

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS**

Escola de Engenharia

Engenharia Elétrica

**LUCAS RODRIGUES**

**RÔMULO DELMONDES**

**CNC INTERCAMBIÁVEL APLICADA A CONFECÇÃO DE PLACAS DE  
CIRCUITO IMPRESSO**

**GOIÂNIA**

**2016**

**LUCAS RODRIGUES  
RÔMULO DELMONDES**

**CNC INTERCAMBIÁVEL APLICADA A CONFECÇÃO DE PLACAS DE  
CIRCUITO IMPRESSO**

Trabalho de conclusão de curso  
como parte dos requisitos para  
obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Elétrica apresentado à  
Pontifícia Universidade Católica de  
Goiás.

Orientador: Prof. M.E.E. Marcelo Antônio Adad de Araújo.

**GOIÂNIA  
2016**

**LUCAS RODRIGUES  
RÔMULO DELMONDES**

**CNC INTERCAMBIÁVEL APLICADA A CONFEÇÃO DE PLACAS DE  
CIRCUITO IMPRESSO**

Trabalho de conclusão de curso  
como parte dos requisitos para  
obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Elétrica apresentado à  
Pontifícia Universidade Católica de  
Goiás.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Marcelo Antônio Adad de Araújo, MEE  
Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC (orientador)

---

Prof. Carlos Alberto Vasconcelos Bezerra, MEE  
Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC

---

Prof. Charles dos Santos Costa, MEE  
Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC

## **DEDICATÓRIA**

Dedicamos esse trabalho a todos os familiares que nos apoiaram e nos deram forças para vencer.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a Deus, ao nosso orientador e em especial aos familiares de todos os integrantes do trabalho, onde esposas, pais, mães, irmãos, tiveram paciência nas horas em que mais precisamos.

*“Existem dois jeitos de viver: acomodar-se ou ousar. Quando lutamos por ideias nas quais acreditamos nasce daí um sentimento de dignidade de ser alguém que faz a diferença”.*

*(Roberto Shinyashiki)*

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento de uma máquina-ferramenta de pequeno porte, tipo CNC (Comando Numérico Computadorizado), para prototipagem de placas de circuito impresso, cujo objetivo é auxiliar estudantes, técnicos e entusiastas do ramo, nas tarefas de confecção de circuitos eletrônicos, automatizando as etapas de isolamento de trilhas e furação de placas, as quais são realizadas normalmente de forma manual. O sistema a ser desenvolvido consiste em uma plataforma composta por: sistema mecânico, uma máquina com funções de fresagem e furação micro controlada, módulos de hardware e softwares adequados as funcionalidades exigidas. O equipamento que será desenvolvido possuirá um sistema mecânico de movimentação em três dimensões (X, Y e Z) capaz de deslocar a fresa conforme a posição comandada pelo software embarcado e realizar a usinagem da placa. O movimento será executado através de sequência de comandos gerados a partir de arquivo no formato G-Code, sendo este uma tradução para a máquina CNC, a partir da interpretação do *layout* definido pelo usuário através da plataforma de interação apropriada. Esta plataforma gráfica servirá como uma interface de comando homem-máquina para plena operação do equipamento e consequente prototipagem de placas.

**Palavras-chave:** fresadora, Placa de Circuito Impresso (PCI), Comando Numérico Computadorizado (CNC), prototipagem e modelagem.

## ABSTRACT

This course completion work presents the development of a small CNC-type machine tool for prototyping of printed circuit boards, whose purpose is to assist students, technicians and enthusiasts of the field, in the tasks of making electronic circuits, automating the steps of tracks' insulation and the plates' drilling, which are usually carried out manually. The system to be developed consists of a platform composed by: mechanical system, a machine with milling functions and micro controlled drilling, hardware modules and appropriate software to the required functionalities. The equipment that will be developed it will have a mechanical system of movement in three dimensions (X, Y and Z) able to move the cutter according to the position commanded by the embedded software and to accomplish the plate machining. The movement will be executed through a commands sequence generated from a G-Code file, this being a translation for the CNC machine (Computational Numerical Command), from the interpretation of the user-defined layout through the appropriate interaction platform. This graphical platform will serve as a man-machine control interface for full equipment operation and consequent plate prototyping.

