



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

WILLIAN SILVA PINTO

FRESADORA CNC DIDÁTICA

ARAXÁ-MG

2017

WILLIAN SILVA PINTO

FRESADORA CNC DIDÁTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende

ARAXÁ-MG

2017



Serviço Público Federal
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL / ARAXÁ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – ATA DE DEFESA

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL DO ALUNO WILLIAN SILVA PINTO

Às 14 horas do dia 07 de julho de 2017, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/ Unidade Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **Fresadora CNC didática**, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Engenheiro de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, *Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende*, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Após a reunião da Banca Avaliadora, o candidato foi considerado APROVADO com nota final de: 81 / 100 (oitenta e um pontos em cem pontos).

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno abaixo-assinado declara que o trabalho ora identificado é de sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que as mesmas identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos autores, quando necessárias. Declara ainda, neste âmbito, não estar violando direitos de terceiros.

WILLIAN SILVA PINTO - [Assinatura] - Araxá, 07 de julho de 2017.
Nome do Aluno Assinatura Local e Data

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Araxá, 07 de julho de 2017.

[Assinatura]
Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende
Orientador

[Assinatura]
Prof. Dr. Carlos Alberto Domingos Ramos
Avaliador

[Assinatura]
Prof. Me. Alexandre Dias Linhares
Avaliador

[Assinatura]
Prof. Me. Herbert Radispiel Filho
Avaliador/Suplente

DEDICO ESTE TRABALHO

Aos meus pais e irmãos, em especial minha mãe e minha irmã por serem responsáveis pelo meu regresso aos estudos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela experiência única e gratificante vivida durante todo o curso. Aos valiosos e estimados amigos que, assim como eu, fizeram parte e companhia nesta engrandecedora jornada, sendo eles: Carlos Dias da Silva Junior, Eduardo Henrique Lemos, Daniel Alves, Pedro Henrique de Oliveira Martins Quintão, Tiago Bruno Dias, Rafael Magalhães Carvalho, eternos membros e desenvolvedores no Núcleo de Desenvolvimento de Robótica, ao Prof. Alexandre Dias Linhares. Todos acima citados inclusive eu, fomos responsáveis pela existência do NDR, assim como as várias e valiosas conquistas.

A minha namorada Bruna Starling Costa, o melhor presente que a faculdade poderia ter me dado. Obrigado pelo carinho, cumplicidade e compreensão. Sou grato por me encorajar nos momentos de dificuldades e desânimo e por ser uma brisa em meio a tantas tensões.

Em especial a meus pais e irmãos, por serem parte fundamental em toda minha vida.

Ao meu orientador pelo apoio, ajuda e dedicação, foi parte importante em todo desenvolvimento deste projeto.

A empresa Torno Mac, por ter disponibilizado o acesso a toda infraestrutura, possibilitando a construção da máquina.

Não confunda derrotas com fracasso nem vitórias com sucesso. Na vida de um campeão sempre haverá algumas derrotas, assim como na vida de um perdedor sempre haverá vitórias. A diferença é que, enquanto os campeões crescem nas derrotas, os perdedores se acomodam nas vitórias.

Roberto Shiniyashiki

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo o desenvolvimento de um projeto, da fabricação e implementação de uma fresadora com Comando Numérico Computadorizado de pequeno porte e didática. A construção desta fresadora didática, além do conhecimento proporcionado ao autor durante seu desenvolvimento e construção, visa possibilitar o acesso da comunidade em geral a estas tecnologias, com a utilização de materiais e métodos que implicam em uma concepção com menor custo financeiro, isso quando comparado aos equipamentos similares existentes no mercado. Tem por objetivo também, promover o acesso das entidades de ensino voltadas para a área de usinagem e eletrônica, a este tipo de equipamento, despertando o interesse e o conhecimento nas áreas envolvidas, o que torna viável a construção nas próprias instituições. Este trabalho disponibiliza todo seu projeto mecânico, eletroeletrônico, assim como métodos utilizados na sua construção. Faz uso de Firmware e Software gratuito, ambos abertos, possibilitando modificações, customizações e aperfeiçoamentos.

Palavras-chave: Fresadora. Didática. CNC.

ABSTRACT

This final Project aims the development of design, the manufacturing and the implementation of a small and didactic mini router with Computer Numeric Control. The construction of this didactic machine, in addition to the knowledge provided to the author during your development and construction, aims to facilitate the access of the community as a whole to these technologies, with the use of materials and methods that imply a cheaper design, than when compared to similar equipments on the market. It aims also to promote the access of educational entities focused on the area of machining and electronics, this type of equipment, arousing the interest and knowledge in the areas involved, which makes feasible the construction in the institutions themselves. This work provides all your mechanical design, electrical and electronics, as well as methods used in your construction. It make use free Software and Firmware, both open, enabling modifications, customizations and improvements.

Keywords: Mini Router. Didactic. CNC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Fresadora de Eli Whitney.	16
Figura 2.1: Fresadora Vertical com Comando NC.	20
Figura 2.2: Gráfico de exatidão e repetibilidade.	26
Figura 2.3: Intervalo de incerteza de um mensurando.	27
Figura 2.4: Distribuição normal.....	27
Figura 2.5: Barras de guias lineares SAE/AISI/ABNT 1045 H7.	31
Figura 2.6: Rolamento Linear com vista explodida.....	33
Figura 2.7: Rolamento Linear, vista transversal e longitudinal.....	34
Figura 2.8: Esquemático rolamento fixo de uma carreira de esferas.....	35
Figura 2.9: Fuso de esferas.....	36
Figura 2.10: Fuso de rosca trapezoidal com porca.	38
Figura 2.11: Desenho técnico de um fuso de rosca trapezoidal	40
Figura 2.12: Eixo-árvore típico de centro de usinagem.	43
Figura 2.13: Formas de ondas geradas no processo de transformação CA/CC pela fonte linear.....	45
Figura 2.14: Formas de ondas geradas no processo de transformação CA/CC pela fonte chaveada.....	46
Figura 2.15: Esquemático de um motor de passo de relutância variável.	48
Figura 2.16: Motor de passo de ímã permanente.....	50
Figura 2.17: Eixo rotor de um motor de passo híbrido.	50
Figura 2.18: Motor de passo.....	51
Figura 2.19: Driver para motor de passo.....	52
Figura 2.20: Arduino Mega 2560.	53
Figura 2.21: Shield Ramps 1.4 com drivers A4988.....	54
Figura 3.1: Imagem renderizada da condição final de todo processo de usinagem das chapas.	56
Figura 3.2: Chassis da fresadora.....	57
Figura 3.3: Chassis finalizado.	57
Figura 3.4: Imagem renderizada do projeto finalizado do mancal do eixo X.	58
Figura 3.5: Imagem renderizada do mancal com rolamento 6001 do fuso dos eixos X, Y e Z.....	59
Figura 3.6: Flange dos motores de passo dos eixos X, Y e Z.....	59

Figura 3.7: Fuso.....	60
Figura 3.8: Cantoneira central.	60
Figura 3.9: Chassis e partes moveis do eixo X finalizado.	61
Figura 3.10: Conjunto do eixo Y montado.....	61
Figura 3.11: Conjunto X e Y montado.....	62
Figura 3.12: Imagem da fresadora finalizada.	62
Figura 3.13: Esquemático projeto eletroeletrônico.....	63
Figura 3.14: Caixa com sistema eletroeletrônico.	64
Figura 3.15: Ramps 1.4 e os componentes de um impressora 3D.....	64
Figura 3.16: Painel de comandos simples do software CNC GCODE CONTROLLER 6.1.	66
Figura 4.2: Parte do código para definição da Shield Ramps 1.4.....	69
Figura 4.3: Parte do <i>Firmware</i> onde é configurado os pontos max/min dos eixos coordenados	69
Figura 4.4: Parte do Firmware onde é configurado o passo do fuso dos eixos coordenados.	70
Figura 4.5: Medição do deslocamento efetivo através de comandos via software.....	72
Figura 4.6: Parâmetros que alteram a velocidade de deslocamento nos eixos coordenados.	72
Figura 4.7: Router Fresadora CNC Mini 400 mm x 390 mm x 60 mm.....	75
Figura 4.8: Router CNC Baby 500 mm x 500 mm.	76
Figura 4.9: Router CNC Hobby.....	77

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2-1: Composição química dos Aços SAE/ABNT/AISI 1020.	28
Quadro 2-2: Propriedades mecânicas estimadas de barras de aço laminadas a quente e trefilados aço SAE/ABNT/AISI 1020.	28
Quadro 2-3: Composição química dos Aços SAE/ABNT/AISI 1045.	29
Quadro 2-4: Propriedades mecânicas estimadas de barras de aço laminadas a quente e trefilados aço SAE/ABNT/AISI 1045.	30
Quadro 2-5: Tolerância ISSO(ABNT) para ajuste de eixos.	31
Quadro 2-6: Coeficiente de atrito (μ). Comparativo entre rolamentos e outras situações.	32
Quadro 2-7: Partes de um rolamento linear e suas respectivas composições.	33
Quadro 2-8: Dados técnicos dos rolamentos lineares.	34
Quadro 2-9: Dados de precisão fornecidos pelo fabricante NSK.	37
Tabela 2.1: Tabela adaptada do catálogo A.T.I Artigos Técnicos Industriais fornecida pelo fabricante Bimeccanica.	38
Tabela 2.2: Tabela adaptada do catálogo A.T.I Artigos Técnicos Industriais fornecida pelo fabricante Bimeccanica.	41
Tabela 4.1: Preço dos suprimentos gastos na fabricação da fresadora.	73

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A (2'') % -	Porcentagem de alongamento
ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI -	<i>American Iron and Steel Institute</i>
A4988 -	Driver de acionamento do motor de passo
C3 -	Classe de precisão para fusos de esfera retificados
C5 -	Classe de precisão para fusos de esfera retificados
C% -	Porcentagem de carbono na composição
CAD -	Computer Aided Design
CAM -	Computer Aided Manufacturing
CNC -	<i>Computer Numeric Command</i> ou Comando Numérico Computadorizado
E -	Módulo de elasticidade
G-Code -	Código G, linguagem padrão de máquinas computadorizadas
HB -	Dureza Brinell [N/mm ²]
H5 -	Classe de acabamento e precisão dos aços trefilados
H6 -	Classe de acabamento e precisão dos aços trefilados
H7 -	Classe de acabamento e precisão dos aços trefilados
H8 -	Classe de acabamento e precisão dos aços trefilados
HMI -	Human Machine Interface Interface Homem Máquina
IHM -	Interface Homem Máquina
Inmetro -	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO -	International Organization of Standardization
J -	Momento de Inércia
K -	Fator multiplicador do desvio padrão (constante)
LR -	Limite de resistência [Mpa]
LE -	Limite de escoamento [Mpa]
MIT -	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MN% -	Porcentagem de manganês na composição
NBR -	Borracha de nitrilo butadieno
NC -	<i>Numeric Command</i> ou Comando Numérico

Pmax%	-	Porcentagem máxima de fósforo na composição
PCI	-	Placa de Circuito Impresso
Qcom	-	Resistência à compressão suportada pelo fuso trapezoidal
RPM	-	Rotações por minuto
Smax%	-	Porcentagem máxima de enxofre na composição
SAE	-	<i>Society of Automotive Engineers</i>
VIM	-	Vocabulário Internacional de Metrologia
X	-	Direção X
Y	-	Direção Y
Z	-	Direção Z
Z	-	(%) Porcentagem de redução de área
3D	-	Plano tridimensional
mm	-	Milímetros
m/min	-	Metros por minuto
\bar{x}	-	Valor médio
σ	-	Desvio padrão
μ	-	Coefficiente de Atrito
\emptyset	-	Diâmetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Fresadoras	19
2.2	Fresadora Cnc	20
2.3	Usinagem	21
2.4	Medição	22
2.5	Metrologia, Mensurando e Erros	22
2.5.1	MENSURANDO	23
2.5.2	ERRO DE MEDIÇÃO	23
2.5.3	ERRO SISTEMÁTICO	24
2.5.4	ERRO ALEATÓRIO	24
2.6	Precisão, Exatidão e Repetibilidade	24
2.6.1	PRECISÃO DE MEDIÇÃO; FIDELIDADE OU PRECISÃO DE MEDIÇÃO	25
2.6.2	EXATIDÃO	25
2.7	Incerteza de Medição	26
2.7.1	MATERIAIS ESTRUTURAIS	28
2.7.1.1	<i>Aço SAE/AISI/ABNT 1020</i>	28
2.7.1.2	<i>Aço SAE 1045</i>	29
2.7.1.3	<i>Aço SAE 1045 H7</i>	30
2.7.1.4	<i>Mancais de Rolamentos</i>	32
2.7.1.5	<i>Rolamentos Lineares</i>	33
2.7.1.6	<i>Rolamento fixo de uma carreira de esferas</i>	34
2.7.1.7	<i>Fuso de esferas recirculantes versus fuso com rosca trapezoidal</i>	35
2.7.1.8	<i>Eixo-árvore</i>	43
2.8	Componentes Eletroeletrônicos	44
2.8.1	FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA	44
2.8.1.1	<i>Fonte de alimentação linear</i>	44
2.8.1.2	<i>Fonte de alimentação chaveada</i>	45
2.8.2	MOTORES DE PASSO	47
2.8.2.1	<i>Motor de passo com relutância variável</i>	48
2.8.2.2	<i>Motor de passo de imã permanente</i>	49

2.8.2.3	<i>Motor de passo hibrido</i>	50
2.8.2.4	<i>Drivers dos Motores de Passo</i>	51
2.8.3	MICROCONTROLADOR ARDUINO MEGA 2560	52
2.8.4	FIRMWARE	53
2.8.5	SHIELD RAMPS 1.4	54
3	METODOLOGIA	55
3.1	Projeto Mecânico	55
3.1.1	ESTRUTURA MECÂNICA	55
3.2	Projeto Eletroeletrônico	63
3.3	Implementação Hardware-Software	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	Teste Funcionamento Dos Motores	67
4.2	Configuração do Firmware Marlin	68
4.3	Configuração da relação do número de passos por revolução	70
4.4	Ajuste de velocidade de deslocamento	72
4.5	Testes efetuados	73
4.5.1	COMPARATIVO COM O MERCADO	74
5	CONCLUSÕES	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	ANEXO A - DATASHEET MOTOR DE PASSO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

1 INTRODUÇÃO

O nome fresadora provém de uma ferramenta específica chamada fresa que é utilizada nesse tipo de máquina. De acordo com Alves (2017), a fresa é uma ferramenta dotada de vários dentes de corte responsáveis pela retirada do cavaco por meio de movimentos giratórios que promovem o arranque do material que se deseja, objetivando alcançar uma forma geométrica específica. A particularidade desta ferramenta, como da máquina, são as inúmeras possibilidades de usinagens, com cortes em diversos sentidos, posições e ângulos. Isso se deve à liberdade de seus movimentos que estão distribuídos em um plano cartesiano tridimensional (coordenadas X, Y e Z).

A invenção da fresadora de acordo com o site Vetor CNC¹ se deu por volta do ano de 1800. Creditada a Eli Whitney, foi desenvolvida para atender às necessidades bélicas dos Estados Unidos da América que se encontravam mergulhados em uma guerra civil e que necessitavam de uma produção armamentista nunca vista antes. Eli Whitney aceitou o desafio da produção atendendo às demandas do governo norte-americano, e para tal feito, desenvolveu um ferramental específico para uma produção em massa, sendo a fresadora um destes equipamentos. Ao longo da história do desenvolvimento industrial tecnológico ocidental, passando especialmente pelas duas Grandes Guerras Mundiais, a fresadora sofreu inúmeras modificações e melhorias. A imagem a seguir (FIG. 1.1) mostra a fresadora de Eli Whitney.

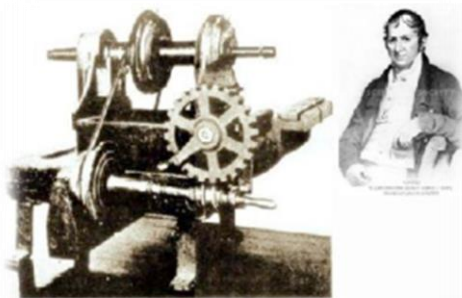


Figura 1.1: Fresadora de Eli
Fonte: Vetor CNC. Notícias

Whitney.
(2017).

Nos primórdios, as fresadoras possuíam comandos e funções totalmente manuais, de difícil controle, pouca precisão e repetibilidade praticamente nula. Em seu processo

¹ Vetor CNC. Notícias. Disponível em: <<http://www.vetorcnc.com/fresadora-historia-51>>.

evolutivo, ganhou novos acessórios e possibilidades. Uma grande evolução foi quando as fresas passaram a ter comandos assistidos nos deslocamentos dos eixos coordenados. Eram usados motores elétricos acoplados aos fusos de cada eixo coordenado ou transmissões mecânicas a partir do próprio motor da máquina que executavam os deslocamentos através de acionamentos restritamente humanos. Isso significava que o operador realizava um acionamento por meio de um comando mecânico ou elétrico e a consequência deste acionamento provocava o movimento solicitado pelo operador, não havendo ainda qualquer tipo de automação implementada às máquinas.

Entretanto, mesmo diante do processo de modernização desse maquinário nos últimos tempos, tem-se observado a ausência de tais ferramentas em laboratórios acadêmicos específicos, o que possibilitaria desenvolver mais e melhores projetos de pesquisas. Nesse sentido, o principal intuito deste trabalho é desenvolver um protótipo de fresadora com controle CNC, para uso didático.

A construção e desenvolvimento dessa máquina operatriz, de pequeno porte, destinam-se à usinagem, à furação e ao acabamento de placas de circuitos eletrônicos ou placas PCI (placas de circuito impresso), assim como usinagens que exigem baixo esforço durante o processo de corte. Sua finalidade pode ser estendida à usinagem de peças a base de polímeros e metais de fácil usinagem; isso será possível devido à robustez de seu projeto mecânico. Seu uso está diretamente ligado a pequenos laboratórios de eletrônica e instituições de ensino, locais onde todo esse processo é realizado manualmente, o que compromete a qualidade, a precisão e o resultado final alcançado, além de estar sujeito a acidentes. Com a aplicação dessa máquina na confecção de placas de circuitos eletrônicos, é dispensado o processo de corrosão a base de percloro de ferro, e a furação manual que gera elevados riscos pelo uso de furadeira e brocas que podem gerar estilhaços ao quebrar, tornando todos estes processos demorados, imprecisos e inseguros.

O intuito deste trabalho foi projetar, desenvolver e construir uma máquina operatriz CNC, bem como adquirir conhecimento na área da usinagem de precisão e suas principais características de funcionamento, usabilidade e programação. A utilização de “softwares livres” proporcionou o contato com toda a parte computacional exigida, obtendo-se, assim, um aprendizado amplo e a detenção de farto conhecimento nesta área.

A construção do protótipo também foi de grande valia, pois os conhecimentos na área de mecânica também se fizeram necessários, levando-se em conta que o curso de Controle e Automação Industrial não se aprofunda muito neste conteúdo. O desenvolvimento e a

construção necessitou do conhecimento de todas as áreas envolvidas no processo, desde a construção até a utilização, passando pelas áreas de mecânica, eletrônica e programação.

A alta produtividade, o baixo índice de perda de peças por erros, baixíssimo índice de acidentes, a praticidade e um custo relativamente baixo são requisitos que despertam o interesse por esse tipo de equipamento. A associação entre fresadoras e o Comando Numérico Computadorizado garantem altíssima precisão e alta velocidade na execução dos movimentos, sejam eles lineares ou coordenados entre dois ou os três eixos, sem contar com o fator da segurança de quem a opera.

Isso se justifica por não haver a necessidade de qualquer tipo de intervenção humana durante o processo de usinagem. Com a elaboração e desenvolvimento deste projeto, visou-se tornar acessível o contato com essas tecnologias que são extremamente utilizadas e imprescindíveis no desenvolvimento do cenário tecnológico produtivo.

