

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora  
CNC Didática**

Por,  
**Pablo Vinícius Apolinário Lyra**

**Brasília, Março de 2010**



**ENGENHARIA  
MECATRÔNICA**  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

## TRABALHO DE GRADUAÇÃO

# Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática

POR,

**Pablo Vinícius Apolinário Lyra**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

### **Banca Examinadora**

Prof. Alberto José Álvares, UnB/ ENM  
(Orientador)

---

Prof. Lélío Ribeiro Soares Júnior, UnB/ ENE

---

Prof. Walter Gennari Júnior, UnB/ ENM

---

Brasília, Março de 2010

## FICHA CATALOGRÁFICA

Lyra, Pablo Vinícius Apolinário Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática , [Distrito Federal]2010.  xvii, 90p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2010). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília.Faculdade de Tecnologia.	
1.Fresadora 3.Motor de Passo	2.Comando Numérico 4.Usinagem
I. Mecatrônica/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Lyra, Pablo V. A., (2010). Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº , Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Pablo Vinícius Apolinário Lyra.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática.

GRAU: Engenheiro                      ANO: 2010

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Pablo Vinícius Apolinário Lyra  
SQS 402 Bloco L ap 208 – Asa Sul.  
70236-120 Brasília – DF – Brasil.

# AGRADECIMENTOS

Ao Deus pela oportunidade de vida.

À minha Mãe pela oportunidade de estudar em Brasília.

Ao meu Pai pelo exemplo de engenheiro.

Aos técnicos do Laboratório de Usinagem Marcão, Artur, Xavier, Wesley, Pereira, Carlos, Tarsis , Tenniel, Fernando e Marrocos pelo esforço incondicional ao meu projeto.

Ao Professor orientador Alberto J. Álvares pela paciência e convivência.

*Pablo Lyra.*

## RESUMO

O presente trabalho é parte do desenvolvimento de uma Célula Flexível de Manufatura que já dispõe de um torno CNC didático. Neste trabalho propõe-se a concepção, projeto, construção e validação de uma máquina fresadora CNC didática. A concepção é baseada nas fresadoras CNC oferecidas pelo mercado nacional. O projeto da fresadora está dividido em três frentes: projeto mecânico, projeto eletroeletrônico e projeto de controle por *software*. A primeira frente visa à escolha do material da estrutura e especificação dos elementos de máquina. O projeto eletroeletrônico consiste na escolha das fontes de energia, placas controladoras de motores de passo, sensores e motor de acionamento da ferramenta de corte. O controle por *software* visa o estudo da plataforma *EMC2 (Enhanced Machine Controller)* para controle de velocidade e direção dos motores de passo, além de uma interface gráfica para interação com o usuário. Toda a construção da máquina foi realizada no Laboratório de Usinagem na Universidade de Brasília. Para validação, vários alunos da disciplina Tecnologia em Comando Numérico desenvolveram códigos “G” e usinaram com máquina.

Palavras Chave: Fresadora, Comando Numérico, Motores de Passo, Código G.

## ABSTRACT

This work is part of the development of the flexible manufacture cell (FMC) that have a didactic lathe CNC. In this work propose the conception, the project, the construction and the validation of the machine didactic miller CNC. The conception is basead in the Millers CNC that have in market national. The project is divided in three parts: mecanic project, eletronic project and the control project. The first part is choice the material of estrutura mecanic and the specification of the machine elements. The electronic project is choice the supply power, powers drivers, sensors and the motor to tool cut. The control software is the study of EMC2(Enhanced Machine Control) for control the step motors speed and direction, besides the study a GUI (Graphic Interface). All machine construction is realized in the Manufacture Laboratory of the Brasília University. For validation, some students, control numeric, development G code and execute in the machine.

Keywords: Miller; Numeric control; Step motors; G code;

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 ASPECTOS GERAIS .....	1
1.2 OBJETIVO .....	1
1.3 INTODUÇÃO .....	1
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1 MÁQUINAS FERRAMENTAS POR COMANDO NUMÉRICO .....	3
2.2 FRESADORA POR COMANDO NUMÉRICO .....	3
2.3 CONCEITOS DE USINAGEM .....	5
2.3.1 ABORDAGEM GERAL .....	5
2.3.2 FRESAMENTO .....	7
2.3.3 GRANDEZAS FÍSICAS NO PROCESSO DE CORTE .....	8
2.4 MÁQUINAS CNC DIDÁTICAS .....	11
2.5 FUSOS, GUIAS LINEARES E ACOPLAMENTO .....	15
2.5.1 FUSO DE ESFERAS RECIRCULANTES .....	16
2.5.2 GUIAS LINEARES .....	17
2.5.3 ACOPLAMENTO .....	18
2.6 MOTORES DE PASSO .....	19
2.6.1 INTRODUÇÃO .....	19
2.6.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....	20
2.6.3 TIPOS DE MOTORES DE PASSO .....	23
2.6.4 MODOS DE ACIONAMENTO .....	25
2.7 CONTROLADORAS DE MOTORES DE PASSO .....	28
2.7.1 INTRODUÇÃO .....	28
2.7.2 TIPOS DE CONTROLADORAS DE MOTORES DE PASSO .....	29
2.8 COMUNICAÇÃO VIA PORTA PARALELA .....	32
2.9 ENHANCED MACHINE CONTROLLER(EMC2 ) .....	34
2.9.1 APRESENTAÇÃO .....	34
2.9.2 MODOS DE OPERAÇÃO .....	36
<b>3 DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>37</b>
3.1 PROJETO INFORMACIONAL .....	37
3.2 PROJETO CONCEITUAL .....	39

3.2.1 ANÁLISE MERCADOLÓGICA .....	39
3.2.2 FUNCIONAMENTO DA FRESADORA CNC DIDÁTICA.....	41
3.2.3 ESCOLHA DA ESTRUTURA .....	44
3.2.4 ESCOLHA DOS EIXOS .....	45
3.2.5 ESCOLHA DA MESA DE TRABALHO .....	45
3.2.6 ESCOLHA DO <i>SPINDLE</i> .....	46
3.2.7 ESCOLHA DOS MOTORES .....	48
3.2.8 ESCOLHA DAS CONTROLADORAS DE POTÊNCIA.....	51
3.2.9 ESCOLHA DO <i>SOFTWARE</i> DE CONTROLE .....	53
3.3 PROJETO PRELIMINAR .....	54
3.4 PROJETO DETALHADO .....	56
3.4.1 ESTRUTURA.....	56
3.4.2 MANCAIS.....	56
3.4.3 EIXOS.....	57
3.4.4 MESA DE TRABALHO.....	58
3.4.5 FIXAÇÃO DO <i>SPINDLE</i> .....	59
3.4.6 FIXAÇÃO DO MOTORE DE PASSO .....	60
3.5 FABRICAÇÃO E MONTAGEM .....	61
3.6 CONFIGURAÇÃO DOS MOTORES DE PASSO .....	64
3.7 INSTALAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO <i>EMC2</i> .....	67
3.8 TESTES REALIZADOS .....	74
3.9 ANÁLISE DE PEÇA USINADA .....	77
<b>4 CONCLUSÃO .....</b>	<b>84</b>
<b>5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>85</b>
<b>6 ANEXOS.....</b>	<b>87</b>

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Diagrama básico da fresadora .....	2
2.1	Principais elementos de máquina de uma fresadora .....	4
2.2	Diagrama do processo de fabricação .....	6
2.3	Tipos de fresamento.....	7
2.4	Mais alguns tipos de fresamento .....	7
2.5	Movimento de corte, avanço e efetivo para o torneamento .....	10
2.6	Movimento de corte, avanço e efetivo para a furação .....	10
2.7	Movimento de corte, avanço e efetivo para o fresamento discordante .....	10
2.8	Caminho helicoidal das esferas.....	12
2.9	Caminho helicoidal das esferas.....	12
2.10	Caminho helicoidal das esferas.....	12
2.11	Fuso de esferas recirculantes .....	16
2.12	Caminho helicoidal das esferas.....	16
2.13	Exemplos de guias lineares.....	17
2.14	Acoplamento <i>oldham</i> .....	18
2.15	Motor de passo (vista explodida).....	19
2.16	Fluxo magnético de um material magnetizado .....	20
2.17	Influência da corrente elétrica no campo magnético.....	21
2.18	Princípio de rotação do eixo .....	21
2.19	Funcionamento do motor de passo .....	22
2.20	Motor de passo a imã permanente .....	23
2.21	Corte de um motor de passo a relutância variável.....	23
2.22	Motor de passo híbrido.....	24
2.23	Motor de passo híbrido com 12 passos por revolução.....	25
2.24	Passo completo, uma fase ligada.....	25
2.25	Passo completo, duas fases ligadas simultaneamente.....	26
2.26	Meio passo.....	27
2.27	Corrente de fase no modo micro passo.....	27
2.28	Elementos de um <i>driver</i> de motor de passo .....	28
2.29	Controle unipolar básico.....	29
2.30	Circuito de um <i>driver</i> bipolar.....	30
2.31	<i>Driver chopper</i> com recirculação .....	30
2.32	Conector DB25.....	32
2.33	Esquema de funcionamento de DB25 no modo SPP .....	33
2.34	Simplificação do controlador de máquinas EMC2 .....	34

2.35	Interface gráfico do EMC2 no modo <i>Axis</i> .....	35
3.1	Centro de usinagem verticais <i>Discovery</i> , Indústrias ROMI .....	39
3.2	Fresadora CNC, Fobrasa Ltda .....	40
3.3	<i>Router</i> CNC, MTC Robótica .....	41
3.4	<i>Router</i> CNC, IO Robotics .....	41
3.5	Diagrama da trajetória da informação no sistema .....	42
3.6	Fresadora convencional com três eixos. ....	43
3.7	Perfil em alumínio extrudado.....	44
3.8	Mesa de trabalho, primeira opção .....	46
3.9	Mesa de trabalho, segunda opção .....	47
3.10	Projeto CAD do eixo Z.....	49
3.11	Esquema de integração entre motor, fuso e carga .....	50
3.12	Gráfico do movimento com perfil trapezoidal.....	52
3.13	Controladora SMC-B-PRO da HobbyCNC .....	53
3.14	Esquema da controladora com as conexões.....	55
3.15	Modelo inicial da Fresadora CNC Didática .....	56
3.16	Projeto CAD da estrutura da máquina .....	57
3.17	Mancal .....	57
3.18	Desenho CAD de um eixo da máquina.....	57
3.19	Desenho CAD da mesa de trabalho .....	58
3.20	Desenho CAD do sistema de fixação da retificadora.....	59
3.21	Sistema de fixação do motor de passo na estrutura .....	60
3.22	Detalhe dos elementos de união dos perfis em alumínio.....	60
3.23	Montagem do eixo.....	61
3.24	Suporte de fixação dos eixos .....	62
3.25	Resultado da fixação do motor no eixo.....	62
3.26	Resultado da mesa de trabalho.....	63
3.27	Resultado do sistema de fixação da retificadora .....	64
3.28	Dimensões do motor de passo.....	64
3.29	Motor de passo oito fios .....	65
3.30	Características do motor para qualquer umas das três ligações.....	66
3.31	Esquema de ligação dos fios do motor de passo .....	67
3.32	Primeira tela do “EMC2 Stepconf Wizard” .....	68
3.33	Segunda tela do “EMC2 Stepconf Wizard” .....	69
3.34	Terceira tela do “EMC2 Stepconf Wizard” .....	70
3.35	Esquema dos sinais de passo e direção .....	71
3.36	Quarta tela do “EMC2 Stepconf Wizard” .....	72

3.37	Quinta tela do “EMC2 Stepconf Wizard” .....	73
3.38	Foto da Fresadora CNC Didática .....	75
3.39	Peça do aluno Elias que utilizou a Fresadora CNC Didática .....	76
3.40	Peça usinada pelo aluno José Oniram .....	76
3.41	Peça usinada pelo aluno José Oniram em outra perspectiva .....	77
3.42	Esboço da peça com alguma medidas desejadas .....	78
3.43	Esboço da peça usinada com as marcações de coleta de dados.....	80
3.44	Esboço para análise da pela do aluno José Oniram.....	81

## LISTA DE TABELAS

2.1	Estruturas das máquinas CNC didáticas .....	13
2.2	Soluções de mancais das três universidades .....	13
2.3	Soluções encontradas para os eixos .....	14
2.4	Sistema de acoplamento escolhido pelas máquinas em discussão .....	14
2.5	Tipos de motores usados nas máquinas em discussão .....	14
2.6	Controladoras de potência usadas nas máquinas em discussão .....	15
2.7	Programas usados para o controle das máquinas em discussão .....	15
2.8	Endereços, registradores e funções referentes à LPT1 .....	32
2.9	Pinos, nomes dos sinais e funções do conector DB25 .....	33
3.1	Materiais disponíveis para projeto .....	38
3.2	Resumo das características das ferramentas elétricas .....	48
3.3	Medidas encontradas na peça usinada .....	78
3.4	Medidas referentes ao eixo Z .....	80
3.5	Valores dos ângulos encontrados pelo técnico em metrologia .....	82
3.6	Resumo dos Erros estatísticos encontrados na fresadora .....	83

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

°	Grau	
<i>Ac</i>	Aceleração	[rot/s <sup>2</sup> ]
<i>T</i>	Torque	[N.m]
<i>I</i>	Inércia	[kg.m <sup>2</sup> ]
<i>In</i>	polegadas	

## Subscritos

<i>m</i>	<i>mili</i>
<i>k</i>	kilo
<i>M</i>	mega
<i>μ</i>	micro

## Siglas

CNC	Comando Numérico Computadorizado
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAM	Manufatura Assistida por Computador
EMC2	Emulador de Máquinas por Computador
ABIMAQ	Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 ASPECTOS GERAIS

O “Comando Numérico” nasce na década de 50 como uma aplicação em automação de Máquinas Operatrizes de Usinagem, oferecendo à indústria o mais dinâmico processo de fabricação até aquele momento. Este processo mostrou-se eficiente às exigências do mercado. Considerando baixo custo de fabricação, pequenos lotes de produção, produtos geometricamente complexos e menores espaços de tempo entre projeto do produto e fabricação.

Mais tarde, com o acesso aos computadores foi possível integrar o “Comando Numérico” a um núcleo de processamento e interface gráfica. O que proporcionou a acessibilidade aos arquivos de programa que podiam ser facilmente alterados de acordo com a necessidade do usuário. Hoje, é impossível pensar em processos de fabricação sem considerar a tecnologia CNC (Comando Numérico Computacional). A integração entre as tecnologias CAD (*Computer Aided Design*), CAM (*Computer Aided Manufacturing*) e CNC é cada dia mais forte, contribuindo no desenvolvimento de Máquinas Operatrizes totalmente automatizadas.

## 1.2 OBJETIVO DO PROJETO

Este projeto de graduação tem como objetivo o desenvolvimento de uma fresadora CNC para fins didáticos, levando para sala de aula um ensinamento prático e motivacional aos alunos nos estudos de usinagem, manufatura, comando numérico e máquinas operatrizes.

Portanto, no projeto da máquina foi considerado a facilidade de manuseio e manutenção da fresadora CNC.

## 1.3 SISTEMA PROPOSTO

O trabalho propõe o desenvolvimento de uma máquina fresadora CNC baseada na plataforma LinuxCNC ([www.linuxcnc.org](http://www.linuxcnc.org)). Esta plataforma é de código aberto (*Open Source*) e permite a distribuição do programa de controle livremente. As placas eletrônicas de potência são configuradas para o tipo Bipolar, que nos fornece maior torque em relação às placas do tipo Unipolar. A estrutura mecânica é composta de perfil em alumínio extrudado, fusos com esferas recirculantes e guias com esferas. A figura 1.1 exibe um diagrama simplificado do projeto da máquina fresadora CNC por meio de uma abordagem *Top-Down*.

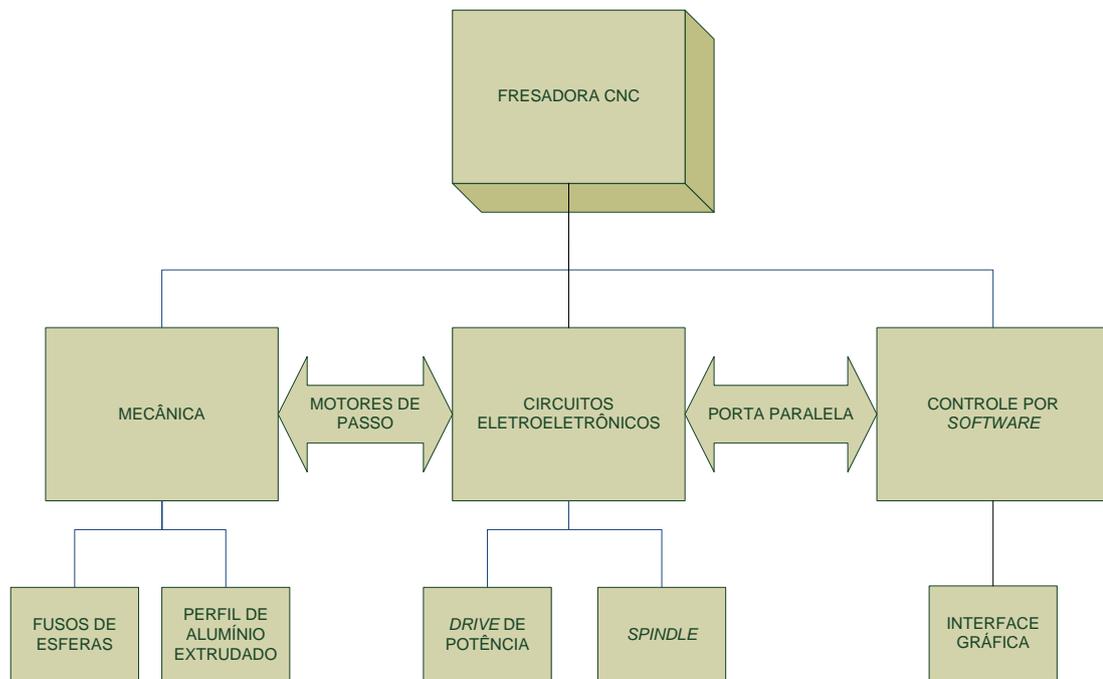


Figura 1.1- Diagrama Básico da Fresadora

Um comando em código “G” é carregado por meio da interface gráfica que solicita um movimento linear a partir de seus atributos (direção e velocidade). Por meio da porta paralela de um PC (*Personal Computer*), os sinais são enviados para o *drive* de potência que habilita o chaveamento dos transistores permitindo a rotação do eixo do motor. Um acoplamento entre o motor e o fuso de esferas recirculantes transforma a força rotacional do motor em movimento linear no eixo. Assim, o movimento solicitado por *software* é respondido em forma de movimento mecânico.

#### 1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em cinco capítulos. O capítulo 2 aborda os principais conceitos necessários para a construção da máquina. Explicitando o acionamento dos motores de passo, fusos de esferas recirculantes, usinagem, código “G”, EMC2 (*Enhanced Machine Controller 2*), entre outros.

O capítulo 3 detalha todo o desenvolvimento da máquina, é um manual passo a passo da construção da fresadora. Este capítulo está subdividido em projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, fabricação e montagem, testes realizados e análise de peça usinada.

Por fim, o capítulo 4 traz uma conclusão do trabalho e indica idéias futuras a serem implementadas.

# CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo propõe a descrição dos principais conceitos aplicados às máquinas ferramenta, analisando e destacando estes conceitos nas diversas máquinas já desenvolvidas comercialmente. Conceitos tais como comando numérico, fresadoras, usinagem, motores de passo, placas de potência para acionamento de motores, *software* de controle e etc.

## 2.1 MÁQUINAS FERRAMENTAS CNC

A máquina ferramenta é um tipo de máquina cujo propósito é a fabricação de peças de diversos materiais por meio de movimentos mecânicos de ferramentas cortantes, ou seja, ferramentas com geometria e dureza capaz de subtrair massa de materiais como aço, alumínio, plástico e etc.

Segundo [1], “uma máquina ferramenta com Comando Numérico Computadorizado – CNC é uma máquina que realiza a seqüência do seu trabalho mediante recurso programado, baseado em Comando Numérico, que são sistemas de coordenadas cartesianas para elaboração de qualquer perfil geométrico (x, y)”.

Em consequência dessas características, desenvolve-se uma máquina com grande precisão, poder de repetibilidade e o mínimo de intervenção humana para execução de um trabalho.

## 2.2 FRESADORA CNC

Fresadora é uma máquina ferramenta. Ela, junto com o torno, é capaz de transformar um material bruto em qualquer peça com alguma complexidade geométrica. Conforme a Figura 2.1, uma fresadora é basicamente formada por um motor de alta velocidade, um mandril e uma ferramenta de corte encaixada no mandril. A rotação do motor gera um movimento rotacional na ferramenta de corte, também chamada de fresa, que retira material de um tarugo. O material bruto é deslocado linearmente quando fixado a uma mesa base. A combinação da rotação da fresa e o movimento linear da mesa resulta na subtração de material do tarugo.

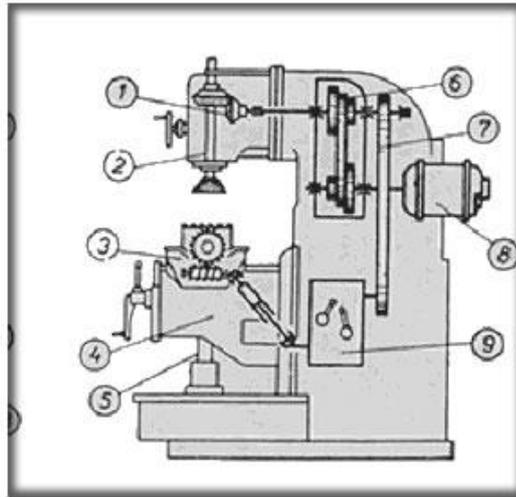


Figura 2.1: Principais elementos de máquinas da fresadora.[3]

As numerações da Figura 2.1 mostram os principais elementos mecânicos de uma fresadora convencional.

- 1.Representa o ataque do eixo principal por engrenagens cônicas
- 2.Eixo principal, no qual fixa-se o mandril e a fresa
- 3.Mecanismo de avanço da mesa
- 4.Mísula
- 5.Fuso de translação da mesa
- 6.Cone de roldanas
- 7.Corrente de transmissão para os avanços
- 8.Motor
- 9.Caixa de câmbio para avanços

Com o controle dos movimentos lineares por meio da eletrônica e da computação, pode-se automatizar uma fresadora convencional e aplicar os conceitos de Comando Numérico Computadorizado. Se uma fresadora tem seu controle por meio do Comando Numérico Computadorizado, a máquina tem o nome de Fresadora CNC. Segundo [2], “a máquina ferramenta possui a característica de poder salvar e carregar os programas NC (*numeric control*) mediante interface de comunicação, tais como: disquete, cartões de memória, cabo RS 232, e rede *ethernet*”.

## **2.3 USINAGEM**

Este tópico tem o objetivo de introduzir o conceito de usinagem. Antes de projetar qualquer máquina ferramenta é indispensável a compreensão dos conceitos de usinagem, em especial as grandezas físicas que envolvem o processo de corte.

### **2.3.1 ABORDAGEM GERAL**

A definição de usinagem pode ser descrita, segundo [3], “como operação que ao conferir à peça forma, as dimensões, o acabamento ou ainda a combinação de qualquer destes itens, produzem cavacos. E por cavaco entende-se: Porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar uma forma geométrica irregular”.

Ainda segundo [3], “a usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais, e empregando dezenas de milhões de pessoas no mundo”.

Durante vários anos a usinagem foi um processo de fabricação manual, visto que a intervenção do homem junto à máquina era constante e os resultados dos produtos usinados dependiam inteiramente da habilidade de um profissional. Os resultados de peças usinadas foram otimizados a partir da introdução de um controle de máquina automático, diminuindo o fator habilidade manual na qualidade das peças fabricadas.

Diversas máquinas foram desenvolvidas para usinagem de peças, entre as mais conhecidas e utilizadas encontram-se os tornos, fresadoras, plainas, furadeiras e retificadoras. Este conjunto de máquinas é capaz de usinar grande parte das peças desejadas atualmente com menor ou maior grau de complexidade geométrica.

Neste trabalho é adequado dar ênfase ao processo de usinagem realizada por uma fresadora, visto que o objetivo do projeto é o desenvolvimento de uma fresadora CNC didática. A Figura 2.2 resume a localização do fresamento dentro do conceito de processo de fabricação.

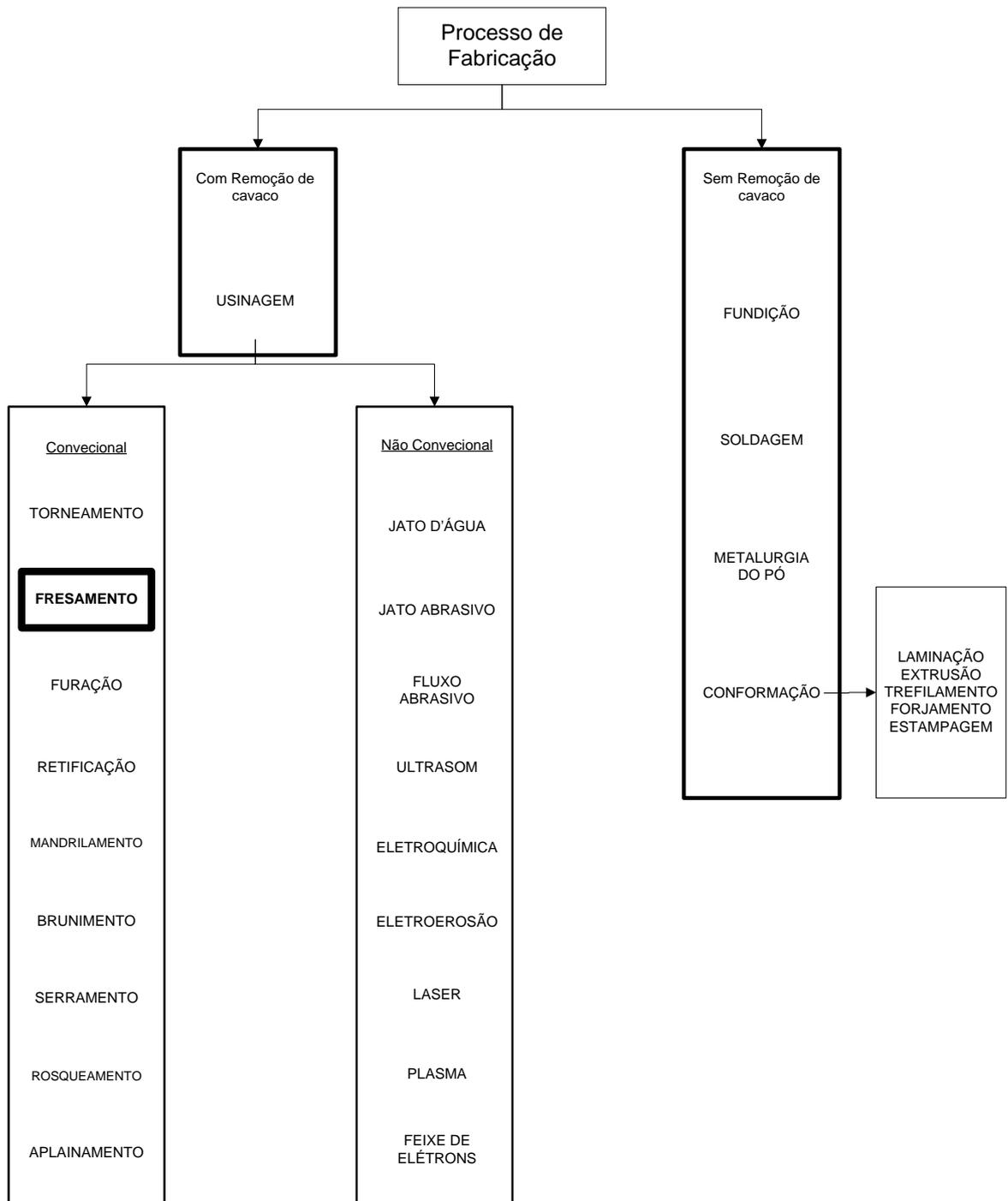


Figura 2.2: Diagrama do Processo de Fabricação

### 2.3.2 FRESAMENTO

O fresamento surge com o objetivo de retirar material de peças mediante a rotação de uma ferramenta de corte chamada fresa. O fresamento é definido como o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. A grande vantagem do fresamento é usar peças fixas a uma mesa de trabalho, diferentemente do torneamento que apenas realiza usinagem por revolução. Na verdade, a fresadora e o torno se complementam em busca de usinar peças com maiores complexidades geométricas.