**Keywords:** milling machine, Printed Circuit Board (PCI), Computerized Numerical Control (CNC), prototyping and modeling.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rádio com a primeira placa de circuito impresso .....	28
Figura 2 - Primeiros circuitos impressos.....	29
Figura 3 - PCI com 5 camadas .....	29
Figura 4 - PCI Through-hole.....	30
Figura 5 - PCI Circuito impresso .....	30
Figura 6 – Placa de circuito impresso em fenolite .....	32
Figura 7 - Placa de circuito impresso de fibra de vidro.....	32
Figura 8 - PCI com 16 <i>layers</i> .....	34
Figura 9 - Esquema de construção de MCPCI .....	35
Figura 10 - Vista em corte da placa.....	37
Figura 11 – Fuso de esferas com gaiola .....	46
Figura 12 – Fuso de esferas retificado .....	46
Figura 13 – Fuso de esferas retificado .....	47
Figura 14 – Fuso de esferas laminado .....	47
Figura 15 – Corte fuso de esferas laminado.....	48
Figura 16 – Eficiência mecânica dos Fusos de Esferas .....	49
Figura 17 - Acoplamento flexível motor de passo .....	51
Figura 18 - Motor de Passo Híbrido Utilizado no Trabalho.....	62
Figura 19 - Motor de Passo Híbrido .....	63
Figura 20 – Funcionamento do motor de passo híbrido .....	64
Figura 21 - Motor de passo híbrido unipolar.....	65
Figura 22 - Motor de passo híbrido bipolar.....	65
Figura 23 - Motor <i>spindle</i> (tupia) Makita .....	66
Figura 24 - Fonte chaveada – diagrama de blocos .....	67
Figura 25 - Fonte chaveada – diagrama de blocos .....	68
Figura 26 – Placa Arduino UNO .....	69
Figura 27 – Placa Arduino UNO – principais partes .....	70
Figura 28 – Placa Shield CNC.....	71
Figura 29 – Drive A4988.....	72
Figura 30 – Máquina-ferramenta proposta .....	75
Figura 31 – Estrutura da mesa .....	76

Figura 32 – Mecanismo de movimentação do eixo Y .....	77
Figura 33 – Mecanismo de movimentação do eixo X .....	78
Figura 34 – Mecanismo de movimentação do eixo Z .....	80
Figura 35 – Shield CNC – replicação do eixo Y .....	82
Figura 36 – Shield CNC – Drives de controle dos eixos.....	82
Figura 37 – Placa Arduino UNO – conexões.....	83
Figura 38 – Configuração da placa .....	85
Figura 39 – Biblioteca GRBL upload .....	85
Figura 40 – Universal G-Code Sender .....	88
Figura 41 – Universal G-Code Sender – controle manual.....	88
Figura 42 – bCNC sondagem de nível .....	91
Figura 43 – bCNC Sondagem de Nível .....	93
Figura 44 – Deslocamento do Eixo Z .....	94
Figura 45 – Deslocamento do Eixo Z .....	94
Figura 46 – Layout do Circuito PISCA Led no bCNC .....	96

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Características das chapas tipo FR-4, disponíveis para PCI.....	36
Tabela 2: Principais comandos Código G para controle da CNC.....	57
Tabela 3: Lista de materiais mesa de trabalho.....	76
Tabela 4: Lista de materiais eixo Y .....	77
Tabela 5: Lista de materiais eixo X .....	79
Tabela 6: Lista de materiais eixo Z.....	80
Tabela 7: Lista de parâmetros GRBL .....	84
Tabela 8: Códigos G .....	89
Tabela 9 – Resultados obtidos no processo de fresagem sem autonivelamento .....	97

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

PCI	Placa de circuito impresso
CN	Controle numérico
CNC	Controle numérico computadorizado
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
RP	Prototipagem rápida
AMT	Tecnologias avançadas de manufatura
JIT	<i>Just-in-time</i>
TQC	Qualidade total
PCP	Planejamento e controle de produção
FMC	<i>Flexible Manufacturing Cell</i>
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
EIA	<i>Electronic Industries Association</i>
APT	<i>Automatically Programmed Tools</i>
FV	Fibra de vidro
PTFE	Politetrafluoroetileno
MCPCI	Metal Clad Printed Circuit Board
LED	Diodo emissor de luz
RF	Rádio frequência
EAGLE	Easy Applicable Graphical Layout Editor
ULP	User Language Program
CLP	Controle Lógico Programável
DNC	Cletores de dados
MID	Material Data Input
APT	Automatically Programmed Tool
WOP	Wertattsortierte Programmierung
3D	Três dimensões

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.1	Software.....	18
1.1.2	Hardware .....	18
1.2	Consideração final .....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	20
2.1	Considerações iniciais .....	20
2.2	Placas de Circuito Impresso .....	20
2.3	Processo de Prototipagem.....	21
2.4	Tecnologias Avançadas de Manufatura.....	23
2.4.1	Contextualização das AMTs .....	23
2.5	Tecnologia CNC .....	24
2.5.1	Breve histórico – Fresadora CNC .....	24
2.5.2	Breve histórico – Placa de Circuito Impresso .....	27
2.5.3	Composição das Placas .....	31
2.5.4	Constituição das PCIs.....	33
2.5.5	Principais Processos de Fabricação das PCIs .....	36
2.5.6	Normas Nacionais.....	41
2.6	Considerações finais.....	41
3	FERRAMENTA CNC .....	42
3.1	Considerações iniciais .....	42
3.2	Centro de Usinagem.....	42
3.3	Furação.....	42
3.4	Fresamento.....	43