Como objetivo, este projeto de Trabalho de Conclusão de Curso visou o desenvolvimento de uma fresadora CNC didática, podendo ser direcionada para prototipagem de circuitos eletrônicos e usinagens leves em geral. A construção e desenvolvimento mecânico, plataforma e mecanismos móveis; o desenvolvimento e dimensionamento de circuito eletrônico, drivers de comunicação e sistemas de acionamento e a implementação do software, geração do G-Code, interpretação do G-Code e protocolos de comunicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo expõe os principais conceitos aplicados às máquinas ferramenta, analisando conceitos das 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 Fresadoras

As fresadoras podem ser classificadas de acordo com a disposição de seu principal eixo, denominado eixo árvore. Segundo Felisberto (1994), este é o principal eixo da máquina devido as suas atribuições, pois ele é responsável por fixar a ferramenta de corte de forma precisa, concêntrica e suportar todos os esforços durante o processo de usinagem. O autor também cita que, de acordo com a posição do eixo árvore em relação à superfície da mesa de trabalho, pode-se classificá-las em alguns tipos, como, por exemplo, em fresadora horizontal que possuem o eixo árvore paralelo à superfície da mesa de trabalho; fresadora vertical que utilizam o eixo árvore perpendicular à superfície da mesa de trabalho e fresadora universal que possuem dois eixos, um vertical e outro horizontal.

Devido ao processo evolutivo acelerado pela Segunda Guerra Mundial, um novo cenário tecnológico para as áreas de usinagem foi aperfeiçoado pelo desenvolvimento científico/acadêmico da época, da qual a automação de máquinas de usinagem já era possível; então se iniciou os testes para os primeiros processos de automação.

Na década de 1940, o *Massachusetts Institute Of Technology* (MIT) desenvolveu o *Numeric Command* ou Comando Numérico (N.C.) o qual era baseado em fitas e cartões perfurados e as informações ali contidas eram interpretadas, resultando no movimento autônomo do respectivo componente móvel da máquina operatriz, como ilustra a FIG. 2.1.

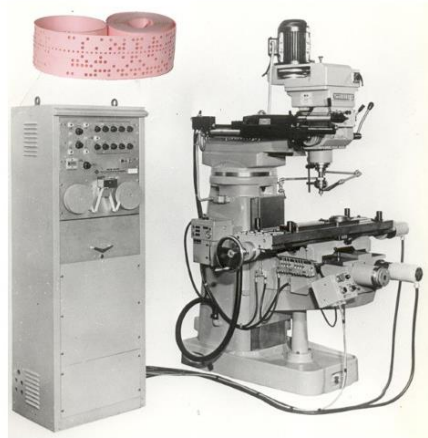


Figura 2.1: Fresadora Vertical com Comando NC.
Fonte: PROTOPTIMUS (2017).

Na década de 1950, com a criação e desenvolvimento dos primeiros computadores, o NC sofreu uma evolução, transformando-se em *Computed Numeric Command* ou Comando Numérico Computadorizado (CNC). A informática nesse momento tornou-se fundamental no desenvolvimento dessa nova tecnologia. Assim, em 1958, surgiu no MIT, a linguagem universal das máquinas, chamado de Código G (*G-Code*). Por conseguinte, tem-se a implementação do CNC juntamente com as mais diversas máquinas operatrizes até então fabricadas.

Essas máquinas são as responsáveis por realizar grande parte das operações dos mais diversos processos de fabricação e manufaturas. Com o processo evolutivo tecnológico, as fresadoras se dividiram em diferentes subcategorias, sendo cada uma delas destinada a uma gama de serviços específicos de cada modelo. No presente momento, têm-se máquinas operatrizes extremamente modernas e precisas, um caso em particular são os centros de usinagem que possuem trocas automáticas de ferramentas e são dotados de cinco eixos de trabalho.

2.2 Fresadora CNC

Segundo Sérgio (1964), fresadoras são máquinas destinadas à usinagem de uma vasta gama de materiais, tendo como características os movimentos contínuos. Fresadoras CNC são equipamentos que possuem controle computadorizado e são direcionadas à grandes centros de usinagem. Seu sistema computadorizado permite total controle simultâneo durante o deslocamento de seus eixos coordenados, obedecendo a série de comandos contidos no G-Code específico de um projeto. A utilização do G-Code juntamente com softwares com extensão

Computer aided desing e Computer aided manufacturing (CAD/CAM), são responsáveis pela execução de projetos de alta complexidade e de alta precisão.

As empresas não têm medido esforços em pesquisa e desenvolvimento, o que provoca o crescimento do uso de recursos computacionais nas fases de projeto, desenvolvimento, inspeção e controle. Como reação, tem-se um crescente avanço tecnológico e conseqüentemente, maior acesso à máquina-ferramenta CNC, demonstrando um novo cenário (TALLMADGE, 1998 apud SIMON, 2001).

Máquinas operatrizes que funcionam através de CNC são equipamentos que trabalham seguindo uma rotina de comandos pré-programados, com ações a serem executadas pela máquina em um sistema de coordenadas cartesianas, gerando peças de qualquer perfil geométrico (MACHADO, 1986 apud LYRA).

Fresadora CNC é um equipamento que funciona através de um código de programação, fundamentado em comando numérico e estabelece ações em um campo tridimensional, descrevendo formas em qualquer perfil geométrico (MACHADO, 2009 apud DEUS, 2015).

Os fabricantes de máquinas-ferramentas usufruem dos frutos gerados pelo desenvolvimento da microeletrônica e de outras novas tecnologias. A partir desta nova realidade, tem desenvolvido novas maneiras e sistemas, com isso a busca por melhorias tem gerado máquinas com alto grau de desenvolvimento tecnológico, podendo oferecer maior flexibilidade, velocidade, precisão e durabilidade. O principal objetivo é redução do tempo total gasto no processo de usinagem, menor tempo de serviço, setup, troca de ferramenta, manuseio, movimentos de peças e inspeções (HEUCHMER, 2000 apud SIMON, 2001).

2.3 Usinagem

A usinagem é uma ação que visa modificar um material conferindo-lhe uma forma desejada, com dimensões e acabamento necessário, tendo como consequência deste processo a geração de cavacos. Define-se como cavaco, o material extraído pela ferramenta de corte no momento da usinagem e não possui forma uma forma geométrica regular. Por fim, a usinagem é o processo para obtenção de uma peça com uma geometria desejada através do arranque controlado de cavacos. Os processos de usinagem são variados, sendo classificados como: Torneamento, Aplainamento, Furação, Alargamento, Fresamento, etc. (FERRARESI, 1977 apud BARROS, 2013).

O arranque de material de uma peça por meio de outros materiais de maior grau de dureza é denominado usinagem (MACHADO et al, 20011 apud DEUS, 2015).

Com a intensa evolução tecnológica das máquinas ferramentas e a consequente evolução dos processos de usinagem, se consegue excelentes resultados mesmo quando é necessária a usinagem de materiais de difícil usinabilidade, conseguindo ainda assim, bons acabamentos e peças com alta precisão (MACHADO, 2009 apud BARROS, 2013).

Um processo de usinagem deve receber abordagens diferentes, contudo, seu planejamento pode ser dividido em duas partes: a primeira é o macroplanejamento do processo de usinagem da peça, objetivando seu conteúdo e plano sequenciado de ações para o devido processo. Assim pode-se considerar: materiais, especificações técnicas da peça, composição da matéria-prima, capacidade de produção, ferramental envolvido. Após a conclusão desta primeira etapa, o segundo passo será a elaboração do projeto das operações de usinagem, que sofrerá um refinamento contendo os dados necessários para o processo de fabricação da peça (WANG & LI, 1991 apud ALVARES, 2005).

2.4 Medição

Como descrito no Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) (2012, p. 16) medição é:

Processo de obtenção experimental dum ou mais **valores** que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma **grandeza**:

NOTA 1 - A medição não se aplica a **propriedades qualitativas**.

NOTA 2 - A medição implica a comparação de grandezas ou a contagem de entidades.

NOTA 3 - A medição pressupõe uma descrição da grandeza que seja compatível com o uso pretendido dum resultado de medição, segundo um procedimento de medição e com um sistema de medição calibrado que opera de acordo com o procedimento de medição especificado, incluindo as condições de medição.

Para Gonçalves (2002), medir é o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física, neste caso o mensurando, é determinado como múltiplo e/ou uma fração de uma unidade, estabelecida por um padrão e reconhecida internacionalmente.

2.5 Metrologia, Mensurando e Erros

Segundo a definição do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO):

A metrologia é a ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza em qualquer campo da ciência ou tecnologia.

Nesse sentido, a Metrologia Científica e Industrial é uma ferramenta fundamental no crescimento e inovação tecnológica, promovendo a competitividade e criando um ambiente favorável ao desenvolvimento científico e industrial em todo e qualquer país.

Nenhum processo de medição, de uma grandeza física em diferentes circunstâncias, pode ser considerado exato, pois o erro é parte do processo. Os fatores de exatidão e precisão de medição estarão associados ao grau de sofisticação do instrumento de medida, às habilidades pessoais daquele que mede e ao processo em que se dará a coleta destas medidas. Levando-se em conta as definições feitas pelo Vocabulário Internacional de Metrologia, VIM 2009 e VIM 2012, os erros associados ao processo de medição são:

- Mensurando;
- Erro de medição;
- Erro sistemático;
- Erro aleatório;
- Erro grosseiro;
- Erro de escala.

2.5.1 MENSURANDO

De acordo com o VIM 2012 (2012, p. 16), a definição de mensurando é:

Grandeza que se pretende medir.

NOTA 1 A especificação dum mensurando requer o conhecimento da natureza da grandeza e a descrição do estado do fenômeno, do corpo ou da substância da qual a grandeza é uma propriedade, incluindo qualquer constituinte relevante e as entidades químicas envolvidas.

NOTA 2 Na 2ª edição do VIM e na IEC 60050-300:2001, o mensurando é definido como a “grandeza particular submetida à medição”. Na 2ª edição do Brasil, a grandeza era adjetivada de específica, em vez de particular.

NOTA 3 A medição, incluindo o sistema de medição e as condições sob as quais ela é realizada, pode modificar o fenômeno, o corpo ou a substância, de modo que a grandeza que está sendo medida pode diferir do mensurando como ele foi definido. Neste caso, é necessária uma correção adequada.

2.5.2 ERRO DE MEDIÇÃO

De acordo com o VIM 2012 (2012, p. 21), a definição para erro de medição:

Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.

NOTA 1 O conceito de “erro de medição” pode ser utilizado:

a) quando existe um único valor de referência, o que ocorre se uma **calibração** for realizada por meio de um **padrão de medição** com um **valor medido** cuja **incerteza de medição** é desprezável, ou se um **valor convencional** for fornecido; nestes casos, o erro de medição é conhecido;

b) caso se suponha que um **mensurando** é representado por um único **valor verdadeiro** ou um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezável; neste caso, o erro de medição é desconhecido.

NOTA 2 Não se deve confundir erro de medição com erro de produção ou erro humano.

2.5.3 ERRO SISTEMÁTICO

De acordo com o VIM 2012 (2012, p. 22), a definição para erro sistemático:

Componente do **erro de medição** que, em **medições** repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível.

NOTA 1 Um **valor de referência** para um erro sistemático é um **valor verdadeiro**, ou um **valor medido** de um **padrão** com **incerteza de medição** desprezável, ou um **valor convencional**.

NOTA 2 O erro sistemático e suas causas podem ser conhecidos ou desconhecidos. Pode-se aplicar uma **correção** para compensar um erro sistemático conhecido.

NOTA 3 O erro sistemático é igual à diferença entre o erro de medição e o **erro aleatório**.

2.5.4 Erro Aleatório

De acordo com o VIM 2012 (2012, p. 22), a definição para erro aleatório:

Componente do **erro de medição** que, em **medições** repetidas, varia de maneira imprevisível.

NOTA 1 O **valor de referência** para um erro aleatório é a média que resultaria de um número infinito de medições repetidas do mesmo **mensurando**.

NOTA 2 Os erros aleatórios de um conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser resumida por sua esperança matemática ou valor esperado, o qual é geralmente assumido como sendo zero, e por sua variância.

NOTA 3 O erro aleatório é igual à diferença entre o erro de medição e o **erro sistemático**.

2.6 Precisão, Exatidão E Repetibilidade

Fazendo-se uso das definições do Vocabulário Internacional de Metrologia, VIM 2012, os termos precisão, exatidão e repetitividade podem ser compreendidos das seguintes formas:

2.6.1 PRECISÃO DE MEDIÇÃO; FIDELIDADE OU PRECISÃO DE MEDIÇÃO

De acordo com o VIM 2012 (2012, p. 21), a definição precisão de medição:

Grau de concordância entre **indicações** ou **valores medidos**, obtidos por **medições** repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas.

NOTA 1 A precisão de medição é geralmente expressa numericamente por características como o desvio-padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições especificadas de medição.

NOTA 2 As “condições especificadas” podem ser, por exemplo, **condições de repetibilidade, condições de precisão intermediária** ou **condições de reprodutibilidade** (ver ISO 5725-1:1994).

NOTA 3 A precisão de medição é utilizada para definir a **repetibilidade de medição**, a **precisão intermediária de medição** e a **reprodutibilidade de medição**.

NOTA 4 O termo “precisão de medição” é algumas vezes utilizado, erroneamente, para designar a **exatidão de medição**.

2.6.2 EXATIDÃO

De acordo com o VIM 2012 (2012, p. 20), a definição de exatidão:

Grau de concordância entre um **valor medido** e um **valor verdadeiro** dum **mensurando**.

NOTA 1 A “exatidão de medição” não é uma **grandeza** e não lhe é atribuído um **valor numérico**. Uma **medição** é dita mais exata quando fornece um **erro de medição** menor.

NOTA 2 O termo “exatidão de medição” não deve ser utilizado no lugar de **veracidade de medição**, assim como o termo “precisão de medição” não deve ser utilizado para expressar exatidão de medição, o qual, contudo, está relacionado a ambos os conceitos. NOTA 3 A “exatidão de medição” é algumas vezes entendida como o grau de concordância entre valores medidos que são atribuídos ao mensurando.

Silva (2002) define exatidão como sendo a exatidão de uma medida (ou da média de um conjunto de medidas), consistindo na distância estimada entre a medida e um valor “verdadeiro”, “nominal”, “tomando como referência”, ou “aceito”. Geralmente, é expressa

como um desvio ou desvio percentual de um valor conhecido. O desenho a seguir (FIG. 2.2) expressa as principais condições de exatidão e precisão.



Figura 2.2: Gráfico de exatidão e repetibilidade.

Repetibilidade pode ser definido como a correlação entre medidas tomadas em certo caráter em um mesmo indivíduo, que foram repetidas no tempo e espaço (Cruz et al. 1997). Desta forma é possível estabelecer a proporção da variância total

2.7 Incerteza De Medição

De acordo com o VIM 2012 (2012, p. 20), a definição de incerteza de medição:

Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos **valores** atribuídos a um **mensurando**, com base nas informações utilizadas. NOTA 1 A incerteza de medição inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associadas a **correções** e a valores atribuídos a **padrões**, assim como a **incerteza definicional**. Algumas vezes, não são corrigidos efeitos sistemáticos estimados mas, em vez disso, são incorporados componentes de incerteza de medição associadas.

NOTA 2 O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio-padrão denominado **incerteza padrão** (ou um de seus múltiplos) ou a metade da amplitude dum intervalo tendo uma **probabilidade de abrangência** determinada.

NOTA 3 A incerteza de medição geralmente engloba muitos componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma **avaliação do Tipo A da incerteza de medição**, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de **medições** e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. Os outros componentes, as quais podem ser estimadas por uma **avaliação do Tipo B da incerteza de medição**, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.

NOTA 4 Geralmente para um dado conjunto de informações, subentende-se que a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído ao mensurando. Uma modificação deste valor resulta numa modificação da incerteza associada.

Para toda medida na qual o procedimento de medição foi realizado dentro das condições e exigências necessárias, resultará na obtenção de um valor referente àquele mensurando. Tal valor deve estar contido em um intervalo de confiança que compreenda o valor real, gerando assim, uma pequena faixa de incerteza, onde estarão alocados o valor real e o valor medido. A proximidade entre o valor medido e o real dependerá do grau de precisão do instrumento de medição e isso levará a um estreitamento desta faixa de confiança e consequentemente a faixa menor de incerteza.

Sendo assim, tem-se: $\bar{x} \pm K\sigma$.

Onde:

- \bar{x} : valor medido;
- $K\sigma$: faixa de erro ou incerteza que contempla o valor real.

A faixa de incerteza e suas variáveis podem ser claramente compreendidas analisando-se a imagem abaixo (FIG. 2.3).

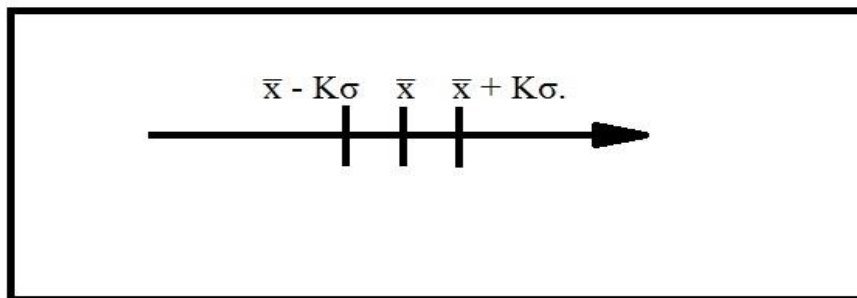


Figura 2.3: Intervalo de incerteza de um mensurando.

A constante K expressa o grau de confiabilidade de uma medida. Para $K=1$, tem-se 68,27%, para $K=2$, tem-se 95,45% e $K=3$, tem-se 99,73%. Levando-se em conta que estes valores pertençam a uma distribuição normal, esta condição pode ser observada na FIG. 2.4.

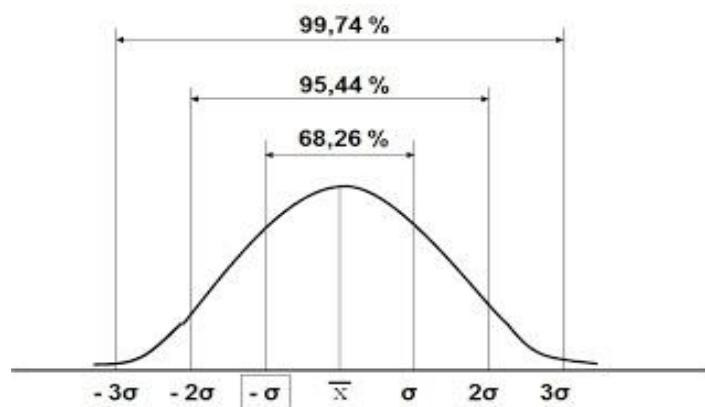


Figura 2.4: Distribuição normal.

Fonte: BLOG DE ESTATÍSTICA DO PROF. ALEXANDRE (2017).

2.7.1 MATERIAIS ESTRUTURAIS

2.7.1.1 Aço SAE/AISI/ABNT 1020

Seguindo as normas *Society of Automotive Engineers* (SAE), *American Iron and Steel Institute* (AISI) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) classificam este aço como sendo de baixa concentração de carbono, contendo 0,20% C, e igual conformidade a ABNT, que classifica este composto como um pertencente ao grupo dos aços comuns, estando localizado no subgrupo dos aços de baixo teor de carbono.

Devido às suas características, tais como alta tenacidade, baixa temperabilidade, ótimo custo-benefício e acessibilidade fazem deste aço um dos mais empregados nos diversos processos de fabricação. Suas principais aplicações são peças para máquinas industriais, veículos, máquinas agrícolas, etc. São encontrados em diversas geometrias de seção transversal, podendo ser trefilados ou não e chapas grossas e chapas finas.

Em condições normais é indicado para situações onde haverá pequenos e médios esforços ou com o processo de têmpera por cementação, que aumentará sua dureza superficial, atendendo assim a situações que demandem maiores esforços em sua superfície, por exemplo, base de retentor ou gaxeta de vedação (CHIAVERINI, 2008). A seguir, QUADRO 2.1, é apresentado a composição química do aço SAE/AISI/ABNT 1020 e no QUADRO 2.2, suas características mecânicas.

Quadro 2-1: Composição química dos Aços SAE/ABNT/AISI 1020.