O conceito de fresamento fica mais complexo se analisar os diversos tipos de fresamento, ou seja, as peculiaridades dos movimentos para realização de um desbaste ou acabamento. As inúmeras operações de fresamento podem ser explicitadas pelas Figuras 2.3 e 2.4.

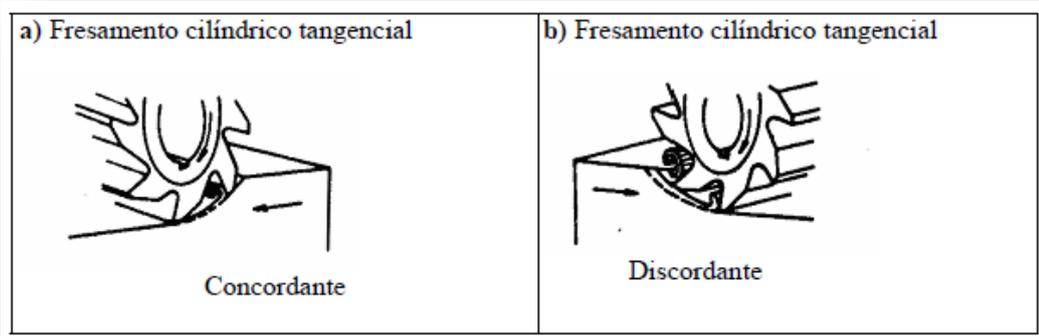


Figura 2.3 : Tipos de Fresamento.[3]

No movimento concordante o deslocamento do avanço e a rotação da ferramenta têm a mesma direção. Este movimento possui a vantagem de gerar menor desgaste na ferramenta e de produzir um acabamento melhor da superfície. Não é adequado para usinar metais trabalhados a quente, forjados ou fundidos.

O movimento discordante é também conhecido como movimento convencional e possui a vantagem de trabalhar com metais forjados ou fundidos, pois não afetam a vida da ferramenta. Em compensação a ferramenta tem tendência em trepidar e a peça de trabalho deve possuir uma fixação melhor. Isto prejudica o acabamento da superfície.

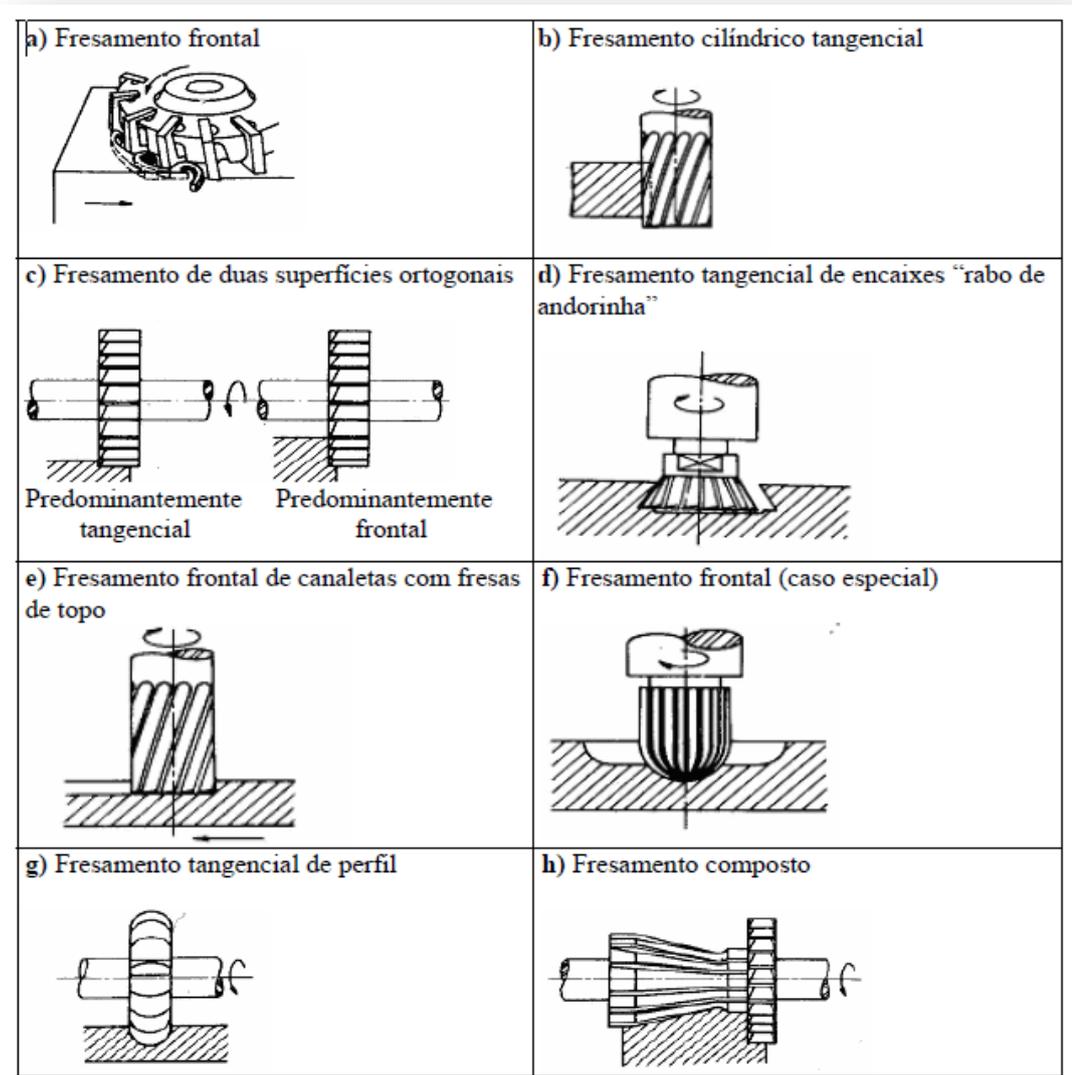


Figura 2.4: Mais alguns tipos de Fresamento.[3]

O fresamento distingue-se em dois tipos básicos, o fresamento cilíndrico tangencial e o fresamento frontal. O primeiro é destinado à obtenção de superfícies planas paralelas ao eixo de rotação da ferramenta, observado nas Figuras 2.3a e 2.3b. Ou quando a superfície obtida não for plana em relação à superfícies originada da peça, será considerado um processo especial de fresamento tangencial, observados nas Figuras 2.4g e 2.4a.

O fresamento frontal é destinado à obtenção de superfícies planas perpendiculares ao eixo de rotação da ferramenta, observados nas Figuras 2.4e e 2.4f.

### 2.3.3 GRANDEZAS FÍSICAS NO PROCESSO DE CORTE

A fim de quantificar o processo de fresamento, deve-se conhecer a interação entre a ferramenta de corte (fresa) e o material bruto a ser trabalhado. Portanto, é necessário

entender e classificar os movimentos de uma fresadora. Basicamente, podem-se dividir os movimentos em duas classificações:

1) Movimentos que causam diretamente a saída do cavaco:

Movimento de Corte: movimento entre a peça e a ferramenta, no qual sem o movimento de avanço, origina uma única retirada de cavaco;

Movimento de Avanço: movimento entre a peça e a ferramenta que juntamente com o movimento de corte origina a retirada contínua de cavaco;

Movimento Efetivo: movimento resultante dos movimentos de corte e de avanço realizado ao mesmo tempo.

2) Movimentos que não causam diretamente a saída de cavaco:

Movimento de Aproximação;

Movimento de Ajuste;

Movimento de Correção;

Movimento de Recuo:

Conhecido os movimentos, é importante conhecer as direções aplicadas aos movimentos:

Direção de Corte: direção instantânea do movimento de corte;

Direção de Avanço: direção instantânea do movimento de avanço;

Direção Efetiva do movimento de corte;

Velocidade de Corte ( $V_c$ ): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte;

Velocidade de Avanço;

Velocidade Efetiva de Corte.

As Figuras 2.5, 2.6 e 2.7 mostram os vetores de cada tipo de movimento já descrito. Para melhor exemplificar, descrevem-se os movimentos para o torneamento, furação e fresamento.

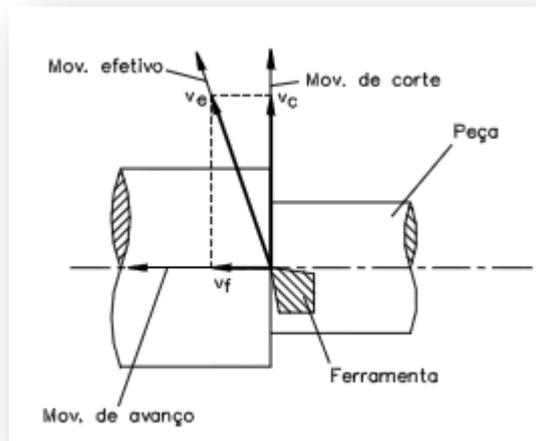


Figura 2.5: Movimento de corte, avanço e efetivo para o torneamento.[3]

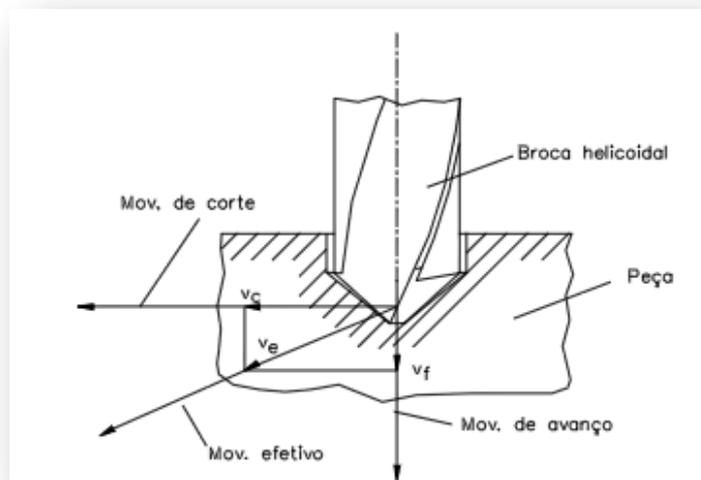


Figura 2.6: Movimento de corte, avanço e efetivo para a furação.[3]

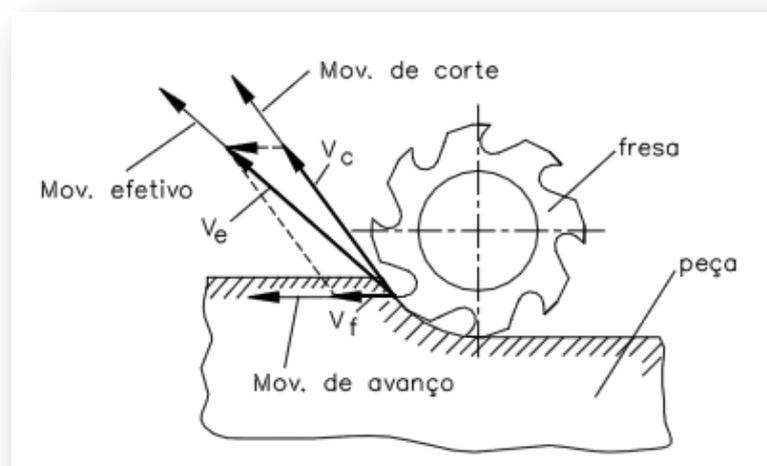


Figura 2.7: Movimento de corte, avanço e efetivo para fresamento discordante.[3]

Com o efeito de quantizar a velocidade de corte e a velocidade de avanço, estabelecem-se algumas equações que relacionam as dimensões da fresa e sua rotação. Para processos com movimento rotacional (fresamento e torneamento) a velocidade de corte é :

$$V_c = (\pi \times d \times n) \div 1000 \text{ [m/min]}$$

Onde:

$d$ : Diâmetro da ferramenta (mm)

$n$ : Número de rotações por minuto (rpm)

A velocidade de avanço pode ser encontrada pela Equação 2.2:

$$V_f = f \times n \text{ [mm/min]}$$

Onde:

$f$ : avanço é o percurso de avanço em cada volta (mm/volta)

$n$ : Número de rotações por minuto (rpm)

As Equações 2.1 e 2.2 são encontradas em tabelas fornecidas pelos fabricantes de ferramentas de corte. Por meio dessas equações otimizam-se o tempo de vida das ferramentas de corte, portanto o domínio dos conceitos acima é de extrema importância às pessoas que trabalham com usinagem.

## 2.4 MÁQUINAS CNC DIDÁTICAS

Este tópico apresenta três máquinas CNC didáticas desenvolvidas em nível acadêmico e em seguida analisa as soluções mecânicas, elétricas e de controle encontradas pelos diversos projetos.

A primeira máquina é um torno CNC desenvolvido pela Universidade de Brasília, a segunda máquina é um torno CNC projetado pela Universidade de São Paulo e a terceira é uma fresadora CNC construída pela Faculdade Assis Gurgacz (Cascavel-PR). As Figuras 2.8, 2.9 e 2.10 mostram fotos e desenho 3D das máquinas CNC.



Figura 2.8: Foto do torno CNC didático da UnB.

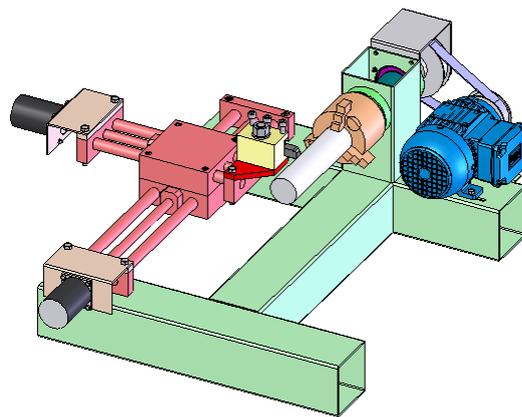


Figura 2.9: Desenho do torno CNC didático da USP.[14]



Figura 2.10: Fresadora CNC didática da FAG.[15]

Cabe, agora, analisar as soluções encontradas nos três projetos, destacando os itens comuns às máquinas CNC didáticas. Os itens que serão analisados são Estrutura, Mancais, Eixos, Acoplamento, Motores, Controladoras de potência e *software* de controle.

### **Estrutura**

A estrutura de uma máquina é definida a partir do objetivo para o qual será destinado e deve-se avaliar o material escolhido quanto à rigidez, facilidade de usinagem, facilidade de soldagem, montagem e preço. A Tabela 2.1 descreve as estruturas escolhidas por cada projeto.

	<b>Material escolhido</b>
<b>Universidade de Brasília</b>	Chapas e perfis em aço
<b>Universidade de São Paulo</b>	Tubos em aço
<b>Faculdade Assis Gurgacz</b>	Madeira

Tabela 2.1: Estruturas das máquinas CNC didáticas.

### **Mancais**

Os mancais devem oferecer uma boa base para os eixos e podem ser compradas em lojas de máquinas ou fabricadas de acordo com a necessidade. A Tabela 2.2 descreve a solução encontrada nos três projetos.

	<b>Solução para mancal</b>
<b>Universidade de Brasília</b>	Barra de aço e construção própria
<b>Universidade de São Paulo</b>	Barra de aço e construção própria
<b>Faculdade Assis Gurgacz</b>	Madeira e construção própria

Tabela 2.2: Solução de macais das três universidades.

### **Eixos**

Os eixos integram a movimentação da máquina e influenciam na precisão do movimento. A Tabela 2.3 descreve as soluções de eixos dos projetos em discussão.

	<b>Solução para cada eixo</b>
<b>Universidade de Brasília</b>	1 Fuso de esferas recirculantes e 2 guias lineares
<b>Universidade de São Paulo</b>	1 Fuso de esferas recirculantes e 2 guias lineares
<b>Faculdade Assis Gurgacz</b>	1 Fuso simples e 1 haste "guia" metálica

Tabela 2.3: Soluções encontradas para os eixos das máquinas.

### **Acoplamento**

O acoplamento é um elemento mecânico que conecta o motor ao eixo e necessita de mais atenção na escolha e montagem. A Tabela 2.4 descreve as formas de acoplar o motor ao eixo das máquinas em discussão.

	<b>Escolha dos acoplamentos</b>
<b>Universidade de Brasília</b>	Acoplamento tipo <i>Oldham</i> e construção própria
<b>Universidade de São Paulo</b>	Junta em única parte. Peça de barra cilíndrica
<b>Faculdade Assis Gurgacz</b>	Junta com articulação elástica. Três partes. Comprada

Tabela 2.4: Sistema de acoplamento escolhido pelas máquinas em discussão.

### **Motores**

Os motores são escolhidos a partir do esforço necessário para realizar o movimento desejado. A Tabela 2.5 descreve as escolhas de motores das máquinas em discussão.

	<b>Motores</b>
<b>Universidade de Brasília</b>	Motor de passo híbrido
<b>Universidade de São Paulo</b>	Motor de passo
<b>Faculdade Assis Gurgacz</b>	Motor de passo

Tabela 2.5: Tipos de motores usados nas máquinas em discussão.

### **Controladoras de potência**

As controladoras são fontes de correntes controladas e decidem qual o torque o motor oferece. A Tabela 2.6 descreve quais controladoras foram usadas nos projetos em discussão.

	<b>Controladoras de potência</b>
<b>Universidade de Brasília</b>	Controladora unipolar de construção própria
<b>Universidade de São Paulo</b>	Controladora unipolar "Jack Rabbit" comprada
<b>Faculdade Assis Gurgacz</b>	Controladora unipolar de construção própria

Tabela 2.6: Controladoras de potência usadas nas máquinas em discussão.

### **Software de controle**

O *software* de controle tem o objetivo de carregar o “Código G” e enviar os sinais para de pulso e direção às controladoras de potência. A Tabela 2.7 mostra os programas usados para os controles das máquinas em discussão.

	<b>Software de controle</b>
<b>Universidade de Brasília</b>	EMC2
<b>Universidade de São Paulo</b>	Sistema próprio em <i>Assembly</i>
<b>Faculdade Assis Gurgacz</b>	TurboCNC

Tabela 2.7: Programa usado para controle das máquinas em discussão.

Os próximos tópicos do Capítulo 2 descrevem em detalhes os itens analisados neste tópico e escolhidos para serem implementados neste projeto da fresadora CNC didática.

## **2.5 FUSOS, GUIAS LINEARES E ACOPLAMENTO**

As fresadoras CNC se destacam pela grande precisão dos movimentos de seus eixos. Geralmente, este tipo de máquina consegue deslocar um eixo em uma distância da ordem de um milésimo de milímetro. Esta impressionante capacidade de deslocamento é viável graças ao desenvolvimento de elementos mecânicos muito bem projetados e que possuem o mínimo de folga mecânica. Alguns elementos que contribuem para essa precisão são os fusos, as guias lineares e o acoplamento (junta) entre o motor e o fuso.

Neste tópico encontram-se as descrições dos três elementos: fuso, guias lineares e acoplamento.

## 2.5.1 FUSO DE ESFERAS RECIRCULANTES

Um fuso é essencialmente uma barra cilíndrica rosqueada. Um importante elemento de união, o parafuso, representa bem um fuso, porém com uma cabeça que limita o movimento de rotação do fuso. O princípio de funcionamento de um parafuso sendo rosqueado numa porca permite uma simples analogia do funcionamento dos eixos de uma máquina CNC. De fato, quando um parafuso é rosqueado surge uma conversão de movimentos. O movimento rotacional do parafuso gera um movimento de translação linear na porca.

Com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema porca parafuso, desenvolveu-se o fuso de esferas. Segundo [4], "um fuso de esfera é um mecanismo que permite converter o movimento de rotação em translação e vice e versa, um fuso de esferas é um conjunto de acionamento que possui esferas como elementos de giro. Para conseguir o movimento contínuo no fuso de esferas, é necessário ter um circuito de recirculação (ou por fora da castanha com pistas de reenvio ou por dentro da castanha com caminho também helicoidal) ou através de insertos de reposicionamento das esferas". As Figuras 2.11 e 2.12 mostram um fuso de esferas recirculantes e o circuito de recirculação.



Figura 2.11: Fuso de esferas recirculantes.[4]



Figura 2.12: Caminho helicoidal das esferas.[4]

Os fusos de esferas e as guias lineares de rolamentos foram importantes conquistas para a indústria de máquinas operatrizes. Estes elementos de máquinas trouxeram à indústria vantagens sobre os antigos fusos trapezoidais quando se compara a redução de atrito nos movimentos e deslocamentos nas máquinas. Outras inúmeras vantagens que estes elementos de máquinas possuem são:

- Duração de vida mais longa (menor desgaste)
- Menor potência de acionamento
- Redução de atrito
- Simplificação construtiva
- Posicionamento mais preciso
- Maior velocidade de translação
- Menor aquecimento

Um fator relevante é a simplificação construtiva. Hoje, encontramos no mercado centenas de módulos prontos para diversos tipos de máquinas e aplicações, facilitando projetos, simplificando montagens e garantindo um menor custo.

## 2.5.2 GUIAS LINEARES

As guias lineares são elementos de máquinas que junto ao fuso de esferas possibilita um movimento alinhado e suave nos eixos de uma máquina CNC. Segundo [4], “a partir dos anos 80 os principais fabricantes de máquinas começaram a empregar as guias lineares em lugar dos barramentos tradicionais, pois elas possuem alta precisão, excelente rigidez e deslocamentos mais suaves”. A Figura 2.13 mostra alguns exemplos de guias lineares:



Figura 2.13: Exemplos de guias lineares.[4]

Os fusos de esferas e as guias lineares devem trabalhar juntos em perfeito alinhamento. Deve ser analisado o tipo de movimento (vertical, horizontal ou inclinado) e considerar a influência das cargas e das forças afim de otimizar a vida útil do elemento de máquina. Segundo [4], os fusos devem receber apenas cargas axiais, não radiais, já as guias lineares permitem a ação de forças e momentos de direções diferentes, no entanto, todas as cargas precisam ser consideradas na hora da seleção do componente.

### 2.5.3 ACOPLAMENTO

Segundo [5], “seria ineficaz considerarmos em um projeto um motor de passo ou um servo motor de alta precisão, se os componentes ligados a eles como: acoplamentos, redutores, posicionadores, fusos de esferas, guias lineares e etc., não conseguissem manter no sistema o nível de precisão e “repetibilidade” tão almejados”.

A necessidade de transmitir a precisão dos motores de passo ou servo motores aos componentes mecânicos levou a Indústria de Automação a desenvolver acoplamentos sem folgas. O acoplamento é um elemento de máquina que liga o eixo do motor ao eixo de uma máquina ou estrutura. As principais funções são compensar os desalinhamentos, não forçar os rolamentos dos motores ou mancais e evitar a transmissão de vibrações ou cargas a equipamentos delicados.

Existem vários modelos de acoplamentos. Cada um com suas vantagens e desvantagens. Um modelo que se destaca para usos em mesas posicionadoras com motores de passo é o *OLDHAM*. Este acoplamento é composto por três partes, sendo que a peça intermediária e flutuante é um acetal, além de dois cubos de alumínio, que interagem aos eixos de entrada e saída de torque. Os dois cubos possuem canais defasados em 90 graus, nos quais a parte do meio se acomoda e desliza para absorver o desalinhamento sem causar folgas. A Figura 2.14 mostra com detalhes o acoplamento *oldham* e suas partes.



Figura 2.14: Acoplamento *Oldham*. [5]

O modelo da Figura 2.14 em particular é composto por duas peças em alumínio e uma peça em *teflon*. Este modelo possui um isolamento elétrico, agindo como um fusível mecânico, com a ruptura do *teflon* em altos torques.

## 2.6 MOTORES DE PASSO

Como pode ser visto do tópico 2.5 deste capítulo, os motores de passo são vastamente usados nas máquinas CNC didáticas, porém é possível utilizar servomotores. A principal vantagem no uso de motores de passo nesse tipo de projeto é o fato do motor trabalhar em malha aberta, visto que facilita o controle do motor. Portanto, fica a cargo deste tópico detalhar o funcionamento de um motor de passo.

### 2.6.1 INTRODUÇÃO

Segundo [7], “um motor de passo é um transdutor de características eletromecânicas que permite a conversão de energia e de informação em movimento. Sua alimentação é elétrica digital, ou impulsional, e seu movimento rotacional é incremental”. Para [6], “o motor de passo é um dispositivo muito usado em robótica para a movimentação de robôs e de outros dispositivos mecatrônicos”. O motor de passo se caracteriza pela capacidade de gerar força e velocidade através de sinais elétricos adicionados em suas bobinas. A Figura 2.15 mostra um motor de passo.

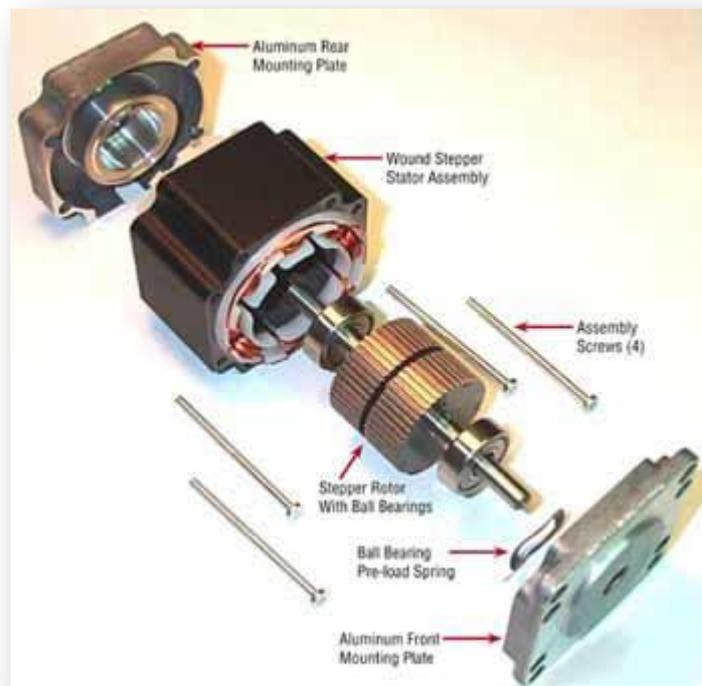


Figura 2.15: Motor de passo (vista explodida). [17]

A fim de fornecer uma fina conversão da informação, o motor de passo deve possuir características síncronas, isto é, a todo impulso na alimentação deve corresponder um avanço elementar, constante, dito passo. A sucessão de impulsos a uma determinada frequência, permite impor uma velocidade de movimento praticamente constante. Em função destas características o motor de passo assegura um controle de posição e velocidade sem a introdução de erros acumulativos e isto, somado à simplicidade, precisão e durabilidade, faz com que ele seja largamente utilizado em aplicações como:

- Impressoras;
- Posicionadores XYZ;
- Registradores;
- Posicionadores de antenas;
- Braços articulados;
- Microscópios;
- Sistemas de foco e auto foco.

## 2.6.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento de um motor elétrico é explicado pelos fenômenos do magnetismo. Os conceitos de atração e repulsão entre pólos magnéticos e a ação dos campos magnéticos sobre as correntes elétricas formam a base para compreender em profundidade o funcionamento de qualquer tipo de motor elétrico. A Figura 2.16 mostra um conceito básico sobre ímãs. Em um material permanentemente magnetizado, o fluxo magnético sai do pólo norte e vai para o pólo sul.

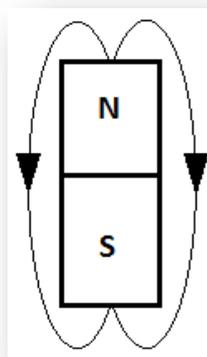


Figura 2.16: Fluxo magnético de um material magnetizado.

Segundo [7], “esta propriedade bipolar pode ser induzida pela corrente  $I$  através de uma bobina, cujos enrolamentos envolvem uma barra de material ferromagnético” (Figura 2.17).