3.4.1	Fresamento Periférico.....	43
3.4.2	Fresamento Frontal.....	43
3.5	Fusos.....	45
3.5	Acoplamento dos Fusos e Guias.....	49
3.6	Mesa de Trabalho.....	50
3.7	Acoplamentos dos motores.....	50
3.8	Softwares.....	51
3.8.1	SolidWorks.....	52
3.8.2	Software CAD - EAGLE.....	52
3.8.3	Código “G”.....	53
3.8.4	Universal G-Code Sender.....	58
3.8.5	CAM.....	58
3.8.6	Firmware GRBL.....	61
3.9	Componentes.....	61
3.9.1	Motores de passo.....	61
3.9.2	Motor Spindle (Tupia).....	65
3.10	Sensores Fim de Curso.....	66
3.11	Fonte de alimentação.....	66
3.12	Placa de Potência.....	68
3.12.1	Arduino.....	68
3.12.2	Shield Arduino para CNC.....	70
3.12.3	Drives dos motores de passo A4988.....	72
3.13	Considerações finais.....	73
4	RESULTADOS.....	74
4.1	Considerações iniciais.....	74
4.2	Projeto da máquina-ferramenta.....	74

4.3	Montagem mecânica.....	75
4.4	Montagem elétrica .....	81
4.5	Software.....	83
4.6	Considerações finais.....	86
5	TESTES.....	87
5.1	Considerações iniciais .....	87
5.2	Testes realizados.....	87
5.3	Considerações finais.....	97
6	CONCLUSÃO .....	98
7	TRABALHOS FUTUROS.....	99
8	REFERÊNCIAS .....	100
	APÊNDICE A – Estrutura Mecânica.....	109
	APÊNDICE B – Equipamentos Elétricos .....	114
	ANEXO A – Fichas Técnicas.....	119
	ANEXO B – Fotos das Peças.....	121
	ANEXO C – Custos da CNC .....	128

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma máquina CNC voltada para prototipagem de placas de circuito impresso (PCI). Trata-se da automatização do processo de confecção destas placas em relação aos métodos manuais existentes, os quais não são totalmente confiáveis, devido alta probabilidade de erros e interferências, caros quando se busca qualidade, ou fora dos padrões, quando considerados os trabalhos artesanais e domésticos, que apresentam limitações ou resultados duvidosos.

O termo circuito impresso refere-se às trilhas, conhecidas como *layout*, que fica estampada na placa de face metalizada colocada sobre um material isolante rígido, geralmente fibra de vidro ou fenolite, substituindo a fiação na interligação dos componentes eletrônicos por trilhas devidamente dimensionadas. O *layout* ou desenho do circuito é feito pelo projetista através de aplicativos específicos, cita-se alguns como Eagle, Tango, Protheus, etc.

A fabricação de PCIs requer inicialmente um planejamento, onde o esquemático do circuito eletrônico deve passar por uma prévia elaboração, aonde são realizados simulações e testes do funcionamento do circuito. A partir do esquemático se inicia o desenho que será impresso na placa, ou *layout*. Nesta etapa, define-se a posição dos componentes para, então, desenhar as interligações do circuito através de trilhas e ilhas de soldagem (PERCHÉ, 2013).

Atualmente a confecção das placas de circuito impresso em ambientes acadêmicos e por entusiastas da área, para criação de protótipos é realizada de modo manual, utilizando tinta permanente e um processo de corrosão por percloroeto de ferro. Independentemente do método de concepção do desenho, todos demandam etapas padrões em sua elaboração, são elas:

- Corte da placa no tamanho específico;
- Limpeza da placa;
- Traço das trilhas;
- Corrosão;
- Furação;
- Limpeza final.



Nas etapas expostas, algumas desvantagens podem ser pontuadas: como falhas na etapa de corrosão da superfície do cobre, ocasionando em problemas no funcionamento do circuito, relacionada ao fato do processo químico realizado com percloroeto de ferro ser lento, perigoso e frequentemente a retirada do cobre acontece de forma irregular em pontos aleatórios da placa, comprometendo o desempenho do circuito eletrônico (PERCHÉ, 2013). Além disso, deve-se ter um cuidado na forma como é feito o descarte do sal percloroeto de ferro, pois trata-se de um produto químico que pode gerar danos ambientais (CASQUÍMICA, 2011).