Aço	C%	Mn%	P max %	S max %
SAE/AISI/ABNT 1020	0,18 – 0,23	0,3 - 0,6	≤0,030	≤0,050

Fonte: GUIA DO AÇO ARCELORMITTAL (2017).

Quadro 2-2: Propriedades mecânicas estimadas de barras de aço laminadas a quente e trefilados aço SAE/ABNT/AISI 1020.

Aço	Processamento	LR (Mpa)	LE (Mpa)	A(2") %	Z (%)	HB
SAE/AISI/ ABNT 1020	Laminado	380	210	25	50	111
SAE/AISI/ ABNT 1020	Trefilado	420	350	15	40	121

Fonte: GUIA DO AÇO ARCELORMITTAL (2017).

Onde:

- L.R: Limite de Resistência;
- L.E.: Limite de Escoamento;
- A (2'') %: Alongamento;
- Z (%): Redução em Área;
- HB: Dureza Brinell.

Diante de todas estas informações, juntamente com o conhecimento prático e as facilidades referente a acessibilidade e praticidade do aço SAE/ABNT/AISI 1020, este será utilizado no projeto estrutural da máquina, sendo destinado às partes onde serão utilizadas chapas em diversas bitolas. A utilização deste aço se deve principalmente, a seu valor de mercado, sendo um aço que atende a um dos principais requisitos: manter o baixo custo com boa qualidade.

2.7.1.2 Aço SAE 1045

Os aços SAE/AISI/ABNT 1045 pertencem ao subgrupo dos aços de média concentração de carbono, com índices variando entre 0,43% até 0,50% C. São compostos que possuem boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura.

Assim como os aços SAE/AISI/ABNT 1020, os aços SAE/AISI/ABNT 1045 possuem acessibilidade, praticidade e excelente usinabilidade. Suas principais aplicações são: eixos diversos, pinos cilindros, parafusos, colunas grampos, utilizado na indústria automobilística, máquinas agrícolas, entre outros.

Com processos de têmpera, suas propriedades mecânicas podem ser modificadas, ou seja, através de tratamentos, sua superfície adquire maior dureza. Como são aços com baixa penetrabilidade em processos de têmpera, seu núcleo permanece dúctil e tenaz, podendo ser utilizado em outras diversas aplicações (CHIAVERINI, 1987). Nos quadros abaixo, QUADRO 2.3 e QUADRO 2.4, estão descritas a composição química e as características mecânicas respectivamente.

Quadro 2-3: Composição química dos Aços SAE/ABNT/AISI 1045.

Aço	C%	MN%	Pmax%	Smax%
SAE/AISI/ABNT 1045	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	≤0,030	≤0,050

Fonte: GUIA DO AÇO ARCELORMITTAL (2017).

Quadro 2-4: Propriedades mecânicas estimadas de barras de aço laminadas a quente e trefilados aço SAE/ABNT/AISI 1045.

Aço	Processamento	LR (Mpa)	LE (Mpa)	A(2'') %	Z (%)	HB
SAE/AISI/ABNT 1045	Laminado	380	210	25	50	111
SAE/AISI/ABNT 1045	Trefilado	420	350	15	40	121

Fonte: GUIA DO AÇO ARCELORMITTAL. 2017.

Onde:

- L.R: Limite de resistência;
- L.E: Limite de escoamento;
- A (2'') %: Alongamento;
- Z (%): Redução de área;
- HB: Dureza Brinell.

Este aço trefilado com seção transversal redonda será empregado no projeto na forma de barramentos auxiliares. Estes barramentos serão responsáveis pela sustentação e estabilidade do chassi da máquina, evitando qualquer tipo de deformação que possa vir a ocorrer nas guias lineares, garantindo precisão, funcionalidade e confiabilidade do equipamento. Seu preço de mercado se assemelha ao aço SAE/AISI/ABNT 1020, e pelos mesmos motivos, foi selecionado para o projeto.

2.7.1.3 Aço SAE 1045 H7

O aço SAE/AISI/ABNT 1045 H7 possui as mesmas propriedades mecânicas do aço SAE/AISI/ABNT 1045 convencional. As diferenças ficam somente por conta do acabamento empregado. Obedecendo a uma tolerância dimensional normalizada, estas barras de aço são submetidas a um processo de retificação por rebolos, conferindo aos aços SAE/AISI/ABNT 1045 H7 excelente acabamento superficial e precisão dimensional.

Sendo assim, são utilizados como guias lineares em conjunto com rolamentos lineares, reduzindo consideravelmente o atrito e possíveis folgas. Com todas as qualidades deste aço, são muito indicados como barramentos para máquinas tais como mini fresadoras, impressoras 3D, máquinas que exigem precisão, etc. Abaixo, está o QUADRO 2.5 para ajustes de eixos de acordo a ABNT.

Quadro 2-5: Tolerância ISSO (ABNT) para ajuste de eixos.

Diâmetro (mm)	H5 (mm)	H6 (mm)	H7 (mm)	H8 (mm)
10 - 18	0 - 0,008	0 - 0,011	0 - 0,018	0 - 0,027
18 - 30	0 - 0,009	0 - 0,013	0 - 0,021	0 - 0,033

Fonte: Quadro adaptado de Usimar Usinagem (2017).

Seguindo a norma ISO/ABNT H7, os eixos utilizados estarão compreendidos entre os intervalos de precisão de:

- Eixo de 20 mm SAE/AISI/ABNT H7

Limite superior de: $20,000 \text{ mm} + 0,000 \text{ mm} = 20,00 \text{ mm}$

Limite inferior de: $20,000 \text{ mm} - 0,021 \text{ mm} = 19,979 \text{ mm}$

- Eixo de 16 mm SAE/AISI/ABNT H7

Limite superior de: $16,000 \text{ mm} + 0,000 \text{ mm} = 16,000 \text{ mm}$

Limite inferior de: $16,000 \text{ mm} - 0,018 \text{ mm} = 15,982 \text{ mm}$

De acordo com os dados da TAB. 5, as possíveis variações dimensionais para as guias lineares de 20 mm e 16 mm de diâmetro, foram calculadas acima através dos cálculos sugeridos pela norma ISO/ABNT. Os diâmetros das guias lineares selecionadas para o projeto estão dentro de sua respectiva margem, ou seja, entre 10 mm e 18 mm para a guia de 16 mm, e 18 mm e 30 mm para a guia de 20 mm. Portanto, são indispensáveis ao bom funcionamento do projeto em questão o uso deste material, tendo em vista a garantia de funcionalidade e um ótimo acabamento agregando um bom padrão estético e funcional ao equipamento. Na FIG. 2.5 está um exemplo de várias bitolas de aço SAE/AISI/ABNT 1045 H7.



Figura 2.5: Barras de guias lineares SAE/AISI/ABNT 1045 H7.

Fonte: Tekkno mecatrônica (2017).

2.7.1.4 Mancais de Rolamentos

As evidências do uso de artifícios utilizados com o intuito da diminuição do atrito em atividades cotidianas são de civilizações que existiram em períodos antes de Cristo. De acordo com (DOWSON, 1979 apud HARRIS, 1992), os mancais de rolamentos, aos quais é feita a tratativa por apenas rolamentos, tem como seu exemplar mais comum o modelo que é composto por uma carreira fixa de esferas, teve seu desenho básico criado no século XV por Leonardo da Vinci. Sua fabricação e utilização industrialmente se dão ao fim do século XIX, passando ao longo do tempo por incessantes evoluções, principalmente em relação à tecnologia empregada nos tratamentos dos materiais quanto ao aumento da precisão de seus componentes rolantes e estruturais.

Sua principal função é suportar cargas radiais e axiais como a redução do atrito em componentes girantes, sendo os rolamentos, uma das mais importantes criações da engenharia para a humanidade, possibilitando a evolução de todos os campos da engenharia, indústria e outros tantos nichos que fazem uso deste importante componente.

O atrito pode ser explicado como sendo um fenômeno que é responsável pela perda gradual de energia cinética, ocorrendo nas mais diversas situações, onde corpos podem estar submersos em diversos tipos de fluidos ou não. Pode-se ilustrar como exemplos: hélice de navio, avião em voo de cruzeiro (imersos em fluidos), movimentos internos em líquidos e sólidos (vibrações), e por fim, o contato direto entre dois corpos onde se tenha o movimento de um dos corpos em relação ao outro (LARSEN-BASSE, 1992 apud CAMPANHA, 2008). Neste último caso, a aplicação dos rolamentos se faz necessária e de extrema importância.

Os rolamentos podem ser classificados em dois tipos: os rolamentos compostos por esferas e os rolamentos compostos por rolos. A partir desta separação por componente rolante, cada tipo é composto por uma vasta gama de subtipos de rolamentos. Neste trabalho, serão utilizados dois tipos de rolamentos, um tipo é o de rolamento linear que é largamente utilizado em máquinas CNC ou máquinas que necessitem de deslocamentos lineares com alta precisão e alto grau de paralelismo e o outro tipo de rolamento a ser utilizado é o mais convencional, o rolamento de uma carreira fixa de esferas. A seguir, o QUADRO 2.6, que descreve um comparativo entre os coeficientes de atrito de várias situações com o coeficiente de atrito do rolamento fixo de uma carreira de esferas (BEARDMORE, 2007 apud CAMPANHA, 2008).

Quadro 2-6: Coeficiente de atrito (μ). Comparativo entre rolamentos e outras situações.

Aplicações	Coeficiente de Atrito (μ)
------------	---------------------------------

Parafuso x Porca (aço x aço – seco e sem tratamento).	0,12 ~ 0,18 (Estático)
Material de Freio x Ferro Fundido (molhado e seco).	0,2 ~ 0,4 (Dinâmico)
Pneu x Asfalto (molhado).	0,25 ~ 0,75 (Dinâmico)
Pneu x Asfalto (seco).	0,5 ~ 0,8 (Dinâmico)
Juntas Sinoviais (pessoas).	0,01 ~ 0,003 (Din. Est.)
Mancal de Deslizamento (filme hidrodinâmico, óleo min. V=2,5m/s).	0,002 ~ 0,007
Rolamento fixo de uma carreira de esferas.	0,0013 ~ 0,0015

Fonte: Berdmore (2007) apud Campanha (2008).

2.7.1.5 Rolamentos Lineares

Para garantir um bom funcionamento com alta confiabilidade de precisão e baixo índice de atrito, serão utilizados rolamentos do tipo linear, que são largamente recomendados para máquinas que necessitam de alta precisão linear e paralelismo, apresentam alta manutenibilidade, resistência ao desgaste e são altamente indicados e utilizados em máquinas CNC. A seguir tem-se a imagem com o esquemático de um rolamento linear (FIG. 2.6).

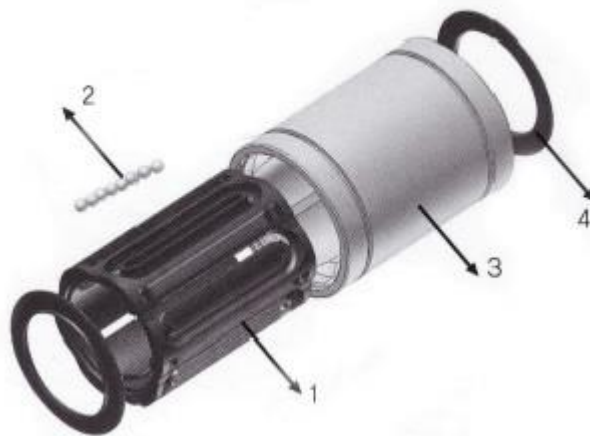


Figura 2.6: Rolamento Linear com vista explodida.
Fonte: OBR EIXOS E ROLAMENTOS LINEARES (2017).

No QUADRO 2.7, de acordo com OBR Equipamentos Industriais, os rolamentos lineares da linha LMxxUU, são compostos das seguintes partes:

Quadro 2-7: Partes de um rolamento linear e suas respectivas composições.

Parte	Material
1- Recirculador	POM Poliacetal.

2- Esferas	Aço com alto teor de carbono.
3- Corpo externo	Aço com alto teor de carbono.
4- Raspadores	NBR (Borracha de nitrilo butadieno).

Fonte: OBR eixos e rolamentos lineares. 2017.

Ainda de acordo com OBR Equipamentos Industriais, estes rolamentos possuem corpo externo construídos em aço do tipo cromo de elevado teor de carbono, temperado e retificado em alta precisão, recirculadores em poliacetal (POM), responsável pelo direcionamento das esferas e retentores de vedação em NBR (borracha de nitrilo butadieno), responsável por proteger o rolamento para que impurezas não tenham acesso ao seu interior.

De acordo com o fabricante SKF, estes rolamentos são normalizados pela ISSO série 1, ISO série 3 e ISO 10285, ou seja, são padronizados e totalmente intercambiáveis facilitando a manutenção, aquisição de peças para substituição, entre outros. Abaixo se tem um esquemático de um rolamento linear (FIG 2.7).

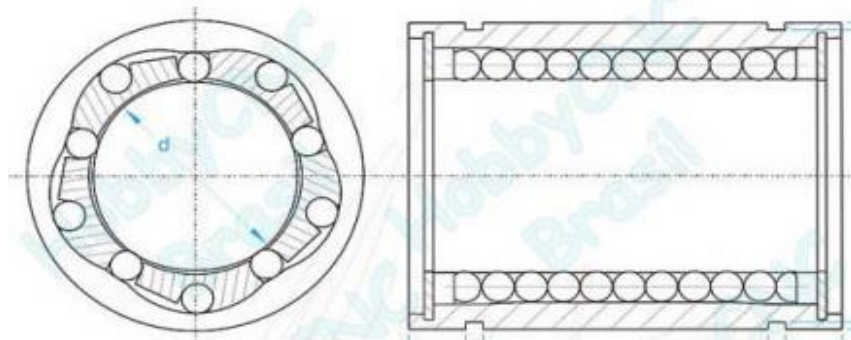


Figura 2.7: Rolamento Linear, vista transversal e longitudinal.
Fonte: HOBBY CNC BRASIL (2017).

Dados técnicos no quadro a seguir (QUADRO 2.8), segundo o fabricante SKF:

Quadro 2-8: Dados técnicos dos rolamentos lineares:

Faixa (Diâmetro interno admissível).	De 3 mm – 50 mm
Velocidade	Até 5 m/s
Aceleração	Até 100 m/s ²
Temperatura operacional	De – 20° C até 80° C
Comprimento do eixo em uma peça	Até 6000 mm
C	Até 6950 N
C ₀	Até 6300 N

Fonte: SKF Rolamentos lineares de esferas LBBR (2017).

2.7.1.6 Rolamento fixo de uma carreira de esferas

De acordo com o fabricante NSK em seu catálogo geral Rolamentos NSK (2013, p. A10):

Os rolamentos fixos de uma carreira de esferas são, entre os rolamentos, os de tipo mais representativo, e atendem um extenso campo de aplicações. Os canais da pista no anel interno e no anel externo apresentam um perfil lateral em arco, com raio ligeiramente maior que o raio das esferas. Além da carga radial, permite o apoio da carga axial em ambos os sentidos. O torque de atrito é pequeno, sendo o mais adequado para aplicações que requerem baixo ruído e vibração, e em locais de alta velocidade de rotação. Neste rolamento, além do tipo aberto, existem os blindados com placas de aço, os vedados com proteção de borracha, e os com anel de retenção no anel externo. Geralmente, as gaiolas utilizadas são as prensadas de aço.

É apresentado abaixo um esquemático de um rolamento fixo de uma carreira de esferas (FIG. 2.8).

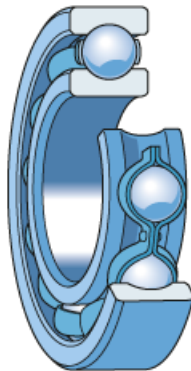


Figura 2.8: Esquemático rolamento fixo de uma carreira de esferas.
Fonte: SKF Rolamentos rígidos de uma carreira de esferas (2017).

Estes rolamentos fixos de uma carreira de esferas possuem uma grande gama de aplicações devido às suas características construtivas, que são de acordo com seu fabricante: ranhuras de pista profundas e ininterruptas. As ranhuras da pista têm uma oscilação próxima às esferas, o que permite aos rolamentos acomodar as cargas radiais e axiais em ambas as direções.

Com isso, atendem uma vasta quantidade de possibilidades de uso em função das cargas que suportam, ou seja, uma quantidade moderada de carga axial, boa quantidade de carga radial, todas estas cargas atuando simultaneamente em baixas ou elevadas rotações.

2.7.1.7 Fuso de esferas recirculantes versus fuso com rosca trapezoidal

2.7.1.7.1 Fuso de esferas recirculantes

Denominado parafuso de potência com rolamento de esferas, ou também chamado de fuso de esferas recirculantes, será tratado apenas como fuso de esferas. Este componente tem por função, a transformação de movimento de rotação em deslocamento linear. Sua principal característica é a alta eficiência, seja pelo fator precisão que é extremamente elevado, ou pelo fator atrito que é um fator importantíssimo. O baixo atrito implica diretamente em seu grau de eficiência, neste caso podendo chegar aos 90%, enquanto em fusos trapezoidais este índice, na melhor das hipóteses, chega aos 50% de eficiência. Em aplicações onde haverá o deslocamento de cargas na vertical será necessário dispositivos auxiliares para seu travamento, isto se deve ao fato de não serem autotravantes em função do reduzido índice de atrito. Os fusos de esferas suportam maiores cargas e pesam menos que os fusos convencionais, tendo como parâmetro comparativo fusos de mesmo diâmetro. Fatores que devem ser levados em consideração para a aplicação dos fusos de esfera é a flambagem e velocidade crítica (JUVINALL e MARSHEK, 2008). Abaixo se tem a imagem de fusos de esferas (FIG. 2.9).

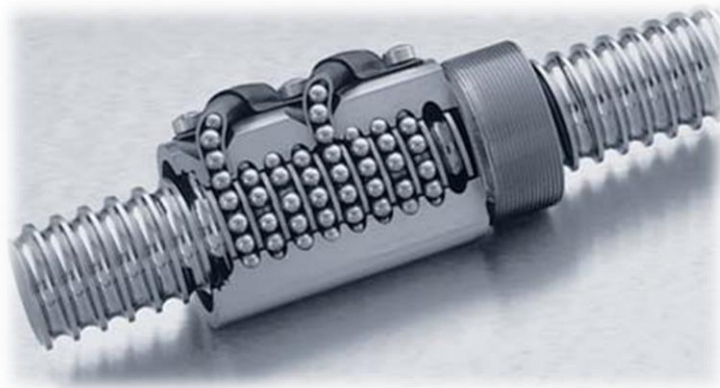


Figura 2.9: Fuso de esferas.
Fonte: SOLUÇÕES INDUSTRIAIS (2017).

Em casos específicos, nos quais se deseja reduzir consideravelmente o atrito de arrasto que ocorre entre os filetes do parafuso e a porca, este conjunto de fuso e porca convencional pode ser substituído pelo fuso de esferas. Neste conjunto, há um fluxo contínuo de esferas entre o fuso e a porca, este fluxo ocorre no interior da porca através dos dutos realimentadores de esferas (COLLINS, 2006).

De acordo com o fabricante NSK, tem-se o QUADRO 2.9, que mostra o grau de precisão deste componente:

Quadro 2-9: Quadro adaptado com dados de precisão fornecidos pelo fabricante NSK

Curso (mm)		C3 (μm)		C5 (μm)	
De	Até	$\pm E$	e	$\pm E$	e
–	100	8	8	18	18
100	200	10	8	20	18
200	315	12	8	23	18
315	400	13	10	25	20
400	500	15	10	27	20
500	630	16	12	30	23
630	800	18	13	35	25
800	1000	21	15	40	27

Fonte: NSK Produtos de precisão. 2017.

Onde:

- E = Desvio principal do curso (em μm);
 - e = Variação para todo curso (em μm);
- C3 e C5 = Classe de precisão para fusos retificados.

