, 2007.

FACHIM, Alan. “Projeto de Fresadora CNC com Plataforma Livre Arduino”. Relatório (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

SILVEIRA, Ricardo C. A. “Desenvolvimento de um Equipamento Mecânico com Controle Numérico Computadorizado para Produção de Protótipos em Escala” Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

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

CUNHA, Lauro S.; CRAVENCO, Marcelo P. “Manual Prático do Mecânico”, Editora Hemus, Nova Edição, Curitiba, 2003.

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.

BRITES, Felipe G.; SANTOS, Vinicius P. A. “Motor de Passo” PETele, Universidade Federal Fluminense, 2008.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma NBR ISO 724:”Rosca métrica ISSO de uso geral – Dimensões básicas”. Rio de Janeiro, 2004. 12p.

NMB *Corporation*, Catálogo de Motores de Passo de Precisão, *Chatsworth, CA U.S.A.*

POLOLU. Robotics and Eletronics. Disponível em <https://www.pololu.com/search/compare/120>, Acesso em: 07 dez. 2017.

GITHUB. Disponível em <https://github.com/gnea/grbl/wiki>, Acesso em: 07 dez. 2017.

SANCHES, José M. “Desenvolvimento de uma Fresadora CNC de Baixo Custo para Fins Didáticos” Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de São Paulo, 2009.

POLASTRINI, Fernando H. “Desenvolvimento de uma Máquina CNC de Baixo Custo com *Softwares* e *Hardwares* Abertos” Relatório (Graduando em Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Minas Gerais, 2016.

10 - Apêndices

10.1 – Apêndice 1

Velocidade do motor	Torque do motor	Velocidade angular do motor		Potência do motor	Avanço da Mesa	
[pps]	[N*m]	[rpm]	[rad/s]	[w]	[mm/min]	[mm/s]
100	0,1625	30	3,142	0,511	30	0,5
200	0,1640	60	6,283	1,030	60	1
300	0,1760	90	9,425	1,659	90	1,5
400	0,1800	120	12,566	2,262	120	2
500	0,1750	150	15,708	2,749	150	2,5
600	0,1688	180	18,850	3,181	180	3
700	0,1655	210	21,991	3,640	210	3,5
800	0,1690	240	25,133	4,247	240	4
900	0,1700	270	28,274	4,807	270	4,5
1000	0,1750	300	31,416	5,498	300	5
Avanço por rotação da fresa		Avanço por dente		Potência Operação	Potência requerida do motor	
[mm/rot]	[10 ³ *mm/rot]	[mm/rot]	[10 ³ *mm/rot]	[cv]	[w]	
1,20E-03	1,20	2,00E-04	0,20	5,33E-04	0,516	
2,40E-03	2,40	4,00E-04	0,40	1,07E-03	1,032	
3,60E-03	3,60	6,00E-04	0,60	1,60E-03	1,548	
4,80E-03	4,80	8,00E-04	0,80	2,13E-03	2,065	
6,00E-03	6,00	1,00E-03	1,00	2,67E-03	2,581	
7,20E-03	7,20	1,20E-03	1,20	3,20E-03	3,097	
8,40E-03	8,40	1,40E-03	1,40	3,73E-03	3,613	
9,60E-03	9,60	1,60E-03	1,60	4,27E-03	4,129	
1,08E-02	10,80	1,80E-03	1,80	4,80E-03	4,645	
1,20E-02	12,00	2,00E-03	2,00	5,33E-03	5,161	

Figura 10.1 – Parâmetros de corte

Fonte: Autor (2017)

10.2 Apêndice 2

Parâmetro	Descrição
\$0=10 (step pulse, usec)	Tamanho do pulso
\$1=25 (step idle delay, msec)	Atraso da inatividade do motor
\$2=0 (step port invert mask:00000000)	Máscara de inversão do sinal
\$3=0 (dir port invert mask:00000000)	Máscara para inversão da direção
\$4=0 (step enable invert, bool)	Inverter o <i>enable</i> do controlador
\$5=0 (limit pins invert, bool)	Inverter os limites
\$6=0 (probe pin invert, bool)	Inverter o <i>probe</i>
\$10=3 (status report mask:00000011)	Relatório de status
\$11=0.020 (junction deviation, mm)	Desvio de junções
\$12=0.002 (arc tolerance, mm)	Tolerância de arco em milímetro
\$13=0 (report inches, bool)	Relatório em polegadas
\$20=0 (soft limits, bool)	Limites através do software
\$21=0 (hard limits, bool)	Limites de hardware
\$22=0 (homing cycle, bool)	Ciclo de <i>homing</i>
\$23=0 (homing dir invert mask:00000000)	Máscara para inverter a direção do <i>homing</i>
\$24=25.000 (homing feed, mm/min)	<i>Homing feed</i>
\$25=500.000 (homing seek, mm/min)	<i>Homing seek</i>
\$26=250 (homing debounce, msec)	<i>Homing debounce</i>
\$27=2147483.648 (homing pull-off, mm)	<i>Homing pull-off</i>
\$100=316.000 (x, step/mm)	Passos por milímetro
\$101=316.000 (y, step/mm)	Passos por milímetro
\$102=316.000 (z, step/mm)	Passos por milímetro
\$110=247.500 (x max rate, mm/min)	Velocidade máxima
\$111=247.500 (y max rate, mm/min)	Taxa máxima
\$112=247.500 (z max rate, mm/min)	Taxa máxima
\$120=20.000 (x accel, mm/sec^2)	Aceleração
\$121=20.000 (y accel, mm/sec^2)	Aceleração
\$122=20.000 (z accel, mm/sec^2)	Aceleração
\$130=200.000 (x max travel, mm)	Dimensão útil
\$131=200.000 (y max travel, mm)	Dimensão útil
\$132=200.000 (z max travel, mm)	Dimensão útil

Figura 10.2 – Configuração do *Universal Gcode Sender*
Fonte: Autor (2017)