Dentro do processo de fabricação de PCIs, a perfuração pode ser considerada uma tarefa custosa de ser realizada. Dependendo do número de furos ou o número de placas a serem feitas, este trabalho pode ser cansativo e demorado (JUNIOR; TOSTES, 2013).

Uma alternativa para facilitar a confecção de PCIs e evitar alguns dos inconvenientes já expostos é a utilização de máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado). Este tipo de equipamento permite automatizar uma ou mais etapas de fabricação como corte, isolamento do circuito e perfuração (CAVALCANTI, 2002). Este método tem como objetivo a remoção do cobre com uma fresa mecânica para isolar as trilhas eletricamente do restante do cobre da placa. Algumas máquinas deste tipo, as quais apresentam maior aprimoramento viabilizam ainda a soldagem de componentes SMD (*Service Mounting Device*).

As CNC's em sua maioria são utilizadas para desbastar e cortar materiais metálicos (como aço, alumínio, cobre, latão) ou outros tipos de materiais (madeira, plástico, entre outros). Este processo é denominado usinagem. Devido às características de operação, materiais, precisão, repetibilidade e rapidez, esta máquina aplicada a confecção de placas de circuito impresso, possui custo de aquisição mais elevado que as demais.

O presente trabalho busca viabilizar o desenvolvimento de uma CNC para confecção de placas de circuito impresso. O projeto mecânico será baseado em uma estrutura composta por perfis de alumínio, fusos dispostos nos três eixos (X, Y e Z), a movimentação do conjunto será realizada por motores de passo, controlados por um micro controlador que receberá o devido código traduzido para a linguagem da máquina.

Equipamentos semelhantes já foram desenvolvidos em vários ambientes acadêmicos devido à dificuldade percebida ao longo do curso quando da necessidade de confecção de placas de circuito impresso para realização de trabalhos acadêmicos. Outro fator importante vem do caráter multidisciplinar, ao qual este trabalho está relacionado, aplicando conhecimentos das disciplinas de Controle, Micro processados, Máquinas Elétricas, Instrumentação, Eletrônica, Mecânica, Ciência e Tecnologia dos Materiais Elétricos, entre outras. Fez desta uma oportunidade de desenvolver e aprimorar a capacidade de aplicar vários conceitos em um único equipamento, resumindo tudo em uma única solução

## **1.1 Objetivo geral**

Pesquisar e desenvolver as ferramentas de hardware e software em atendimento ao sistema proposto:

### **1.1.1 Software**

- Implementar rotinas de tratamento de formato de arquivos padrões para manufatura de circuitos impressos, exemplo: Gerber;
- Implementar *firmware* com funções de posicionamentos dos eixos, acionamentos dos motores de passo, leitura dos sensores ópticos e acionamento da micro retífica.

### **1.1.2 Hardware**

- Desenvolver a estrutura mecânica do sistema;
- Desenvolver circuito micro controlado, circuito de acionamentos dos motores, circuitos dos sensores e circuito de acionamento da micro retífica;
- Desenvolver demais circuitos para integração dos módulos principais.

## **1.2 Consideração final**

O próximo capítulo detalhará os objetos de trabalho deste projeto para melhor entendimento do sistema proposto.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Considerações iniciais**

O presente capítulo apresenta o estado da arte das placas de circuito impresso.

Para desenvolver este projeto se faz necessário o estudo de vários assuntos, cada um possuindo diferentes soluções e características para atender as necessidades do projeto. Tais características devem ser ponderadas para se chegar a uma solução final. Os itens seguintes contextualizam as abordagens relacionadas ao processo de concepção de uma máquina-ferramenta CNC para confecção das placas de circuito impresso, além de outros conceitos e metodologias para o entendimento do processo.

### **2.2 Placas de Circuito Impresso**

Conhecidas como PCIs, as Placas de Circuito Impresso estão cada vez mais presentes em nosso dia-a-dia, devido a dependência da tecnologia. Tecnologias estas que se utilizam de PCI's para funcionar são, por exemplo: computadores, smartphones, carros, brinquedos entre outros.

Partindo desse princípio torna-se necessário uma atenção especial para seus métodos de fabricação.

Tendo como definição de circuito, segundo Dorf (2006, p. 01), circuito elétrico são um conjunto de componentes elétricos ligados entre si formando um percurso fechado através do qual passa a circular corrente elétrica.

Segundo uma publicação da Tecmundo (2016), circuito impresso é formado por camadas de materiais plásticos e fibrosos, como: fibra de vidro, fibra e filme poliéster e outros polímeros que com finas películas de substâncias metálicas, como: cobre, prata, ouro ou níquel forma trilhas por onde irá passar a corrente elétrica através de componentes.