2.7.1.7.2 Fuso com rosca trapezoidal

De acordo com o site A.T.I - Artigos Técnicos Industriais², fusos com rosca trapezoidal são componentes formados por uma barra de seção transversal circular composta por roscas em sua região periférica com passos contínuos em ângulo de 30°. Este dispositivo é empregado em praticamente todos os processos industriais que requerem movimento linear constante, seja em aplicações verticais ou horizontais. A fricção entre a rosca do fuso com a porca é relativamente grande, mas em contrapartida, exerce grande força (tração e compressão) e é capaz de transmitir alto torque. São vantagens do uso deste componente:

- Alta aplicabilidade, inúmeros equipamentos necessitam deste tipo de componente;
- Montagem simples e manutenção fácil;
- Atende a vários tamanhos e cargas;
- Trabalho universal em cada posição de montagem;
- Não há movimentação (recuo) nas paradas (autotravamento);
- Normalizados (ISO 2901 - 2902 - 2904, equivalente a DIN 103);
- Custo reduzido comparado aos fusos de esfera.

² A.T.I. ARTIGOS TÉCNICOS INDUSTRIAIS. Disponível em: <<http://atibrasil.com.br/wp-content/uploads/2016/08/fuso-de-rosca-trapezoidal-004.pdf>> Acesso em: 29 Jun. de 2017.

A imagem abaixo (FIG. 2.10) mostra um conjunto fuso/porca de um fuso de rosca trapezoidal.



Figura 2.10: Fuso de rosca trapezoidal com porca.
Fonte: BIOMECCANICA (2017).

De acordo com o fabricante Bimeccanica, exposto no catálogo da Artigos Técnicos Industriais (A.T.), os fusos trapezoidais fabricados em aço R50, são geralmente utilizados para transmissão mecânica de baixa e média carga. Para estes componentes ainda há a possibilidade de se aplicar o processo de nitretação em sua superfície, com a finalidade de endurecimento do fio de rosca, e com isso há o aumento da sua resistência ao entrar em contato com a porca e também com agentes oxidantes.

Abaixo segue o QUADRO 2.10, com informações técnicas para os cálculos fornecidos pelo fabricante Bimeccanica:

Tabela 2.1: Tabela adaptada do catálogo A.T.I Artigos Técnicos Industriais fornecida pelo fabricante Bimeccanica.

Dimensões normalmente não variáveis

Rosca Trapezoidal.	Comprimento padrão da porca.	Nº de filetes presos à porca.	Superfície de contato de um filete.	Superfície de contato em todo perfil da porca.	Superfície de contato linear de um filete em toda a porca.	N eficiência (f=10) com boa lubrificação.
TR x Ø x Pitch	Mm	n	mm ²	mm ²	mm	–
T R 10 x 2	20	10	28,3	283	28,3	0,40
T R 10 x 3	20	6,7	40	268	26,7	0,51
T R 12 x 3	22	7,3	49,5	361	33	0,46
T R 14 x 3	25	8,3	58,9	489	39,2	0,42
T R 14 x 4	25	6,3	75,4	475	37,7	0,50
T R 16x 4	30	7,5	88	66	44	0,46
T R 18 x 4	35	8,7	100,4	87	50	0,43
T R 20 x 4	40	10	113	110	56	0,40

Fonte: BIOMECCANICA. 2017

Seguindo as informações do fabricante Bimeccanica, pode-se calcular a compressão máxima no fuso na pior situação, ou seja, na vertical.

$$Q_{comp} = \frac{p^2 * E_{aço} * J}{2 * a_r^2 * L^2}$$

$$L_{max} = \sqrt{\frac{p^2 * E_{aço} * J}{2 * a_r^2 * Q_{comp}}}$$

$$J = \frac{p}{64 * dn^4}$$

Ainda em concordância com o fabricante Bimeccanica, o desenho técnico abaixo (FIG. 2.11) apresenta as informações referentes às variáveis comuns aos fusos de rosca trapezoidal:

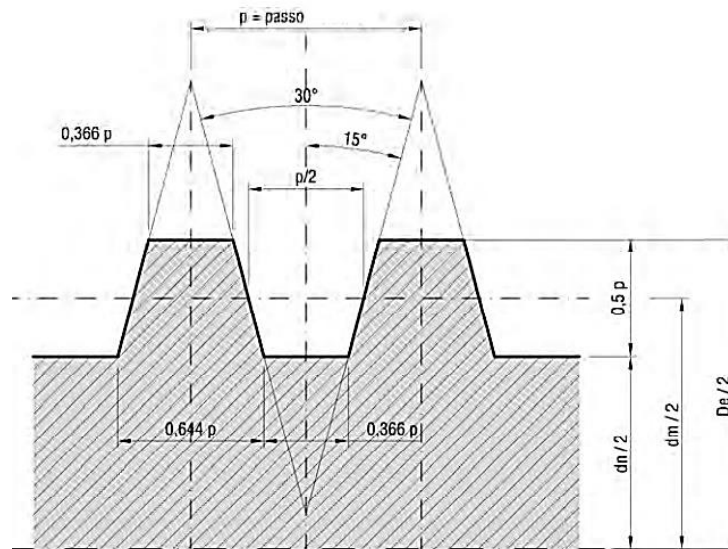


Figura 2.11: Desenho técnico de um fuso de rosca trapezoidal
Fonte: BIOMECCANICA (2017).

Onde:

- Q_{comp} = resistência à compressão suportável pelo fuso trapezoidal;
- $E_{aço}$ = módulo de elasticidade do aço (210.00);
- J = momento de inércia;
- d_c = diâmetro do núcleo do fuso;
- α_r = coeficiente relativo ao tipo de restrição do fuso trapezoidal:
($\alpha_r = 0,5$ para aplicações onde o fuso tem restrições axiais / radiais;
 $\alpha_r = 0,7$ para aplicações onde o fuso tem restrições axiais / radiais e restrições radiais;
 $\alpha_r = 1$ para aplicações onde o fuso tem restrições radiais;
 $\alpha_r = 2$ para aplicações com balanço de fuso);
- L = comprimento livre do fuso trapezoidal;
- L_{max} = comprimento máximo de fuso em relação à carga de compressão aplicada.

Abaixo segue o QUADRO 2.11, com informações técnicas para os cálculos fornecidos pelo fabricante:

Tabela 2.2: Tabela adaptada do catálogo do fabricante Bimeccanica.

Valores Decrescentes Proporcionais			Valores Crescentes Proporcionais				
Rosca Trapezoidal.	VELOCIDADE MÁXIMA. Calculado sobre a superfície de contato linear de um filete para o número de rotações/min com base em 25m/min.		VELOCIDAD E DE CONTATO	Máx. carga a ser levantada a uma velocidade máx. ("L" parafuso máx. 100 vezes Ø).	Pressão média distribuíd a nos filetes da rosca.	Pressão sobre a primeira rosca (1/3 de toda a carga)	Torque necessário para o levantamento (fator de serviço FS 2,5)
TR x Ø x Pitch	RPM	mm (linear) por min.	m/min.	Kg	Kg/mm2	Kg/mm2	Nm
TR 10 x 2	83	766	25	30	0,11	0,3	060
TR 10 x 3	936	2808	25	40	0,15	0,34	0,95
TR 12 x 3	757	2271	25	51	0,15	0,35	1,33
TR 14 x 3	637	1911	25	63	0,13	0,36	1,80
TR 14 x 4	663	2652	25	76	0,16	0,34	2,43
TR 16x 4	568	2272	25	91	0,14	0,35	3,15
TR 18 x 4	498	1992	25	107	0,13	0,36	3,98
TR 20 x 4	442	1768	25	122	0,11	0,36	4,83
	A			B			C

Fonte: BIOMECCANICA (2017).

Cálculos referente às velocidades de interesse e flexão segundo o fabricante:

- A= Velocidade em RPM;
- B= Carga em elevação guiada;
- C= Torque requerido [Nm]

$$V_{st} = \frac{p * dm * RPM}{1000}$$

$$L_{cf} = De * \beta$$

$$RPM_{max} = RPM * \left(\frac{100 - \frac{+L\%}{2}}{1000} \right)$$

Onde:

- VST= velocidade de deslizamento entre o fuso e porca;
 - dm = diâmetro médio do fuso de rosca e porca;
 - Rpm = número de voltas feitas pelo fuso trapezoidal;
 - L cf= comprimento de flexão crítico;
 - De = diâmetro nominal de rosca trapezoidal;
- ($\beta = 100$ para o uso onde o fuso tem restrições axiais / radiais;
 $\beta = 70$ para o uso onde o fuso tem restrições axial / radial e radial;

$\beta = 44$ para as restrições de uso radiais;

$\beta = 16$ para o uso com restrições);

- RPMmax = rotação máxima utilizável em relação ao comprimento de flexão crítico (Lcf);
- +L% = excesso de diferença entre o comprimento crítico flexão (Lcf) e o comprimento livre (L) expressa como uma percentagem.

Para estudo das cargas dinâmicas atuantes no fuso, tem-se:

$$Q_{DIN} = Asf * P_{AMM} * 3$$

$$Asf = \left[\left(\frac{De}{2} \right)^2 * p \right] - \left[\left(\frac{dn}{2} \right)^2 * p \right]$$

Onde:

- QDIN = carga dinâmica usando o fuso e porca;
- Asf = área de contato da rosca;
- PAMM = pressão admissível na superfície de contato da rosca.

Para eficiência, torque requerido e potência de acionamento tem-se:

$$\eta = \frac{1 - f * Tga}{1 + \frac{f}{Tga}}$$

$$M = \frac{Fa * p}{2p * \eta * 1000}$$

$$P_{AZ} = \frac{M * RPM}{9,55}$$

Onde:

- η = eficiência do fuso e porca;
- $Tg\alpha$ = tangente de α em relação à hélice da rosca;
- f = coeficiente de atrito entre o fuso e porca;
- Fa = forças axiais;
- p = passo rosca trapezoidal;
- PAZ = potência de acionamento necessária (em kW) em relação ao torque (M);
- Rpm = rotação do fuso trapezoidal;
- 9,55 = fator de conversão;
- M = torque requerido (momento de torção) para movimentação da carga.

2.7.1.8 Eixo-árvore

De acordo com Felisberto (1994a), eixo-árvore é o principal eixo da máquina devido as suas atribuições, pois é ele o responsável por segurar a ferramenta de corte e suportar todos os esforços durante o processo de usinagem, sofrendo o mínimo de interferências ou, na melhor das hipóteses, não sofrendo qualquer tipo de deformação.

Segundo Joshi (2007a), os eixos são elementos que devem suportar cargas de flexão sofrendo o mínimo de torção, ou em melhores condições, não sofrendo nenhum tipo de torção. Quando esses elementos mecânicos transmitem torque são denominados como eixo-árvore. São geralmente desenvolvidos acoplados a sistemas transmissores de torque, onde poderá haver uma caixa de engrenagens, combinações de polias ou conjuntos de rodas dentadas e corrente.

Os eixos-árvore têm por função dar suporte às ferramentas de corte (fresas), ou seja, as fresas estarão fixadas por meio de suportes especiais ao eixo-árvore de uma fresadora. São funções do eixo-árvore:

- Segurar a ferramenta de corte de forma concêntrica e segura;
- Gerar movimento de rotação e torque suficiente a fresa;

Para estas funções serem efetuadas satisfatoriamente, deve-se ter:

- Uma montagem em alto padrão de qualidade, onde não existam folgas radiais e axiais acima da tolerância exigida pelos rolamentos;
- Deve possuir uma rigidez dinâmica e estática satisfatória, visando evitar distorções e vibrações geradas pela força de corte;
- Resistência ao desgaste das partes móveis e dissipação do calor gerado durante o período de trabalho;
- Concentricidade do eixo-árvore para o porta-pinças e porta ferramentas.

A FIG. 2.12 mostra um eixo árvore de centro de usinagem Hision.



Figura 2.12: Eixo-árvore típico de centro de usinagem.
Fonte: Hision (2017).

2.8 Componentes Eletroeletrônicos

A estrutura elétrica de uma máquina CNC compreende as partes relacionadas aos circuitos de potência, das quais se pode citar:

- Fonte de alimentação;
- Motores de passo;
- Drivers;
- Microcontrolador;
- Shiel Ramps 1.4;
- Fins de curso.

2.8.1 FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA

Estes equipamentos denominados como fonte de alimentação para circuitos eletroeletrônicos podem ser divididos em dois grupos, tendo como base para isso a tecnologia de desenvolvimento. São eles: Fontes de alimentação linear e fonte de alimentação chaveada.

2.8.1.1 *Fonte de alimentação linear*

De acordo com o site Faíscas Eletrostática e Alta Tensão³, as fontes de alimentação lineares são responsáveis por transformar a energia fornecida pelas companhias de energia, (energia essa fornecida em Volts de Corrente Alternada (VCA), podendo ser 127 VCA ou 220 VCA), em energia contínua, ou seja, Volts de Corrente Contínua (VCC), por exemplo, uma tensão de 12 Volts. Esta tensão ainda que tenha sido reduzida, permanece sendo de corrente alternada. Após ser retificada por uma ponte de diodos, passa a ser uma corrente pulsante. Em sequência, esta corrente pulsante passa por um processo de filtragem, ou seja, um capacitor eletrolítico. Com este processo de filtragem se consegue chegar muito próximo de uma corrente constante, mas ainda existem pequenas oscilações, estas oscilações são chamadas de ripple. Para que se obtenha uma corrente realmente contínua, será necessário um circuito integrado regulador.

³ Faíscas Eletrostática e Alta Tensão Fontes chaveadas. Disponível em: <<http://www.faiscas.com.br/Fontes%20chaveadas.pdf>> Acesso em: 29 Jun. de 2017.

Segue abaixo (FIG. 2.13) os exemplos de ondas para cada parte do processo realizado por uma fonte de alimentação linear:

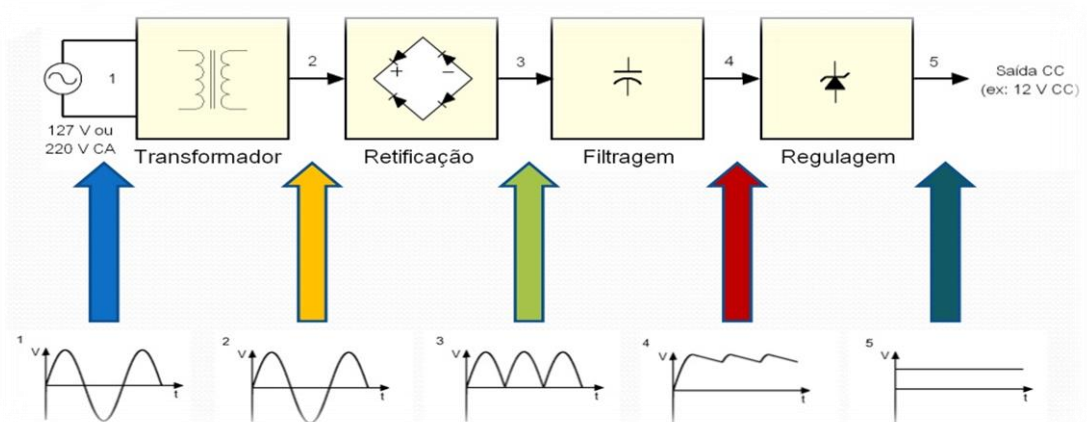


Figura 2.13: Formas de ondas geradas no processo de transformação CA/CC pela fonte linear. Fonte: Fontes chaveadas (2017).

Estas fontes de alimentação lineares desempenhem bem seu papel funcionando perfeitamente em aplicações que demandam pouca potência. Em casos em que maiores potências sejam requeridas, estas fontes podem vir a ser muito grandes e pesadas.

Os tamanhos do transformador e do capacitor podem vir a serem muito grandes se a potência requerida for alta. Isso se deve à relação entre o tamanho do transformador e a frequência da energia fornecida pelas companhias de energia ser inversamente proporcionais. Como a frequência dessa energia gira entre 50 Hz e 60Hz (de acordo com cada país), que é muito baixa, resulta em transformadores muito grandes. O mesmo ocorre com o capacitor para esta mesma fonte. Sendo assim, quanto maior a potência requerida, maior o transformador. Isso resulta em:

- Grande peso devido aos transformadores;
- Alto custo, pois transformadores possuem grande quantidade de fio de cobre, o torna estas fontes mais onerosas;
- Tamanho exagerado, devido ao transformador;
- Menor eficiência.

2.8.1.2 Fonte de alimentação chaveada

Seguindo ainda as informações de Faíscas Eletrostática e Alta Tensão, fontes chaveadas são unidades eletrônicas de alimentação, pois possui em seu circuito eletrônico um regulador chaveado, que pode ser descrito como sendo um circuito controlador que pulsa

(ligando e desligando) em alta frequência, mantendo assim uma tensão de saída estabilizada. Este tipo de fonte (FIG. 2.14) vem substituindo as fontes de alimentação lineares devido às várias vantagens que este novo componente traz.

Podem ser listadas as seguintes vantagens das fontes de alimentação chaveadas comparadas às fontes de alimentação linear:

- Peso consideravelmente menor;
- Tamanho consideravelmente menor;
- Maior eficiência em situações onde a potência requerida for maior;
- Menor custo.

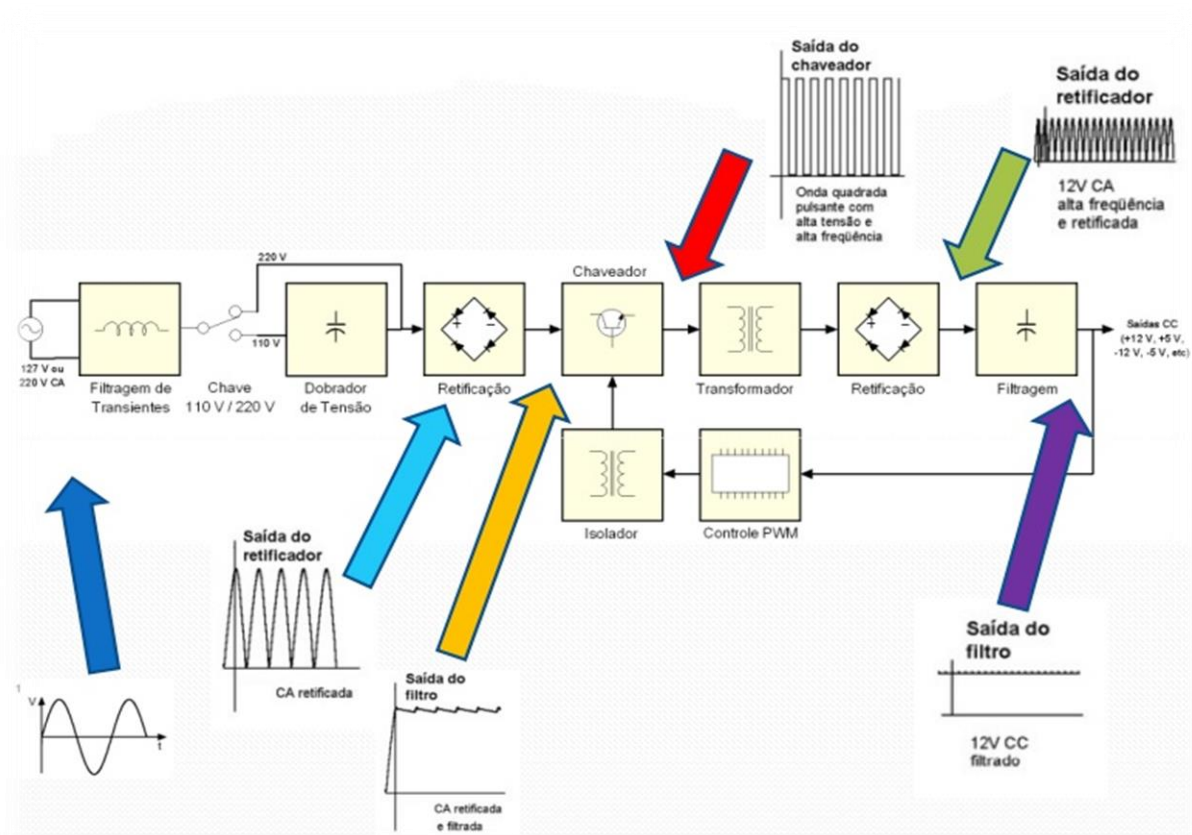


Figura 2.14: Formas de ondas geradas no processo de transformação CA/CC pela fonte chaveada.
Fonte: Fontes chaveadas (2017).