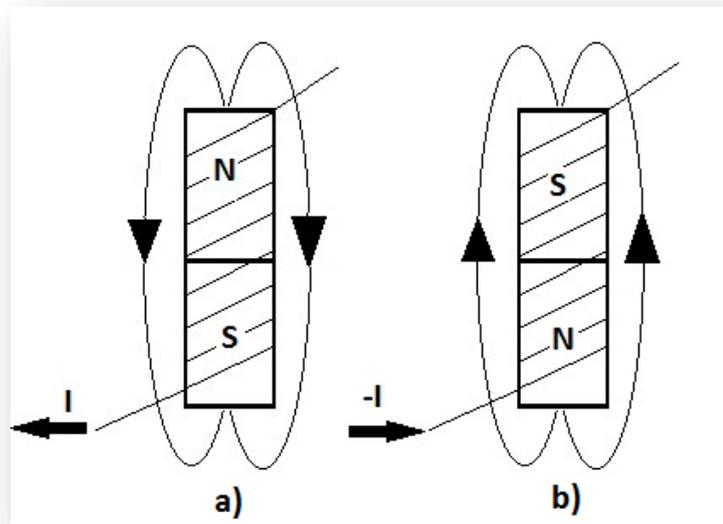


Figura 2.17: Influência da corrente elétrica no campo magnético; a) Campo eletromagnético gerado pela corrente  $I$ ; b) Inversão do campo magnético por meio da inversão da corrente.

A inversão da polaridade é concretizada por meio da simples inversão do sentido da corrente. Aproximando ainda mais os conceitos já mostrados com um motor real, pode-se considerar um eixo (rotor), uma carcaça (estator) e suas interações. A Figura 2.18 apresenta o movimento do rotor por meio das forças magnéticas desenvolvidas entre os pólos magnéticos do rotor e do estator.

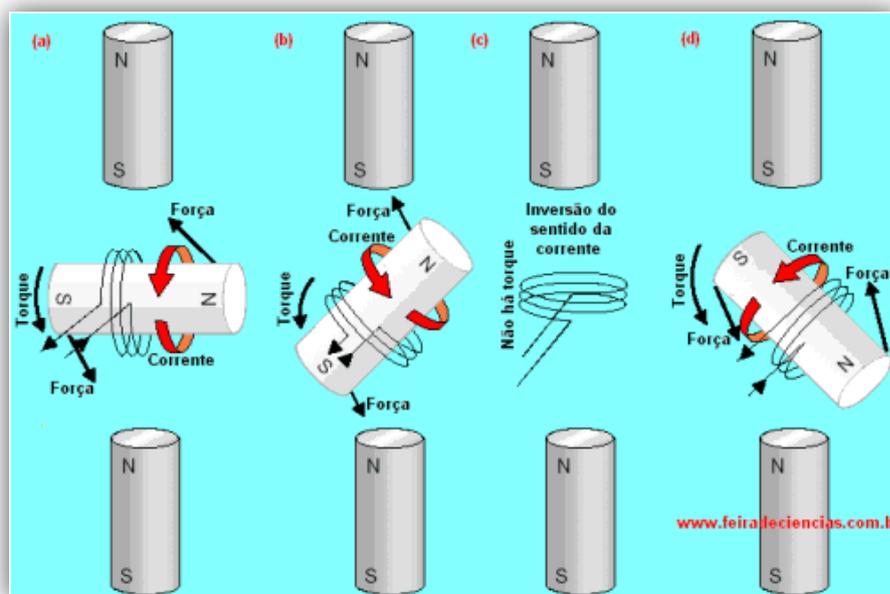


Figura 2.18: Princípio de rotação do eixo. a) Os pólos magnéticos da bobina são atraídos pelos pólos dos ímãs; b) A bobina gira para aproximar os pólos opostos; c) Quando

se aproxima da posição desejada, inverte-se o sentido da corrente; d) Os pólos, agora, repelem-se e continuam a impulsionar o eixo.[16]

A Figura 2.18 esquematiza um motor simples onde os ímãs permanentes representam um estator e o rotor é uma bobina de fio de cobre por onde circula uma corrente elétrica. Esta corrente produz campos magnéticos e faz a bobina se comportar como um ímã permanente. Uma vez que a corrente é controlada as atrações e repulsões fazem o rotor girar.

No caso de um motor de passo, podem-se usar os princípios do magnetismo para construir um motor que não gira continuamente e sim em etapas, ou seja, discretamente. A Figura 2.19 esquematiza o princípio de funcionamento do motor de passo.

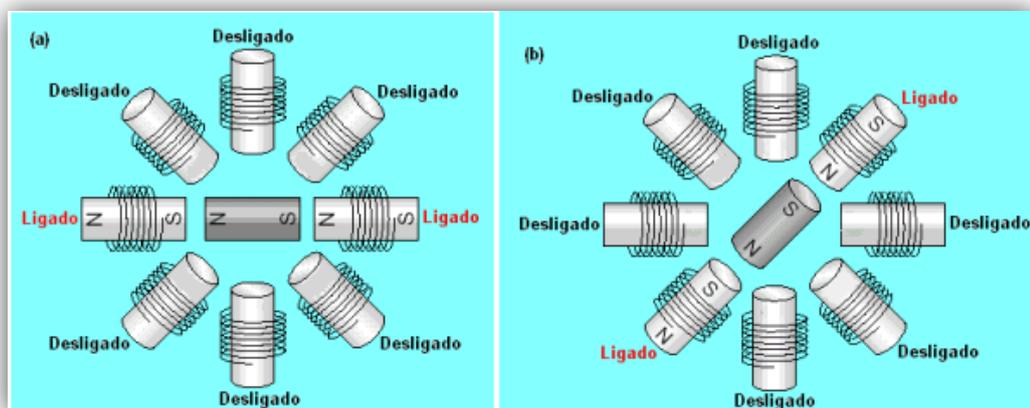


Figura 2.19: Funcionamento do motor de passo: a) O rotor é atraído por um par de pólos do estator; b) Desliga-se os pólos anteriores e novos pólos ligados.[16]

O rotor se movimenta discretamente, pausando em cada orientação, até que um novo comando ative outros eletroímãs. Estes eletroímãs são ligados/desligados numa sequência de modo que o rotor de movimento de um eletroímã para outro.

### 2.6.3 TIPOS DE MOTORES DE PASSO

Segundo [7], “dependendo das características construtivas, os motores de passo podem ser classificados em três tipos: a ímã permanente, a relutância variável ou híbrido”.

#### Motor de Passo a ímã permanente

Para [7], “a principal característica destes motores é o fato do rotor ser constituído de um material permanentemente magnetizado. Motores deste tipo possuem baixo custo, baixo torque e baixa velocidade”. São ideais para uso em periféricos de informática. Devido a sua característica construtiva, o motor resulta em ângulos de passos relativamente grandes,

porém seu controle é mais fácil de ser implementado. A Figura 2.20 esquematiza um motor de passo a imã permanente.

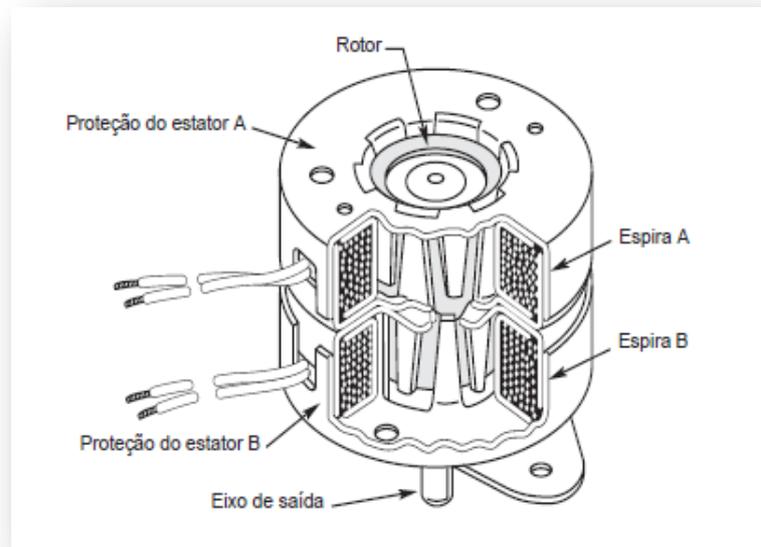


Figura 2.20: Motor de passo a imã permanente.[8]

### **Motor de passo a relutância variável**

Segundo [7], “ao contrário dos motores de imã permanente, cujo rotor é constituído de material permanentemente magnetizado e não é ranhurado, os motores de passo a relutância variável possuem o rotor e o estator constituídos de material ferromagnético e ambos ranhurados”. Por não possuir magneto permanente, o rotor gira livremente sem torque de retenção. Este tipo de motor é usado frequentemente em aplicações como mesas de micro posicionamento. A Figura 2.21 mostra o corte de um motor de passo a relutância variável.

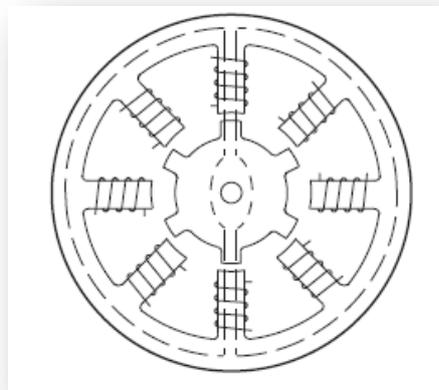


Figura 2.21: Corte de um motor de passo a relutância variável.[8]

### Motor de passo híbrido

Para [7], “os motores de passo híbridos combinam as características dos motores de passo de ímã permanente (rotor permanentemente magnetizado) e de relutância variável (rotor e estator providos de pólos salientes)”.

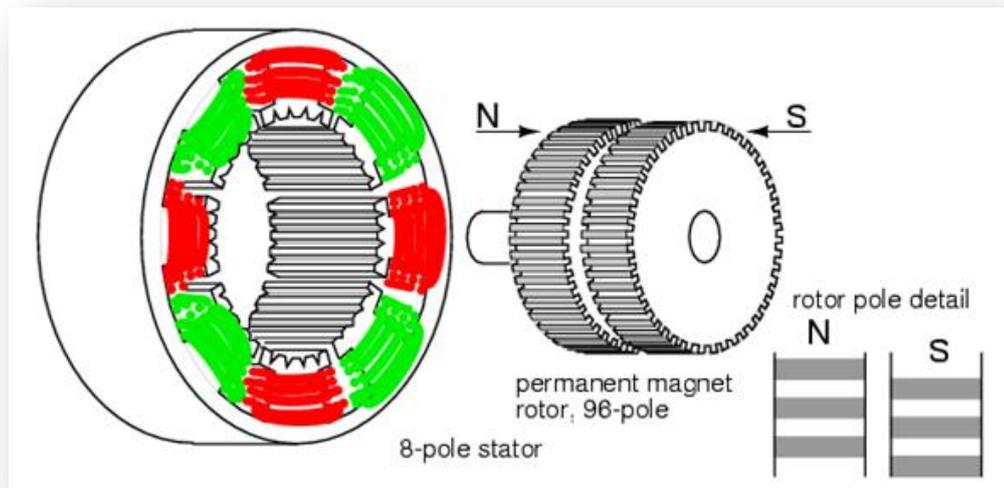


Figura 2.22: Motor de passo híbrido. [7]

### 2.6.4 MODOS DE ACIONAMENTO

Os motores de passo possuem três formas de acionamentos, passo completo (*full step*), meio passo (*half step*) e micro passo (*micro step*). Estes métodos variam de acordo com a sequência de comandos enviados da controladora para o motor. Basicamente, as seqüências permitem energizar uma combinação de pólos que leva ao modo de acionamento desejado.

O motor híbrido da Figura 2.23 mostra um modelo muito simples que produzirá 12 passos por revolução.

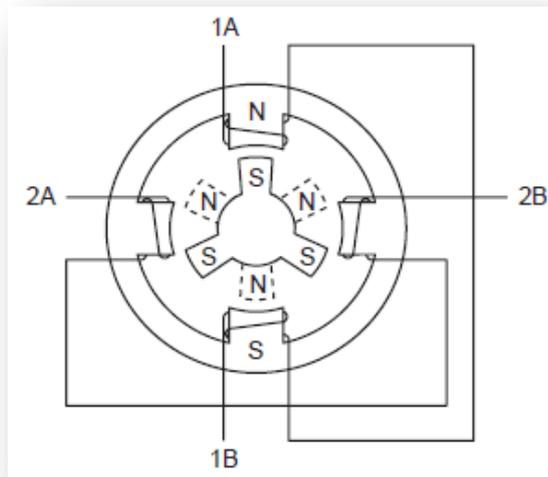


Figura 2.23: Motor híbrido com 12 passos por revolução.[8]

O rotor é composto por duas partes com três dentes em cada parte. As duas partes são ligadas por um magneto permanente, isto gera um pólo sul numa extremidade e um pólo norte em outra. O estator é composto de uma carcaça com quatro dentes e bobinas são enroladas em cada dente formando pares. Caso não exista energia nas bobinas, o rotor tenderá a repousar em uma posição inicial, visto que a carcaça é de material ferroso e o rotor é magneto permanente.

Caso energize um par de espiras do estator, como pode ser visto na Figura 2.24a, os pólos norte e sul atrairão os dentes de polaridades opostas em cada extremidade do rotor. Um dos três dentes do rotor posiciona o mais próximo possível do pólo norte.

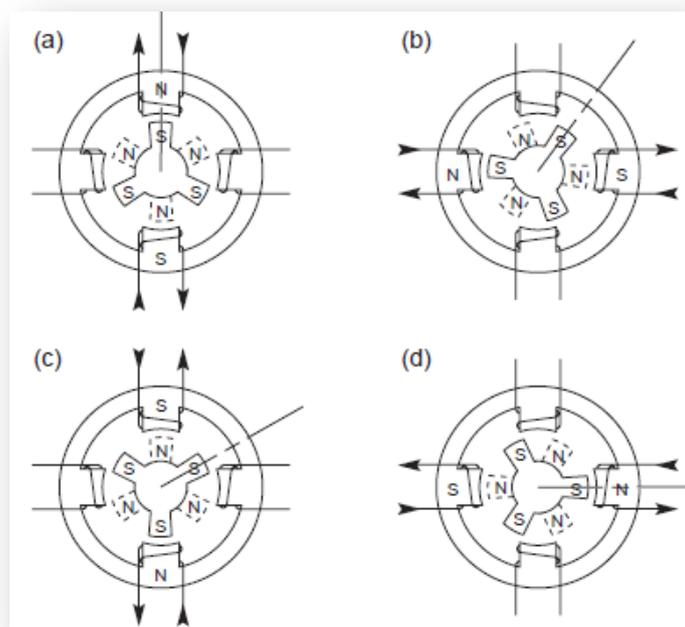


Figura 2.24: Passo completo, uma fase ligada.[8]

Mudando o fluxo da corrente elétrica para os próximos pares de espiras do estator (Figura 2.24b), o campo magnético do estator rotaciona 90° e atrai um novo dente do rotor. Isso faz o rotor girar 30°, que corresponde a um passo completo (*full step*). Revertendo as polaridades do primeiro conjunto de espiras do estator, o rotor realiza mais um passo completo (Figura 2.24c). E por fim, invertendo as polaridades do segundo conjunto de espiras do estator, o rotor realiza mais 30° (Figura 2.24d). Portanto, retorna-se a mesma situação (Figura 2.24a) e seguindo a sequência de acionamentos o motor realiza uma volta em 12 passos. Caso inverta os sentidos das correntes, o motor gira no sentido oposto.

A Figura 2.25 esquematiza o movimento do rotor em passo completo com dois conjuntos de bobinas energizadas. Esta condição implica uma ligação bipolar, (Figura 2.26).

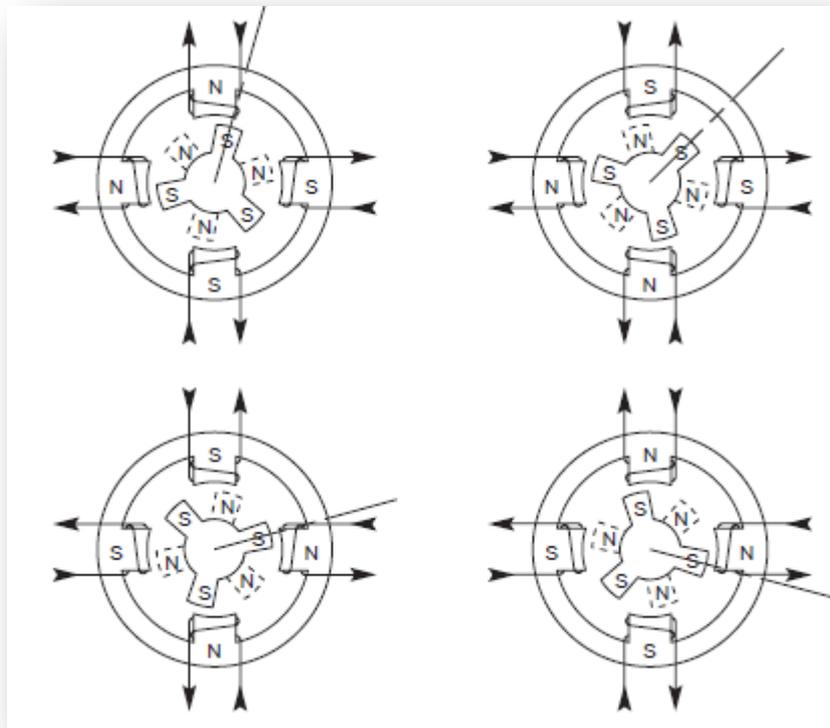


Figura 2.25: Passo completo, duas fase ligadas simultaneamente.[8]

Segundo [8], esta condição produz um torque maior, pois todos os pólos do estator estão influenciando o motor.

O conceito de meio passo (*half step*) é esquematizado pela Figura 2.26. Segundo [7], energizando-se alternadamente uma e depois duas espiras do estator, o rotor se movimenta por apenas 15° em cada estágio, e o número de passos por revolução será dobrado.

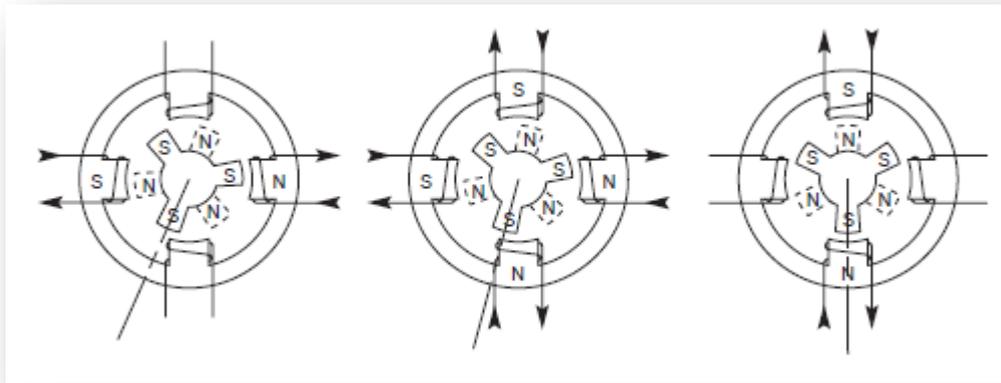


Figura 2.26: Meio passo.[8]

Este modo resulta em suavidade muito melhor em baixas velocidades, além de menos sobrepasso ao final de cada passo.

O modo micro passo é mais complicado de se explicar em duas dimensões, mas está baseado na desigualdade de intensidade entre as correntes elétricas que ativam as bobinas do estator. A posição do rotor será deslocada em direção ao pólo mais forte. Esta forma diminui o tamanho do passo e suaviza o movimento em baixas velocidades. Segundo [parker], nesta situação, o padrão de correntes nas espiras é muito semelhantes a ondas senoidais com um deslocamento de fase de  $90^\circ$  entre elas. A Figura 2.27 mostra a intensidade da corrente para energizar as bobinas.

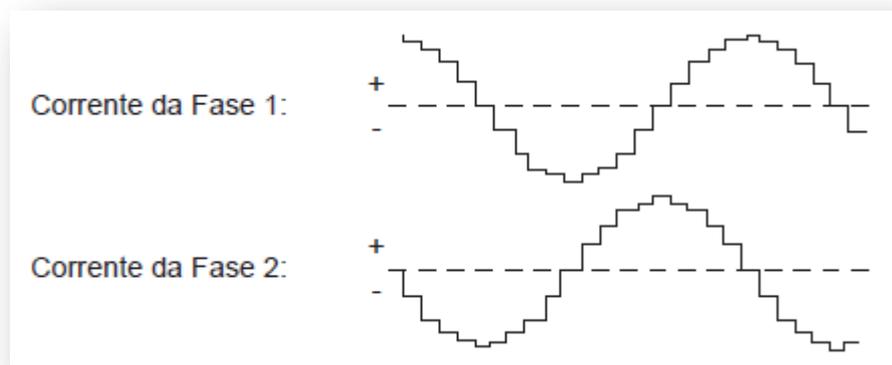


Figura 2.27: Correntes de fase no modo micro passo.[8]

O motor de passo está sendo acionado de forma semelhante ao acionamento de uma motor síncrono CA convencional.

## 2.7 CONTROLADORAS DE MOTORES DE PASSO

### 2.7.1 INTRODUÇÃO

As controladoras, também conhecida por *drive*, são o dispositivo eletrônico que interliga a máquina CNC às instruções das estratégias da usinagem. Segundo [6], “estas interfaces se apresentam, geralmente, na forma de circuitos eletrônicos (placas de acionamento). O grau de complexidade destes circuitos varia na exata medida com que variam as características das máquinas a serem controladas por tais circuitos”. Para [8], “o *drive* para motor de passo fornece energia elétrica ao motor em respostas a sinais de baixa tensão do sistema de controle”. Portanto, a controladora nada mais é que uma fonte de corrente. A Figura 2.28 esquematiza as entradas e saídas dos sinais de um *drive*.

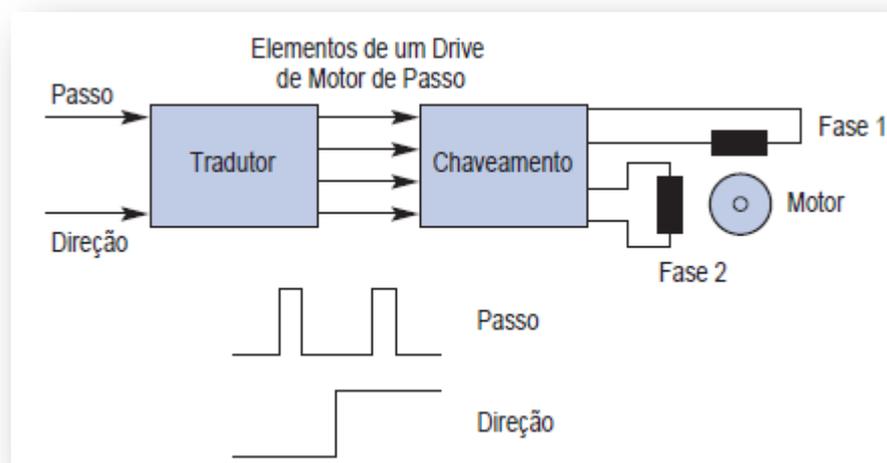


Figura 2.28: Elementos de um *drive* de motor de passo.[8]

A entrada de um *drive* é um trem de pulsos digitais e um sinal de direção. A cada pulso refere-se a um passo, seja o dispositivo configurado para passo completo, meio passo ou micro passo. Portanto, o *drive* pode exigir entre 200 e 100 000 pulsos para uma única rotação do rotor. Supondo uma velocidade de 3200 rpm, exige-se para meio passo, uma frequência de pulsos da ordem de 20 kHz.

### 2.7.2 TIPOS DE CONTROLADORAS DE MOTORES DE PASSO

As controladoras são desenvolvidas de acordo com as necessidades da aplicação do motor de passo. Já foi visto do item 2.6 (motores de passo) que os motores são divididos em motores de passo com ímã permanente, relutância variável e híbrido. Cada tipo destinado aos seus requisitos de torque, velocidade, precisão e custo. Assim, para garantir que os requisitos sejam respeitados, existem controladoras unipolares e bipolares.

## Controladora Unipolar

O *drive* unipolar é o arranjo mais simples de estágio de potência para alimentar o motor de passo. Sua principal característica está relacionada à corrente elétrica que flui em uma direção através de um único terminal do motor. A Figura 2.29 esquematiza um circuito simples de controle unipolar.

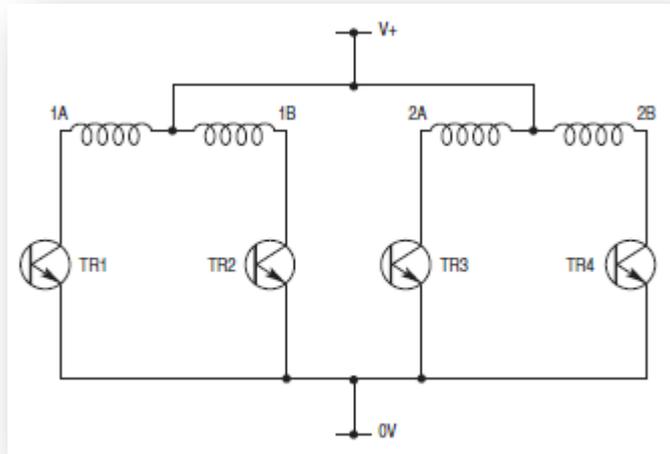


Figura 2.29: Controle unipolar básico.[8]

No caso deste simples *drive*, a corrente elétrica para polarização das bobinas é determinada apenas pela resistência da bobina e pela tensão elétrica aplicada. Portanto, este circuito funciona bem para baixas velocidades, pois à medida que a velocidade aumenta o torque cai rapidamente devido à indutância do enrolamento.

## Controladora Bipolar

Com o objetivo de aumentar o desempenho e a eficiência, usa-se uma controladora bipolar. Este *drive* permite controlar os sentidos da corrente elétrica em cada bobina do estator, portanto pode-se energizar várias bobinas simultaneamente. Esta condição proporciona ao motor um torque relativamente maior em relação às controladoras unipolares. O arranjo padrão de um *drive* bipolar é esquematizado na Figura 2.27.

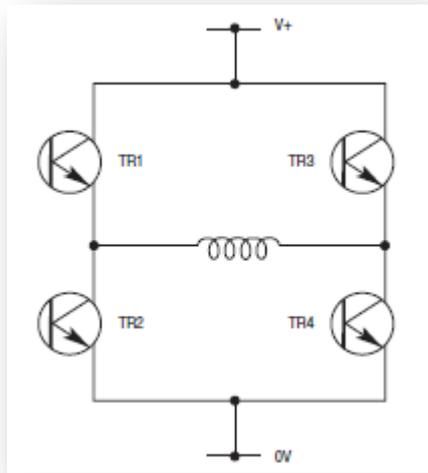


Figura 2.30: Circuito de um *drive* bipolar.[8]

Embora o circuito use dois pares de transistores comutadores, não exige-se alimentação simétrica como era de esperar para o controle do sentido da corrente elétrica. Um método de controle mais eficiente é aplicado no circuito da Figura 2.30 por meio da estratégia de recirculação ou *chopper* de três estados. Este método é baseado na ponte de quatro transistores com diodos de recirculação e um resistor. A Figura 2.31 mostra o circuito de uma controladora *chopper*.

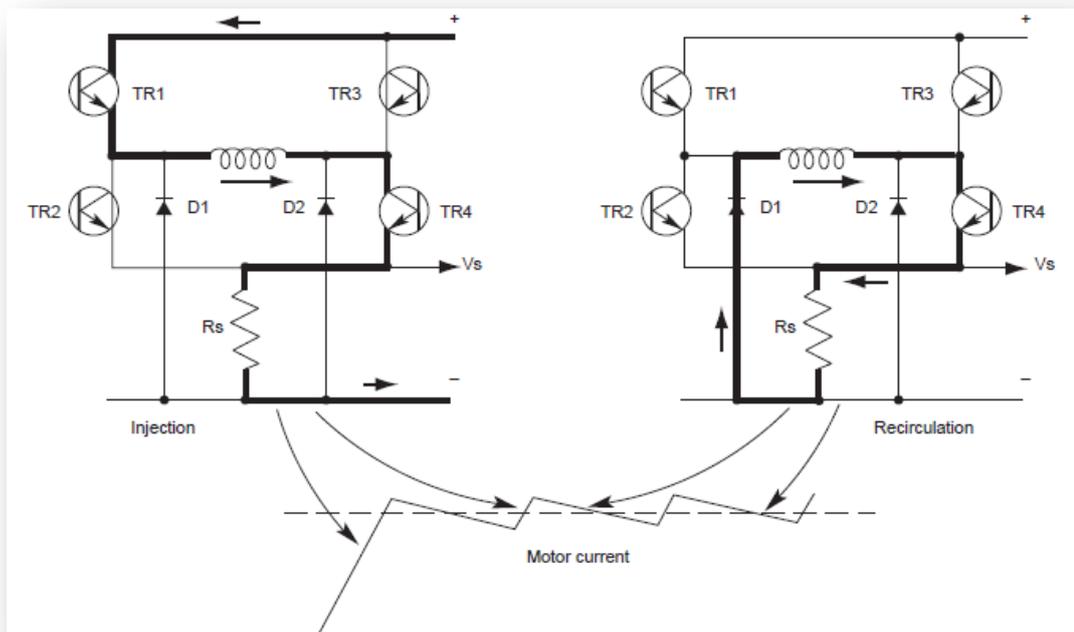


Figura 2.31: *Drive Chopper* com recirculação.[8]

O circuito mostra que a corrente é introduzida no enrolamento se for acionado um transistor superior e outro inferior, o par de transistores complementar altera o sentido da corrente. A corrente aumentará linearmente e pode ser monitorada pelo resistor (Rs). Quando a tensão nominal do motor for atingida o transistor superior é desligado e a energia armazenada na bobina mantém a corrente circulando pelo diodo e o transistor inferior. Aos poucos a corrente vai diminuindo de intensidade até atingir um limiar pré estabelecido, o transistor superior volta a ser religado e alimenta a bobina novamente, repetindo o ciclo. O mais importante é que a corrente é mantida no valor médio necessário ao funcionamento adequado do motor devido a comutação dos transistores.