Uma placa PCI geralmente possui o formato retangular, com trilhas altamente condutivas.

Para a criação do desenho, sendo este um passo inicial básico na criação de um PCI consiste, segundo Sousa (1998), na geração de uma máscara que representa

o padrão que se deseja imprimir a placa. Porém, atualmente existem métodos mais precisos para a criação de fotolitos com a ajuda de computadores e softwares específicos originando arquivos no formato CAD e CAM para, de forma mais precisa, furar e criar as trilhas por onde passa a corrente.

Segundo Tectudo (2016), o passo seguinte ao desenho é a perfuração. Pode-se, para a proteção da placa, adicionar uma fina folha de papel alumínio. Posteriormente retira-se o papel alumínio passando por uma limpeza e banhadas por uma substância química, seguindo para um banho de cobre.

Posterior ao passo do cobre aplica-se um filme fotorresistente para prevenir oxidações e curto-circuito. Seguido pelo mascaramento onde recebe uma película para determinar o traçado das trilhas. Finalizando com a remoção da película fotorresistente, seguido pela máscara de solda – um tipo de verniz – para proteção permanente dos traçados da PCI.

### **2.3 Processo de Prototipagem**

Segundo Gorni (2003), prototipagem designa um conjunto de tecnologias para fabricação de objetos a partir de dados gerados por computador – sistemas auxiliares como o CAD (*Computer Aided Desing*) – permitindo o ligamento de materiais, camada a camada até a formação do objeto desejado.

Conforme Factories (2016), a máquina lê os dados do desenho CAD, e vai colocando camadas sucessivas de líquido pulverizado assim construindo o modelo com uma série longa de seções transversais – Usa-se com frequência no procedimento o laser.

O processo de prototipagem também pode ser conhecido como impressão tridimensional ou produção de camadas. Tem como vantagem segundo Factories (2016), que os objetos podem ser formados mesmo quando complexos geometricamente, sem ter a necessidade de ajustes de máquinas ou montagem final, construindo assim objetos complexos com um processo de fácil manejo, direto e relativamente rápido.

Segundo Gorni (2003), os processos de prototipagem rápidos permitem um processo mais ágil e barato, economizando tempo e custo na construção de modelos – estima-se uma economia entre 70 a 90%.

Diferentes formas de tecnologias estão sendo aplicadas de forma comercial para a aplicação de prototipagem – nem sempre de forma direta – talvez por isso Gorni (2003), designa o método como fabricação sólida com forma livre, manufatura automatizada por computadores ou manufatura em camadas. Sendo que, um software transforma em comandos um modelo advindo do CAD em camadas. Este processo permite a moldagem de objetos muitas vezes complicada quando feitos por métodos comuns como, por exemplo: fresamento, furação ou torneamento.

Segundo Gorni (2003), atualmente os processos de prototipagem são constituídos por cinco etapas básicas:

- Criação de um modelo CAD;
- Conversão do arquivo CAD em formato STL;
- Fatiamento do arquivo STL em camadas;
- Construção física do modelo, e empilhamento das camadas;
- Acabamento do protótipo.

Segundo Factories (2016), os tipos comuns de processos de prototipagem rápida (RP), são:

- CNC usinagem;
- Modelagem por deposição fundida – FDM;
- Métodos de deposição de jato de tinta;
- Modelização de objeto Laminado – LOM;
- Tecnologia de formação laser-pó;
- Sintetização por laser seletivo – SLS;
- Impressão tridimensional (3DP), entre outros.

Dentre as características de RP uma de suas principais tecnologias está a de usinagem CNC (*Computer Numerical Control*), que segundo Factories (2016), são máquinas de usinagem rápida comandada por software CAM, e permite produzir protótipo e ferramentaria rápida. Controle numérico computadorizado (CNC), é um método de manufatura no qual uma máquina cortante – por exemplo, torno mecânico – controlado por computador corta uma forma específica, podendo no meio do processo mudar de ferramentas cortantes, tendo alta precisão e acabamento.

## **2.4 Tecnologias Avançadas de Manufatura**

O termo prototipagem rápida foi criado pela indústria com o objetivo de designar processos de criação de sistemas ou parte deles almejando representação de determinada peça antes da sua versão comercial. Ou seja, o propósito deste termo está na elaboração de um determinado artefato com agilidade, onde a partir da modelagem de um protótipo inicial, outros modelos poderão ser aperfeiçoados.