A fonte ideal para o sistema deverá operar em uma tensão compatível com o sistema e fornecer corrente suficiente para todos os componentes elétricos. A somatória das correntes dos componentes deve ser menor que a especificada na fonte.

2.8.2 MOTORES DE PASSO

O princípio do motor de passo foi criado pelo engenheiro francês Marius Lavet em 1936 (patente francesa 823 395 1936), de acordo com o site *Association Marius Lavet*⁴. Marius Lavet foi engenheiro da Escola Nacional de Artes e Ofícios (Clunny 1910) e *Ecole Supérieure d'Electricité* (1911). Foi um professor notável na *Graduate School of Óptica e Supaéro*. Fez fama e fortuna prestando seus serviços na indústria relojoeira. Ao longo de sua vida, registrou mais de 100 patentes. Foi o inventor do relógio de quartzo, que possui fundamentos muito parecidos com o motor de passo.

Segundo Pazos (2002a), os motores de passo estão dentro de uma classe especial de motores devido a sua forma particular de funcionamento. Estes motores produzem movimento de rotativo discreto, ou seja, incrementos angulares ocorrem como reação a polarização sequenciada de suas bobinas. Esta polarização é sincronizada através de pulsos sequenciados chaveados por um controlador, havendo assim, movimento nos sentidos horários, anti-horário ou o seu bloqueio. Diferentemente dos motores VDC comuns, os motores de passo não possuem elementos comutadores (escovas e coletores). Neste sentido, tem-se que, cada incremento angular equivale a um passo, que por sua vez, equivale a resolução mínima em graus para cada incremento. Pode-se tomar como exemplo um motor que possui uma relação de 200 passos por revolução, portanto ter-se-á uma resolução mínima neste motor de 1.8° por passo.

Cristo (2009a) ressalta que o passo pode ser entendido como uma constante, devido ao erro ser muito pequeno ao ponto de ser compreendido como desprezível (aproximadamente 5% de erro por passo e não cumulativo em uma cadeia de passos) com isso estes motores atendem às demandas de projetos com controle digital. Em diversos casos, onde se assegure o desempenho do motor de passo extinguindo-se a possibilidade da perda de passo, torna-se desnecessário o controle em malha fechada dos dispositivos, isso ocorre devido á eficiência e confiabilidade particular destes motores.

Para Condit e Jones (2004), os motores de passos são divididos em três grupos, de acordo com suas características construtivas. Assim tem-se os motores de passo com relutância variável, motor de passo com imã permanente e o motor de passo híbrido.

⁴ ASSOCIATION MARIUS LAVET. Marius Lavet. Disponível em: <<http://lavet.fr/marius-lavet/>> Acesso em: 24 Jun. de 2017.

2.8.2.1 Motor de passo com relutância variável

A relutância magnética é um fenômeno que pode ser quantificado, sendo a oposição que um determinado material possui quanto à passagem em seu interior de um fluxo magnético. Os materiais ferrosos possuem relutância magnética baixa se comparado a materiais compostos por outros elementos, portanto, um fluxo magnético transpõe mais facilmente os materiais ferrosos.

Os motores com este padrão de construção são dotados de um rotor construído em ferro doce, ou seja, menor relutância. O estator é composto por uma série de bobinas (podem variar de 3 e 5 bobinas), sendo estas responsáveis por promover o giro do motor de acordo com a forma que serão comutadas. Quando uma bobina é energizada, promove um pequeno deslocamento angular no rotor do motor, ocasionando uma tendência de completo alinhamento entre os dentes do rotor e a bobina energizada e variação na relutância. No momento em que o alinhamento for completo, a relutância será mínima assim como a distância entre o dente do rotor e a bobina. Abaixo esquemático de um motor de passo de relutância variável (FIG. 2.15).

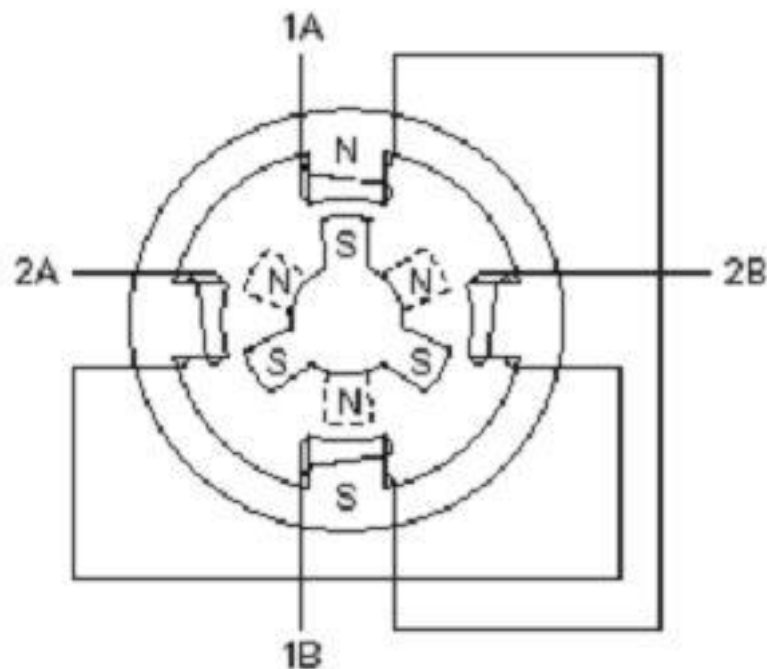


Figura 2.15: Esquemático de um motor de passo de relutância variável.
Fonte: MÁQUINAS ELÁTRICAS I (2017).

Para o cálculo do deslocamento angular tem-se a seguinte equação:

$$\alpha_s = \frac{360}{ND * NB}$$

Onde:

- α_s = valor do deslocamento angular em graus;
- ND= número de dentes no rotor;
- NB= número de bobinas.

2.8.2.2 *Motor de passo de imã permanente*

De acordo com o blog Máquinas Elétricas I⁵, motores de passo do tipo com imã permanente se assemelham muito aos motores de passo do tipo relutância variável. Enquanto motores de passo do tipo relutância variável possui rotores com dentes e composto por ferro doce, o rotor dos motores de passo do tipo imã permanente é composto por imãs, isso lhe confere a característica de manter a última posição após seu desligamento. Seu funcionamento se dá através do magnetismo, pois ao se energizar suas bobinas de forma sequenciada, os polos do imã são atraídos para o polo oposto gerado na bobina, como isso ocorre em uma sequência, há a produção de movimento.

A construção deste motor se torna mais barata, pois seu rotor composto por imãs possui uma superfície lisa, o que torna sua construção mais simplificada. Outra vantagem deste tipo de motor de passo é o fato de ele possuir um campo magnético permanente, que somado ao campo magnético gerado nas bobinas, lhe confere mais potência, conseqüentemente mais torque. A desvantagem deste motor de passo é pelo fato de ter uma resolução pequena, o que gera passos grandes e imprecisos. A seguir, imagem exemplificando um motor de passo de imã permanente (FIG. 2.16).

⁵ MÁQUINAS ELÁTRICAS I. Disponível em: < <http://maquinaseletricas1.blogspot.com.br/2013/03/aula-51-motor-de-passo.html>.> Acesso em: 29 Jun. de 2017.

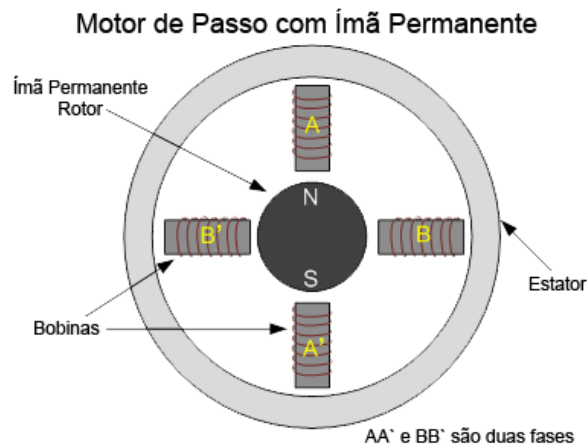


Figura 2.16: Motor de passo de ímã permanente.
Fonte: MÁQUINAS ELÁTRICAS I (2017).

2.8.2.3 Motor de passo híbrido

Os motores de passo do tipo híbrido compartilham das qualidades tecnológicas dos dois modelos acima citados. O rotor possui pequenas ranhuras em sua extremidade, podendo ser chamadas de dentes, seu núcleo é maciço e magnetizado, ou seja, o motor de passo híbrido possui os dentes que são característicos dos motores de passo de relutância variável e o núcleo magnetizado, característica dos motores de passo de ímã permanente.

Os dentes do rotor de passo do tipo híbrido (FIG. 2.16) se alinham com os dentes das bobinas guiados pelo fluxo magnético, e como nos motores de passo de relutância variável, o alinhamento será exato no momento em que a relutância for mínima. Estes motores geralmente possuem incrementos angulares de 1.8° .

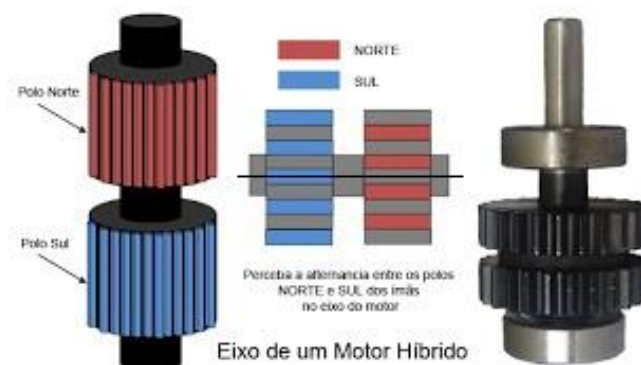


Figura 2.17: Eixo rotor de um motor de passo híbrido.
Fonte: MÁQUINAS ELÁTRICAS I. 2017.

Na sequência segue esquemático (FIG. 2.17) da dinâmica entre o rotor e as bobinas do motor de passo híbrido.

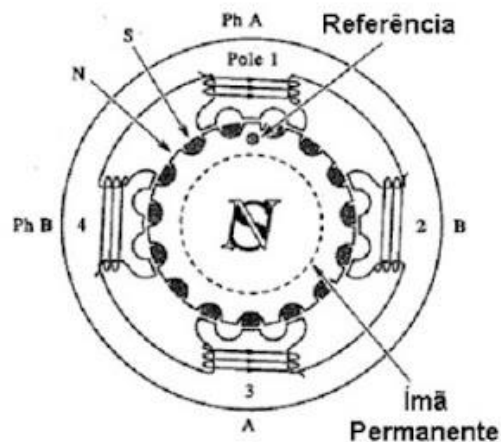


Figura 2.18: Motor de passo
Fonte: MECATRÔNICA NA NET (2017).

2.8.2.4 Drivers dos Motores de Passo

De acordo com o fabricante Allegro MicroSystems Inc.⁶, os drivers de motores de passo (FIG. 2.19) são os responsáveis pela comutação das bobinas dos motores de passo. São uma espécie de ponte de transistores que chaveiam e alimentam as bobinas numa dada sequência e frequência, isso promove a movimentação do eixo na velocidade e no sentido desejado, gerando torque e produzindo o movimento solicitado pelo microcontrolador.

As configurações são:

- Chip: A4988;
- Controle de passos e direção;
- Tensão lógica: 3 e 5,5V;
- Tensão saída motores: 8-35V;
- 5 Resoluções: full-step, half-step, 1/4-step, 1/8-step e 1/16-step;
- Controle ajustável de corrente, permitindo ajustar a corrente máxima de saída usando um potenciômetro, ou seja, utilizar tensões acima de tensão nominal do seu motor de passo para alcançar taxas maiores de passo;
- Regulador de tensão embutido;
- Proteção contra sobrecarga de corrente e curto-circuito.

⁶ Allegro Microsystems Inc. Driver A4988. Disponível em: <www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A4988-Datasheet.ashx> Acesso em: 01 jul. de 2017.



Figura 2.19: Driver para motor de passo.
Fonte: Stepstick A4988 Steper Drive Module (2016).

2.8.3 MICROCONTROLADOR ARDUINO MEGA 2560

Através de um microcontrolador pode-se chegar a um computador, devido ao grau de semelhança e características em comum. Ambos são dotados de uma Unidade Central de Processamento (CPU), memórias Flash e Ram, que são dispositivos responsáveis por armazenamento de dados e programas. Possuem a possibilidade de interação através de suas portas de entrada e saída. Se confrontarmos microcontroladores e computadores em relação as suas interações, pode-se citar como dispositivo de entrada em um computador um mouse, e em microcontrolador um sensor. Seguindo ainda este raciocínio, como dispositivo de saída em um computador tem-se um monitor, e em um microcontrolador ter-se-á um atuador (MICROCONTROLADORES, 2014 apud CAPELLI, 2014).

A placa de prototipagem Arduino Mega (FIG. 2.20) possui um microcontrolador ATMEL 2560. Esse componente possui um custo benefício excelente. Suas principais características são:

- Microcontrolador Atmega 2560;
- Voltagem de alimentação 5 V;
- Voltagem de entrada (recomendada) 7-12 V;
- Voltagem de entrada (limites) 6-20 V;
- Pinos digitais I/O 54 (dos quais 14 podem ser saídas PWM);
- Pinos de entrada analógica 16;
- Corrente contínua por pino I/O 40 mA;
- Corrente contínua para o pino 3.3V 50 mA;
- Memória Flash 256 KB of which 4 KB used by bootloader;

- SRAM 8 KB;
- EEPROM 4 KB;
- Velocidade de Clock 16 MHz.

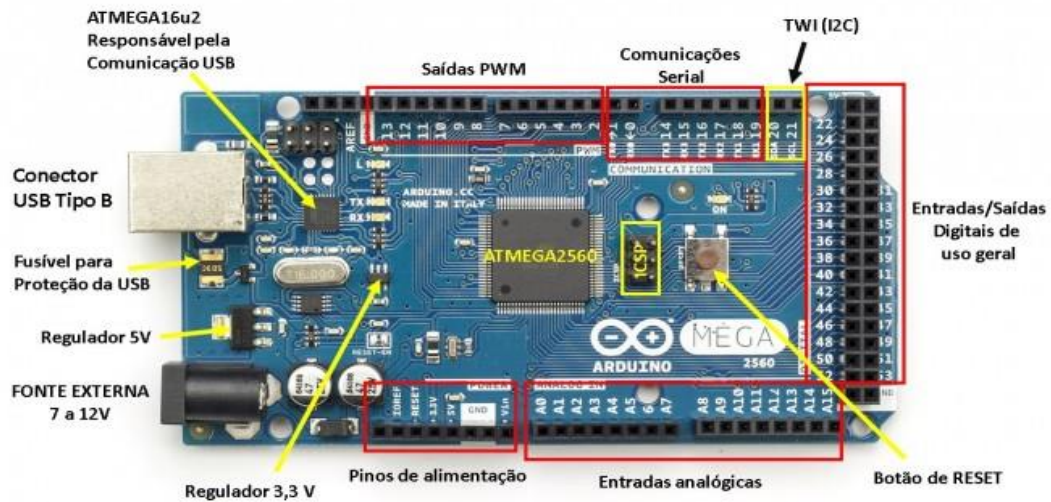


Figura 2.20: Arduino Mega 2560.
Fonte: EMBARCADOS. Arduino MEGA 2560 (2016).

2.8.4 FIRMWARE

De acordo com Andrade (2017), Firmware é:

[...] um software interpolado num dispositivo de hardware que permite a leitura e execução de software, porém não permite modificação. O termo firmware foi originado para indicar um substituinte de hardware em microcontroladores. Em outras palavras, o firmware é um controlador de entrada e saída de baixo nível que gerencia dispositivos de hardware. No computador, ele permite a comunicação entre software e hardware. A linguagem de programação dos firmwares é, primordialmente, a linguagem de máquina, mas hoje alguns microcontroladores interpretam, também, funções da linguagem C.

Sendo assim, o Firmware será o código a ser compilado no Arduino Mega 2560, fará todo gerenciamento eletroeletrônico da fresadora (motores de passo, drivers, fins de curso e acionamento do motor principal), será responsável também pela comunicação com o software instalado no computador. O software, por sua vez, gera um código em linguagem de máquina, ou, G-Code que será enviado em partes sequenciadas de acordo com o buffer do Arduino Mega 2560, via serial. O código ao chegar no Arduino, é lido e transformado pelo Firmware em ações referentes a cada linha de G-Code gerado e enviado pelo software. O G-Code é gerado segundo o protocolo RS 274.

2.8.5 SHIELD RAMPS 1.4

De acordo com o site Usinainfo⁷, a placa Ramps 1.4 é um módulo eletrônico de uso direcionado ao Arduino Mega 2560, voltado para o desenvolvimento de impressoras 3D. Esta placa permite que o Arduino Mega 2560 controle o complexo sistema de uma impressora 3D, atuando sobre motores de passo e demais componentes elétricos e eletrônicos como: extrusor, coolers, aquecimento da cama de impressão, entre outros. Através da Ramps 1.4, o Arduino Mega 2560 pode receber informações da impressora 3D: sensores de temperatura, chaves fim de curso, etc.

Uma grande vantagem é praticidade deste módulo. Os drivers podem ser trocados de forma fácil, prática e rápida, pois é uma placa com estrutura modular e os componentes são encaixados em suas posições. A Ramps 1.4 é conectada ao Arduino Mega 2560 também de forma modular, tornando-se um conjunto compacto, conforme Figura 2.21.

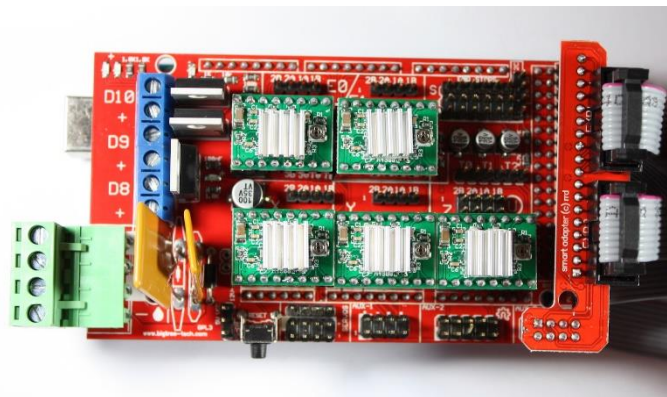


Figura 2.21: Shield Ramps 1.4 com drivers A4988.
Fonte: Paradisetronic.com (2017).

⁷ USINAINFO. Disponível em: <http://www.usinainfo.com.br/impressora-3d-e-cnc/ramps-14-reprap-shield-arduino-para-impressora-3d-4501.html>

3 METODOLOGIA

Este capítulo, conta com a descrição das etapas de desenvolvimento do protótipo físico, da implementação do software de programação e dos testes de funcionamento.

O projeto para a construção e funcionamento consistiu em quatro fases distintas, sendo elas:

- Projeto mecânico;
- Projeto eletroeletrônico;
- Comunicação *Arduino Mega 2560*, drivers A4988 e motores de passo;
- Comunicação entre software CNC GCODE CONTROLLER 6.1 com *Arduino Mega 2560*.

3.1 Projeto Mecânico

3.1.1 ESTRUTURA MECÂNICA

O projeto mecânico de uma máquina CNC começou com uma pesquisa, onde as propostas mais viáveis de construção e operação, menos complexas, mais baratas que gerasse uma máquina versátil, atendendo não somente o propósito deste trabalho, mas que no futuro venha a ser empregada em outros segmentos de matérias. Foi necessário definir alguns tópicos para que se pudesse traçar planos e metas no processo de projeção e construção. Pode-se citar como tópicos importantes, por exemplo, os itens abaixo:

- Materiais estruturais a serem utilizados;
- Tipos de guias lineares;
- Tipos de rolamentos e mancais;
- Tipos de fusos;
- Tipo de mesa de trabalho;
- Motores de passo;
- Motor principal (eixo arvore)

O ponto de partida para este projeto foi a criação de um chassi estrutural robusto, composto de aços do tipo SAE/AISI/ABNT 1020 e 1045. Estes aços são comumente empregados em uma variedade extensa de equipamentos de vários seguimentos e máquinas diversas. Com custo relativamente baixo se comparado à maioria de outros aços, além de serem encontrados facilmente.