Segundo [8], “quando um controle de corrente mais apurado for necessário, como no caso de um motor de micro passo, a modulação por largura de pulso (PWM) é utilizada”. O controle por *chopper* é muito eficiente porque muito pouca energia dissipada nos transistores de comutação quando não estão no estado de comutação transiente.

## 2.8 COMUNICAÇÃO VIA PORTA PARALELA

A porta paralela é uma interface de comunicação entre um computador e um periférico. Ela é usada desde o início da produção dos PCs e se mantém praticamente inalterada durante todo esse tempo. A porta paralela foi projetada pela IBM para conectar os PCs a uma impressora, portanto deveria ser compatível com as conexões utilizadas pela maior fabricante de impressoras da época, a Centronics. Porém, a fabricante utilizava 36 pinos para comunicação e a IBM resolveu fazer o mesmo controle da impressora com apenas 25 pinos. Assim, a porta paralela é conhecida como DB-25.

Existem dois modelos de porta paralelas, transmissão unidirecional e transmissão bidirecional. O primeiro é conhecido como SPP (*Standard Parallel Port*) e possui uma taxa de transmissão de dados de até 150Kb/s. Para as transmissões de dados são usado 4 bits por vez. O modelo bidirecional, chamado de EPP (*Enhanced Parallel Port*) possui uma taxa de transmissão de dados de até 2Mb/s. Porém, esta velocidade só é atingida com o uso de cabos especiais. O EPP usa 8 bits por vez nas transmissões de dados. Segundo [12], a extensão de um cabo para interligar um computador a um periférico, é de no máximo 8 m. Nos PCs, as portas paralelas são conhecidas como LPT1, LPT2, LPT3 e etc, porém a porta padrão é a LPT1. No caso da porta LPT1, sabe-se que o endereço de memória para acesso à porta vale 378h, 379h e 37Ah. A Tabela 2.8 resume os endereços, os registradores e sua função.

NOME	ENDEREÇO	DESCRIÇÃO
<b>Registro de dados</b>	378h	Envia um <i>byte</i> para impressora
<b>Registro de status</b>	379h	Ler o <i>status</i> da impressora
<b>Registro de controle</b>	37Ah	Envia dados de controle para a impressora

Tabela 2.8: Endereços, registradores e funções referentes à LPT1.

Um conector DB25 normalmente se localiza atrás do gabinete do PC e por meio dele conecta-se um cabo que interliga o computador ao periférico. Neste conector existem 25 entradas e saídas de sinais TTL, o que significa que um pino está no nível lógico 0 quando a tensão elétrica do mesmo tem valores entre 0V e 0.8V ou um pino se encontra no nível lógico 1 quando a tensão elétrica vale entre 3.1V e 5V. A Figura 2.32 mostra o conector padrão DB25 onde identifica o nome de cada pino.

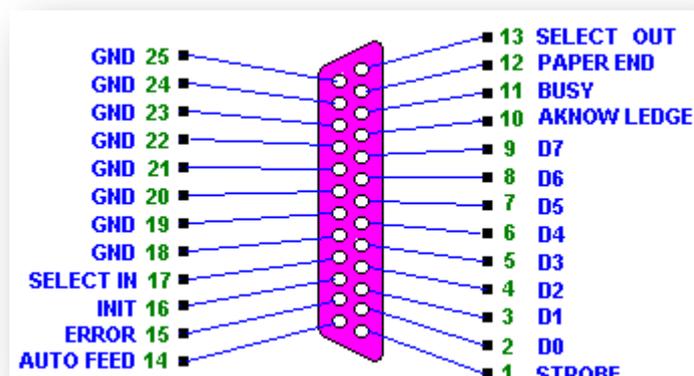


Figura 2.32: Conector DB25.[9]

Para uma porta paralela do tipo SPP, os pinos de 1 a 9 são saídas de dados, de 10 a 13 e 15 são entradas, 14,16 e 17 são saídas e de 18 a 25 são terra(*ground*). A Figura 2.33 expressa de forma intuitiva o funcionamento do DB25.

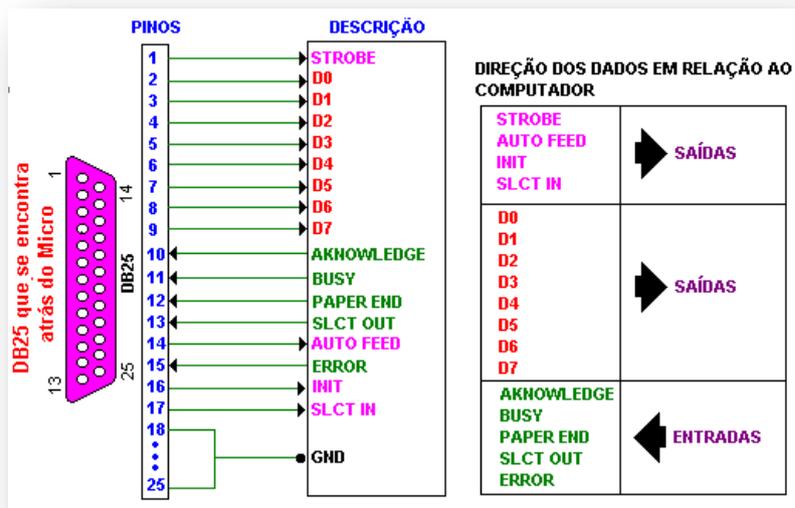


Figura 2.33: Esquema de funcionamento do DB25 no modo SPP.[9]

A descrição das funções dos pinos de 1 a 25 da porta paralela quando usada numa impressora pode ser simplificada pela Tabela 2.9.

Pino no DB25	Nome do Sinal	Descrição
1	-Strobe	Envie um pulso > 0,5us
2	Data 0	Bit menos significativo
3	Data 1	.
4	Data 2	.
5	Data 3	.
6	Data 4	.
7	Data 5	.
8	Data 6	.
9	Data 7	Bit mais significativo
10	-Ack	Enviar um pulso baixo de aproximadamente 5us, depois de interrupção.
11	+Busy	Alto para Ocupado/Fora de Linha/Erro
12	+PaperEnd	Alto para impressora sem papel
13	+Select In	Alto pra impressora selecionada
14	-AutoFd	Envie um sinal baixo para avançar uma linha
15	-Error	Baixo para Erro/Fora de Linha/Sem Papel
16	-Init	Envie um pulso baixo com mais de 50us para iniciar a impressora
17	-Select	Envie um pulso baixo para selecionar a impressora
18-25	Terra	

Tabela 2.9: Pinos, nome dos sinais e funções do conector DB25.

Segundo [9], “os pinos de saída de dados (*Data Out D0-D7*) são interfaceados através de um *latch octal 74LS374*, o qual pode fornecer até 2,6 mA e drenar até 24 mA de corrente em cada pino. Entre cada um dos pinos e o terra existe um capacitor de 100 nF visando reduzir transientes no sinal”. Portanto, é necessário garantir esses requisitos para não existir problema com o conector DB25 e/ou com o periférico.

## 2.9 ENHANCED MACHINE CONTROLLER (EMC2)

### 2.9.1 APRESENTAÇÃO

Segundo [10], “o *Enhanced Machine Controller (EMC2)* é mais que um programa qualquer sobre fresamento CNC. Ele pode controlar máquinas ferramentas, robôs, ou outros artifícios automatizados. Controla servos motores, motores de passo, relés e outros dispositivos das máquinas ferramentas”.

O programa EMC2 é basicamente dividido em quatro componentes: o controlador de ações, o controlador de entradas e saídas (I/O), o executor de tarefas e a interface gráfica. Além disso, existe um componente chamado HAL (*Hardware Abstract Layer*) responsável pela configuração do EMC2. Uma idéia geral de uma aplicação para o programa pode ser observado pela Figura 2.34.

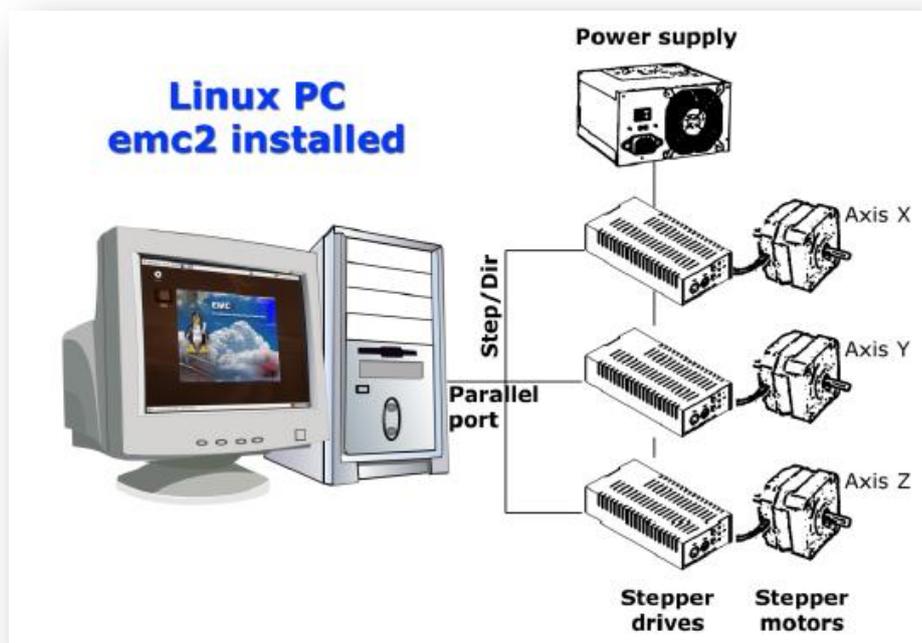


Figura 2.34: Simplificação do controlador de máquinas EMC2.[10]

A Figura 2.34 mostra um diagrama de blocos representando uma simples aplicação do EMC2. Neste caso, um sistema composto por 3 motores de passo, controladoras de potência, fonte de energia e um PC com o EMC2 instalado. No PC, usa-se o sistema operacional *Linux* e a comunicação, entre o PC e os motores de passo, é feita por meio da porta paralela (descrita no item 2.8 deste documento). Os sinais emitidos por meio da porta paralela são processados pelas controladoras de potência que geram, posteriormente, a movimentação dos motores.

O EMC2 possui três tipos de interface gráfica, duas delas são usadas para aplicações cujos comandos do operador é por meio de código G (*Axis* e *Mini*). Uma terceira interface é disponível aos usuários que pretendem fazer o controle por meio da linguagem *ladder*. A interface *Axis* é *openGL* (código aberto) e pode ser reconfigurada usando a linguagem *Python*. A Figura 2.35 mostra a principal tela da interface *Axis*.

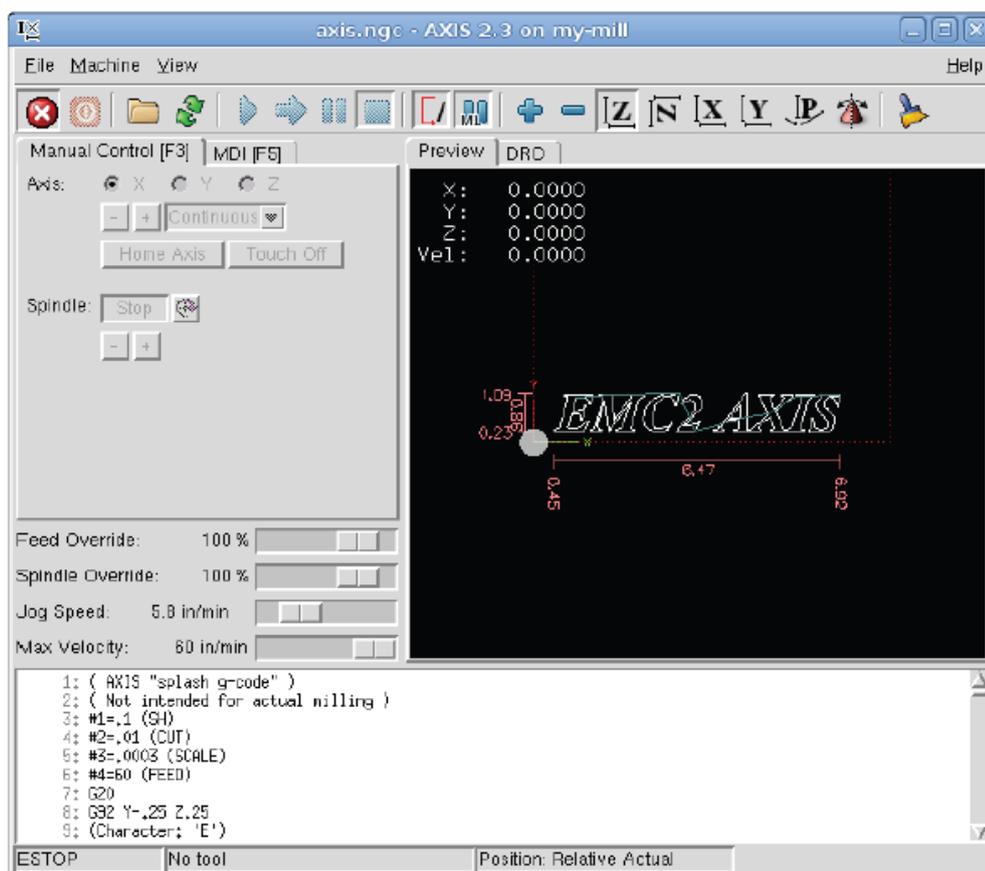


Figura 2.35: Interface gráfica do EMC2 no modo *Axis*. [10]

## 2.9.2 MODOS DE OPERAÇÃO

Segundo [10], “para a execução do EMC2, três modos de entrada de dados podem ser usados. O *manual*, o *auto* ou o *MDI*. Alterando o modo de operação, percebe-se uma grande diferença na forma como o programa se comporta. Cada modo de operação possui suas especificações”. Um exemplo, o operador pode solicitar que a máquina vá para o ponto

*home* apenas usando o modo *manual*. Ou ainda, o operador entra com um arquivo com extensão de texto (.txt) cujos dados são uma lista de comando em código G, a leitura desse arquivo só pode ser executada pelo modo *auto*.

No modo *manual*, cada comando de entrada é realizada por um botão que especifica o tipo de movimento a ser realizado pela máquina. Podemos selecionar uma velocidade de avanço e um eixo para movimentar. Vale ressaltar que a escolha destes parâmetros se dá por meio de botões na interface gráfica. Além dos botões selecionados pelo *mouse*, os comandos de acionamento dos eixos podem ser executados pelo teclado. O modo *MDI* executa uma linha de comando em código G de cada vez. Enquanto o modo *auto* carrega um arquivo com várias linhas de código G e executa todo o arquivo automaticamente.

## 3 DESENVOLVIMENTO

Concerne deste capítulo uma metodologia para o desenvolvimento de máquinas CNC didáticas. O capítulo está dividido em projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, fabricação e montagem e testes.

### 3.1 PROJETO INFORMACIONAL

Este tópico apresenta o primeiro passo para o desenvolvimento da fresadora CNC didática. Ele consiste na apresentação do problema e das necessidades básicas, na definição dos requisitos de projeto e na especificação do projeto.

Este projeto consiste no desenvolvimento de uma máquina fresadora CNC didática e estará disponível aos alunos da disciplina de Tecnologia de Comando Numérico da Universidade de Brasília. Um torno CNC didático já foi desenvolvido para a mesma aplicação, portanto a fresadora faz parte de uma segunda etapa para o desenvolvimento de uma Célula Flexível de Manufatura (FMC) para aplicações didáticas.

Segundo [11], “projetar é um processo inovador e altamente iterativo. É também um processo de tomada de decisão. Decisões, algumas vezes, têm de ser tomadas com base em muito pouca informação, ocasionalmente com a quantidade certa de informação, ou mesmo com uma fatura de informações parcialmente contraditórias”.

O levantamento das necessidades básicas para o desenvolvimento da máquina é baseada em alguns atributos básicos de projetos:

- Funcionamento: Os alunos devem carregar seus “códigos G” na máquina e conseguir acompanhar a execução dos programas e a movimentação da máquina;
- Ergonomia: É necessário espaço suficiente para o usuário controlar a máquina e verificar os movimentos da máquina;
- Estética: É desejável a pintura da máquina;
- Econômico: Comprar apenas o necessário e aproveitar materiais descartados por outros projetos;
- Normalização: Não é necessário seguir nenhuma norma específica.

Os requisitos de projetos podem ser formados pelas as necessidades mais básicas e os seguintes atributos:

- Confiabilidade: A máquina tem que demonstrar que foi desenvolvida por profissional;

- Baixo custo: O projeto deve racionalizar o uso de recursos e aproveitar materiais já disponíveis na universidade;
- Operação: A fresadora deve ser de fácil manuseio. Fácil para carregar os programas e editar. Fácil fixação da peça e troca de ferramentas.
- Resistência: Deve ter alta robustez e durabilidade para ser usados por alunos dos próximos semestres;
- Fabricação: Devem-se utilizar as instalações do Laboratório de Usinagem para fabricação de peças.

Elaborado os requisitos de projeto, pode-se realizar a especificação do projeto. Antes, é necessário conhecer a disponibilidade de alguns materiais já adquiridos pela universidade para o projeto. Os materiais disponíveis estão listados na Tabela 3.1 a seguir:

<b>Materiais</b>	<b>Quantidade (Un)</b>
<b>Fuso de Esferas Recirculantes 430mm</b>	2
<b>Fuso de Esferas Recirculantes 330mm</b>	1
<b>Guias Lineares 430mm</b>	4
<b>Guias Lineares 330mm</b>	2
<b>Luva de esferas para guias lineares</b>	12
<b>Motores de passo modelo KTC-HT23-400</b>	3

Tabela 3.1: Materiais disponíveis para projeto

A partir dos materiais já comprados, pode-se iniciar uma especificação do projeto. Inicialmente, escolhe-se um modelo de referência mais próximo do projeto idealizado, esta decisão está fundamentada nos tipos de fresadoras existentes e apresentadas neste documento. Estas máquinas podem diferir entre si segundo as seguintes características funcionais:

- Quantidade de eixos: 3, 4 ou 5;
- Movimentação do eixo árvore: vertical, horizontal ou universal;
- Movimentação dos demais eixos: convencional ou portal.

Neste projeto, escolheu-se construir uma fresadora com 3 eixos, com movimentação do eixo árvore na vertical e a movimentação dos demais eixos é do tipo convencional. Foi assim decidido visto que 3 eixos são suficientes para demonstração didática e possui menor custo. O eixo árvore na vertical é mais simples de ser implementado e a disponibilidade de ferramentas é maior, visto que é possível realizar furos com brocas. Por fim, a

movimentação dos demais eixos é convencional devido à disponibilidade de construção de uma futura fresadora do tipo portal com outros materiais já adquiridos.

## 3.2 PROJETO CONCEITUAL

Este tópico consiste na transformação das idéias do Projeto Informacional em um projeto mais palpável. Implicitamente, este tópico realiza uma análise mercadológica das máquinas CNC, em seguida, apresenta o funcionamento da fresadora CNC didática idealizada e por fim revela algumas soluções obtidas a partir dos requisitos descritos no tópico anterior.

### 3.2.1 ANÁLISE MECADOLÓGICA

O mercado de máquinas operatrizes no Brasil é dos setores econômicos da indústria. A partir do seu crescimento temos um futuro com geração de empregos e renda à população. A importância da indústria de máquinas operatrizes na economia do país deve-se ao fato destas máquinas formarem a base para a industrialização de qualquer bem de consumo, desde um suco de laranja para exportação até uma aeronave executiva da Embraer®.

Todas as empresas de grande porte na área de máquinas operatrizes desenvolvem produtos com tecnologia CNC (Comando Numérico Computadorizado) e dentre os produtos desenvolvidos tem destaque a fresadora. Procurando no portal eletrônico de algumas empresas que fabricam máquinas operatrizes com tecnologia CNC encontram-se alguns exemplos como os indicados pelas Figuras 3.1 e 3.2.



Figura 3.1: Centro de Usinagem Verticais Discovery, Indústrias ROMI. Fonte: Site da Empresa



Figura 3.2: Fresadora CNC, Fobrasa Ltda. Fonte: Site da Empresa

A ABIMAQ (Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos) dispõe em seu banco de dados o cadastro de 333 empresas no Brasil que comercializam ou fabricam máquinas operatrizes (máquinas ferramenta). E o mercado dessas máquinas fica maior quando se inclui as centenas de empresas não vinculadas à ABIMAQ. Muitas delas usam os conceitos de máquinas operatrizes e a tecnologia CNC para desenvolver novos produtos em centenas de outras aplicações. Por exemplo, fresadoras para construção de circuitos impressos, para corte e gravação em acrílico, para trabalho em pedras preciosas e etc. Estas máquinas CNC são usadas tanto para *hobby* quanto para uso profissional. São encontradas facilmente nos portais eletrônicos de compras, por exemplo, *mercadolivre.com.br*.

Podem-se observar nas Figuras 3.3 e 3.4 a seguir, alguns produtos oferecidos pela *internet*:



Figura 3.3 : *Router* CNC, MTC Robótica. Fonte: Site da Empresa



Figura 3.4 : *Router* CNC, IO Robotics. Fonte: Site da Empresa

A partir dos exemplos expostos nas Figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 pode-se obter informações básicas quanto ao *design*, dimensões, movimentação, material da estrutura e adaptações das máquinas.

### **3.2.2 FUNCIONAMENTO DA FRESADORA CNC DIDÁTICA**

A máquina discutida neste trabalho segue o princípio de funcionamento de todas as máquinas CNC apresentadas neste documento até agora. Para descrever o funcionamento da fresadora é interessante compreender o caminho da informação no sistema. Esta

trajetória de informação refere-se desde a idéia do usuário na elaboração de um código “G” para usinagem até o movimento dos eixos da máquina.

- Usuário disponibiliza um código “G” de acordo com seu objetivo e criatividade;
- Por meio de uma unidade de processamento, o código “G” é carregado e executado;
- Um programa computacional faz a interação entre o usuário e a máquina;
- Este mesmo programa transforma o código “G” em sinais digitais;
- Os sinais são enviados a um sistema eletrônico para o processamento dos sinais;
- Já processados, os sinais são enviados aos atuadores;
- Os atuadores transformam os sinais processados em um movimento mecânico.

A Figura 3.5 mostra um diagrama do fluxo de informações do sistema em projeto.



Figura 3.5: Diagrama da trajetória da informação no sistema.

Para tornar a idéia mais clara, apresentam-se os requisitos e funcionamento da máquina num ambiente mais próximo do esperado no projeto final. A Figura 3.6 mostra uma fresadora convencional e a partir desta fresadora é viável apresentar os subsistemas e componentes do projeto.

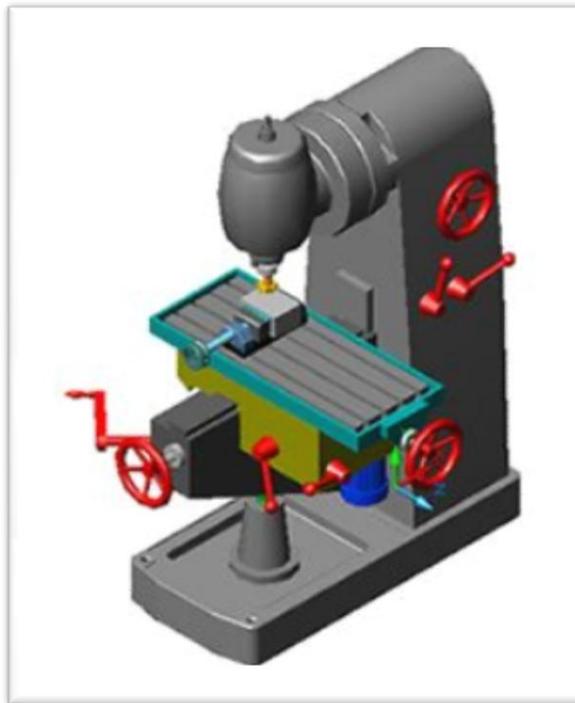


Figura 3.6: Fresadora convencional com três eixos. Fonte: Portal CIMM.

A partir da Figura 3.6 é possível destacar alguns subsistemas da máquina convencional que terá a mesma aplicação na fresadora CNC didática.

Subsistema Estrutura: Estrutura em material rígido e robustez visível ao usuário. Base para apoio aos eixos, para mesa de trabalho e para eixo árvore.

Subsistema Eixos: Formado por três eixos que permitem a movimentação nas direções cartesianas X, Y e Z.

Subsistema Mesa de Trabalho: Base para a fixação da peça a ser usinada com acesso a fácil fixação da peça. Confiabilidade na fixação.

Subsistema Spindle: Acionamento da ferramenta de corte.

Além dos quatro subsistemas descritos a partir da Figura 3.5, faltam os subsistemas peculiares as máquinas CNC.

Subsistema Eletrônico: Consiste nas unidades de processamento de sinais digitais e nos atuadores. São as controladoras de potência e motores.

Subsistema Controle: Consiste no sistema que transforma os códigos “G” em sinais digitais. A forma mais simples é por meio de *software* instalado em um PC.

O próximo passo é analisar algumas soluções para os subsistemas de tal forma que seja possível aplicar as tecnologias disponíveis em cada subsistema. Os próximos tópicos apresentam algumas possíveis soluções para cada um dos subsistemas.

### 3.2.3 ESCOLHA DA ESTRUTURA

Definir o material da estrutura da máquina para uma aplicação didática compreende na definição da robustez da fresadora para um ambiente plenamente educativo e longe de muitas horas de trabalhos ininterruptas. Como é de se esperar, esse material deve possuir as seguintes características:

- Alta resistência mecânica;
- Fácil usinagem;
- Fácil montagem;
- Leve;
- Baixo custo.

Alguns materiais que podem ser usados para a estrutura da máquina e suas vantagens e desvantagens são:

Madeira: Baixo custo, fácil usinagem, fácil montagem e leve. Porém, baixa resistência mecânica para as especificações;

Perfis em aço: Alta resistência mecânica, difícil usinagem e montagem, pesado e custo médio;

Perfis em alumínio: Alta resistência, média usinagem e montagem, leve e alto custo.

O melhor material encontrado foi o perfil em alumínio extrudado visto que possui as características desejadas e coube no orçamento. De fato, o perfil em alumínio é menos denso e mais fácil de usinar que o aço. Além disso, possui resistência mecânica condizente com a aplicação devido principalmente à geometria. A Figura 3.7 mostra o perfil em alumínio adquirido para o projeto:

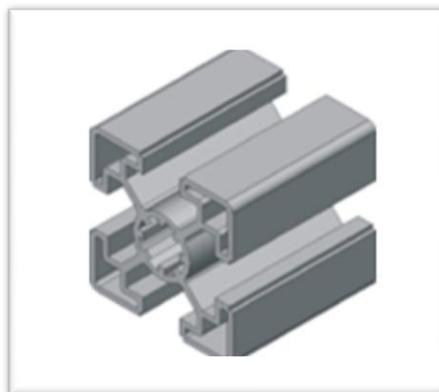


Figura 3.7: Perfil em alumínio extrudado.

Este perfil é formado pela liga normalizada AL 6063-T5, possui resistência à tração de 25 Kg/mm<sup>2</sup> e uma dureza de 72 HB. Além disso, o mercado oferece elementos de união

específicos para este tipo de material que permite a conexão de vários perfis sem uso de soldas, rebites ou parafusos.