Com o passar do tempo e a integração e novas metodologias, a nomenclatura prototipagem rápida vem sendo considerada inadequada, além de não descrever alguns dos processos mais recentes deste tipo de tecnologia. Melhoras na qualidade de produção destas máquinas criaram uma correlação muito mais forte com o produto final. Em alguns casos, certas partes já são diretamente manufaturadas destas máquinas, o que faz com o termo “prototipagem” seja avaliado como incorreto. Uma outra restrição deste termo é que ele negligencia o princípio de construção das peças por essa tecnologia, a construção por adição de camadas.

As denominadas Tecnologias Avançadas de Manufatura, cuja abreviação AMT vem do termo em inglês, Advanced Manufacturing Technologies, são consideradas uma nova maneira de obter vantagens competitivas, pois impactam não somente os processos de manufatura, mas também as operações do negócio. Sua adoção potencializa as habilidades das empresas para gerenciar a manufatura e o volume de informações dispostas pelas novas tecnologias (DANGAYACH, 2006).

### **2.4.1 Contextualização das AMTs**

Células robotizadas, máquinas de comando numérico, sistemas integrados de controle e supervisão de processos, as AMTs representam uma variedade de sistemas computacionais, voltados para o melhoramento das operações de manufatura e, conseqüentemente, da competitividade da empresa.

Segundo Borges (2005), sua conceituação se enquadra mais como uma delimitação de escopo para excluir os sistemas de produção e tecnologias não palpáveis, tais como Just-in-Time (JIT) e Qualidade Total (TQC), das tecnologias normalmente baseadas em combinações de hardware e software que viabilizam a execução dos planos de produção com alto nível de eficiência, segurança e qualidade.

Combinadas as visões de Dangayach (2006) e Chan (2001), tem-se que AMT é um termo que engloba tecnologias de controle automático aplicadas a processos produtivos, com o intuito de melhorar seu desempenho em relação à qualidade, flexibilidade e produtividade, suportadas pelos avanços da tecnologia da informação.

Como exemplo de interação desta aplicação, são considerados uma célula de usinagem composta por uma máquina CNC, um robô manipulador e um sistema Planejamento e Controle de Produção (PCP). Considerando os três sistemas isolados visto que não comunicam automaticamente. Assim, a operação exige que um operador humano verifique no PCP qual a próxima peça a ser produzida, parametrize o CNC e libere a ação do robô para manipular a peça.

Através da inserção de um quarto elemento, um sistema de informação que promova a conversação automática entre robô, a máquina CNC e o software PCP, ter-se-á não mais um conjunto de equipamentos isolados, mas uma célula de manufatura flexível ou Flexible Manufacturing Cell (FMC).

Na situação apresentada, a célula flexível inserida não mais depende da ação humana para o trabalho de rotina. Ao sinal da máquina CNC informando a conclusão da usinagem, o sistema integrado verifica na fila do PCP qual o próximo processo a ser manufaturado. Essa informação é transmitida ao robô, que receberá a informação e orientará os passos seguintes.

No caso do trabalho aqui apresentado, parte desta interação entre os diferentes processos deverá ser abordada buscando a integração de hardware e software.

## **2.5 Tecnologia CNC**

### **2.5.1 Breve histórico – Fresadora CNC**

Conforme afirma Sousa (1998), as máquinas-ferramenta de hoje tiveram suas origens a muitos séculos atrás. O torno mecânico, por exemplo, é a máquina-ferramenta mais antiga conhecida, com origem na época da antiguidade. A invenção da primeira fresadora primitiva é creditada a um artesão italiano chamado Torriano, por volta do ano de 1540. Torriano foi incumbido de construir um relógio planetário para o rei Carlos V da Espanha. Este relógio continha cerca de 1800 rodas dentadas e levou 3 anos e meio para ser construído. Com o objetivo de facilitar o trabalho,



Torriano adaptou um tipo de torno mecânico de modo que este passasse a ter um instrumento de rosca vertical, uma placa horizontal e uma profundidade de corte ajustável. Deste modo ele conseguia uma produção de três rodas dentadas por dia.

As máquinas-ferramenta atuais tem suas origens estimadas por volta do ano de 1775, com o inventor inglês John Wilkinson que criou uma máquina de ação horizontal para a produção de superfícies cilíndricas intenas. Esta invenção possibilitou a fabricação de motores a vapor eficientes (criados por James Wan). Em meados da década de 1790, o engenheiro Henry Maudslay desenvolveu o primeiro torno mecânico com motor a vapor. Mais tarde, por volta de 1830, Joseph Whitworth desenvolveu instrumentos de medida com uma precisão de um milionésimo de polegada. Este foi um avanço fundamental para a subsequente produção em massa de maquinaria com partes intercambiáveis. Com maior precisão, surgiu a possibilidade de produção de peças idênticas com estreitas margens de tolerância, o que ajudou a disseminar o uso das máquinas de Wilkinson e Maudslay. Todas essas invenções culminaram, não só na diminuição da necessidade de mão de obra, uma vez que os tornos podiam ser operados por uma pessoa apenas, como também fez com que a mão de obra se tornasse menos especializada.