O serviço de corte a plasma foi terceirizado. As primeiras peças cortadas no plasma CNC foram as chapas em aço SAE/AISI/ABNT 1020 de espessura 3/16" destinadas a parte frontal e seu respectivo par. Juntamente com as chapas, foram adquiridas duas barras de aço de seção transversal circular SAE/AISI/ABNT 1045 de diâmetro 3/4" com 720 mm de comprimento que foram utilizadas como longarinas do chassis.

A chapa frontal e seu par foram soldados em pequenos pontos de solda. Este artifício foi utilizado para que durante os processos que furação, usinagem e mandrilhamento, as chapas sofressem o menor índice de erro quando confrontadas no momento da montagem, pois se houvesse erro no alinhamento dos furos, influenciaria de forma significativa as condições de paralelismo no eixo coordenado X, sendo necessário a compra de novas chapas. Toda usinagem realizada nas chapas dos chassis foi realizado em uma fresadora vertical Pinnacle com leitura digital nos 3 eixos. A FIG. 3.1 ilustra o resultado final da operação nas chapas.

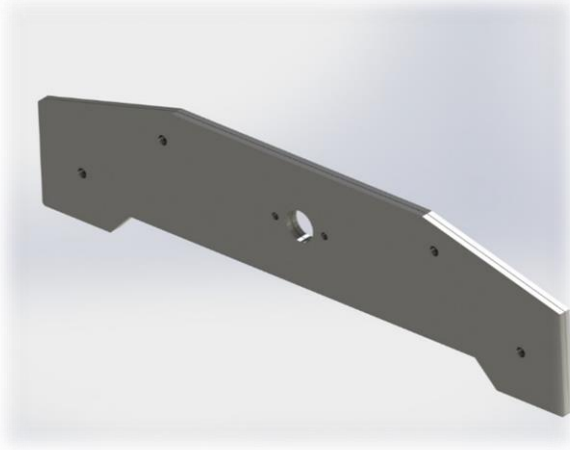


Figura 3.1: Imagem ilustrativa da condição final de todo processo de usinagem das chapas.

Os furos das extremidades são de 8 mm, o furo central é de 1" e os dois furos ao seu redor são de 1/4". Todo o perímetro das chapas foi usinado.

As longarinas de 3/4" e 70 mm de comprimento foram usinadas em um torno Nardine Mascote. As duas peças foram reduzidas ao comprimento de 700 mm, sendo as duas faces de cada barra usinadas. Foi necessário neste processo e em todos os processos de usinagem de longarinas e guias lineares o uso de luneta, este equipamento confere a usinagem alta precisão. Nas extremidades de cada longarina foi executado um furo de 7 mm de diâmetro e 40 mm de profundidade. Ainda no torno um macho de 8 mm foi preso em um mandril de

aperto rápido para início da abertura das roscas. O processo de abertura das roscas foi finalizado utilizando o desandador de machos.

A utilização de parafusos do tipo allen, melhorou a aparência do equipamento e com apenas 4 chaves pode-se desmontar toda a máquina. Barramentos e longarinas foram fixados com parafusos allen de 8 mm x 25 mm.

A FIG. 3.2 ilustra como se deu a montagem inicial dos chassis.



Figura 3.2: Chassis da fresadora.

O processo seguinte foi a usinagem das guias lineares de 20 mm. Todo o processo de usinagem nas guias lineares foi idêntico ao das longarinas. Foi tomado certo cuidado com a superfície das guias lineares para que não houvesse danos superficiais que prejudicassem o deslocamento dos rolamentos lineares. A imagem da FIG. 3.3 ilustra como ficou o chassi finalizado da fresadora.



Figura 3.3: Chassis finalizado.

Os mancais dos rolamentos lineares de 20 mm destinado ao eixo X, foram feitos em seguida, obedecendo um padrão construtivo e tolerância de medidas exigidas pelo fabricante dos rolamentos. A circunferência interna de alojamento do rolamento linear está na casa de 0,015 mm. Este grau de precisão foi obtido com o uso de um súbito, que é uma ferramenta de aferição de furos. Optou-se por utilizar dois rolamentos lineares de 20 mm para cada guia linear, isso conferiu ao projeto maior estabilidade e precisão. Os mancais foram confeccionados em aço SAE/AISI/ABNT 1045. Somente neste caso foram feitos mancais individuais para cada rolamento, que foram unidos posteriormente. Cada mancal possui um flange de 65 mm com espessura de 8 mm, onde foram feitos 4 furos de 5 mm e posteriormente roscas de 6 mm. Foram cortadas 4 chapas de 3/16" (corte a plasma), estas chapas receberam furação idênticas as furações dos flanges dos mancais. As furações de precisão foram realizadas na fresadora vertical, com a ferramenta de auxílio de furação contida em seu painel digital. Os mancais foram unidos as chapas através de parafusos allen de 6 mm x 10 mm.

Com os mancais quase finalizados, foi realizada a última parte do serviço para a união dos dois mancais individuais, formando um único mancal dotado de dois rolamentos lineares. A confecção da chapa suporte para as laterais. Nesta chapa foram feitas uma serie de furação, sendo dois furos de 5 mm em cada face da seção transversal da chapa, onde posteriormente foram feitas roscas de 6 mm, e em sua face principal 3 furos de 7 mm, e posteriormente roscas de 8 mm. Na FIG. 3.4 tem-se uma ilustração do resultado final deste processo em particular. A usinagem destes mancais foi realizada em um torno Nardine Nodus 650 e fresadora vertical Pinnacle, na empresa Torno Mac.

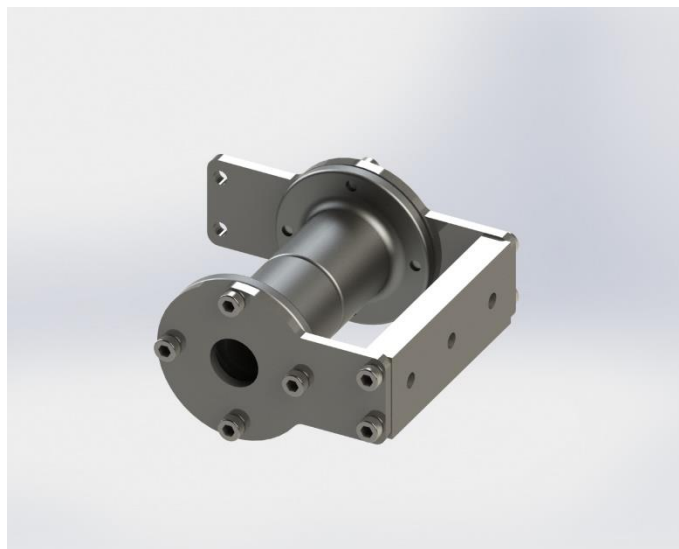


Figura 3.4: Imagem renderizada do projeto finalizado do mancal do eixo X.

Aos chassis da fresadora foram acrescentados ainda o mancal do fuso, o flange do motor de passo, fuso e o suporte com a porca do fuso. Para o mancal do rolamento do fuso, foi desenvolvido um projeto único para os três eixos, onde se tem uma base para rolamento 6001, um guia com diâmetro de 1” para o encaixe em seus respectivos alojamentos e dois furos de 5 mm, que posteriormente tornaram-se roscas de 6 mm. Toda usinagem foi realizada em torno Nardine Mascote, o material utilizado foi o aço SAE/AISI/ABNT 1045. A FIG. 3.5 ilustra o resultado final obtido.



Figura 3.5: Imagem renderizada do mancal com rolamento 6001 do fuso dos eixos X, Y e Z.

O flange do motor de passo foi usinado a partir de um disco de chapa 5/16” x 3” em aço SAE/AISI/ABNT 1020. Foram feitas as sedes para encaixe do motor de passo e de encaixe na chapa frontal dos chassis. Este flange possui seis furos, sendo os quatro da extremidade com diâmetro de 4,5 mm que posteriormente recebeu roscas de 5 mm e dois mais internos de 5 mm de diâmetro que posteriormente recebeu roscas de 6 mm. O resultado final é ilustrado abaixo FIG. 3.6. Assim como o projeto do mancal do fuso, o flange do motor de passo se resume a um único projeto para os três motores de passo.

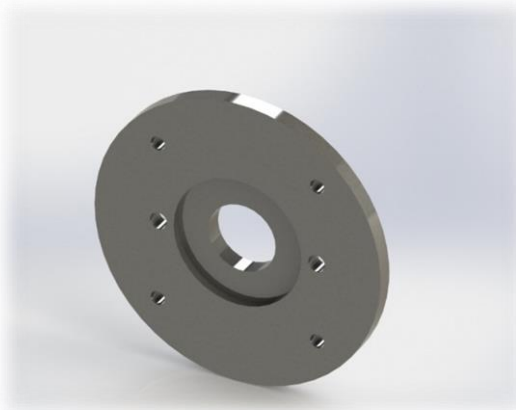


Figura 3.6: Flange dos motores de passo dos eixos X, Y e Z.

Os fusos foram construídos a partir de barras de rosca, tendo como principal motivo esta escolha o baixíssimo custo, visto que o orçamento se encontrava apertado e o fato de ser o primeiro protótipo, não haveria a necessidade de um investimento tão alto em fuso trapezoidal ou fuso de esferas. Foi adquirido barras de roscas na medida de 12 mm com passo de 1,75 mm. Foi necessário a criação de uma extensão no fuso, pois não era possível criar uma base para o rolamento 6001. Esta extensão foi a condição para se ter uma base de 10 mm para o perfeito encaixe em seu rolamento. Na extremidade da extensão foi criado um furo e uma rosca de 5 mm pra que o fuso não tivesse qualquer folga durante a operação. Na outra extremidade foi criada uma base de 6,35 mm para receber o acoplamento. Sendo assim o resultado final do fuso e ilustrado na FIG. 3.7. O processo de fabricação dos três fusos é idêntico, sendo que, a única diferença entre eles está no comprimento.



Figura 3.7: Fuso.

O suporte da porca do fuso foi feito a partir de uma cantoneira de medidas 1. 1/2" x 3/16". Fora feitos furos em sua extremidade, em seguida roscas de 6 mm. Pode-se ver na ilustração abaixo (FIG. 3.8).



Figura 3.8: Cantoneira central.

Com a instalação do motor de passo juntamente com seu acoplamento, está finalizado a parte estrutural e móvel do eixo X. Assim tem-se na ilustração a seguir o resultado obtido (FIG. 3.9) desta parte da construção e montagem dos chassis da fresadora.

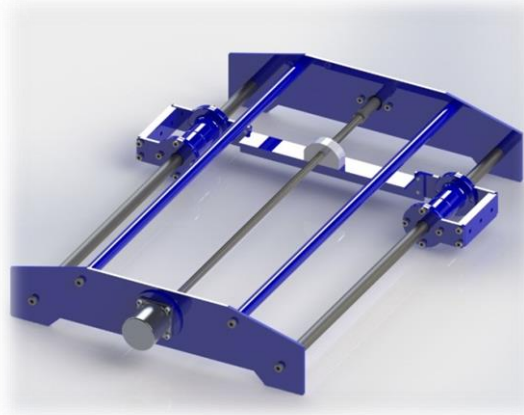


Figura 3.9: Chassis e partes moveis do eixo X finalizado.

Com a parte baixa da máquina finalizada, o passo seguinte foi construção e montagem da base do eixo Y, assim como suas partes moveis. O corte das chapas laterais foi feito segundo desenho feito em SOLIDWORKS 2014, e como as chapas do eixo, estas chapas receberam o mesmo processo: corte plasma; usinagem lateral, furação e mandrilhamento na fresadora vertical, foi utilizado chapa 3/16" de aço SAE/AISI/ABNT 1020. Os procedimentos realizados em guias lineares e barramentos do eixo X, foram repetidos para os componentes do eixo Y, o que mudou de fato foram as bitolas das guias lineares, passaram de 20 mm para 16 mm e os barramentos de 3/4" para 5/8", o comprimento diminuiu para 550 mm em ambos. O fuso do eixo Y foi construído da mesma forma que o do eixo X, a diferença ficou apenas em seu comprimento, tendo que ser reduzido em virtude do dimensionamento da máquina, ilustrado abaixo na FIG. 3.10. Depois que se executou todo trabalho de usinagem, montagem e pintura tem-se os eixos X e Y finalizados.

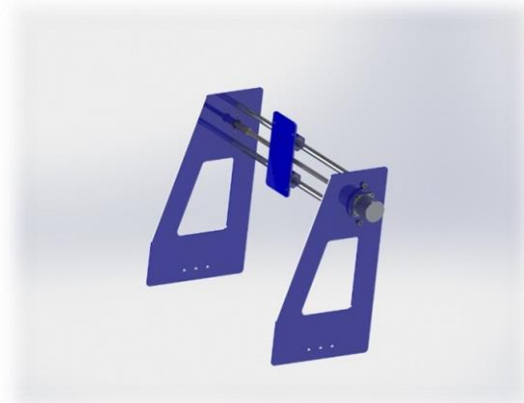


Figura 3.10: Conjunto do eixo Y montado.

Após a conclusão do eixo Y, é feita a fixação com eixo X, conforme ilustração da FIG. 3.11.

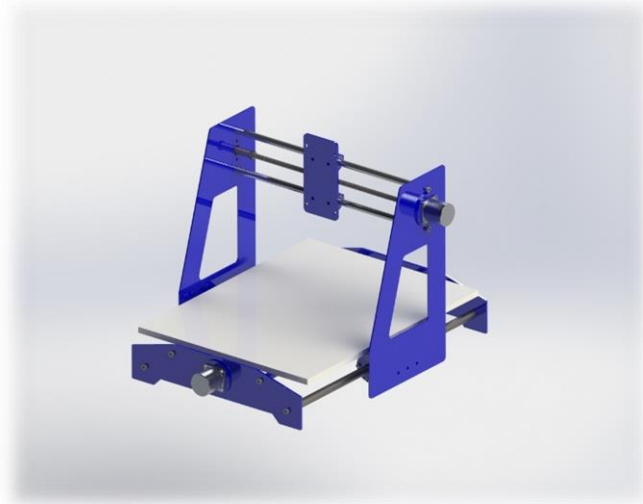


Figura 3.11: Conjunto X e Y montado.

Por fim a fabricação e montagem do eixo z. O processo de usinagem das guias para os rolamentos lineares de 16 mm passaram mesmo processo de usinagem que as outras guias, assim como o fuso. O flange com o rolamento 6001 do fuso segue o mesmo modelo que os demais, assim como o flange do motor de passo. O barramento foi fabricado segundo o processo: foi soldado uma chapa com dimensões 70 mm x 74 mm com espessura de 3/8” nos dois barramentos, formando um “H”, esta peça é fixada na base do eixo Y. A partir disso, foram montadas as outras peças do eixo Z, sendo ilustrado abaixo FIG. 3.12.

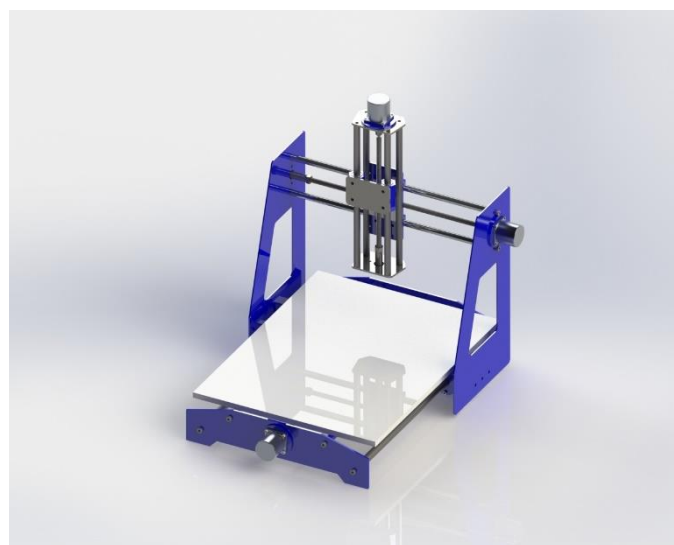


Figura 3.12: Imagem da fresadora finalizada.

3.2 Projeto Eletroeletrônico

O projeto eletroeletrônico pode ser detalhado conforme diagrama da FIG. 3.13, onde estão os componentes, microcontrolador *Arduino Mega 2560*, *drivers A4988*, fins de curso, fonte 12 VCC e motores de passo.

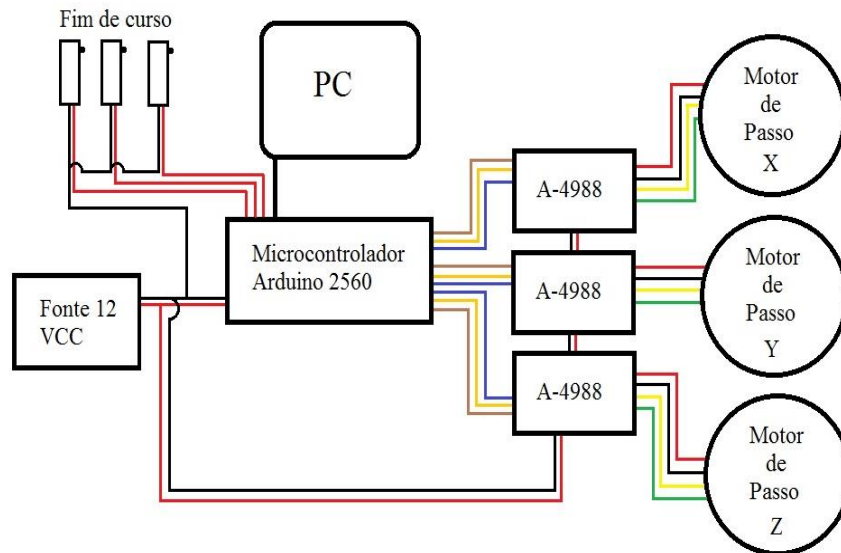


Figura 3.13: Esquemático projeto eletroeletrônico.

Para o sistema eletroeletrônico é necessário uma fonte de alimentação de 12 VCC, devido a exigência do conjunto Arduino Mega 2650 e shield Ramps 1.4. A corrente necessária para o sistema é o somatório das correntes dos componentes. Então, ter-se-á:

- Motores de passo: 1,2 A;
- Conjunto Arduino Mega 2560 e Ramps 1.5: 500 mA;
- Cooler de resfriamento: 240 mA;
- Drivers: 20 mA
- Relé de acionamento da retifica manual: 50 mA

Assim tem-se:

$$\sum I = (1,2 * 3) + (0,5) + (0,24) + (3 * 0,02) + (0,05) = 4,45 A$$

Uma fonte 12 VCC de 10 A é suficiente para alimentar o sistema eletroeletrônico. A instalação ficou conforme FIG. 3.14 abaixo.



Figura 3.14: Caixa com sistema eletroeletrônico.

Na caixa foi instalado um interruptor (chave on/off), responsável por ligar a fonte. Esta por sua vez, alimenta a Ramps 1.4, o Arduino Mega 2560, os drivers dos motores de passo e o relé de acionamento da retifica manual. Ligado a fonte estão também a tomada central dos motores de passo unipolares e o cooler de resfriamento.

Observando o esquemático abaixo FIG. 3.15 da Ramps 1.4, utilizado em uma impressora 3D, percebe-se a semelhança entre as duas máquinas no que se refere às ligações entre os componentes e a placa. São ligações simples, pois a shield possui indicações com nomes dos componentes a serem conectados. Os componentes em comum são os três motores de passo, chaves fim de curso, cooler e o relé de acionamento.