### **3.2.4 ESCOLHA DOS EIXOS**

Os eixos da fresadora CNC didática são formados por fusos e guias lineares. Como já foi especificado no Projeto Informacional, a Universidade já disponibilizava fusos de esferas recirculantes e guias lineares em quantidades ideais para aproveitar neste projeto.

Portanto, é necessário apenas analisar se os componentes mecânicos para os eixos podem ser usados no projeto.

Os fusos de esferas recirculantes possuem as seguintes características:

- Alta resistência mecânica;
- Folgas mínimas;
- Baixo atrito e
- Custo zero.

As guias lineares possuem as mesmas características e isso permite o uso dos componentes mecânicos neste projeto.

### **3.2.5 ESCOLHA DA MESA DE TRABALHO**

As mesas de trabalho das fresadoras convencionais são grandes blocos em aço usinado com fresas especiais. Essas fresas criam vários rasgos no bloco e permitem fixar uma peça na mesa com maior segurança, além de proporcionar o escoamento do líquido refrigerante.

No caso da fresadora CNC didática não há necessidade de pesados blocos em aço, mas alguns requisitos devem ser obedecidos.

- Fácil montagem e usinagem;
- Segurança na fixação da peça;
- Fácil limpeza;
- Alta resistência mecânica;
- Baixo peso e;
- Baixo custo.

Dois sistemas para a mesa de trabalho foram avaliados. O primeiro consiste na usinagem de um bloco de alumínio de tal forma que esta mesa permitisse fixar uma peça por meio de “sargentos” nos rasgos. A Figura 3.8 mostra o projeto da mesa como bloco único.

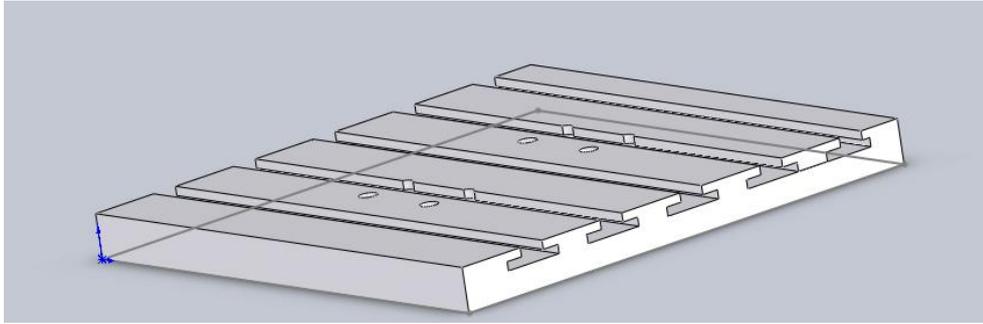


Figura 3.8: Mesa de trabalho, primeira opção.

A segunda opção é a construção de uma mesa com a união de várias partes de perfis em alumínio extrudado, o mesmo usado na estrutura da máquina. A Figura 3.9 mostra o projeto com os perfis em alumínio.

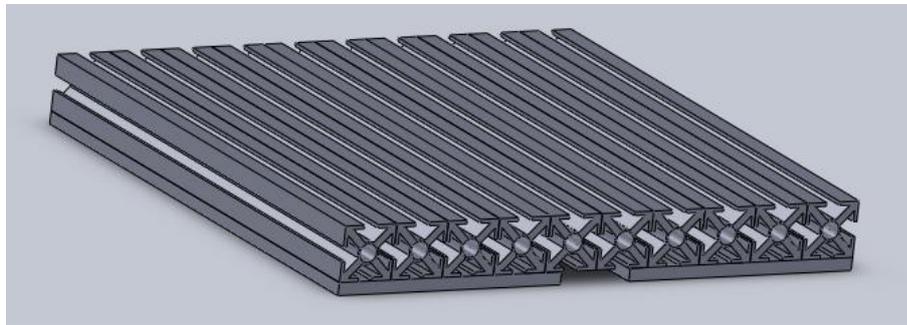


Figura 3.9: Mesa de trabalho, segunda opção.

A opção escolhida foi a mesa com união de perfis em alumínio, visto que possui fácil montagem, baixo peso, alta resistência mecânica e um custo dentro do orçamento estimado. Ao contrário da primeira opção de demonstrou-se de difícil usinagem e mais pesada.

### 3.2.6 ESCOLHA DO SPINDLE

As fresadoras convencionais usam motores elétricos para rotacionar a ferramenta de corte junto a um cabeçote que fixa o motor para evitar deslocamentos e desalinhamentos. Além disso, um sistema de polias faz a redução ou aumento da velocidade.

Para este projeto, foi adaptado um motor para a ferramenta de corte. Devido o tamanho e robustez da fresadora didática, houve a necessidade de adquirir uma ferramenta que atendesse os seguintes requisitos:

- Pequenas dimensões;
- Peso reduzido: 1.5 kg;
- Geometria regular: Cilíndrica;
- Baixo custo: Disponibilidade limitada;

- Altas velocidades: 20000 rpm.

As dimensões pequenas são necessárias visto que o eixo Z (vertical) possui um comprimento útil de 250 mm, portanto quanto maior o *spindle*, menor é a área de trabalho da peça a ser usinada. A massa tem sua importância na diminuição da carga solicitada para o motor de passo, até porque o motor deve ter força suficiente para deslocar toda a estrutura do eixo vertical no sentido oposto a força gravitacional. A geometria regular é necessária para facilitar a fixação do motor *ca* no eixo Z (vertical). E por fim, as altas velocidades favorecem nas velocidades de corte e de avanço.

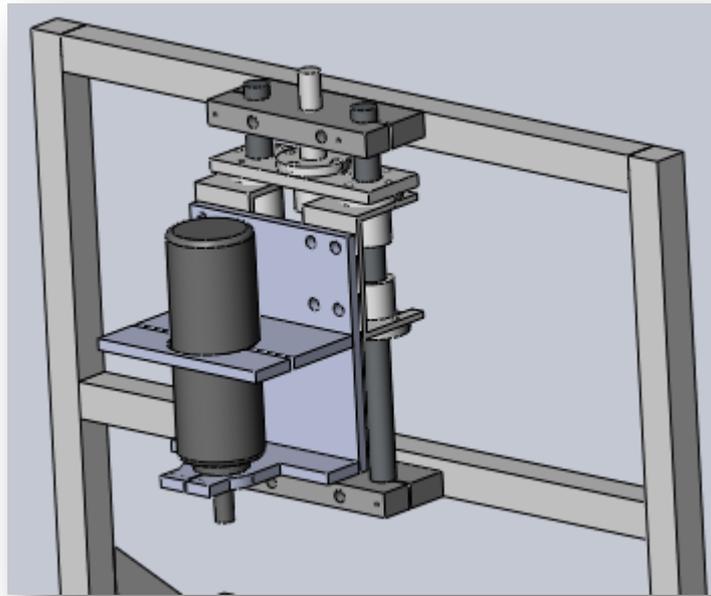


Figura 3.10: Projeto CAD do eixo Z.

As opções encontradas no mercado que inicialmente atendia pelo menos alguns dos requisitos de 1 a 5 apresentados são:

- Furadeira
- Tupia
- Retificadora

Entre as três ferramentas analisadas, a que mais atendeu os requisitos foi a retificadora. Mesmo com a diversidade de modelos e marcas reconhecidas de furadeiras e tupias, a retificadora mostrou-se mais adequada ao projeto. A Tabela 3.2 resume as vantagens e desvantagens das ferramentas analisadas.

	<b>Furadeira</b>	<b>Tupia</b>	<b>Retificadora</b>
<b>Volume</b>	70000 mm <sup>3</sup>	70000 mm <sup>3</sup>	40000 mm <sup>3</sup>
<b>Peso</b>	1.6Kg	4.0Kg	1.3 kg
<b>Geometria</b>	Irregular	Regular	Cilíndrica regular
<b>Custo</b>	Médio	Médio	Médio
<b>Velocidade</b>	Baixa	Média	Alta

Tabela 3.2: Resumo das características de ferramentas elétricas.

As furadeiras encontradas no mercado, normalmente das marcas *Bosch®*, *Makita®* e *Dewalt®*, possuem velocidades de rotação da ordem de 3000 rpm e uma geometria irregular em forma de “L” que prejudicava na fixação à máquina.

As tupias possuem dimensões bem maiores que as furadeiras e retificadoras, o que diminui a área de trabalho da máquina fresadora. Além disso, as tupias são indicadas pelos fabricantes para uso em madeira.

Portanto, a retificadora se adequou ao projeto devido principalmente à sua geometria regular, que facilitou à fixação no eixo Z. Esta ferramenta também possui maior velocidade e maior torque quando comparada às outras ferramentas elétricas.

### 3.2.7 ESCOLHA DOS MOTORES

Vários tipos de motores elétricos podem ser aplicados em máquinas CNC didáticas, entre eles, os motores de passo e os servomotores são os mais usados. Porém, a Tabela 3.1 já mostrou que existem motores disponíveis para o projeto com um custo zero. Neste tópico deve-se analisar se os motores disponíveis atendem as necessidades do projeto.

Os motores disponibilizados podem ser acionados no modo bipolar ou no modo unipolar. A decisão correta do modo de acionamento deve ser baseada no torque exigido ao motor. A partir do conhecimento do torque, pode-se escolher tanto o melhor motor indicado como também a controladora de motores de passo adequada.

Para o cálculo do torque é necessário realizar algumas considerações e obter alguns dados técnicos a respeito do fuso de esferas recirculantes, do motor de passo e da carga que será submetida ao fuso. Inicialmente, considera-se o motor acoplado ao fuso que por sua vez desloca uma carga, como mostra a Figura 3.11.

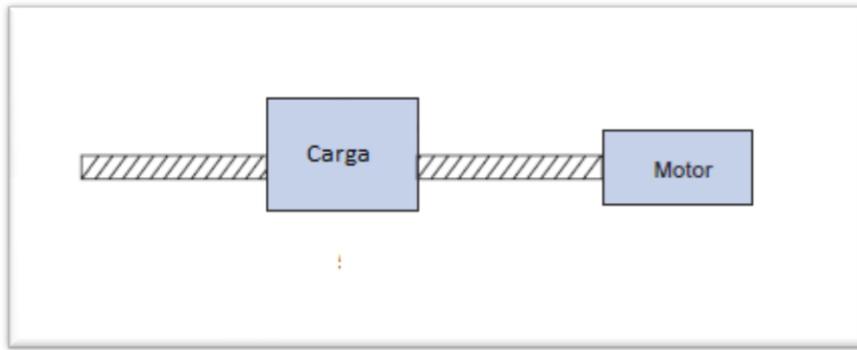


Figura 3.11: Esquema de integração entre motor, fuso e carga.[8]

Segundo [8], o torque necessário ao motor é definido pela Equação 3.1:

$$T = 2 \times \pi \times J \times \text{rot}/\text{seg}^2$$

Equação 3.1: Torque é o produto da inércia e da aceleração,  $T$  em N.m e  $J$  em Kg.m<sup>2</sup>.

A inércia ( $J$ ) é referente à soma das inércias do rotor, do fuso e da carga. A aceleração é uma estimativa do valor esperado para a aplicação e portanto escolhida pela experiência do projetista.

Segundo o Anexo 1, o rotor tem inércia igual à 480 g.cm<sup>2</sup>. Este valor é equivalente à 48.10<sup>-6</sup> kg.m<sup>2</sup>.

Segundo [8], a inércia do fuso pode ser estimada pela Equação 3.2:

$$J_c = 761 \times D^4 \times L$$

Equação 3.2: Inércia de uma barra cilíndrica em aço, onde  $D$  em m,  $L$  em m e  $J$  em Kg.m<sup>2</sup>.

Se  $D = 25 \cdot 10^{-3}$  m e  $L = 0,45$  m, temos  $J = 133,77 \cdot 10^{-6}$  kg.m<sup>2</sup>.

A carga também é estimada de acordo com a experiência do projetista e para o pior caso pode-se considerar igual a 60 Kg. Segundo [8], para um sistema de parafuso, a inércia referente à carga é estimada pela Equação 3.3:

$$J_w = W \times p^2 \div (4 \times 10^7)$$

Equação 3.3: Inércia é igual ao produto da massa (Kg) e o passo do fuso (mm).

Portanto,  $J_w = 37,5 \cdot 10^{-6}$  Kg.m<sup>2</sup>, visto que  $W = 60$  Kg e  $p = 5$  mm.

A inércia total é igual à soma das três parciais já calculadas pelas Equações 3.2 e 3.3 e ainda a inércia especificada na nota técnica do motor de passo. Portanto,  $J =$

$219,27 \cdot 10^{-6} \text{ Kg.m}^2$ . Considera-se ainda que o a eficiência do fuso, o coeficiente de atrito dos rolamentos e o desalinhamento do eixo do motor e fuso aumente a inércia em até 60%. Temos uma inércia total ( $J_t$ ):

$$J_t = 350,83 \cdot 10^{-6} \text{ Kg.m}^2$$

O parâmetro que ainda resta encontrar é a aceleração. Conhecendo as máquinas vendidas comercialmente, encontram-se uma velocidade máxima de trabalho na ordem de 3500 mm/min para motores semelhantes ao KTC-HT23-400. Esse valor corresponde a 5 mm em 85ms, ou seja, 1 passo a cada 85ms. Sabendo que o movimento do eixo possui um perfil trapezoidal, ou seja, parte da velocidade zero e aumenta linearmente até a velocidade máxima, depois mantém a velocidade constante e posteriormente começa a decair linearmente até a parada, é possível determinar a aceleração pela Equação 3.4. A Figura 3.12 mostra um gráfico do movimento com perfil trapezoidal.

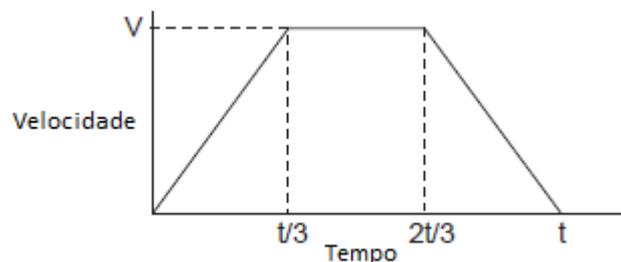


Figura 3.12: Gráfico do movimento com perfil trapezoidal.[8]

Segundo [8], a aceleração para um movimento com perfil trapezoidal é definida pela Equação 3.4.

$$Ac = (4,5 \times D) \div t^2$$

Equação 3.4: Aceleração para um movimento com perfil trapezoidal, D em rotações e t em segundos.

Se a carga deve mover 5mm em 85ms, temos:

$$Ac = 622,83 \text{ rot/s}^2$$

Substituindo os valores encontrados na Equação 3.1, encontra-se o valor do torque estático exigido ao motor:

$$T = 1,37 \text{ N.m}$$

'T' é o valor estimado do torque necessário no motor para cumprir os requisitos da máquina.

Portanto, os motores disponíveis podem ser usados no projeto, visto que a necessidade do projeto é de 1,37 N.m e a capacidade do motor em modo bipolar é 1,82 N.m.

### 3.2.8 ESCOLHA DAS CONTROLADORAS DE POTÊNCIA

Os *drives* de potência são basicamente uma fonte de corrente controlada. Seu objetivo é fornecer a corrente adequada às bobinas do motor de passo. Porém, existem inúmeras formas de enviar a corrente elétrica correta e já foram comentadas na revisão bibliográfica deste trabalho. Os requisitos que contribuem para escolha de uma boa controladora de potência são:

- Custo baixo;
- Método de acionamento bipolar;
- Micro passo;
- PWM (*Pulse Width Module*) por microcontrolador;
- Comutação de transistores por eletrônica analógica;
- Fonte de alimentação *ca*.

Os principais fabricantes de *drive* de potência para motores de passo são a *Parker®*, a *Festo®*, a *Kalatec®*, entre outras. Os produtos destes fornecedores são usados para aplicações profissionais, onde os motores são exaustivamente solicitados. Estes *drives* possuem uma robustez para aplicações industriais e por isso possuem um custo significativamente maior que os produtos fabricados por *hobbistas* e estudantes de eletrônica. Entre as controladoras desenvolvidas por *hobbistas*, apenas uma atendia aos requisitos especificados.

A controladora escolhida foi a SMC-B-PRO fabricada pela *HobbyCNC Brasil*. A Figura 3.13 mostra a controladora da *HobbyCNC* escolhida.

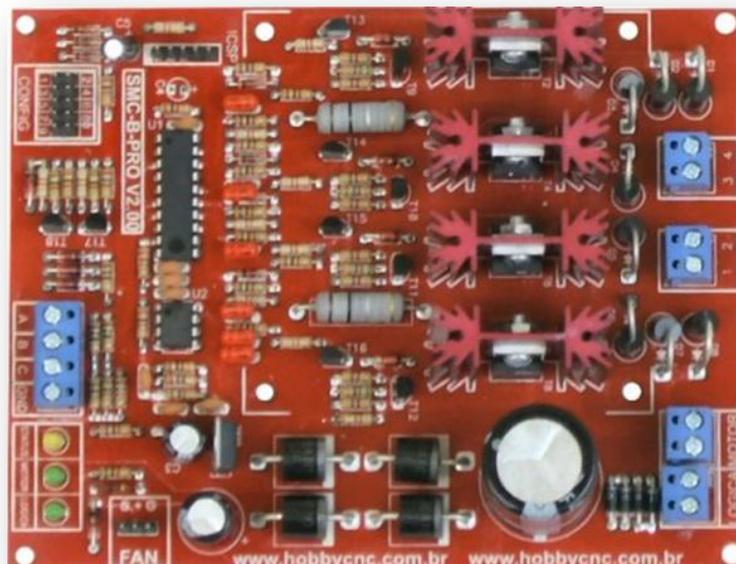


Figura 3.13: Controladora SMC-B-PRO da *HobbyCNC Brasil*.

Este *drive* possui o melhor custo benefício entre todas as pesquisadas para aplicação numa fresadora CNC didática com a robustez pretendida.

Outro fato que contribui para a escolha é a capacidade desta controladora permitir acionamento de motores bipolares. O acionamento bipolar aumenta em aproximadamente 40% o torque em relação ao acionamento unipolar, o que permite usar o maior torque oferecido pelo motor KTC-HT23, segundo as informações do fabricante. A necessidade de um acionamento bipolar deve-se a dois fatores. Primeiro, descarta o uso de redutores mecânicos entre o fuso e o motor de passo, visto que o torque de 1.82 N.m, gerado pelo motor, é suficiente para aplicações didáticas. O segundo fator é a necessidade de deslocar o eixo Z (vertical) da máquina. Este eixo desloca a retificadora (*spindle*) no sentido oposto ao sentido da força gravitacional, necessitando de uma força maior e consequentemente um torque maior.

Também é característica da controladora escolhida a movimentação do motor por meio de micropassos. Como já foi explicitado na revisão bibliográfica, o micropasso é uma forma peculiar de alimentar as bobinas do motor de passo. Para esta forma de alimentação é necessário um controle de corrente por PWM (*Chopper*). Assim, a controladora SMC-B-PRO dispõe de um microcontrolador para o controle de corrente em nível de micropassos. Esta característica positiva do *driver* é realizada pelo microcontrolador AVR *Attiny* da fabricante ATMEL®. As características do microcontrolador está disponível no Anexo 2.

O próximo ponto positivo da SMC-B-PRO é o chaveamento por meio de transistores discretos. Isso significa que é possível fornecer uma corrente elétrica de até 5 A às bobinas, segundo o manual da controladora. E o motor usado neste projeto permite uma corrente de

até 3 A. Além disso, a controladora escolhida possui um circuito de proteção por meio de diodos. Outra forma de chaveamento seria por meio de *chips* já prontos para aplicações em motores de passo, como por exemplo o *LM297*. Porém, estes *chips* permitem fornecer uma corrente de até 0.5 A e o necessário para o projeto é uma corrente de 1.41 A.

O último ponto relevante analisado para a escolha da controladora é a alimentação. Na maioria das controladoras bipolares é necessária uma fonte de alimentação simétrica, que não é fácil de encontrar. A SMC-B-PRO possui um circuito retificador integrado à placa que permite alimentar a controladora com uma tensão de 24V alternada. Portanto, a alimentação é realizada por meio de um transformador de baixa potência (100W). Este transformador baixa a tensão de uma rede elétrica comum (110V ou 220V) para a tensão elétrica desejada de 24V.

O esquema da Figura 3.14 mostra a facilidade na montagem da fonte de alimentação e do motor junto à controladora.

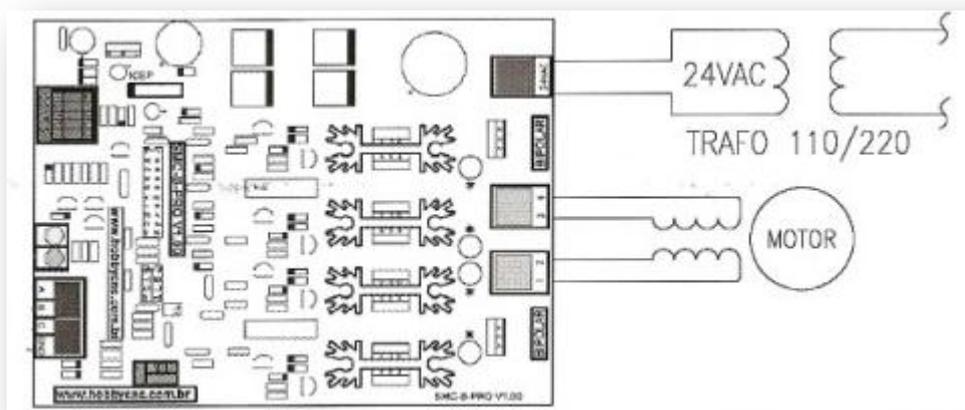


Figura 3.14: Esquema da controladora com as conexões da fonte de alimentação e motor de passo.

### 3.2.9 ESCOLHA DO SOFTWARE DE CONTROLE

As máquinas CNC possuem uma interface para interação com o usuário e por meio desse sistema é possível carregar os arquivos necessários à usinagem. Além disso, o sistema também é encarregado de gerar os sinais de pulso e direção às controladoras de potência. As características que contribuem para um bom *software* de controle são:

- Fácil operação;
- Execução em *real time*;

- Baixo custo;
- Fácil atualização;
- Fácil instalação e configuração.

A primeira análise que deve ser realizada para escolha do sistema de controle é se vale a pena desenvolver um sistema ou adquirir um programa comercial. Hoje, existem vários programas que atendem às necessidades do projeto e o desenvolvimento de um *software* é bastante difícil para esta aplicação. Portanto, decide-se por adquirir um programa comercial.

Os principais programas de controle são:

- Turbo CNC;
- EMC2;
- MACH 3;
- Art-CAM.

Todos os programas possuem características muito parecidas, porém o EMC2 se destaca pelo fato de ser um aplicativo totalmente *open source* (código livre) e instalado em plataforma Linux. Isso torna o custo igual a zero e torna-se o *software* escolhido para este projeto. Além disso, o EMC2 já foi usado no Torno CNC Didático da UnB e tanto os alunos quanto o projetista da máquina já possuem familiaridade.

### 3.3 PROJETO PRELIMINAR

Este tópico apresenta o projeto idealizado para a construção da fresadora CNC didática. Cabe a este tópico descrever o projeto a partir dos resultados obtidos com o projeto informacional e o projeto conceitual.

De forma mais técnica, o funcionamento da fresadora CNC didática possui o seguinte comportamento:

- O *software* EMC2 é o responsável pela interação com o usuário. A partir deste programa, é possível carregar o código “G”, executá-lo e acompanhar a execução passo a passo;
- Os sinais digitais gerados pelo EMC2 são enviados, por meio da porta paralela, para as controladoras de potência SMC-B-PRO da *HobbyCNC*;
- As controladoras são responsáveis pelo chaveamento dos transistores que limitam as correntes elétricas enviadas aos motores de passo KTC-HT23-400 da *Kalatec*;

- Os motores de passo geram um torque capaz de rotacionar os fusos de esferas recirculantes, que juntos às guias lineares movimentam a mesa de trabalho e/ou o *spindle*;
- Os movimentos dos eixos criam os movimentos de usinagem, que produzem saída de cavacos ou não.

O projeto CAD é mostrado na Figura 3.15 e facilita a compreensão do funcionamento do sistema. O volume útil de trabalho da máquina é 250mm x 250mm x 100mm e foi limitado pelas dimensões dos fusos e guias disponíveis para o projeto. Os eixos X e Y possuem movimento útil de 250mm cada e o eixo vertical possui movimentação de 100mm.



Figura 3.15: Modelo inicial da fresadora CNC.

Como pode ser visto no desenho CAD da fresadora, a estrutura da máquina é formada pela união de perfis em alumínio. A união dos perfis é realizada por elementos de união específicos para este tipo de perfil. Também percebe-se que a simplicidade da estrutura torna a máquina mais leve e melhor esteticamente. A fim de tornar a estrutura mais rígida e estável existe um par de mãos francesas.

Os três eixos se movimentam ortogonalmente, os dois eixos horizontais que podemos chamar de X e Y movimentam a mesa de trabalho. O terceiro eixo, Z, movimenta a retificadora que por sua vez estará rotacionando a ferramenta de corte. Os eixos são

formados por fusos de esferas e guias lineares. A transmissão do movimento de rotação do motor de passo para o fuso de esferas é feita por meio de acoplamentos do tipo *oldham*

Por fim, a mesa de trabalho é projetada em alumínio e possui vários rasgos longitudinais para fixação de “sargentos”, isto garante melhor fixação da peça a ser usinada.

### 3.4 PROJETO DETALHADO

Neste tópico é possível compreender o desenvolvimento de todos os elementos mecânicos desenvolvidos e fabricados no Laboratório de Usinagem.

#### 3.4.1 ESTRUTURA

Inicialmente, montou-se uma estrutura em alumínio. Essa estrutura tem o objetivo de apoiar os três eixos da fresadora e garantir a ortogonalidade entre eles. A Figura 3.16 esquematiza o projeto CAD da estrutura da máquina.

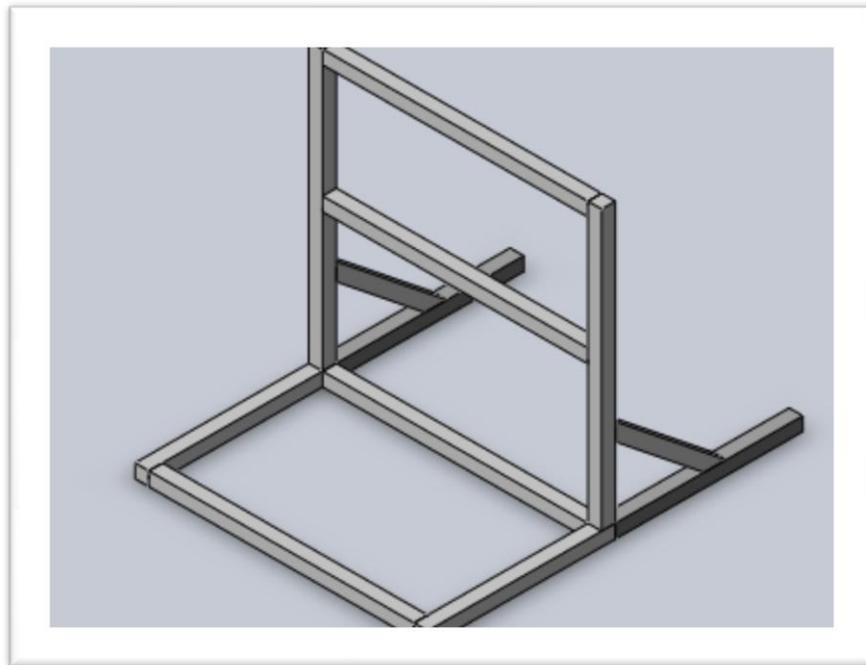


Figura 3.16: Projeto CAD da estrutura da máquina.

Percebe-se que a base da estrutura é um retângulo que sustentará dois eixos. Uma estrutura vertical sustenta o terceiro eixo. Na vertical existe uma mão francesa para aumentar a rigidez da estrutura. Vale destacar que a união dos perfis em alumínio é realizada por elementos de união específicos para este tipo de perfil.

#### 3.4.2 MANCAIS

Os mancais têm o objetivo de fixar o fuso e as guias lineares à estrutura. Estes elementos de máquina foram baseados nas peças do torno didático, visto que possuem

robustez semelhante e ainda, tanto a fresadora quanto o torno usam fusos e guias lineares do mesmo fabricante. A Figura 3.17 mostra o desenho CAD de um dos mancais da fresadora CNC.