Segundo Sousa (1998), o americano Eli Whitney consolidou o conceito de produção em massa. Em 1798, Whitney firmou um contrato com o governo dos Estados Unidos para a produção de 10.000 mosquetes para o exército. Ele conseguiu demonstrar que a implementação do conceito de partes intercambiáveis era factível. Whitney mostrou que partes aleatoriamente selecionadas, dentre diversas produzidas por uma máquina-ferramenta, se encaixavam e formavam um mosquete totalmente operacional. Isso só foi possível com o estabelecimento de margens de tolerância mais rigorosas. Ele projetou e construiu sozinho toda a maquinaria para a produção das armas.

Os próximos avanços vieram no início do século XX, em 1906, onde os tornos foram equipados com a correia motriz, movimentada por um conjunto de polias de diferentes diâmetros, o que possibilitava uma variada gama de velocidades de rotação. Sua propulsão era obtida através de um eixo acionado por um motor, o que fixava a máquina a um local específico.

O processo evolutivo das máquinas continuou com o desenvolvimento de pesquisas voltadas especificamente para o assunto, onde surgiu a máquina

comandada numericamente. O primeiro resultado das pesquisas surgiu em 1949 no laboratório do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), com a união da Força Aérea Norte-americana (U.S. Air Force) e a empresa Parsons Corporation of Traverse City, Michigan, onde foi adotada uma fresadora de três eixos, a Hydrotel, da Cincinnati Milling Machine Company, como alvo das novas experiências. Os controles e comandos convencionais foram retirados e substituídos pelo comando numérico, composto por uma leitora de fita de papel perfurado, unidade de processamento de dados e servomecanismo nos eixos. Após testes e ajustes, a demonstração prática da máquina ocorreu em março de 1952, e o relatório final do novo sistema somente foi publicado em maio de 1953. Após este período, a Força Aérea Norte americana teve um desenvolvimento extraordinário, pois as peças complexas e de grande precisão, empregadas na fabricação das aeronaves, principalmente os aviões a jato de uso militar, passaram a ser produzidos de forma simples e rápida, reduzindo-se os prazos de entrega do produto desde o projeto, até o acabamento final. A cada ano, foi incrementada a aplicação do CN, principalmente na indústria aeronáutica.

Na década de 50 novos eventos consideráveis aconteceram. Em 1956 surgiu o trocador automático de ferramentas, mais tarde em 1958, os equipamentos com controle de posicionamento ponto a ponto e a geração contínua de contornos, que foram melhorados por este sistema em desenvolvimento. A partir de 1957, houve nos Estados Unidos, uma grande corrida na fabricação de máquinas comandadas por CN, pois os industriais investiam até então em adaptações do CN em máquinas convencionais. Este novo processo foi cada vez mais usado na rotina de manufatura, que a partir deste ano, com todos os benefícios que haviam obtido deste sistema, surgiram novos fabricantes que inclusive já fabricavam seus próprios comandos. Devido ao grande número de fabricantes, começaram a surgir os primeiros problemas, sendo que o principal, foi a falta de uma linguagem única e padronizada. A falta de padronização era bastante sentida em empresas que tivessem mais de uma máquina de comandos, fabricados por diferentes fornecedores, cada um deles tinha uma linguagem própria, com a necessidade de uma equipe técnica especializada para cada tipo de comando, o que elevava os custos de fabricação. Em 1958, por intermédio da EIA (Electronic Industries Association) organizou-se estudos no sentido de padronizar os tipos de linguagem. Houve então a padronização de entrada conforme padrão RS-244 que depois passou a EIA244A ou ASC II. Atualmente o meio

mais usado de entrada de dados para o CNC é via computador, embora durante muitos anos a fita perfurada foi o meio mais usado, assim como outros com menor destaque. A linguagem destinada a programação de máquinas era a APT (Automatically Programed Tools), desenvolvida pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts em 1956, daí para frente foram desenvolvidas outras linguagens para a geração contínua de contornos como AutoPrompt (Automatic Programming of Machine Tools), ADAPT, Compact II, Action e outros que surgiram e continuam surgindo para novas aplicações. Com o aparecimento do circuito integrado, houve grande redução no tamanho físico dos comandos, embora sua capacidade de armazenamento tenha aumentado, comparando-se com os controles transistorizados.