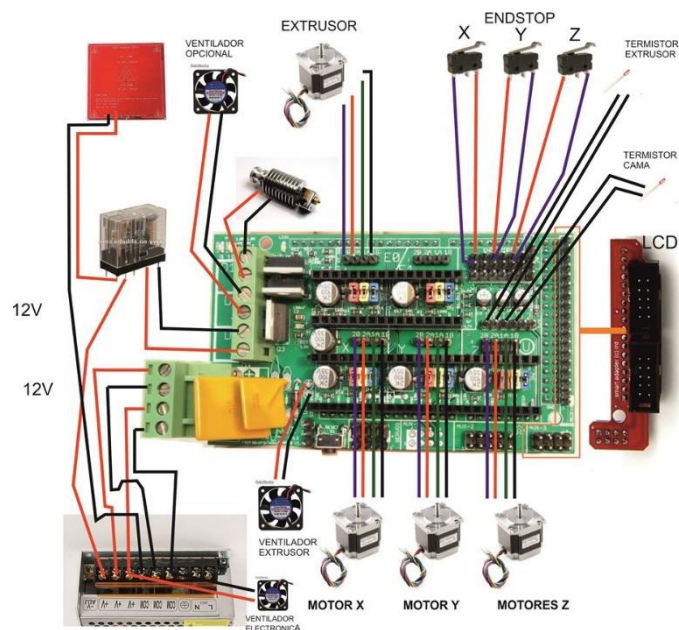


Figura 3.15: Ramps 1.4 e os componentes de um impressora 3D.

Os drivers possuem um controle de corrente que necessita ser regulado antes do acionamento dos motores. É um processo simples, mas muito importante para a preservação do driver e do motor. Cada driver possui um trimpot. Ao fazer a instalação do driver na Ramps 1.4, deve-se com uma chave philips, girar o trimpot no sentido anti-horário, onde a corrente será limitada a um valor muito baixo. As fórmulas a seguir deverão ser utilizadas para determinação da tensão de referência no trimpot. Para os motores 23LM C004, a corrente nominal é 1,2 A.

$$V_{ref} = I * 0,7 * (8 * R_s)$$

$$V_{ref} = 1,2 * 0,7 * (8 * 0,1) = 0,672 V$$

V_{ref}= Tensão de referência no trimpot;

I= Corrente nominal do motor de passo;

R_s= Resistor da Ramps 1.4 = 0,1 kΩ

O procedimento de medição do V_{ref} deve ser feito aterrando uma das pontas de prova do multímetro juntamente ao terra de entrada da fonte e com a outra ponta de prova encostada no trimpot. Ao ser feito este procedimento, o drive estará limitando a corrente do motor de passo de forma correta.

Os motores de passo possuem um funcionamento diferenciado dos outros motores. Cada motor de passo possui uma curva que caracteriza seu torque em função da velocidade. Em virtude das características dos motores de passo, a velocidade estará diretamente relacionada a força necessária para uma operação, ou seja, em deslocamentos livres de esforço a velocidade pode ser próximo a máxima, em situação de trabalho deverá estar dentro da faixa ótima do motor. No trabalho de pesquisa não foi encontrado informações sobre os motores de passo utilizados. Em testes experimentais verificou-se que seu torque atende ao propósito do projeto, ou seja, a usinagem de PCI's e MDF, pois são materiais de fácil usinabilidade. Devido ao passo da rosca do fuso utilizado ser de apenas 1,75 mm, o que torna a máquina lenta, em contra partida ganhasse em torque.

3.3 Implementação Hardware-Software

Para o interfaceamento entre Arduino Mega 2560 e o software CNC GCODE CONTROLLER 6.1, foi utilizado o Firmware Marlin. Este Firmware é muito utilizado em impressoras 3D, mas pode ser configurado e customizado de acordo com as necessidades de cada projeto, isso devido a seu código ser aberto. As configurações do Firmware foram descritas passo a passo em Resultados e Discussões, referente aos procedimentos de testes e calibração da máquina. O Marlin é responsável pela comunicação com o software CNC GCODE CONTROLLER 6.1, ele recebe e requisita dados durante o processo de usinagem. Isso acontece devido ao espaço limitado do buffer do Arduino Mega 2560, por isso o envio do G-Code se dá em pequenas partes e ao fim de cada parte, o Marlin requisita mais dados, sendo esta a dinâmica do processo de comunicação.

O software CNC GCODE CONTROLLER 6.1 foi desenvolvido em Java, possui controles simples e avançados de ações manuais, sendo possível o posicionamento dos eixos coordenados através linha de código G-Code, ou através de botões com valores de deslocamento predefinidos.

Na aba de comandos simples se tem acesso às funções Home de cada eixo coordenado individualmente e a função Home All, que desloca os três eixos para seu ponto inicial zero. Os botões de deslocamento individuais têm as opções de 10 mm, 1mm e 0,1 mm (FIG. 3.16).

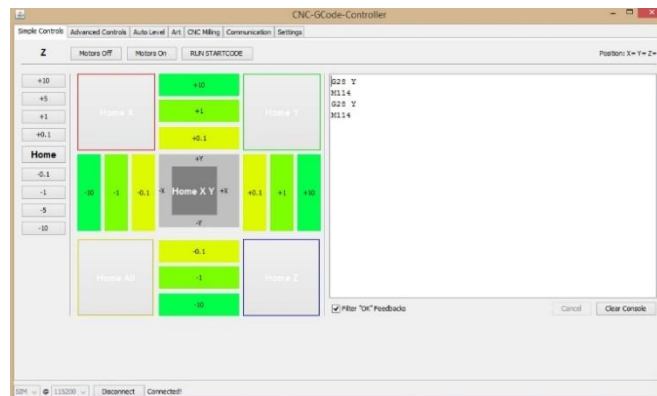


Figura 3.16: Painel de comandos simples do software CNC GCODE CONTROLLER 6.1.

O software possui ainda uma aba de comandos avançados, com a possibilidade ajustes e setup posicional. Possui uma aba específica para o nivelamento. Este software possui também um processamento de imagem baseado na intensidade do brilho da imagem, gerando o G-Code para à usinagem. Depois de gerado o código da imagem, ele é enviado para aba milling, onde será exibido o trabalho a ser realizado assim como o código em andamento. Por último, tem a aba settings, local onde são feitas as alterações nas configurações da máquina via software. O CNC GCODE CONTRLLER 6.1 é um software gratuito.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teste Funcionamento Dos Motores

Com a etapa de montagem da fresadora concluída, parte-se então para a descrição dos testes. Inicialmente, foram testados os motores de passo, consequentemente, Arduino Mega 2560, Drivers A4988 e as ligações de todo sistema elétrico, isso visando constatar um dimensionamento adequado e funcionamento dentro das expectativas. Utilizando um código de programação extremamente simplificado e reduzido, efetuou-se o teste individual de cada eixo coordenado (X, Y e Z). Havia certa atenção voltada ao eixo Z, por ser posicionado verticalmente, haveria de deslocar uma massa de 3 Kg (base móvel do eixo Z e retífica manual instalada).

Verificou-se que as ligações estavam de acordo com o projeto, acionando os motores de passo corretamente. Constatou-se que o torque gerado pelos motores de passo estava dentro do esperado, atendendo aos requisitos para fresagem de PCI. Nesse teste, não foi feito nenhum ajuste no sentido de se obter resultados voltados para o âmbito da precisão e resolução, apenas verificou-se o comportamento da máquina em relação aos movimentos solicitados de acordo com o programa executado pelo Arduino. Abaixo (FIG. 4.1) o código utilizado para os testes.

```

1
2 // defines dos pinos
3 #define X_STEP_PIN      A0
4 #define X_DIR_PIN      A1
5 #define X_ENABLE_PIN   38
6
7 void setup() {
8   pinMode(X_STEP_PIN, OUTPUT);
9   pinMode(X_DIR_PIN, OUTPUT);
10  pinMode(X_ENABLE_PIN, OUTPUT);
11  digitalWrite(X_ENABLE_PIN, LOW); // Enable = 0 ativa o driver do motor
12 }
13 void loop() {
14   digitalWrite(X_DIR_PIN, HIGH); // define a direção do motor (HIGH ou LOW)
15   for(int x = 0; x < 20000; x++) { // define a quantidade de passos que o motor executará
16     digitalWrite(X_STEP_PIN, HIGH);
17     delayMicroseconds(150);
18     digitalWrite(X_STEP_PIN, LOW);
19     delayMicroseconds(150);
20   }
21   delay(2000);
22 }
23 }

```

Figura 4.1: Código básico para teste dos motores de passo.

4.2 Configuração do *Firmware Marlin*

Com a instalação do *Firmware Marlin*, uma série de ajustes foi realizada. Esses ajustes contemplam as características particulares da máquina, em que são definidos os sentidos de rotação dos motores de passo para o deslocamento dos eixos X, Y e Z, velocidade do deslocamento, definições dos fins de curso (ponto máximo ou mínimo), entre outros. O primeiro parâmetro que se definiu na aba de configurações, (configurações. h) contidas no Firmware, foi feito em função da escolha da placa de interfaceamento utilizada para comunicação com o Arduino Mega. No caso deste projeto, a Shield Ramps 1.4 é listada como número 35, vide parte do código abaixo.

```

73 // 9 = Gen3+
74 // 70 = Megatronics
75 // 701= Megatronics v2.0
76 // 702= Minitronics v1.0
77 // 90 = Alpha OMCA board
78 // 91 = Final OMCA board
79 // 301= Rambo
80 // 21 = Elefu Ra Board (v3)
81 // 88 = 5DPrint D8 Driver Board
82 // 999 = Leapfrog
83
84 #ifndef MOTHERBOARD
85 #define MOTHERBOARD 35 // Refere-se a shield Ramps 1.4
86 #endif
87
88 // Define this to set a custom name for your generic Mendel,
89 // #define CUSTOM_MENDEL_NAME "This Mendel"

```

Figura 4.2: Parte do código para definição da Shield Ramps 1.4

Com esse parâmetro configurado, assegurou-se que a comunicação entre o Arduino Mega e demais componentes eletroeletrônicos foi realizada de forma precisa e exata. Nessa mesma aba de configurações são estabelecidos os deslocamentos em X, em Y e em Z, onde o ponto mínimo de cada eixo é zero (0) e o ponto máximo de cada eixo foi definido primeiramente de forma estimada, apenas para os testes de comunicação do software com o Arduino Mega e certificação de que os movimentos ocorreriam dentro do esperado. Essas configurações no deslocamento máximo dos eixos coordenados só puderam ser feitas de forma precisa após a correta configuração do real deslocamento, ou seja, onde um comando de deslocamento, por exemplo, de 10 mm, fosse realmente 10 mm. Isso só virá a ocorrer quando se configura a parte em que definimos corretamente o passo do nosso fuso, e estas modificações sejam conferidas de forma a validar estas alterações. Os testes feitos nessa fase abrangem uma pequena área, ou seja, pequenos deslocamentos não havendo qualquer tipo de usinagem. Abaixo se tem a parte do *Firmware* (FIG. 4.3) onde estas configurações de deslocamento máximo são feitas, com isso tem-se a área e volume útil de usinagem.

```

369 #define min_software_endstops false // If true, axis won't move to coordinates less than HOME_POS.
370 #define max_software_endstops true // If true, axis won't move to coordinates greater than the defined lengths below.
371
372 // Travel limits after homing
373 #define X_MAX_POS 500 //Deslocamento máximo em X
374 #define X_MIN_POS 0 //Posição 0 no eixo X
375 #define Y_MAX_POS 350 // Deslocamento máximo em Y
376 #define Y_MIN_POS 0 // Posição 0 do eixo Y
377 #define Z_MAX_POS 150 // Deslocamento máximo em Z
378 #define Z_MIN_POS 0 // Posição 0 do eixo Z
379
380 #define X_MAX_LENGTH (X_MAX_POS - X_MIN_POS)
381 #define Y_MAX_LENGTH (Y_MAX_POS - Y_MIN_POS)
382 #define Z_MAX_LENGTH (Z_MAX_POS - Z_MIN_POS)
383 //===== Bed Auto Leveling =====

```

Figura 4.3: Parte do *Firmware* onde é configurado os pontos max/min dos eixos coordenados

O processo de comunicação ocorreu de forma esperada e satisfatória, já na parte mecânica houve problemas pouco relevantes no deslocamento dos eixos X e Y, então se optou por reparar a máquina. Foi constatada a necessidade de troca do acoplamento que faz a transferência de torque entre o motor de passo e o fuso dos eixos acima citados. O motivo do reparo foi o desalinhamento entre o eixo do motor de passo e seu respectivo fuso. Esse desalinhamento estava provocando ruído e uma pequena perda de torque. Com a intenção de se evitar futuros problemas, tais como, empeno de fuso, desgaste das bases dos rolamentos nas do

motor de passo e o próprio desgaste dos rolamentos do motor de passo buscou-se deixar a máquina com um menor nível de ruído.

Esse desalinhamento ocorreu quando o furo do acoplamento encontrou com a medida do furo interno acima da tolerância. Por ser um acoplamento fixo, sem compensação de desalinhamento, ao se apertar os parafusos houve um leve deslocamento, causando esse tipo de reação.

4.3 Configuração da relação do número de passos por revolução

É nessa parte que se teve o ajuste da relação do número de passos necessários para que se completasse uma revolução, cujo eixo do motor de passo completou os 360°. A FIG. 4.4 mostra as alterações realizadas no Firmware Marlin para que se tenha a exata proporção entre as medidas contidas no projeto e no momento da usinagem. Um exemplo interessante foi o corte projetado em um software de desenho adequado para esse tipo de serviço, em que a medida do mesmo foi 20 mm. No momento da usinagem, esse corte teve de se aproximar o máximo possível de 20 mm, obedecendo a uma determinada tolerância preestabelecida e específica para cada tipo de usinagem, estando, então, a máquina com o grau de precisão em um nível aceitável ou não. Abaixo segue a FIG. 4.4 contendo uma parte do Firmware onde se configurou a medida do passo do fuso de cada eixo coordenado.

```

495 #define Cyclone_XY_Gear_Ratio 1 // Number of tooth (motor/rod)
496 #define Cyclone_Z_Gear_Ratio 1 // Number of tooth (motor/rod)
497 #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {3200.0/(Cyclone_XY_Gear_Ratio*1.75),
498                                     3200.0/(Cyclone_XY_Gear_Ratio*1.75),
499                                     3200.0/(Cyclone_Z_Gear_Ratio*1.75),800}
500

```

Figura 4.4: Parte do Firmware onde é configurado o passo do fuso dos eixos coordenados.

As sentenças trazem valores relativos ao número de passos (para os motores de passo utilizados = 200), a divisão dos passos (1/16) e ao passo de rosca do fuso (1,75 mm).

Assim tem-se:

- 200 Número de passos que o motor de passo necessita para completar uma revolução;

- 16 Número que divide um único passo, ou seja, tem-se uma precisão de 1/16 passos;
- 1,75 Deslocamento linear que uma revolução do fuso provoca. Todos os fusos possuem passo de 1,75 mm.

$$d_{XYZ} = 200 * 16 = 3200 \text{ passos} = 1RPM$$

$$d_{XYZ} = 1RPM = 1,75 \text{ mm}$$

$$d_{XYZ} = \frac{1,75}{1,75} = 1 \text{ mm}$$

Sendo assim, feitas tais configurações e os testes de medição do deslocamento utilizando-se um paquímetro, observou-se uma coerência extremamente alta entre os comandos de deslocamento via software e o deslocamento realizado pela máquina. Para os resultados obtidos neste primeiro teste de precisão, embora realizado de forma grosseira, percebeu-se um excelente grau de precisão e repetibilidade dos comandos.

Somente um único caso despertou curiosidade nesse processo, os momentos de reversão de sentido de deslocamento. Foi nesse instante que foram percebidas as folgas que existiam quando se utilizou os fusos com roscas convencionais. Testes futuros devem ser efetuados para que, se tenha conhecimento dessas folgas em questão, visto que é possível amenizá-las com reparos no *Firmware*. A FIG. 4.5 retrata o teste em que se verificou a coerência entre comandos e os deslocamentos.

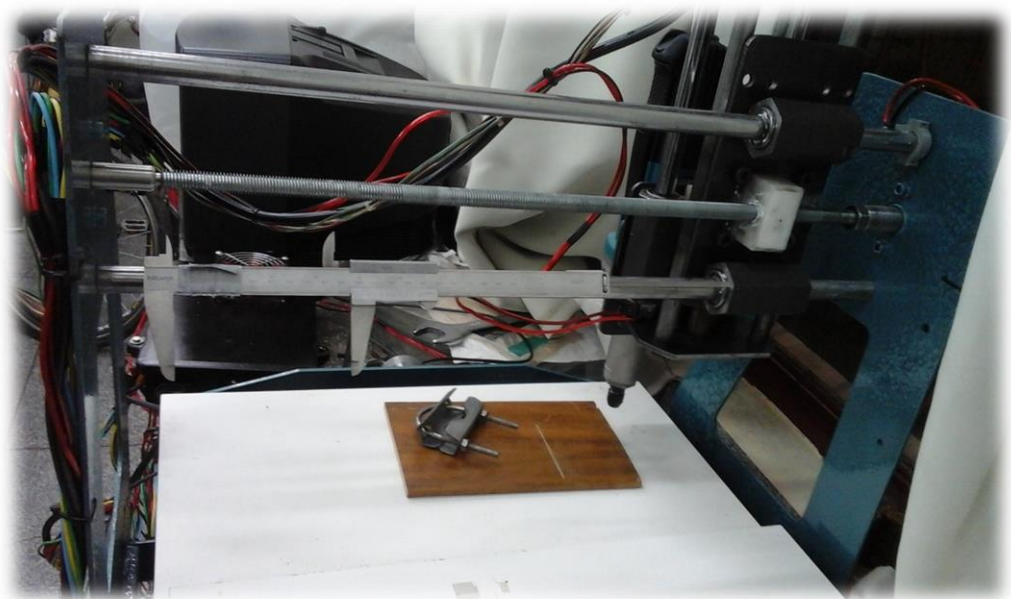


Figura 4.5: Medição do deslocamento efetivo através de comandos via software.

4.4 Ajuste de velocidade de deslocamento

O ajuste da velocidade de deslocamento foi o último parâmetro a ser configurado, visto que, há um limite para esta velocidade em virtude da perda de torque e nos motores de passo. A FIG. 4.6 indica os parâmetros de velocidade que foram alterados no Firmware.

Isso ocorre devido ao curtíssimo tempo de comutação, ou seja, quanto menor for o intervalo de tempo entre cada pulso que o motor recebe, maior será a perda de torque, pois a corrente não terá tempo suficiente de atingir aquele valor máximo que foi regulado no *driver*. Sendo assim, observou-se que, em função do fuso possuir um passo de rosca relativamente pequeno, a velocidade máxima com torque dentro de uma faixa que atenda às necessidades será baixa; em contrapartida teve-se bom torque devido à redução em função do passo do fuso e ganho de precisão por esse mesmo motivo.

```

494
495 #define Cyclone_XY_Gear_Ratio 1 // Number of tooth (motor/rod)
496 #define Cyclone_Z_Gear_Ratio 1 // Number of tooth (motor/rod)
497 #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {3200.0/(Cyclone_XY_Gear_Ratio*1.75),
498                                     3200.0/(Cyclone_XY_Gear_Ratio*1.75),
499                                     3200.0/(Cyclone_Z_Gear_Ratio*1.75),800}
500
501 #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {2, 2, 2, 1} // (mm/sec)

```

Figura 4.6: Parâmetros que alteram a velocidade de deslocamento nos eixos coordenados.

Foi observado que a velocidade de 1 mm/s a resposta foi muito lenta, enquanto a velocidade de 3 mm/s ocasionaria alta perda de torque, provocando assim a perda indesejada de passos do motor. Como o sistema não possuía malha fechada para detecção deste fenômeno, no momento da fresagem poderia ocorrer diversos erros indesejáveis, como movimentos fora do sincronismo, perda da peça e da ferramenta, etc. Por isso optou-se pela velocidade de 2 mm/s em cada eixo, por ser um valor razoável e por estar dentro de uma boa faixa de torque.

4.5 Testes efetuados

Alguns testes foram realizados em MDF, dos quais se percebeu bom torque, boa estabilidade durante a fresagem, ótimo acabamento, ao passo que não foi observado nenhum índice significativo de vibrações. Este último é um fator extremamente indesejado em processos de usinagem. As vibrações provocam, por sua vez, acabamento ruim, perda de padrão, de peças e ferramentas, o que provoca alto índice de ruídos além de aspectos de acabamento não profissionais.

A seguir na TAB. 4.1, são apresentados os valores dos itens que foram gastos na fabricação da fresadora.

Tabela 4.1: Preço dos suprimentos gastos na fabricação da fresadora.