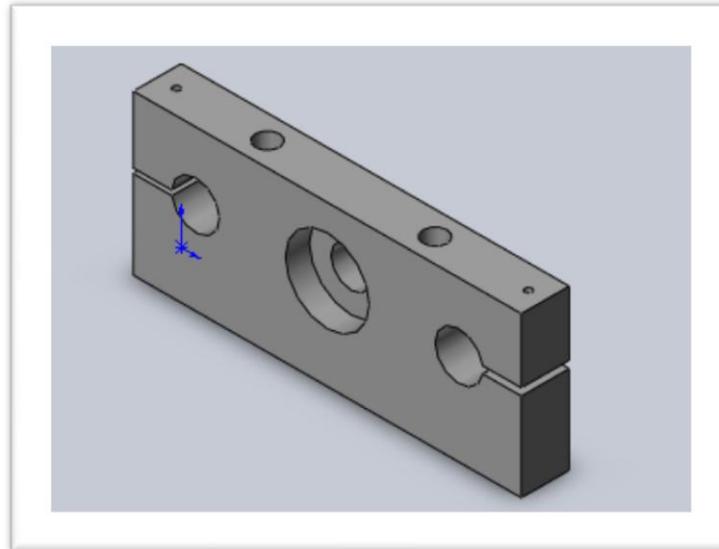


Figura 3.17: Mancal.

O mancal é fabricado em alumínio. Sua fixação à estrutura é por meio de dois parafusos de 9 mm de diâmetro. Os três furos na parte frontal da peça são passantes e encaixam duas guias lineares e um fuso de esferas recirculantes, além de um rolamento.

### 3.4.3 EIXOS

O eixo é a composição dos mancais, guias, fuso, luvas de guias e um par de suportes. Todos estes elementos podem ser visto no desenho CAD da Figura 3.18.

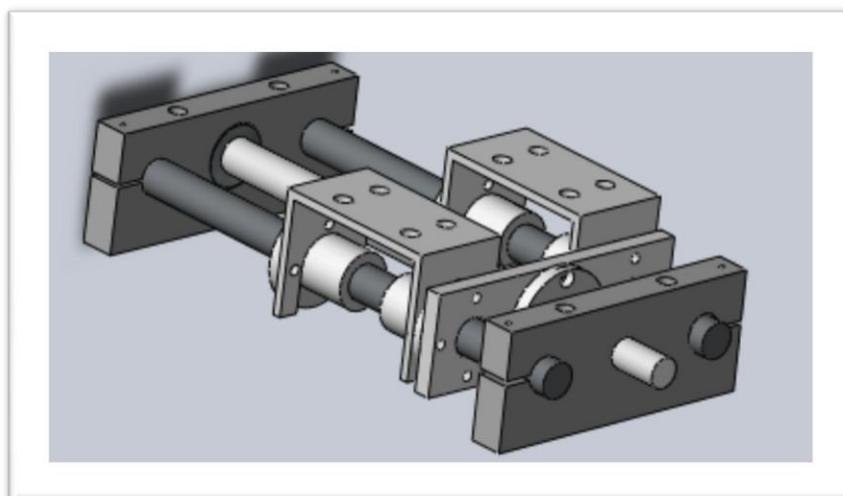


Figura 3.18: Desenho CAD de um eixo da máquina.

A fresadora possui três eixos como este mostrado na Figura 3.18. Dois eixos se encaixam perpendicularmente para realizar a movimentação da mesa de trabalho e o

terceiro eixo é fixado na vertical. Este último também é conhecido como eixo árvore, pois nele está fixada a ferramenta de corte.

A fixação entre os elementos mecânicos mostrado na Figura 3.18 é feito por meio de parafusos e porcas. O elemento de suporte, em forma de “U”, é constituído de três partes soldadas.

### 3.4.4 MESA DE TRABALHO

A mesa de trabalho é a parte da fresadora responsável, junto com os “sargentos”, pela fixação da peça a ser usinada. A mesa é constituída por um conjunto de perfis em alumínio fixado a um gabarito. O gabarito é uma chapa em alumínio com 1/8in de espessura. A idéia de construir uma mesa a partir de perfis em alumínio deve-se ao fato de aproveitar os rasgos disponíveis nos perfis e fixar os “sargentos” que são responsáveis pela fixação do material a ser usinado e a mesa de trabalho. A fixação entre os perfis em alumínio e o gabarito é por meio de solda. A Figura 3.19 mostra o desenho CAD da mesa de trabalho.

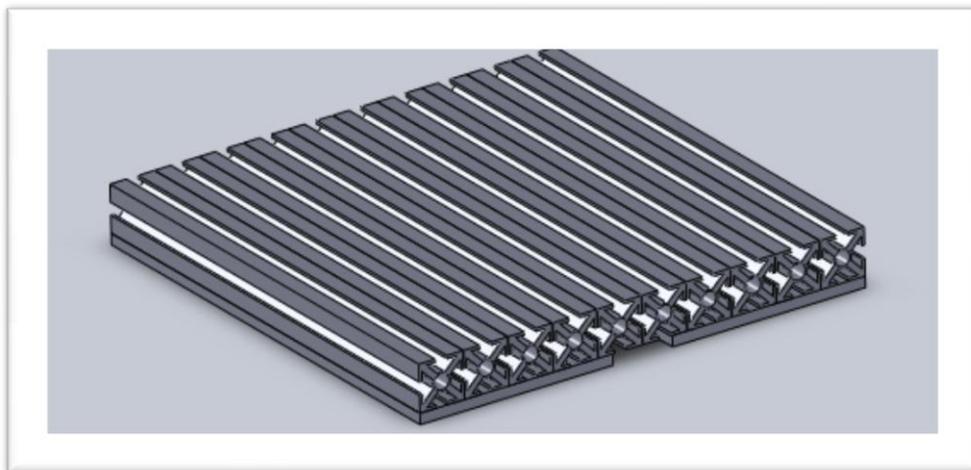


Figura 3.19: Desenho CAD da mesa de trabalho da fresadora CNC.

Esta mesa de trabalho tem dimensões de 300mm x 300mm e oferece uma maior praticidade para sua construção em relação às mesas de trabalho das fresadoras convencionais.



Figura 3.20: Detalhe da mesa de trabalho com uma peça sendo usinada.

### **3.4.5 FIXAÇÃO DO SPINDLE**

O sistema de fixação da retificadora é constituído de três chapas em alumínio com espessura de 1/2 in. Estas partes são unidas por meio de solda. Como pode ser visto na Figura 3.21, o sistema de fixação prende a retificadora em dois pontos, evitando que a retificadora se mova em relação ao sistema de fixação.

A simplicidade no sistema de fixação é responsável pela diminuição da massa da estrutura, garantindo um menor esforço do motor de passo para realizar um movimento no sentido contrário à força gravitacional, além disso, o projeto torna a circulação de ar facilitada para melhor refrigeração da retificadora.

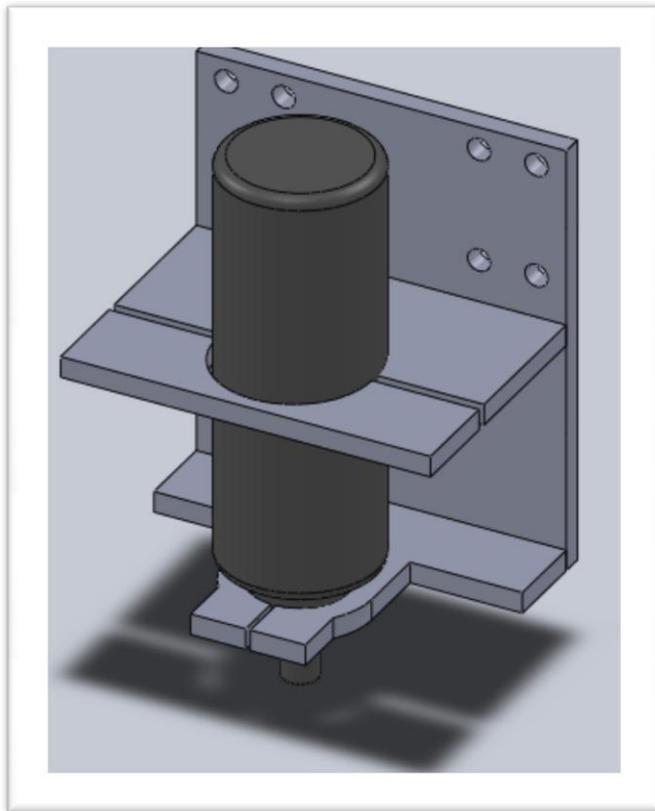


Figura 3.21: Desenho CAD do sistema de fixação da retificadora.

### 3.4.6 FIXAÇÃO DO MOTOR DE PASSO

Os motores de passo interagem com a estrutura mecânica da máquina em duas partes. Uma delas é a interação entre o eixo do motor e o fuso de esferas. Este contato ocorre por meio de um acoplamento do tipo *oldham*. A outra interação ocorre entre o motor e o mancal. Neste contato uma peça em formato de “L” fixa o motor ao mancal. A Figura 3.22 mostra o desenho CAD do sistema motor de passo, acoplamento e peça de fixação entre motor e mancal.

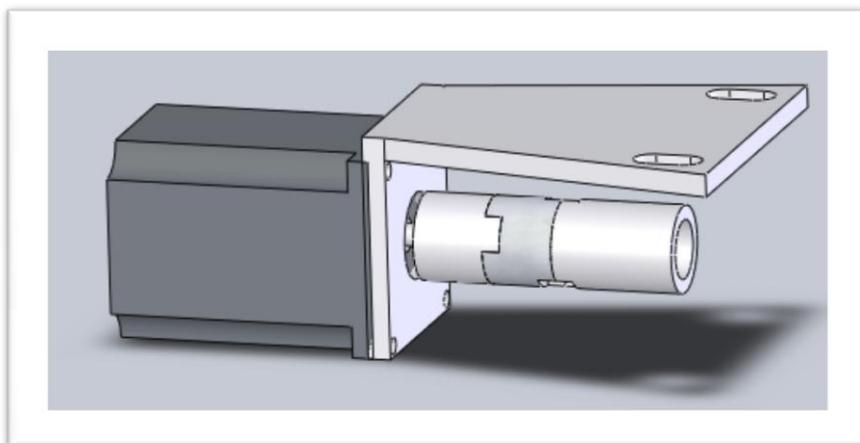


Figura 3.22: Sistema de fixação do motor de passo na estrutura mecânica.

Apesar de projetado como mostrado na Figura 3.16, tanto o acoplamento quanto a fixação em “L” não obtiveram êxito, visto que o sistema em geral ficou pouco rígido e mostrou-se instável para baixas rotações do motor.

A solução foi acrescentar mais uma chapa em alumínio na fixação em “L”, transformando-a em uma fixação “U”. No caso do acoplamento *oldham*, foi necessário transformar as três partes do acoplamento em apenas uma parte.

### 3.5 FABRICAÇÃO E MONTAGEM

Este tópico apresenta todas as partes da fresadora que foram fabricadas e montadas no Laboratório de Usinagem da Universidade de Brasília. Também descreve em ordem cronológica o passo a passo da fabricação e montagem.

Após a conclusão do projeto da máquina, iniciaram-se a aquisição dos perfis em alumínio para montagem da estrutura. Os perfis já chegaram cortados, faltando apenas furá-los para encaixar os elementos de união. A Figura 3.23 mostra um elemento de união fixado.



Figura 3.23: Detalhe do elemento de união dos perfis em alumínio.

A etapa seguinte à montagem da estrutura foi a fabricação dos mancais. Como já foram especificados, os mancais são construídos em barra de alumínio de 1/2 in de espessura. Mesma dimensão que os mancais do torno CNC didático. Com os mancais construídos, iniciaram-se as montagens dos eixos. Esta etapa consiste na conexão dos fusos de esferas, das guias lineares e rolamentos nos mancais. A Figura 3.24 apresenta em detalhe a fixação dos elementos em um mancal.



Figura 3.24: Montagem do eixo.

Vale ressaltar que foram montados três eixos. Dois desses eixos (X e Z) foram fixados diretamente na estrutura de perfil em alumínio e um terceiro eixo foi fixado perpendicularmente ao eixo X. Juntos, os eixos X e Y realizam o movimento da mesa de trabalho. A peça responsável por unir os eixos perpendicularmente e também unir a mesa de trabalho e a retificadora nos eixos é mostrada na Figura 3.25.

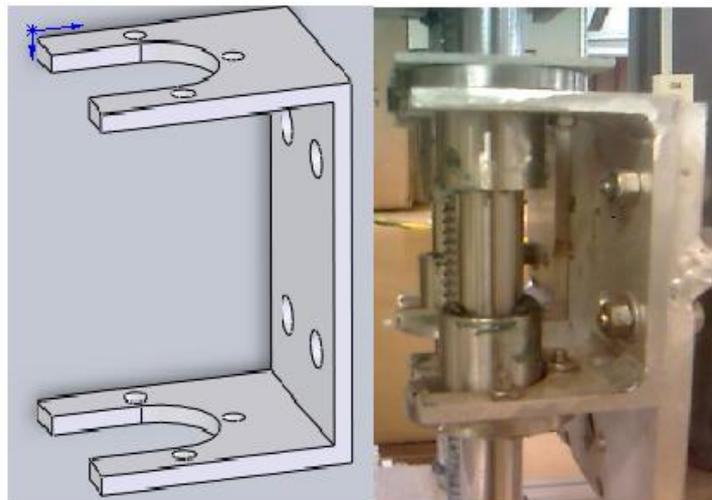


Figura 3.25: Suporte de fixação dos eixos.

O suporte de fixação é constituído por três peças fabricadas isoladamente e depois foram soldadas para proporcionar o formato em “U” visto na Figura 3.25. Cada guia linear possui um suporte igual a esse.

Outro subsistema fabricado e montado foi a fixação do motor de passo no fuso de esferas. Para isso, foi fabricado um suporte de fixação do motor e uma junta de ligação entre o eixo de motor e o fuso de esferas. A Figura 3.26 mostra o resultado do subsistema motor em detalhe.



Figura 3.26: Resultado da fixação do motor no eixo.

A Figura 3.26 permite visualizar uma peça em forma de “L” que une o motor ao mancal. Esta peça é constituída de duas partes unidas por solda. Também verifica-se uma adaptação na fixação do motor para tornar o sistema mais rígido, pois a solução projetada não obteve êxito. Ainda na Figura 3.26, verifica-se a junta que une o eixo do motor e o fuso de esferas. Esta junta é formada por apenas uma peça torneada nas faces.

O passo seguinte é a montagem da mesa de trabalho. Como especificado, a mesa de trabalho é constituída por perfis em alumínio e um gabarito de fixação. A Figura 3.26 mostra o resultado da mesa de trabalho.



Figura 3.26: Resultado da mesa de trabalho.

A mesa de trabalho é unida por solda. Cada pedaço de perfil em alumínio foi soldado no gabarito da mesa, que é apenas uma chapa de alumínio de 1/8in de espessura e de dimensões 300 mm x 300 mm.

Por fim, a ultima montagem foi a fixação do subsistema *spindle* na máquina. Essa fixação é formada por três peças unidas por solda e visa fixar a retificadora em dois pontos. Uma chapa em alumínio garante a fixação do subsistema *spindle* por meio da união com o suporte de fixação do eixo Z. Outras duas chapas fixam a retificadora ao sistema por meio de parafusos. A Figura 3.27 permite visualizar melhor o sistema de fixação.



Figura 3.27: Resultado do sistema de fixação da retificadora.

Com isso, a parte mecânica da fresadora é concluída. Fica a cargo dos próximos capítulos as configurações da parte eletrônica e de controle.

### 3.6 CONFIGURAÇÃO DOS MOTORES DE PASSO

O motor de passo é o atuador para movimentos lineares da máquina projetada. Sua escolha para este projeto já foi amplamente discutido nos requisitos da fresadora CNC. Cabe a este tópico identificar os parâmetros dos motores de passo, identificar as bobinas por meio da técnica da resistência elétrica, explicitar as ligações de fios e mostrar a interação entre o motor, a controladora e o fuso de esferas.

O motor disponibilizado para este projeto foi adquirido por meio da empresa *Kalatec®* e representa o modelo *KTC-HT23 NEMA 23*. A Figura 3.28 esquematiza as dimensões deste motor.

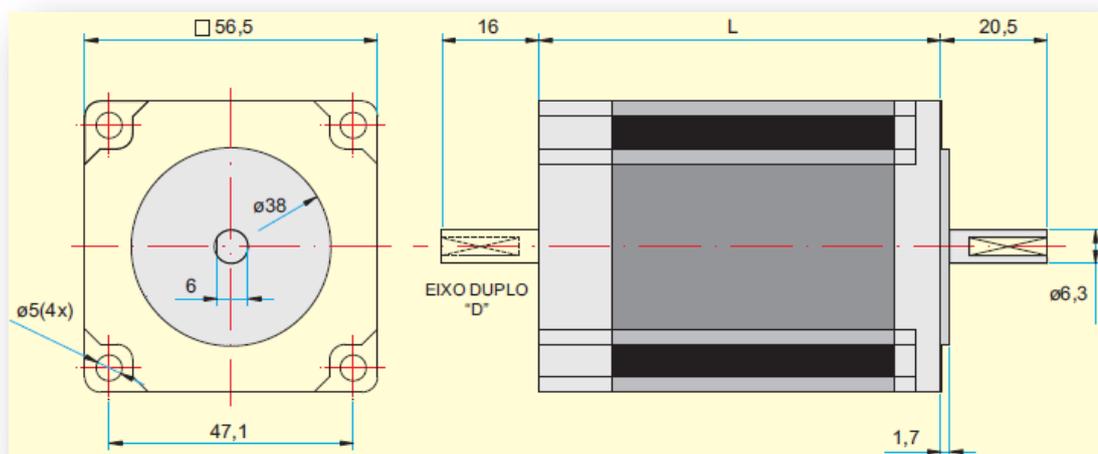


Figura 3.28: Dimensões do motor de passo.

O valor de L da Figura 3.28 vale 76 mm para este projeto. As características do motor relevante ao trabalho são:

- Trabalha com *drivers* unipolares ou bipolares;
- Otimizado para aplicações de micro passo.
- As duas características foram discutidas no tópico 3.1 e são requisitos da máquina.

Além dessas qualidades, os parâmetros técnicos do *KTC-HT23* são:

- Tensão elétrica de trabalho entre 3.2V e 6.4V (Depende das ligações das bobinas);
- Corrente elétrica de trabalho por fase entre 1.41 A e 2.38 A;
- Torque estático mínimo igual a 1.86N.m;
- Oitos fios;
- Quatro fases;
- Inércia do rotor igual a 480 g.cm<sup>2</sup>;
- Massa igual a 1 Kg.

A partir das principais características expostas, é normal identificar a função de cada um dos oito fios disponíveis no motor. Vale ressaltar que o manual do fabricante referencia cada fio com sua respectiva bobina, mas afim de eliminar qualquer erro do fabricante e conhecer melhor o funcionamento de um motor de passo é indicado realizar o técnica da resistência elétrica para identificação das bobinas.

A técnica de identificação das bobinas consiste em usar um multímetro para referenciar cada fio à sua bobina. Contendo o motor deste projeto oitos fios e quatro pólos no estator, pode-se concluir que o motor é esquematizado segundo a Figura 3.29.



Figura 3.29: Motor de passo oito fios.[8]

A partir da Figura 3.29 verifica-se que há um par de fios para cada bobina. E colocando o multímetro na opção de medir resistências (*ohmímetro*) podemos identificar cada uma das quatro fases. Se escolher dois fios que possuem resistências diferentes de zero ou infinito, encontra-se uma fase. Para o motor KTC-HT23 as bobinas estão dispostas da seguinte forma:

- Bobinas 1: Fios Vermelho e Vermelho/Branco
- Bobinas 2: Fios Preto e Preto/Branco
- Bobinas 3: Fios Verde e Verde/Branco
- Bobinas 4: Fios Amarelo e Amarelo/Branco

Com as bobinas identificadas é possível agora configurar o tipo de ligação desejada. Estas bobinas podem ser ligadas de forma paralela ou em série para *drives* bipolares ou ainda ligar os fios para *drives* unipolares. Como já foi exposto na revisão bibliográfica, existem vantagens para cada tipo de *drive*. Conforme a tabela de instruções do fabricante *Kalatec*, a ligação em série oferece mais torque e menos velocidade enquanto a ligação paralela oferece mais velocidade e menos torque (Anexo 1).

Neste trabalho optou-se por ligar o motor de modo a oferecer mais torque e menos velocidade. O motivo da escolha é devido à máquina ser para fins didáticos, portanto não há necessidade de altas velocidades como numa empresa do ramo. O torque maior também é preferível para evitar o uso de redutores mecânico quando cargas maiores forem solicitadas.

Deste modo, as Figura 3.30 e 3.31 mostram as características do motor para a ligação em série.

MODELO	LIGAÇÃO DO MÓTOR 1=SÉRIE 2=PARALELO 3=UNIPOLAR	MINÍMO TORQUE ESTÁTICO (N.m)	VOLTS	AMPS	OHMS	mH	ROTOR INÉRCIA (g.cm <sup>2</sup> )	MOTOR PESO (Kg)
KTC-HT23-400	1	1,86	6,4	1,41	4,5	14,4	480	1,00
	2		3,2	2,38	1,1	3,6		
	3	1,32	4,5	2,00	2,3	3,6		

Figura 3.30: Características do motor para qualquer uma das três ligações.

É identificado na Figura 3.30 que o motor com a ligação em série necessita de uma fonte de alimentação com 6.4 V, uma corrente elétrica por fase de 1.41 A e oferecerá um torque mínimo estático de 1.86 N.m.

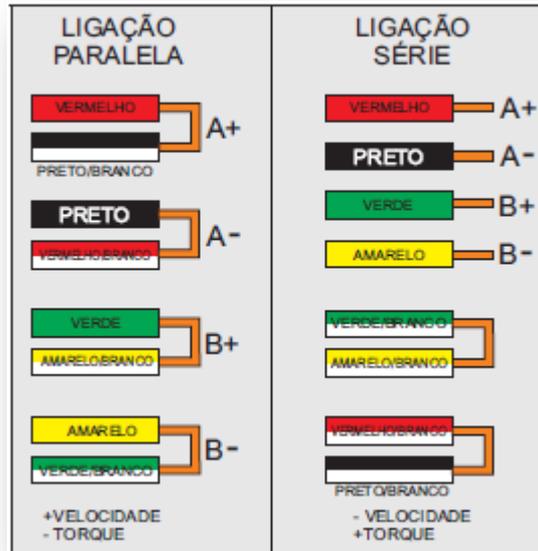


Figura 3.31: Esquema de ligação dos fios do motor de passo.

Concluídas as anotações referentes aos parâmetros de uso e as ligações dos fios, percebe-se que há agora apenas quatro fios para ligar à controladora. Observando ainda que os fios possuem polaridades.

### 3.7 INSTALAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO EMC2

O programa EMC2 (*Enhanced Machine Control*) é usado neste projeto para enviar os sinais de passo e direção aos motores de passo. A escolha por este *software* de controle é devido à sua distribuição gratuita e instalação em ambiente *Linux* que por sua vez é um sistema operacional *Open Source* (código aberto). Além disso, o EMC2 já foi usado no torno CNC didático já disponível no laboratório de automação (GRACO) da Universidade de Brasília.

O primeiro passo para instalação do EMC2 é visitar a página *web* da organização que desenvolveu o programa e atualiza suas versões. O site [www.linuxcnc.org](http://www.linuxcnc.org) dispõe de todas as instruções para instalação, configuração e manuseio do programa.

Entrando na página *web* percebe-se um botão de acesso (*link*) para *download* do programa EMC2. Baixando o arquivo de 695Mb, pode-se gravar (queimar) em um CD (*Compact Disc*) o arquivo com extensão .ISO. Assim é possível instalar em um PC (*Personal Computer*) a distribuição *Linux* do Ubuntu junto com o EMC2. Portanto, um novo sistema operacional deve ser instalado no computador. Seguindo os passos de uma instalação intuitiva, percebe-se a disponibilidade do programa EMC2 já na área de trabalho do Ubuntu.

O próximo passo, agora, é configurar o programa para o perfil da máquina projetada. A partir da versão 2.2.2 do EMC2 foi criado um programa de configuração que auxilia a criar um arquivo para o controle de motores de passo. Este programa chama-se “EMC2 Stepconf Wizard”. Executando este druída aparece a tela de “Bem Vindo”, mostrando o objetivo do programa (Figura 3.32).



Figura 3.32: Primeira tela do “EMC2 Stepconf Wizard”.

A primeira tela informa que será criado arquivos com extensões .ini e .hal. Nestes arquivos estão disponíveis os parâmetros de configuração da máquina fresadora que receberá os comandos de controle por meio da porta paralela (LPT).

Pressionando o botão “Avançar”, dirige-se para a segunda tela (Figura 3.33).

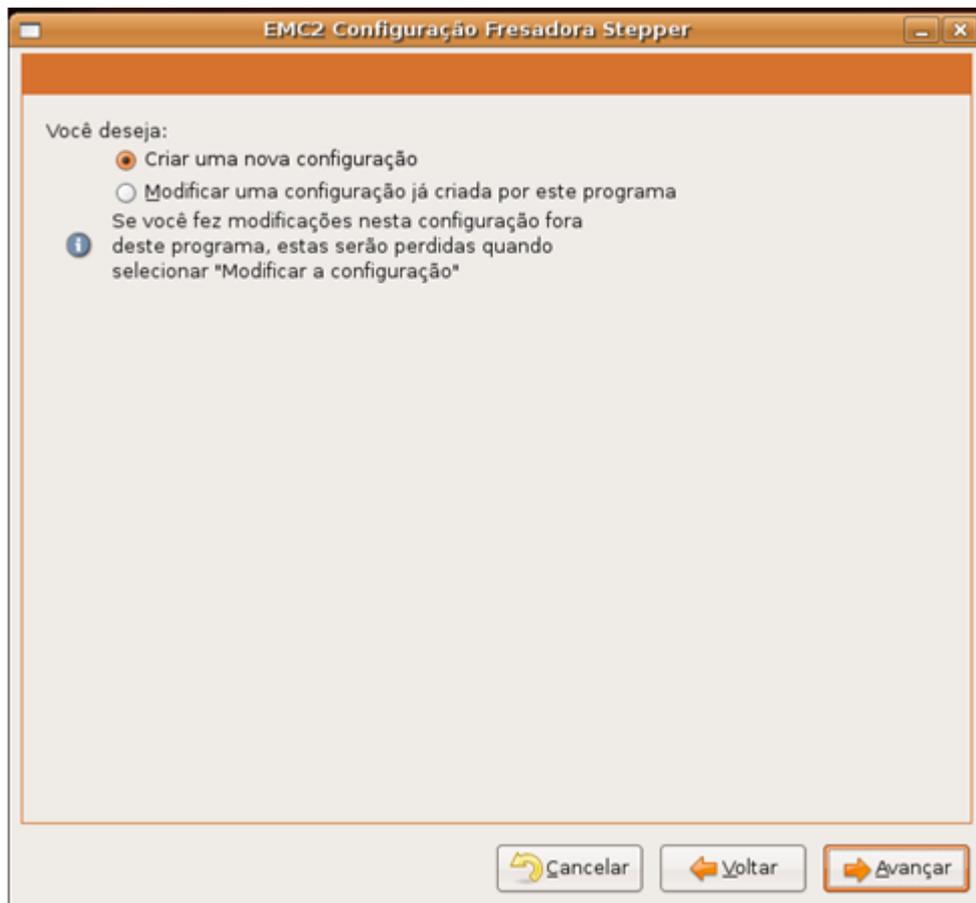


Figura 3.33: Segunda tela do “EMC2 Stepconf Wizard”.

A segunda tela de configuração dispõe de duas opções de comando. A primeira, “Criar uma nova configuração”, inicializa a configuração de uma máquina e a segunda opção altera a configuração de uma máquina.

Pressionando o botão “Avançar”, dirige-se agora para a terceira tela de configuração. Nesta etapa, adiciona-se as informações básicas a respeito da máquina fresadora, do PC e dos *drives* de potência.

EMC2 Configuração Fresadora Stepper

### Informação Básica da Máquina

Nome da Máquina: teste

Diretório da Configuração: ~/emc2/configs/teste

Configuração de Eixo: XYZ

Unidades: Milimetro

---

Características do Driver: (Multiplicar por 1000 para tempos em  $\mu$ s-or microssegundos)

Condicionadores de sinal ou isolamento como optoacopladores e filtros RC podem impor algum retardo ao tempo natural do driver.