ITENS	QUANTIDADE	VALOR R\$ (BRASIL)	VALOR R\$ (CHINA)
Parafusos e porcas		R\$ 62,00	-
Pintura		R\$ 60,00	-
Ferragens (guias, chapas, etc.)		R\$ 556,11	-
Rolamento Linear 20 mm*	04	R\$ 80,00	R\$ 89,27 12und.
Arduino Mega*	01	R\$ 75,90	R\$ 24,84 und.
Driver A4988*	05	R\$ 49,90	R\$ 24,50 10 und.
Fonte chaveada 12VCC*	01	R\$ 34,67	-
Rolamento Linear 16 mm*	08	R\$ 96,89	R\$ 64,61 12 und.

Fresa de Gravação 45° x 0,1 mm*	03	R\$ 53,50	R\$ 29,84 10 und
Retífica manual*	01	R\$ 321,30	-
Barra de rosca 12 mm	02	R\$ 16,00	-
Rolamento de esfera 6001	03	R\$ 24,00	-
Motor de passo	03	R\$ 150,00	-
Tampo de MDF	01	R\$ 15,00	-
Fiação		R\$ 25,00	-
Brocas de 1 mm e fresas 2,25 mm*	10	R\$ 30,00	R\$ 25,35 10 und.
Fim de curso	03	R\$ 30,00	R\$ 5,38 4 und.
	TOTAL	R\$ 1687,27**	

*No valor do item, está embutido o valor do frete. Estes produtos foram entregues pelos Correios, via PAC.

** Custo dos materiais por unidade. Serviço de usinagem, montagem e pintura não contabilizado. Estes serviços foram realizados pelo autor do projeto.

4.5.1 COMPARATIVO COM O MERCADO

As características técnicas da fresadora desenvolvida neste Trabalho de Conclusão de Curso são:

- Área útil de trabalho: 500 mm x 380 mm x 200 mm;
- Tensão de trabalho: Bivolt 127 V~ e 220 V~;
- Velocidade de deslocamento: 2 mm/s
- Motores de passo: NEMA 23 de 5,5 Kgf.cm;
- Firmware: Marlin;
- Eixo árvore: Retífica manual Makita 400 W;

A FIG. 4.7 mostra as características da Router Fresadora CNC Mini 400 mm x 390 mm x 60 mm.



Figura 4.7: Router Fresadora CNC Mini 400 mm x 390 mm x 60 mm.

Fonte: http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-876960222-router-fresadora-cnc-mini-400x-390mm-lancamento-_JM

Dados técnicos:

- Área útil de operação: 400 mm x 390 mm x 60 mm;
- Placa driver com micro passo;
- Gabinete placa controladora;
- Fonte: 12 VCC;
- Cabos para ligação;
- Sistema de tração via correia dentada;
- Motores de 6 kgf com sistema que permite aumentar 3 X sua força via polias;
- Peso: em média 35 Kg;
- Dimensões: comp: 0,85m; Alt: 0,85 m; Larg: 0,65 m;
- 12 Pillow BlocKs com rolamentos lineares;
- Eixo retificado X e Y com 16 mm;
- Suporte lateral de 6mm;
- Valor: R\$ 4950,00.

Os detalhes técnicos da fresadora Router CNC Baby 500 mm x 500 mm podem ser visualizados na FIG. 4.8.



Figura 4.8: Router CNC Baby 500 mm x 500 mm.

Fonte: http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-704559866-router-cnc-baby-500x500mm-frete-gratis-_JM

Dados técnicos:

- Área útil de operação: 400 mm x 390 mm x 60 mm;
- Placa driver com micro passo;
- Gabinete placa controladora;
- Fonte: 12 VCC;
- Cabos para ligação;
- Sistema de tração via correia dentada;
- Motores de 6 kgf com sistema que permite aumentar 3 X sua força via polias
- Peso: em média 35 Kg
- Dimensões: comp: 0,85m; Alt: 0,85 m; Larg: 0,65 m;
- 12 Pillow BlocKs com rolamentos lineares;
- Eixo retificado X e Y com 16 mm;
- Suporte lateral de 6mm;
- Valor: R\$ 6840,00.

A FIG. 4.9 detalha as características da fresadora Router CNC Hobby.

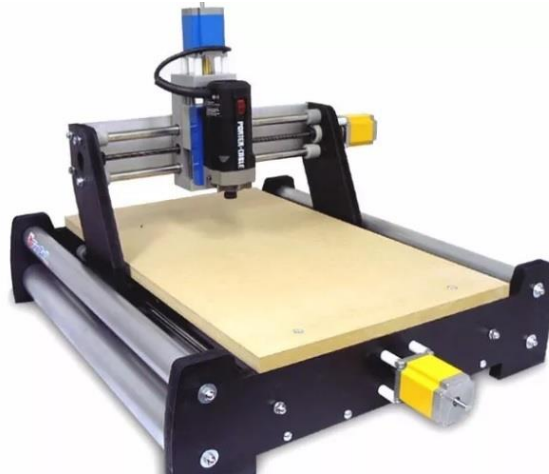


Figura 4.9: Router CNC Hobby

Fonte: http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-779476185-router-cnc-hobby-_JM

Dados técnicos:

- CNC para trabalhos leves, hobby entre outros.
- Largura de corte aproximados: 304 mm;
- Comprimento de aproximados: 457 mm;
- Altura de corte aproximado: 76 mm.
- Valor R\$ 12 000,00

5 CONCLUSÕES

Para este Trabalho de Conclusão de Curso, foi proposto a construção de uma fresadora CNC didática de baixo custo. Analisando-se os custos para a construção de um único protótipo, e fazendo um comparativo com máquinas de porte equivalente, é notável a diferença das cifras em questão. Vale ressaltar que, em protótipos em desenvolvimento, os custos são bem mais elevados do que em projetos que se encontram em produção seriada. Um dos fatores que inviabilizou menor custeio que o obtido neste projeto, foi o fato de não se ter uma cadeia de suprimentos fundamentada, em que itens foram adquiridos em sua maioria pela Web (Mercado Livre principalmente), o que acabou onerando mais os componentes por conta do frete cobrado pelos Correios.

Uma das propostas deste projeto foi o minimizar o máximo de erros durante a construção, montagem e testes do protótipo, o que foi alcançado com êxito, pois pouquíssimos erros ocorreram durante estas fases de fato. O mais significativo dos erros cometidos ocorreu na concepção dos mancais dos rolamentos lineares do eixo coordenado Y. Este foi projetado e construído em duas peças separadas e no momento da montagem foram unidos por parafusos. Os alinhamentos de concentricidade necessários não foram alcançados, sendo o deslocamento no eixo Y, drasticamente afetado. Como correção, foi criado um novo modelo de mancal em peça única, possibilitando o alojamento dos dois rolamentos lineares simultaneamente, melhorando as condições de concentricidade entre eles e produzindo um deslocamento ideal, sendo necessário agora um mínimo de esforço. Os outros problemas durante a construção e montagem foram contornados sem maiores problemas. O processo de pintura ocorreu sem adversidades. Os cuidados que foram tomados durante a confecção das peças, respeitando o projeto e as tolerâncias, proporcionaram uma montagem simples e tranquila.

Na montagem da parte elétrica também não houve contratemplos, apenas alguns cuidados foram tomados nas ligações dos componentes elétricos à *Shield Ramps 1.4*, foram seguidas as configurações dos pinos e as recomendações do fabricante.

A retífica manual Makita GD 0600 de 400W teve um bom comportamento, em testes em MDF, executou fresagens com profundidade de corte muito acima do que foi, de fato, é requerido em PCI. Com certeza foi uma escolha acertada, podendo a fresadora trabalhar com outros tipos de materiais, visto que, há uma demanda crescente de mini routers para usinagem de MDF, policarbonato, PVC, etc.

O *Firmware* Marlin, instalado no Arduino Mega 2560, funcionou perfeitamente, sendo necessário apenas as configurações particulares a máquina, ajustes estes citados em

Resultados e Discussões. A dificuldade em fazer os reparos necessários se deu pela extensão do código. Este, por sua vez, encontra-se todo comentado, o que torna a tarefa de configuração um pouco mais fácil.

O *Software* utilizado CNC GCODE CONTROLLER 6.1, não correspondeu às expectativas. Mostrou-se um software com sérios problemas de comunicação e grande instabilidade. Seu processamento de imagem para geração do G-Code é muito limitado, pois tem como base a criação de código máquina apenas levando e conta o brilho da imagem tratada. Isso leva a execução de fresagens pouco precisas e pouco confiáveis. Outra deficiência do software é a deficiência na otimização do G-Code, isso faz com que trabalhos mais simples demandem muito mais tempo que um gerador de G-Code com boa otimização faria em um curto espaço de tempo.

No geral, foi muito engrandecedor a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Foram exigidos conhecimentos de diversas áreas da engenharia. Em nenhum momento este projeto foi desanimador, pelo contrário, os desafios aqui abordados serviram para consolidação do conhecimento e do aprendizado durante o curso. Outro fato importante foi a descoberta e constatação de uma área fascinante, área esta da usinagem que sempre estive imerso. O fato de ter sido por um longo período operador de máquinas operatrizes (torno mecânico, fresadora vertical entre outras), com certeza foi um facilitador de todo este processo.

5.1 Sugestões

Algumas melhorias devem ser feitas, alguns pontos neste protótipo ainda não foram abordados, a segurança por exemplo. Equipamentos de proteção deverão ser instalados, assim como proteções de partes rotativas. O software deverá ser substituído também, as constantes falhas na comunicação apresentam uma alta probabilidade de incidentes e possíveis acidentes. A estrutura permite a instalação de um quarto eixo, o que possibilitaria a execução de usinagem mais complexas. A substituição dos atuais fusos por fusos de esferas recirculantes com os devidos cuidados em sua instalação, também agregaria alto valor ao produto, confiabilidade na precisão e melhor funcionamento.

A fiação não ficou com acabamento final, devido ao tempo escasso para os testes. Os fios devem ser reposicionados e um novo padrão de conectores utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVARES, A. J. **Uma Metodologia Para Integração CAD/CAPP/CAM Voltada Para Manufatura Remota De Peças Rotacionais Baseada Na Internet.** 2005. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal De Santa Catarina Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica – Florianópolis – SC. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102366/221833.pdf?sequence=1>> Acesso em: 30 Jun. de 2017.
- ALVES, C. C. **Técnico em mecânica. Tecnologia de fabricação. III fresagem.** Disponível em: <[Http://claudemiralves.weebly.com/uploads/3/8/6/2/3862918/apostila_de_fresagem.pdf](http://claudemiralves.weebly.com/uploads/3/8/6/2/3862918/apostila_de_fresagem.pdf)> Acesso em: 20 Jan. de 2017.
- ANDRADE, T. A. **Um Estudo dos Firmwares Utilizados em Sistemas Embarcados.** Curso Técnico em Informática – IFBA Campus Barreiras. Disponível em: <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/62ra/arquivos/jovem/THA%C3%8DSA%20ALVES%20ANDRADE.pdf>> Acesso em 28 jun. de 2017
- A.T.I. **Artigos técnicos industriais.** Disponível em: <<http://atibrasil.com.br/wp-content/uploads/2016/08/fuso-de-rosca-trapezoidal-004.pdf>> Acesso em: 29 jun. 2017.
- BARROS, V. R. **Fresamento de madeiras de média densidade MDF.** 2013. Dissertação de (Graduação) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Campus Experimental de Itapeva, Itapeva – SP. 2013. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/118228/000789531.pdf?sequence=1>> Acesso em: 29 jun. 2017.
- BIOMECCANICA. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM245/Prof.%20Walter%20A.%20Kapp/20161109/fuso-de-rosca-trapezoidal-004.pdf>> Acesso em: 16 jun. 2017.
- BLOG DE ESTATÍSTICA DO PROF. ALEXANDRE. Disponível em: <<http://alexandreprofessor.blogspot.com.br/p/probabilidade-e-distribuicoes-de.html>> Acesso em: 29 jun. 2017.
- CAMPANHA, M. V. **Estudo sobre a vida útil de rolamentos fixos de uma carreira de esferas.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo SP. 2008. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-31032008-180633/publico/Texto_Marcos_Campanha_rev.PDF> Acesso em: 29 jun. 2017.
- CAPELLI, B.M. **Desenvolvimento de uma estufa controlada e monitorada remotamente.** 2014. Dissertação (Graduação) – Universidade de São Paulo “Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia elétrica. São Carlos – SP. 2014. Disponível em:<<https://www.google.com.br/search?q=arduino+tcc+pdf&oq=arduino+tcc+pdf&aqs=chrome..69i57.16612j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8#>> Acesso em: 29 jun. 2017.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 5. ed. Makron Books: São Paulo, 1987.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas.** São Paulo: AMB, 2008.

COLLINS, J. A. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção de Falha**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CONDIT, R. e JONES, D. W. **Stepping Motors Fundamentals, Microchip Application Note**, 2004. <<http://www.t-es-t.hu/download/microchip/an907a.pdf>>. Acesso em: 20 nov. de 2016.

CRISTO, E. F. **Implementações e Técnicas de controle de motor de passo em aplicações CNC**, Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

DEUS, P. R. de. **Análise Do Processo De Fresamento De Mdf Em Centro De Usinagem Cnc**. 2015. Dissertação (Graduação) - UNESP Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Guaratinguetá – SP. 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/123323/000825556.pdf?sequence=1>> Acesso em: 01 jul. 2017.

EMBARCADOS. **Arduino MEGA 2560**. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>> Acesso em: 20 nov. de 2016.

FAÍSCAS ELETROSTÁTICA E ALTA TENSÃO. Fontes chaveadas. Disponível em: <<http://www.faiscas.com.br/Fontes%20chaveadas.pdf>>. Acesso em: 29 Jun. 2017.

FELISBERTO, L. C.; RUFFINO, R. T. **Contribuição para o estudo de uma fresadora cnc de pequeno porte com cabeçote universal reversível do tipo p. Hure**. 1994. [s.n.], São Carlos, 1994.

GUIA DO AÇO ARCELORMITTAL. Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>> Acesso em: 11 maio 2017.

GONÇALVES, Jr; ALBERTAZZI, Armando. **Metrologia: Parte 1**: apostila para os curso de metrologia da UFSC, LABMETRO. Cidade: Editora, data. Disponível em: http://www.labmetro.ufsc.br/Disciplinas/EMC5222/metrologia_1.pdf. Acesso em: 20 out. 2016.

HEUCHMER, B. **Towrd a Truly Open Manufacturing Enviroment**. v. 72. Modern Machine Shop. Cincinnati. 2000.

HARRIS, T.A. **Friction and wear of rolling-elements bearings**. In: ASM Handbook, 18: Friction, Lubrification, and waer technology. Ohio, 1992. v.18. p. 499-514

HOBBY CNC BRASIL. Disponível em: <<http://www.hobbycnc.com.br/site/index.php?aid=51>> Acesso em: 29 jun. 2017.

HISION. Disponível em:<<http://www.hisioncnc.com/pt/cnc-machines/products-275.html>> Acesso em: 18 jun. 2017.

INMETRO. **Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Metrologia Científica**. Disponível em:<<http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/>> Acesso em: 29 jun. 2017.

JOSHI, P. H.; **Machine tools handbook – design and operation**. McGraw-Hill, New Delhi, 2007

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamento do Projeto de Componentes de Máquinas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LARSEN-BASSE, J. **Basic theory of solid friction**. In: **ASM Handbook, 18: Friction, Lubrification, and wear technology**. Ohio, 1992. v. 18. p. 27-38.

LYRA, P. V. A. **Desenvolvimento de uma máquina fresadora CNC didática**. 2010. Dissertação (Graduação) – Universidade de Brasília, Brasília 2010. Disponível em: <<http://alvarestech.com/temp/cnc/Fresadora%20CNC%20Did%20tica.pdf>> Acesso em: 29 jun. 2017.

MACHADO, A. **Comando Numérico Aplicado às Máquinas Ferramentas**. Cone editora. 1986.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009. OBR EIXOS E ROLAMENTOS LINEARES. Disponível em: <http://www.obr.com.br/catalogos/OBR_rolamentos.pdf> Acesso em: 29 jun. 2017.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MÁQUINAS ELÉTRICAS I. Disponível em: <<http://maquinaseletricas.blogspot.com.br/2013/03/aula-51-motor-de-passo.html>> Acesso em: 29 jun. 2017.

MECATRONICANET. **Motor de passo**. Disponível em: <http://mecatronicanet.blogspot.com.br/2012/08/tutorial-motor-de-passo-parte-1_28.html> Acesso em: 29 jun. 2017.

NSK. **Produtos de precisão**. Disponível em: <<http://www.nsk.com.br/upload/file/B02.pdf>> Acesso em: 15 jun. 2017.

PARADISETRONIC. Disponível em: <<https://paradisetronic.com/en/3d-printer/ramps-1-4-kit-shield-mega-2560-5x-a4988-12864-lcd-reprap-3d-printer>> Acesso em: 01 jul. 2017.

PAZOS, F. **Automação de Sistemas e Robótica**. Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil, 2002.

PROTOPTIMUS. **Máquinas CNC: história comando numérico computadorizado**. Disponível em: <<http://www.protoprimus.com.br/maquinas-cnc-historia-comando-numerico-computadorizado>> Acesso em: 08 maio 2017.

SÉRGIO, R. **A Fresadora**. Rio de Janeiro: Delmar Publisher, 1967.

SILVA, J. Humberto Dias. **Curso de Licenciatura em Física. Lab. de Eletromagnetismo**, Unesp-Bauru, 2006. Disponível em: http://www.fc.unesp.br/~jhdsilva/Precisao_e_Terminologia_de_Medicoes.pdf.

SIMON, A. T. **Condições De Utilização Da Tecnologia CNC: Um Estudo Para Máquinas Ferramentas De Usinagem Na Indústria Brasileira**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica. 2001. Acesso em: <<http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/264371/1/Simon%2c%20Alexandre%20Tadeu.pdf>> Acesso em: 01 jun. 2017.

SKF. Rolamentos rígidos de uma carreira de esferas. Disponível em: <<http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings/index.html>> Acesso em: 11 jun. 2017.

SKF. Rolamentos rígidos de uma carreira de esferas. Disponível em: <<http://www.skf.com/br/products/linear-motion/linear-guides-and-tables/linear-ball-bearings/linear-ball-bearing-lbbr/index.html>> Acesso em: 11 jun. 2017.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. Disponível em: <<http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/metais-e-artefatos/rosa-do-brasil/produtos/acessorios/fuso-de-esfera-recirculante>> Acesso em: 29 jun. 2017.

STEPSTICK A4988 STEPPER DRIVER MODULE. Disponível em: <<https://www.geeetech.com/stepstick-a4988-stepper-driver-module-p-577.html>> Acesso em: 29 jun. 2017.

TALLMADGE, P. Today's "Low End" Machine Offer High-End Value. v. 70. Modern Machine Shop. Cincinnati. 1989.

TEKKNO MECATRÔNICA. Disponível em: <<https://www.tekkno.com.br/produto/3885/EIXO-LINEAR-RETIFICADO---POLIDO---CROMADO-16H7>> Acesso em: 29 jun. 2017.

THOMSEN. Precisão, Exatidão, e a Terminologia das Medições. Precision and the terminology of measure.

USIMAR USINAGEM: Disponível em: <<http://usimarusinagem.com/tabelas/Tabelas%20para%20ajustes%20de%20Eixos%20e%20Furos.pdf>> Acesso em: 29 jun. 2017.

USINAINFO. Impressora 3D e CNC. Disponível em: <<http://www.usinainfo.com.br/impressora-3d-e-cnc/ramps-14-reprap-shield-arduino-para-impressora-3d-4501.html>> Acesso em: 01 jul. 2017.

VETOR CNC. Notícias. Disponível em: <<http://www.vetorcnc.com/fresadora-historia-51>>. Acesso em: 10 jan. 2017

VIM 2008. Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008). Rio de Janeiro: INMETRO, 2009. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/VIM_2310.pdf> Acesso em: 20 nov. de 2016.

VIM 2012. Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e termos associados (VIM 2012). Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 20 nov. de 2016.

Wang, H.P. e Li, J.K., **Computer-Aided Process Planning, Advances in Industrial Engineering, Vol. 13,** Elsevier, 1991.