Tipo de Driver: Outros

Step Time: 1000 ns

Step Space: 2000 ns

Direction Hold: 200 ns

Direction Setup: 200 ns

---

Endereço base LPT: 0x378 ... Período base min.: 25100 ns

Resultado Teste de Latência: 17100 ns Frequência Máxima: 39840 Hz

Aviso na tela de Troca de Ferramentas

Cancelar Voltar Avançar

Figura 3.34: Terceira tela do “EMC2 Stepconf Wizard”.

Na Figura 3.34, a primeira lacuna é a identificação da máquina. Simplesmente um nome. Posteriormente, escolhem-se quantos eixos a máquina possui. Na terceira lacuna selecionam-se a unidade dimensional.

O próximo passo é referente aos dados técnicos da controladora e todos esses dados são fornecidos pelo “Guia de Utilização” do fabricante. No campo “Tipo de Driver”, seleciona-se um dos *drivers* conhecido pelo EMC2 ou então a opção “Outros”. No caso deste trabalho, opta-se por “Outros”, visto que a controladora SMC-B-PRO não está na lista.

Continuando com os dados técnicos da controladora SMC-B-PRO, o próximo item é o “Step Time”. Este parâmetro é o tempo de duração do sinal de passo em nível alto. Na especificação do fabricante da controladora encontra-se o valor de 1.0  $\mu$ s, que corresponde à 1000 ns. O campo seguinte é o “Step Space”, este é o tempo de duração do sinal de passo no nível baixo. Na Figura 3.34, o valor do “Step Space” vale 2000 ns. O parâmetro “Direction Hold” refere-se ao tempo de duração do sinal de direção depois que o próximo sinal de passo foi emitido. E o “Direction Setup” é o tempo de duração do sinal de direção antes do sinal de passo. A Figura 3.35 exemplifica melhor os sinais de comando.

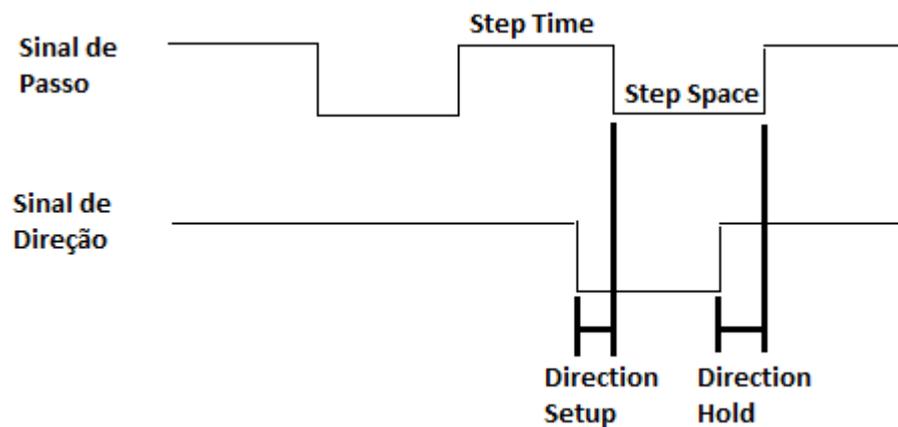


Figura 3.35: Esquema dos sinais de passo e direção.

O próximo campo, ainda na terceira tela, compreende ao “Endereço base LPT:”. Este campo é referente ao endereço de memória da porta paralela do PC cujo EMC2 foi instalado. Como já foi visto na revisão bibliográfica, o endereço padrão da porta paralela LPT1 é 0x378 (hexadecimal). E este projeto usou a LPT1 como porta de acesso aos *drives* de potência.

Por fim, o último campo refere-se ao teste de latência do computador. A latência é o tempo que o computador necessita para responder a um pedido externo. No caso deste projeto, o pedido externo é o tempo necessário para a geração de pulsos de passos. Assim, quanto menor a latência, mais rápido é o trem de pulsos.

Verifica-se neste momento que é importante usarmos um sistema em tempo real para garantir que a tarefa será executada num intervalo de tempo adequado. E o EMC2 é um *software RT (real time)*. Isso garante que as tarefas serão executadas num intervalo de tempo pré estabelecido. E o teste de latência nos fornecerá este parâmetro de relógio para garantir que o motor não perca passos.

### Teste de Latência

- Abre-se uma janela de “Terminal” no Ubuntu ;
- Digita-se: `sudo mkdir /dev/rtf; sudo mknod /dev/rtf/3 c 150 3; sudo mknod /dev/rtf3 c 150 3; cd /usr/realtime*/testsuite/kern/latency; ./run`
- Digita-se sua senha de *root*;
- Usa-se vários programas do PC, fechar e abrir janelas. Porém, não executa-se o EMC2;
- Tecla-se `ctrl +c` para interromper o teste;
- Anota-se o maior valor encontrado na coluna OVL\_MAX.

O valor encontrado de OVL\_MAX é escrito na lacuna “Resultado de teste de latência”. Para o projeto, a Figura 3.35 mostra um valor igual à 17100 ns.

Continuando a configuração pressionando o botão “Avançar”, a tela seguinte ajusta a função de cada pino da porta paralela. A Figura 3.36 mostra a tela de configuração da porta paralela.



Figura 3.36: Quarta tela de configuração do EMC2.

Como pode ser observado na Figura 3.36, são referenciados as funções de dezessete pínos da porta paralela. Visto que a porta possui vinte e cinco (25) pínos, os que sobram são “terra”. Os pínos 10 a 15 são entradas da máquina fresadora para o computador, portanto usados para implementar sensores de fim de curso. No caso deste projeto, foram aplicados sensores nos três eixos possíveis (X, Y e Z), mas o programa permite o controle de até quatro eixos.

O pino 1 é destinado à interrupção do acionamento eletrônico da máquina. O pino 2 destina-se aos comando de passos do eixo X e o pino 3 aos comando de direção deste eixo. Vale ressaltar que existe a opção de inverter o sinal TTL, isso permite que o sinal 0V indique rotação no sentido horário e 5V indique rotação no sentido anti horário ou vice e versa. Os pínos 4 e 5 configuram o eixo Y e os pínos 6 e 7 o eixo Z. Os pínos 8 e 9 ajustam o eixo A, também conhecido como quarto eixo. Os pínos 14 e 15 permitem o controle do sentido de rotação do *spindle* (retificadora, neste trabalho), porém não foi aplicado este controle no

projeto da fresadora CNC didática. Outros botões desta tela fazem parte de configuração de *drives* já conhecidos pelo EMC2, o que não é o caso do projeto.

A próxima tela de configuração apresenta os dados referentes aos eixos e à sintonia do motor de passo com a parte mecânica do projeto. A Figura 3.37 apresenta os parâmetros de configuração dos eixos.

Parâmetro	Valor	Unidade
Passos do Motor por volta:	200.0	
Micropasso do Driver:	2.0	
Redução (Motor : Fuso):	1.0	; 1.0
Passo do Fuso:	5	mm / volta
Máxima Velocidade:	100	mm / seg
Máxima Aceleração:	300	mm / s <sup>2</sup>
Local de Home:	0.0	
Curso da Mesa:	-900.0	a 900.0
Local do Sensor Home:	0.0	
Velocidade de Procura de Home:	0.05	
Direção de Contato:	Mesma	
Tempo de Aceleração até a Máxima:	0.3333s	
Distância de Aceleração até a Máxima:	16.6667mm	
Frequência da Máx. Velocidade:	8000.0Hz	
ESCALA do Eixo	80.0	

Figura 3.37: Quinta tela de configuração do EMC2.

O primeiro campo expressa quantos passos o motor realiza em uma volta. No caso do KTC-HT23, pode-se trabalhar com até 200 passos por volta, ou seja, cada passo rotaciona o motor em 1.8°. O segundo campo é referente ao modo de acionamento do motor, caso seja acionado em passo completo usa-se o valor 1, caso seja meio passo, usa-se o valor 2. O campo “Redução” considera se entre o motor e o fuso existe alguma redução mecânica. Como neste projeto não possui redução, escreve-se 1:1. O item seguinte é o passo do fuso.

Os parâmetros “Máxima Velocidade” e “Máxima Aceleração” são valores encontrados por tentativa e erro. Na verdade, a calibração é feita testando vários valores de velocidade e aceleração por meio do botão à direita e acima da tela. “Testar Eixo”. Normalmente, os valores de aceleração são maiores que os valores de velocidade.

Passa-se, agora, para os valores referentes ao ponto cartesiano que estabelece a origem cartesiana da máquina. Este é o valor no eixo X que a máquina se deslocará quando

executado o comando “*home*”. Neste caso, o valor vale 0 que é a posição da máquina quando encontra o sensor de fim de curso. O campo seguinte é o tamanho do curso da mesa no eixo X, este valor é o comprimento útil do fuso que pode ter valores tanto negativos quanto positivos. Ainda vale lembrar que este valor é um sensor virtual. Caso execute um comando para a máquina se deslocar com valor maior que o limitado neste parâmetro, o EMC2 não permitirá a movimentação. O parâmetro “Local do sensor *home*” implica no ponto cartesiano que o sensor se encontra no eixo. O campo seguinte define a velocidade que a máquina possui quando for solicitado que ela vá para sua origem cartesiana. E por fim, o último parâmetro define se a procura da origem da máquina deve ser no sentido horário ou anti horário.

Vale ressaltar que a partir dos valores de todos os parâmetros já mencionados, o próprio EMC2 gera alguns valores importantes. O tempo que a máquina atinge a aceleração máxima e a distância percorrida no fuso para atingir a máxima aceleração.

A próxima tela de configuração é idêntica a da Figura 2.38, porém ela configura o eixo seguinte, Y. Os parâmetros são os mesmos. E da mesma forma, a tela posterior à tela do eixo Y, configura o eixo Z. Depois que todos os eixos foram configurados, o “Stepconf Wizard” finalmente é concluído.

### **3.8 TESTES REALIZADOS**

Este tópico apresenta os resultados obtidos pelos alunos da disciplina Tecnologia em Comando Numérico quando os mesmos criaram códigos “G” e usaram na máquina projetada.

Para a validação da fresadora foram usinadas 15 peças com diversas complexidades geométricas. Foi estabelecido que os alunos usassem como material de trabalho uma tábua de madeira com as dimensões máximas de 250mm x 250mm x 100mm . Sobre este material de trabalho bruto foi disponibilizado uma área de 200 mm x 200 mm para usinagem, portanto ficou uma borda de 50mm para a fixação da peça na mesa de trabalho.

O resultado do projeto da fresadora CNC didática pode ser vista na Figura 3.38. Projetada num programa de CAD 3D, a máquina mostra-se fiel ao projeto, porém algumas modificações foram ocorridas durante a montagem, visto que não foi simulada a rigidez da fixação dos motores de passo e vibrações generalizadas devido a folgas mecânicas.



Figura 3.38: Foto da Fresadora CNC Didática.

As Figuras 3.39, 3.40 e 3.41 mostram os resultados obtidos por dois alunos. A peça referente à Figura 3.39 é totalmente projetada com comandos de interpolação circular. Esta peça foi usinada com uma fresa de topo para madeira com 5mm de diâmetro e apenas uma aresta de corte.

A outra peça, Figuras 3.40 e 3.41, foi projetada apenas com comandos de interpolação linear. Ela foi usinada com uma fresa de topo de 4mm contendo quatro arestas de corte. Devido aos fatos como, alta rotação da retificadora, fresa com quatro arestas e madeira, ocorreu a queima da peça, caracterizada pela cor escura nas fotos.



Figura 3.39: Peça do aluno Elias que utilizou a fresadora CNC didática.



Figura 3.40: Peça usinada pelo aluno José Oniram.



Figura 3.41: Peça do aluno José Oniram em outra perspectiva.

### 3.9 ANÁLISE DE PEÇA USINADA

Usando a peça do aluno José Oniram, mostrada nas Figuras 3.40 e 3.41, pode-se verificar o comportamento da máquina quanto ao seu posicionamento e calcular os erros vinculados aos eixos X, Y e Z. Além disso, pode-se realizar uma análise de paralelismo e perpendicularismo entre eixos X e Y da máquina. Esta análise é fundamental para verificar o quão próximo a máquina chegou do projeto idealizado.

Inicia-se o procedimento de análise dos eixos X e Y por meio da Figura 3.42. Ela apresenta um esboço da peça e mostra as medidas pretendidas pelo aluno. Um bom parâmetro para estimarmos a precisão dos eixos é calcular o Erro Padrão. Equação baseada no desvio padrão e encontrada em qualquer livro de Estatística.

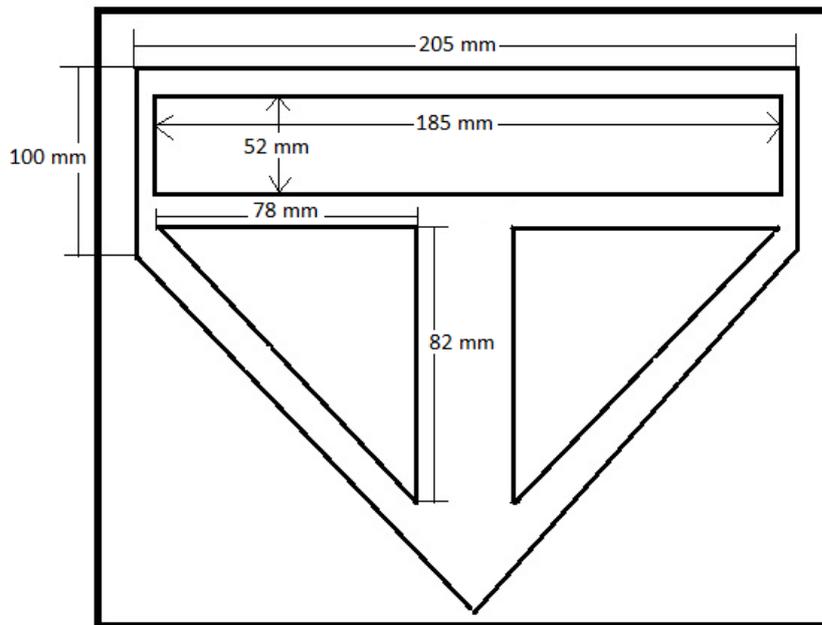


Figura 3.42: Esboço da peça com algumas medidas desejadas.

Devido à geometria da ferramenta de corte, alguns cantos da peça ficaram levemente arredondados, atrapalhando as medições. Portanto, vale atentar para as medidas referente à 185mm no eixo X e 52mm no eixo Y.

A Tabela 3.3 mostra as medidas encontradas na peça.

REFERÊNCIA	MEDIDAS ENCONTRADAS				
52 mm	52,3	52,32	52,28	52,3	52,24
185 mm	184,92	184,96	185,06	185	185,06

Tabela 3.3: Medidas encontradas na peça usinada.

### Erro Padrão do Eixo X

A partir da referência 185mm e das medidas encontradas é possível encontrar o Desvio padrão e posteriormente o erro.

O Desvio padrão é encontrado pela equação abaixo, onde  $n$  é o número de amostras,  $x_i$  é o valor de cada medida encontrada e  $\bar{x}$  é a média entre os valores encontrados:

$$\sigma x = \sqrt{(1 \div n) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\sigma x = 0,027mm$$

O Erro Padrão do Eixo X vale:

$$Ex = \frac{\sigma x}{\sqrt{n}}$$

$$Ex = 0,012mm$$

### **Erro Padrão do Eixo Y**

A partir da referência 52mm e das medidas encontradas é possível encontrar o Desvio padrão e posteriormente o erro.

O Desvio padrão é encontrado pela equação abaixo, onde  $n$  é o número de amostras,  $y_i$  é o valor de cada medida encontrada e  $\bar{y}$  é a média entre os valores encontrados:

$$\sigma y = \sqrt{(1 \div n) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$\sigma y = 0,014mm$$

O Erro Padrão do Eixo X vale:

$$Ey = \frac{\sigma y}{\sqrt{n}}$$

$$Ey = 0,006mm$$

Encontrado os erros dos eixos X e Y, analisa-se o comportamento do eixo Z (Vertical). Esta análise é realizada da mesma forma que as anteriores, alterando apenas a medida de referência. A peça do aluno é um trabalho em baixo relevo cuja profundidade é constante e mede 4mm. A Figura 3.43 apresenta o esboço da peça com destaques aos locais das medidas encontradas.

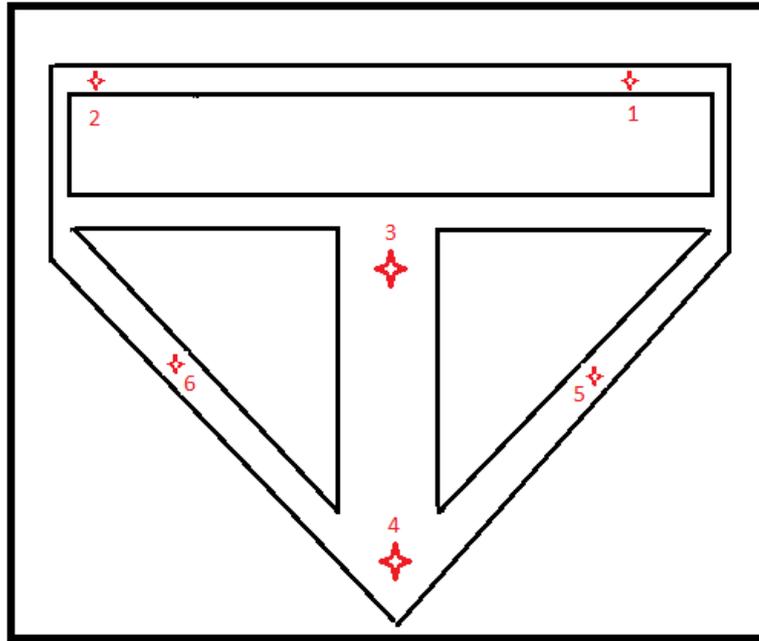


Figura 3.43: Esboço da peça usinada com as marcações de coleta de dados.

A Tabela 3.4 apresenta as medidas encontradas para o eixo Z.

REFERÊNCIA	MEDIDAS ENCONTRADAS					
4mm	4,02	3,68	4,08	4,02	4,4	4

Tabela 3.4: Medidas referente ao eixo Z.

### Erro Padrão do Eixo Z

A partir da referência 4mm e das medidas encontradas é possível encontrar o Desvio padrão e posteriormente o erro.

O Desvio padrão é encontrado pela equação abaixo, onde  $n$  é o número de amostras,  $z_i$  é o valor de cada medida encontrada e  $\bar{z}$  é a média entre os valores encontrados:

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}$$

$$\sigma_z = 0,263mm$$

O Erro Padrão do Eixo Z vale:

$$E_z = \frac{\sigma_z}{\sqrt{n}}$$

$$E_z = 0,11mm$$

As próximas análises referem-se aos cálculos dos erros de paralelismo e perpendicularismo. Para estas análises foram necessárias medições por instrumentos do Laboratório de Metrologia. Enviando a peça aos cuidados do Técnico do Laboratório de Metrologia obteve-se os seguintes resultados.

A Figura 3.44 mostra a enumeração das retas da peça que permitiram encontrar o valor dos ângulos.

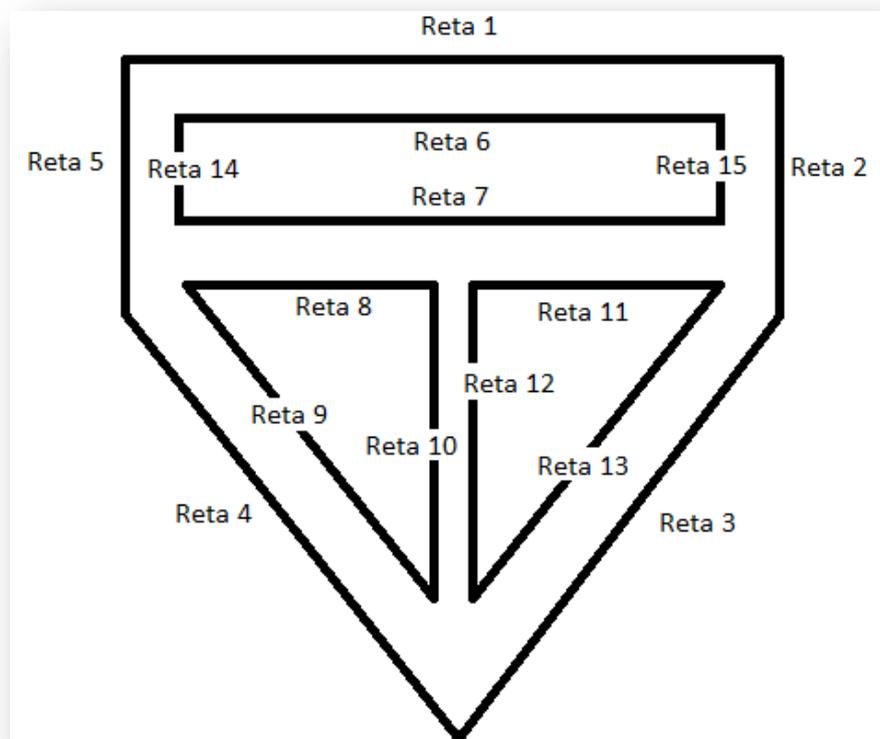


Figura 3.44: Esboço para análise da peça do aluno José Oniram.

Como pode ser observado na Figura 3.445, cada par de retas que se cruzam, formam-se ângulos. E os pares de retas que não se cruzam são consideradas retas paralelas. Portanto, o trabalho do técnico foi medir os ângulos formados por duas retas da peça.

Para esta análise de paralelismo e perpendicularismo é interessante apenas os dados referentes aos ângulos de 90° e 180°. A Tabela 4.1 mostra as medidas encontradas pelo Laboratório de Metrologia.

REFERÊNCIA	ÂNGULOS ENCONTRADOS								
90°	90,22	90,26	90,24	90,24	90,22	90,2	89,81	89,86	89,79
180°	180,11	180,43	178,96	180,51	180,1	180,21	179,87	-----	-----

Tabela 3.5: Valores dos ângulos encontrados pelo Técnico em Metrologia.

#### Erro Padrão de Paralelismo entre os Eixos X e Y

A partir da referência 180° e das medidas encontradas é possível encontrar o Desvio padrão e posteriormente o erro.

O Desvio padrão é encontrado pela equação abaixo, onde  $n$  é o número de amostras,  $y_i$  é o valor de cada medida encontrada e  $\bar{y}$  é a média entre os valores encontrados:

$$\sigma_{||} = \sqrt{(1 \div n) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$\sigma_{||} = 0,477^\circ$$

O Erro Padrão de Paralelismo vale:

$$E_{||} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{n}}$$

$$E_{||} = 0,180^\circ$$

#### Erro Padrão de Perpendicularismo entre os Eixos X e Y

A partir da referência 90° e das medidas encontradas é possível encontrar o Desvio padrão e posteriormente o erro.

O Desvio padrão é encontrado pela equação abaixo, onde  $n$  é o número de amostras,  $y_i$  é o valor de cada medida encontrada e  $\bar{y}$  é a média entre os valores encontrados:

$$\sigma_T = \sqrt{(1 \div n) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$\sigma_T = 0,211^\circ$$

O Erro Padrão de Perpendicularismo vale:

$$E_T = \frac{\sigma y}{\sqrt{n}}$$

$$E_T = 0,07^\circ$$

A Tabela 3.6 apresenta um resumo com os Erros encontrados para a Fresadora CNC Didática.

Erro Padrão do Eixo X	0,027 mm
Erro Padrão do Eixo Y	0,06 mm
Erro Padrão do Eixo Z	0,11 mm
Erro de Paralelismo entre X e Y	0,180°
Erro de Perpendicularismo entre X e Y	0,07°

Tabela 3.6: Resumo dos Erros estatísticos encontrados na Fresadora CNC Didática.

## 4 CONCLUSÃO

A fresadora CNC atingiu os resultados esperados na promoção de um ambiente didático, pois além de introduzir uma nova ferramenta de aprendizado aos alunos, permitiu uma interação entre o ensino teórico e prático da tecnologia de comando numérico. A satisfação dos alunos (usuários) junto à máquina tornou-se explícita, pois cada aluno que projetou um código “G” foi capaz de transformá-lo numa peça usinada como especificado.

O processo de desenvolvimento da máquina também alcançou o esperado na integração de uma estrutura mecânica com um sistema eletrônico e um programa de controle, visto que a manufatura e montagem dos elementos mecânicos respeitaram o projeto CAD especificado na concepção da máquina. Além disso, os motores de passo foram corretamente acionados pelas controladoras de potência e fielmente controlados pelo programa EMC2, não existindo perdas de passos significativas.

Um fato importante constatado na realização do trabalho foi o empenho na manufatura das peças mecânicas. A utilização das máquinas ferramentas do Laboratório de Usinagem dificultou a eliminação de folgas mecânicas, visto que as máquinas estão sucateadas para usinagem com precisão da ordem de 0,005 mm. Este fato foi responsável pela usinagem de alguns elementos mecânicos mais de uma vez. No entanto, os resultados da fabricação e montagem mostraram-se satisfatórios para a aplicação didática da fresadora CNC, até porque o Erro Padrão do eixo X foi 0,027 mm, o Erro Padrão do eixo Y foi 0,06 mm, o Erro Padrão do eixo Z foi 0,11 mm, o Erro Padrão de paralelismo foi 0,180° e o Erro Padrão de Perpendicularismo foi de 0,07°.

No prosseguimento do projeto da fresadora CNC, um grande esforço no controle da velocidade da retificadora será necessário, com o objetivo de habilitar os comandos de liga e desliga e a escolha da velocidade de rotação por meio do programa EMC2.

## 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Machado, A. “**COMANDO NUMÉRICO APLICADO ÀS MÁQUINAS-FERRAMENTA**” 1ª edição-Cone Editora, 1986.

[2] Silva, S. D. da, “CNC: PROGRAMAÇÃO DE COMANDOS NUMÉRICOS COMPUTADORIZADOS: TORNEAMENTO” 4ª edição – Editora Érica , 2005.

[3] COSTA, E. S. “**Disciplina: Processo de Usinagem**”.Divinópolis, MG. 2006. 6 p.

[4] SANTOS, D. R. Fuso de esferas recirculantes e guias lineares. **Mecatrônica atual**, São Paulo, Abril, 2001. Número 3, 52 p.

[5] KASSOUF, S. Acoplamento elástico sem folga. **Mecatrônica atual**, São Paulo, Dezembro, 2004. Número 19, 52 p.

[6] DOMINGOS, W. R. Conceitos de motores de passo. **Mecatrônica fácil**, São Paulo, Abril, 2009. Número 38, 48 p.

[7] Betiol, W. E. G., “CONTROLE DE ACIONAMENTO POR MOTORES DE PASSO APLICADOS A IMPRESSORAS MATRICIAIS”. Curitiba, 1989.145 p.

[8] SÃO PAULO. Parker Hannifin Ind. Com Ltda. **Parker Automation**. Tecnologia Eletromecânica. Jacareí, 2003. 60p.

[9] STEWART, Z. **Interfacing the IBM PC parallel printer port**. Out. 1994 Disponível em < ftp://ftp.armory.com/pub/user/rstevew/LPT/zha96lpt.faqhtml> . Acesso em 13 ago. 2009.

[10] TEAM, T. E. **User manual v2.3**. Boston: GNU Free Software Documentation License. 2009. 159 p.

[11] SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. Porto Alegre : Bookman, 2005. 960 p.

[12] MESSIAS, A. R. **Introdução à porta paralela**. Disponível em < 85TTP://www.rogercom.com/pparalela/introducao.htm> . Acesso em 18 mai. 2009

[13] CORRÊA, M. B. , IOCCA, E. G. Desenvolvimento de um torno CNC didático.2006.Projeto de Graduação.Universidade de Brasília.

[14]SOUZA, G. F. M., ADAMOWSKI, J. C., COELHO, T. H. Mini torno CNC. 2006. 88 p. Iniciação Científica.Universidade de São Paulo.

[15] CAROZZI, H. J. C. Projeto de uma fresadora controlada por comando numérico computadorizado. 2005. 99 p. Projeto de graduação. Faculdade Assis Gurgacz

[16] SILVA, E. **Motores Eléctricos**. Disponível em <<http://eduvisilva.com.sapo.pt/melectricos.htm>> . Acesso em 19 nov. 2009

[17] MARTINS, M. S. **Motores de Passo**. Disponível em <<http://msm.no.sapo.pt/stepper/stepper.html>> . Acesso em 19 nov. 2009

BESANT, C. B. **Projeto e fabricação com auxílio de computador**. São Paulo: 3ª edição- Editora Campus. 1985. 136p.

POLAK, P. **Projeto em engenharia**. São Paulo: 1ª edição- Editora Hemus. 2004. 247p.

BEER, F. P. , JOHNSTON, E. R. **Mecânica vetorial para engenheiros**. São Paulo: 5ª edição Editora Makron books.1915. 793 p.

KOSOW, I. I. **Máquinas eléctricas e transformadores**. São Paulo: 19ª edição Editora Pearson education.1915. 457 p.

BAUCO, S. A. **Usinagem em altíssimas velocidades**. São Paulo: 2ª edição Editora Êrica. 2003. 380 p.

GEOF, W. **CNC Robotics**. New York: 1ª edição Editora McGran-Hill.2003. 320 p.

CARVALHO, R. S., DUTRA, J. C. , BONACORSO, N. G. Implementação de controlador CNC de baixo custo em manipulador robótico para soldagem. Salvador: CONEM, 2008. 9 p. (CONEN)

FERREIRA, A. P. de S., COELHO, E. A. , RODRIGUES, E. S. *Drive* de corrente bipolar para acionamento de motores de passo. Curitiba: ENECA, 2006. 3 p. (ENECA)

HOBBYCNC. Guia de utilização da controladora de motor de passo bipolar SMC-B-PRO. Belo Horizonte, 2008. 9 p.

GESSER, F. J., POZZOBON, F. R. , BONACORSO, N. G. Desenvolvimento e construção de uma fresadora CNC de baixo custo destinada à confecção de pranchas de surf. Florianópolis: CEFET, 2008. 10 p.

ECKHARDT, M. , RIBEIRO, L. F. , SCHWINGEL, F. P. , PELLIN, A. Avaliação geométrica de máquinas ferramentas CNC através do método de padrões corporificados. Panambi: UNIJUI, 2008. 7 p.

CAROZZI, H. J. C. Projeto de uma fresadora controlada por comando numérico computadorizado. 2005. 99 p. Projeto de graduação. Faculdade Assis Gurgacz

ELETRONICA. Estudo do motor de passo e seu controle. Geocites. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em <http://www2.eletronica.org/artigos/outros/estudo-do-motor-de-passo-e-seu-controle-digital>> Acesso em: 02 de outubro 2009

IME. Trabalho sobre motores de passo. Coimbra, 2002. Disponível em [http://www.ime.eb.br/~pinho/micro/trabalhos/Mecatronica\\_TP1.pdf](http://www.ime.eb.br/~pinho/micro/trabalhos/Mecatronica_TP1.pdf)> Acesso em: 02 de outubro 2009

SABER ELETRONICA. Artigo de revista de eletrônica. São Paulo, 2008. Disponível em <http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/474>> Acesso em: 02 de outubro 2009

SEARCH ENGINE. Vários arquivos para "download". Estados Unidos da América, 2008. Disponível em <http://www.pdf-search-engine.com/motor-de-passo-pdf.html> > Acesso em: 02 de outubro 2009

MECATRONICA ATUAL. Motores de passo . São Paulo, 2009. Disponível em <http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/560>> Acesso em: 02 de outubro 2009

## 6 ANEXOS

Anexo 1 – Características gerais do microcontrolador AVR Attiny, ATMEL®

Anexo 2 – Características gerais do motor de passo KTC-HT23-400, Kalatec®

Anexo 3 – Desenho CAD 2D da peça “Suporte do Fuso”, tolerância de 0,02mm

Anexo 4 – Desenho CAD 2D da peça “Acoplador”, tolerância de 0,02mm

Anexo 5 – Desenho CAD 2D da peça “Mancal”, tolerância de 0,02mm

Anexo 6 – Desenho CAD 2D da peça “Gabarito da Mesa XY”, tolerância de 0,02mm

Anexo 7 – Desenho CAD 2D da peça “Fixação do Motor”, tolerância de 0,02mm

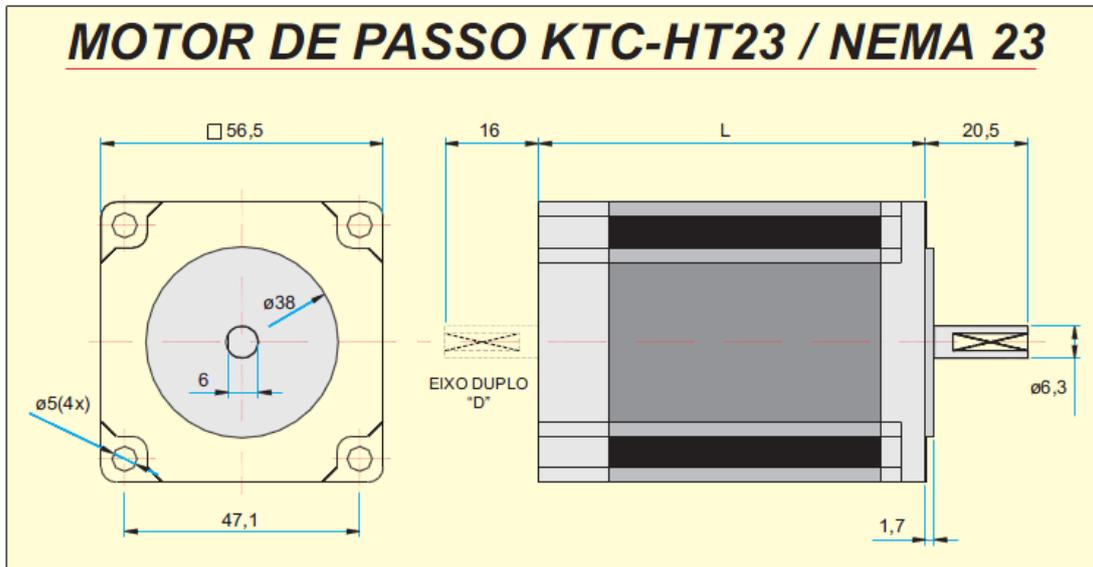
Anexo 8 – Desenho CAD 2D da peça “Suporte Retificadora 1”, tolerância de 0,02mm

Anexo 9 – Desenho CAD 2D da peça “Suporte Retificadora 2”, tolerância de 0,02mm

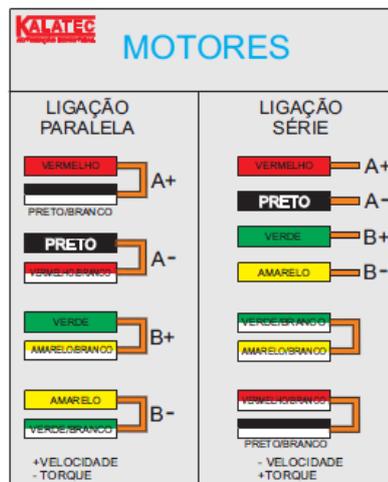
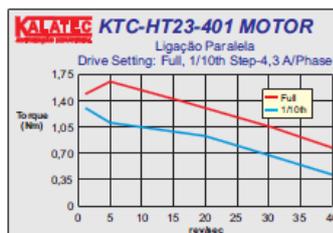
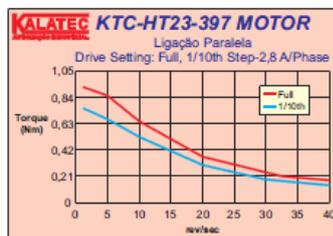
Anexo 10 – Lista de materiais usados no projeto

## ANEXO 1: Características gerais do microcontrolador AVR Attiny, ATMEL®

<p><b>Features</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Utilizes the AVR® RISC Architecture</li><li>• AVR – High-performance and Low-power RISC Architecture<ul style="list-style-type: none"><li>– 120 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution</li><li>– 32 x 8 General Purpose Working Registers</li><li>– Fully Static Operation</li><li>– Up to 20 MIPS Throughput at 20 MHz</li></ul></li><li>• Data and Non-volatile Program and Data Memories<ul style="list-style-type: none"><li>– 2K Bytes of In-System Self Programmable Flash Endurance 10,000 Write/Erase Cycles</li><li>– 128 Bytes In-System Programmable EEPROM Endurance: 100,000 Write/Erase Cycles</li><li>– 128 Bytes Internal SRAM</li><li>– Programming Lock for Flash Program and EEPROM Data Security</li></ul></li><li>• Peripheral Features<ul style="list-style-type: none"><li>– One 8-bit Timer/Counter with Separate Prescaler and Compare Mode</li><li>– One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare and Capture Modes</li><li>– Four PWM Channels</li><li>– On-chip Analog Comparator</li><li>– Programmable Watchdog Timer with On-chip Oscillator</li><li>– USI – Universal Serial Interface</li><li>– Full Duplex USART</li></ul></li><li>• Special Microcontroller Features<ul style="list-style-type: none"><li>– debugWIRE On-chip Debugging</li><li>– In-System Programmable via SPI Port</li><li>– External and Internal Interrupt Sources</li><li>– Low-power Idle, Power-down, and Standby Modes</li><li>– Enhanced Power-on Reset Circuit</li><li>– Programmable Brown-out Detection Circuit</li><li>– Internal Calibrated Oscillator</li></ul></li><li>• I/O and Packages<ul style="list-style-type: none"><li>– 18 Programmable I/O Lines</li><li>– 20-pin PDIP, 20-pin SOIC, 20-pad QFN/MLF</li></ul></li><li>• Operating Voltages<ul style="list-style-type: none"><li>– 1.8 - 5.5V (ATtiny2313V)</li><li>– 2.7 - 5.5V (ATtiny2313)</li></ul></li><li>• Speed Grades<ul style="list-style-type: none"><li>– ATtiny2313V: 0 - 4 MHz @ 1.8 - 5.5V, 0 - 10 MHz @ 2.7 - 5.5V</li><li>– ATtiny2313: 0 - 10 MHz @ 2.7 - 5.5V, 0 - 20 MHz @ 4.5 - 5.5V</li></ul></li><li>• Typical Power Consumption<ul style="list-style-type: none"><li>– Active Mode<ul style="list-style-type: none"><li>1 MHz, 1.8V: 230 µA</li><li>32 kHz, 1.8V: 20 µA (including oscillator)</li></ul></li><li>– Power-down Mode<ul style="list-style-type: none"><li>&lt; 0.1 µA at 1.8V</li></ul></li></ul></li></ul>	 <hr/> <p><b>8-bit AVR® Microcontroller with 2K Bytes In-System Programmable Flash</b></p> <hr/> <p><b>ATtiny2313/V</b></p> <p><b>Preliminary Summary</b></p>
---	---



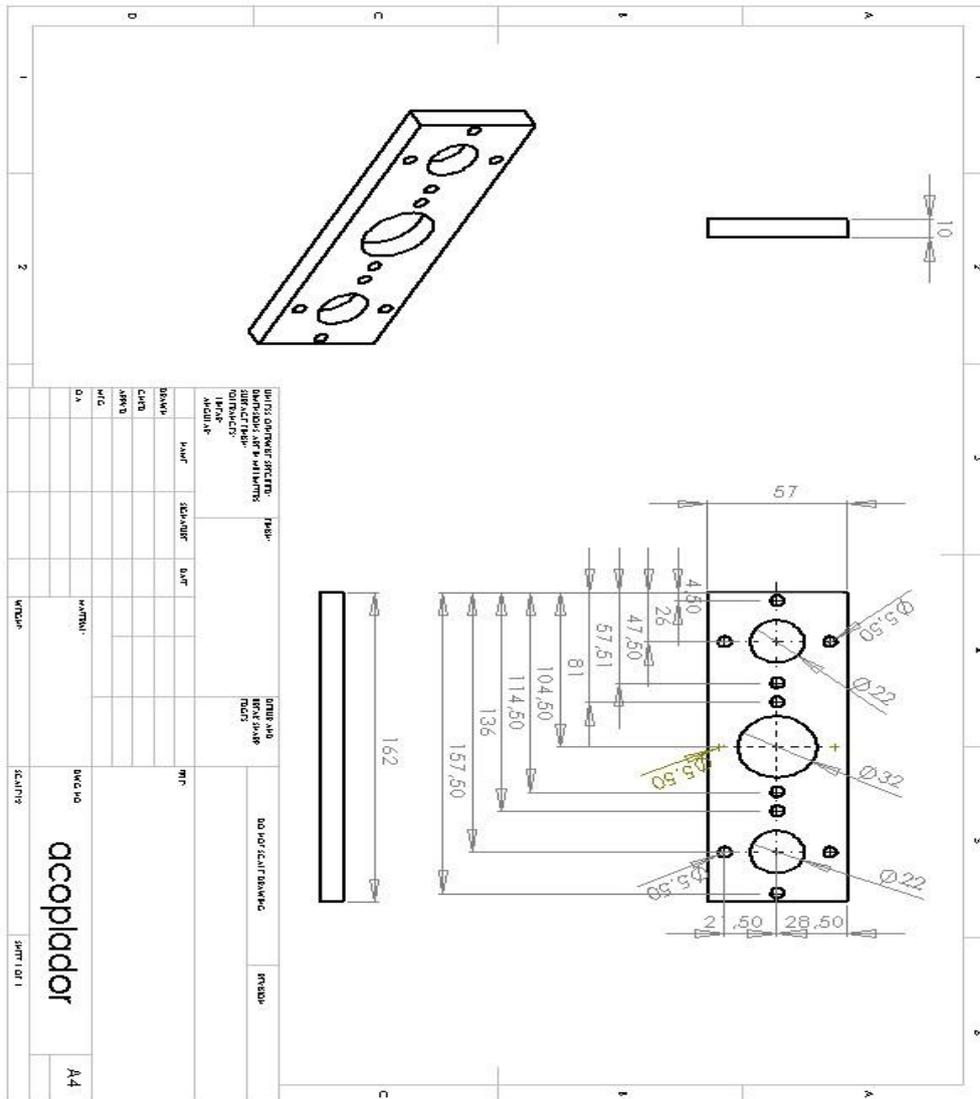
MODELO	LIGAÇÃO DO MOTOR 1=SÉRIE 2=PARALELO 3=UNIPOLAR	COMPRIMENTO "L" (mm)	MINIMO TORQUE ESTÁTICO (N.m)	FIOS	STEP (ÂNGULO)	VOLTS	AMPS	OHMS	mH	ROTOR INÉRCIA (g.cm <sup>2</sup> )	MOTOR PESO (Kg)
KTC-HT23-394	1	40,6	0,54	8	1,8	4,0	1,41	2,8	5,6	120	0,45
	2					2,0	2,38	0,7	1,4		
	3		2,8			2,00	1,4	1,4			
KTC-HT23-397	1	59	1,25	8	1,8	5,1	1,41	3,6	10,0	300	0,69
	2		2,5			2,38	0,9	2,5			
	3		3,6			2,00	1,8	2,5			
KTC-HT23-400	1	76	1,86	8	1,8	6,4	1,41	4,5	14,4	480	1,00
	2		3,2			2,38	1,1	3,6			
	3		4,5			2,00	2,3	3,6			
KTC-HT23-401	1	76	1,86	8	1,8	4,2	2,12	2,0	6,4	480	1,00
	2		2,1			4,24	0,5	1,6			
	3		3,0			3,00	1,0	1,6			



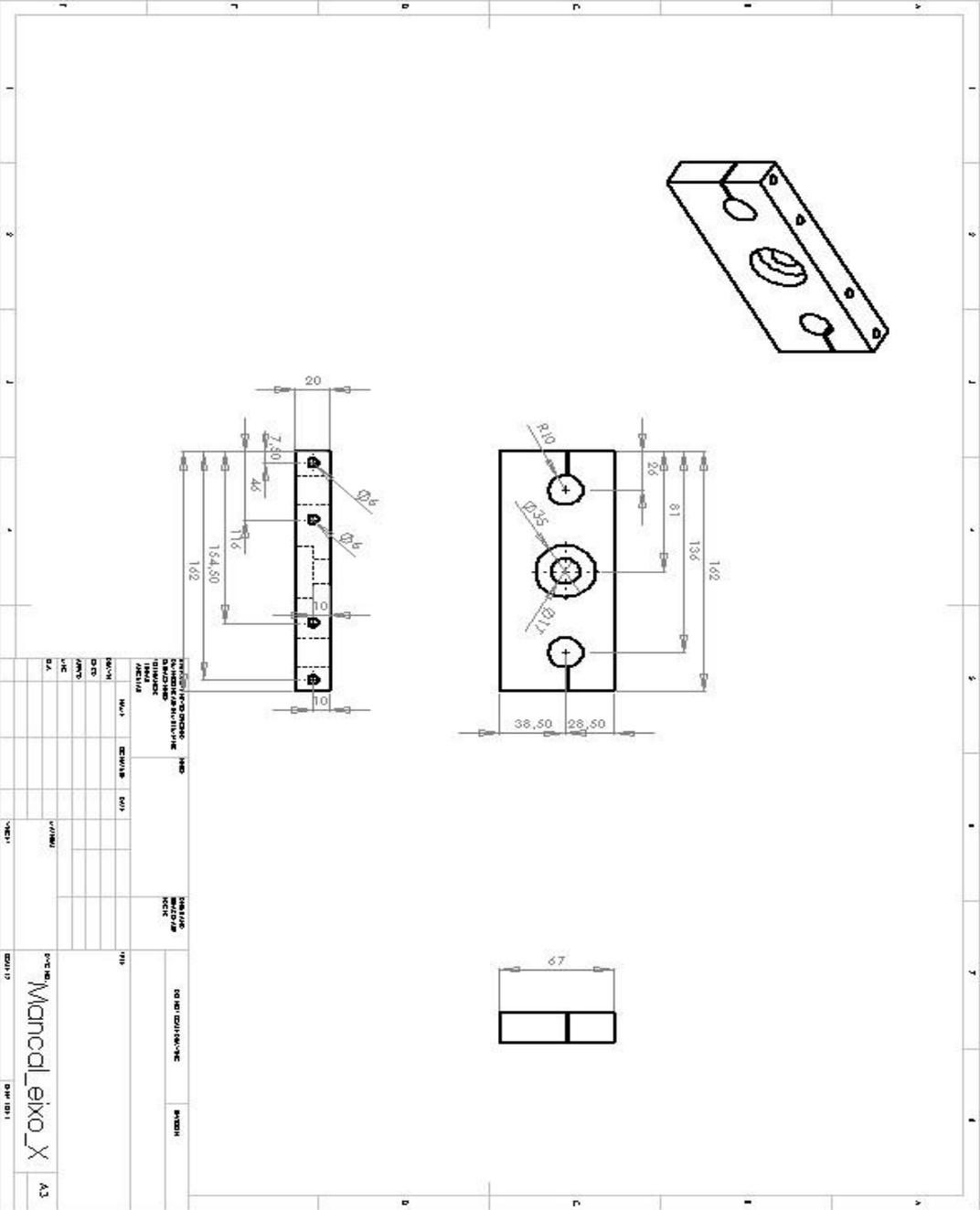
Bymatins



Anexo 4 – Desenho CAD 2D da peça “Acoplador”, tolerância de 0,02mm

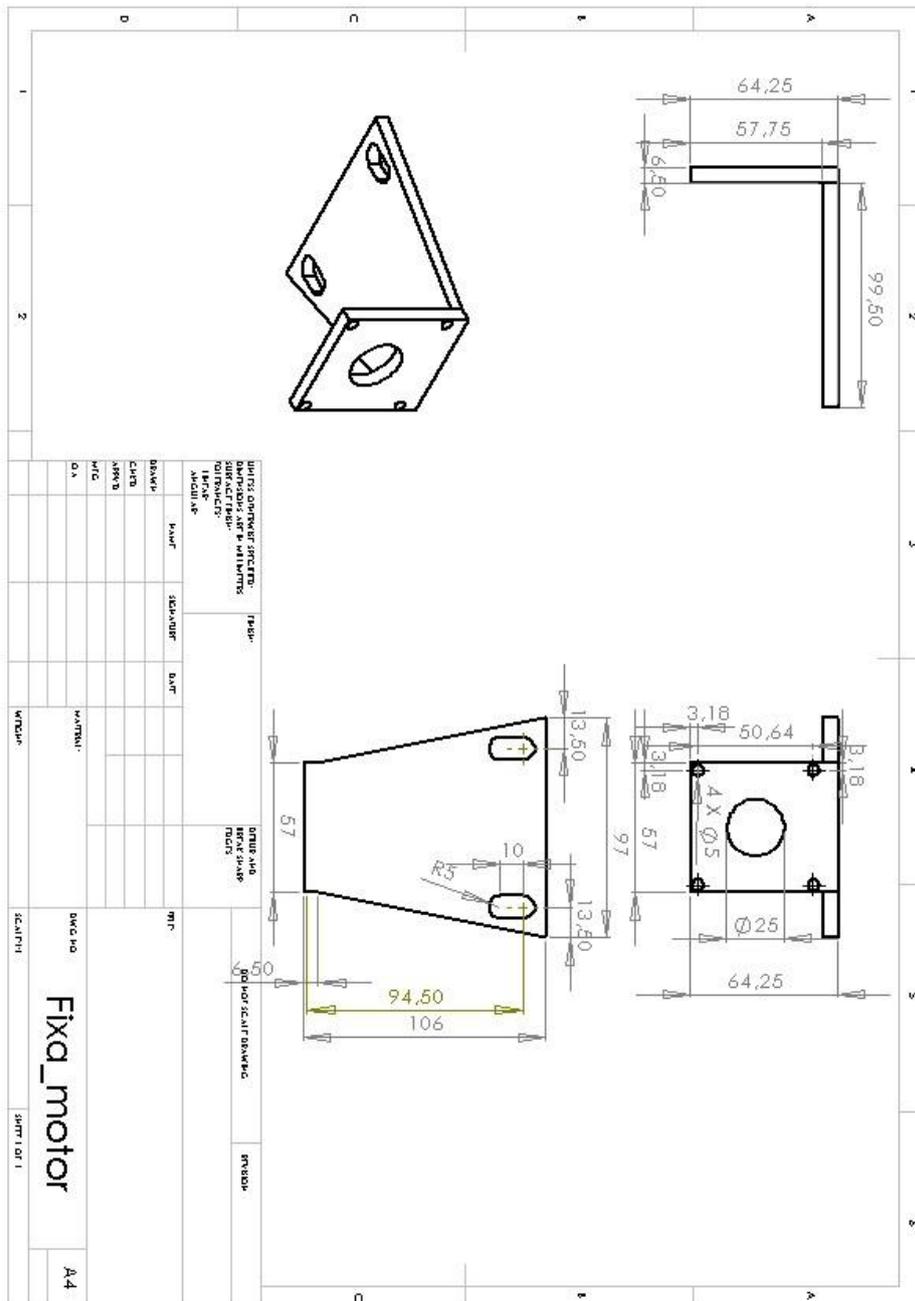


Anexo 5 – Desenho CAD 2D da peça “Mancal”, tolerância de 0,02mm

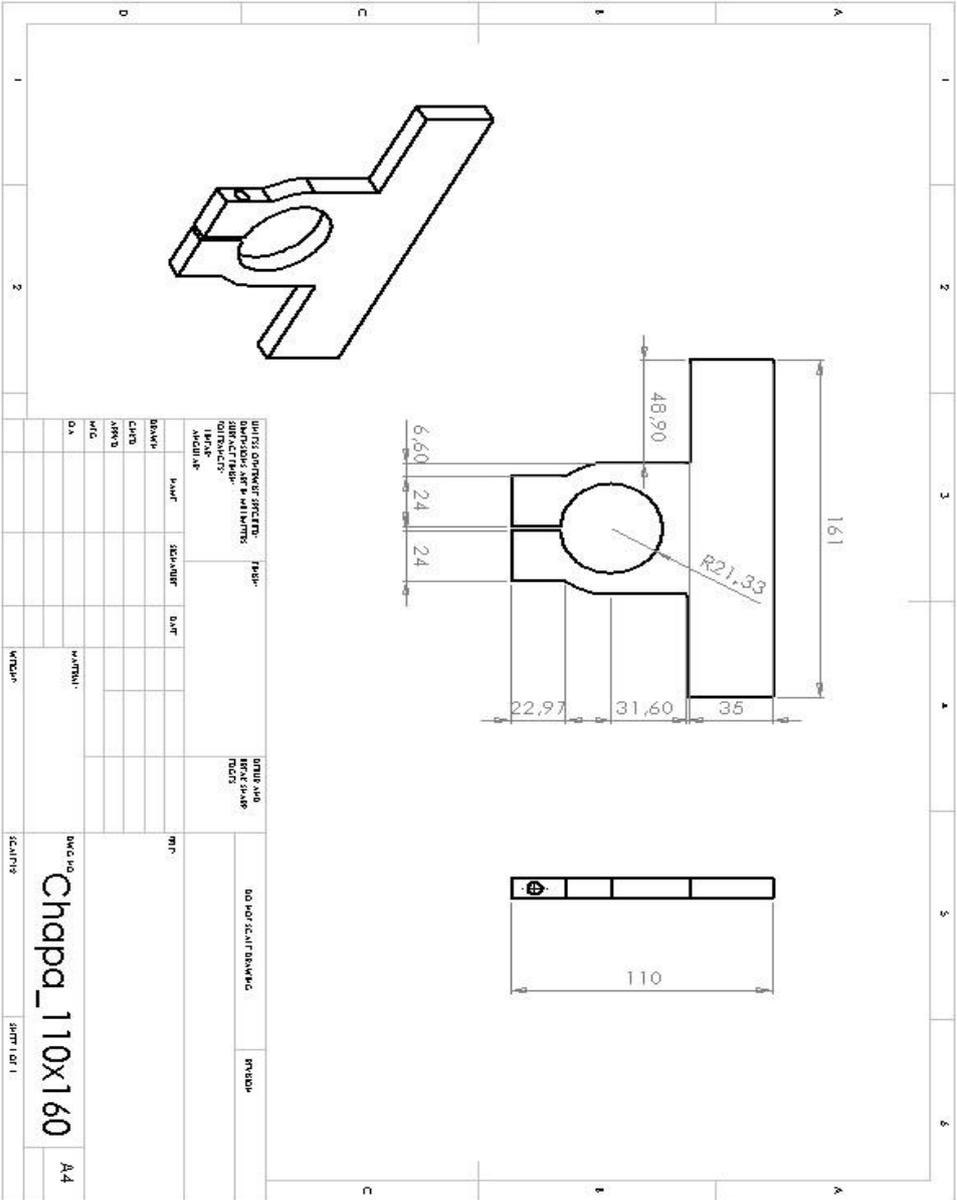




Anexo 7 – Desenho CAD 2D da peça “Fixação do Motor”, tolerância de 0,02mm



Anexo 8 – Desenho CAD 2D da peça “Suporte Retificadora 1”, tolerância de 0,02mm





Anexo 10 – Lista de materiais utilizados no projeto

<b>MATERIAIS UTILIZADOS</b>	<b>QUANTIDADE (Un)</b>	<b>FORNECEDOR</b>
<b>Fusos de esferas recirculantes 430 mm</b>	2	Kalatec
<b>Fusos de esferas recirculantes 320 mm</b>	1	Kalatec
<b>Guias de esferas 430mm</b>	4	Kalatec
<b>Guias de esferas 320mm</b>	2	Kalatec
<b>Luvas para Guias de esferas</b>	12	Kalatec
<b>Perfis em Alumínio 40 mm x 40 mm x 580 mm</b>	4	Famak
<b>Perfis em Alumínio 40 mm x 40 mm x 410 mm</b>	4	Famak
<b>Perfis em Alumínio 40 mm x 40 mm x 610 mm</b>	2	Famak
<b>Perfis em Alumínio 40 mm x 40 mm x 310 mm</b>	2	Famak
<b>Perfis em Alumínio 30 mm x 30 mm x 300 mm</b>	10	Famak
<b>Motores de Passo KTC-HT23-400</b>	3	Kalatec
<b>Controladoras de Potência SMC-PRO-B</b>	3	HobbyCNC
<b>Transformadores elétricos 220v/24v 100w</b>	3	HobbyCNC
<b>Retificadora GS27L</b>	1	Bosch
<b>Chapa em Alumínio 1/8in 300 mm x 300 mm</b>	1	Brasília Metais
<b>Chapa em Alumínio 1/4in</b>	não calculado	Brasília Metais
<b>Chapa em Alumínio 1/2in</b>	não calculado	Brasília Metais
<b>Computador Pentium 166Mhz</b>	1	Sucata