Em 1967 surgiram no Brasil as primeiras máquinas CN, vindas dos Estados Unidos. No início da década de 70, surgem as primeiras máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado), e no Brasil surge as primeiras máquinas CN de fabricação nacional. A partir deste período, observa-se uma evolução das máquinas que ocorre juntamente com a evolução dos computadores em geral, fazendo com que os comandos (CNC) mais modernos, empreguem em seu conceito físico (hardware) tecnologia de última geração. Com isso, a confiabilidade nos componentes eletrônicos aumentou, aumentando a confiança em todo sistema.

### **2.5.2 Breve histórico – Placa de Circuito Impresso**

Segundo Falcão (2014) o desenvolvimento do que no futuro se tornariam as placas de circuito impresso tem registros do início do século XX com as patentes de trabalhos que buscavam prensar materiais condutores em materiais isolantes, com a finalidade de atender as instalações telefônicas.

Os acontecimentos mais notórios iniciaram com Albert Hanson, em 1903, quando ele utilizou de pequenos laminados planos de alumínio sobre uma placa isolante em múltiplas camadas. No ano seguinte, Thomas Edison experimentou a inserção de material condutor através de um processo químico em um dielétrico de papel de linho. Após alguns anos, em 1913, Arthur Berry patenteou, na Inglaterra, um método de impressão e Max Schoop, na América do Norte, outra patente relativa ao processo de metalização.

Mehl (2008) menciona o registro de uma patente norte-americana de 1925, em nome de Charles Ducas, que propunha depositar uma tinta condutiva sobre um

substrato isolante, que deu origem à expressão “Circuito Impresso”. No entanto, conforme o mesmo autor, a maior parte das publicações credita a invenção do circuito impresso a um engenheiro austríaco chamado Paul Eisler, em 1936 na Inglaterra, em que patenteou um método de se corroer uma camada de cobre depositada sobre uma superfície isolante. Apesar disso, somente por volta de 1943 os circuitos impressos foram usados de uma forma mais ampla, quando foram empregados em equipamentos de rádio para uso militar, onde era essencial que o circuito funcionasse em situações extremamente adversas.

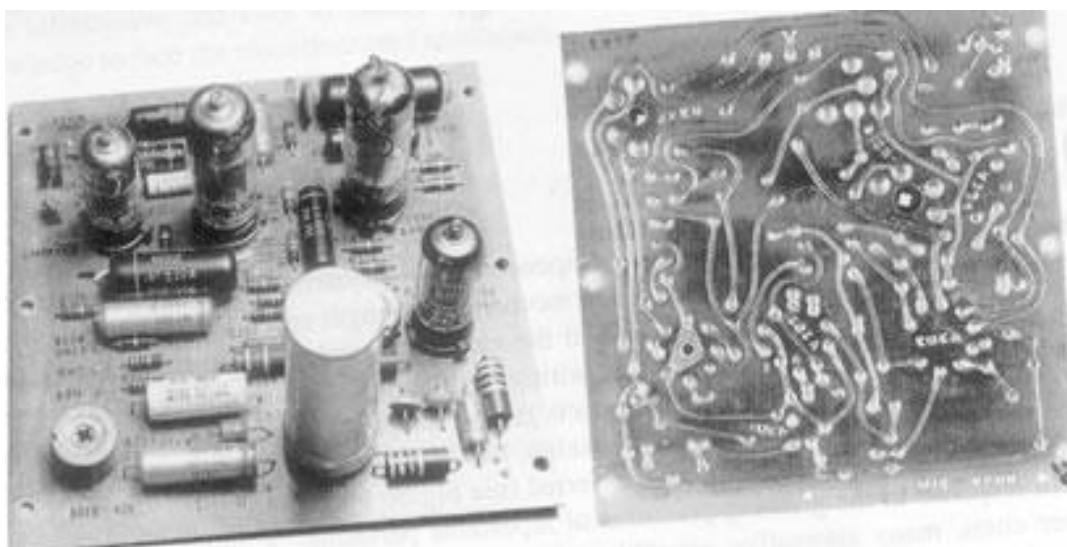
Figura 1 - Rádio com a primeira placa de circuito impresso



Fonte: © Science Museum/Science and Society Picture Library, 2016

Surgem em 1947, conforme afirma Falcão (2014), nos Estados Unidos as primeiras placas impressas em um os lados e com vias verticais revestidas para uso militar. No ano subsequente lançaram a versão comercial que se popularizaram somente em meados da década de 1950, com diferentes resinas e outros materiais, embora esta só pudesse ser impressa de um único lado. O circuito é impresso de um lado e os componentes elétricos colocados do outro, semelhantes as Figura 1 e Figura 2. Nesta altura, o circuito é fotografado numa placa de zinco, que depois é utilizada como negativo para desenhar numa placa de cobre. O processo é concluído submetendo a placa de cobre a um banho ácido, corroendo superficialmente o material e deixando intacta a zona desenhada.

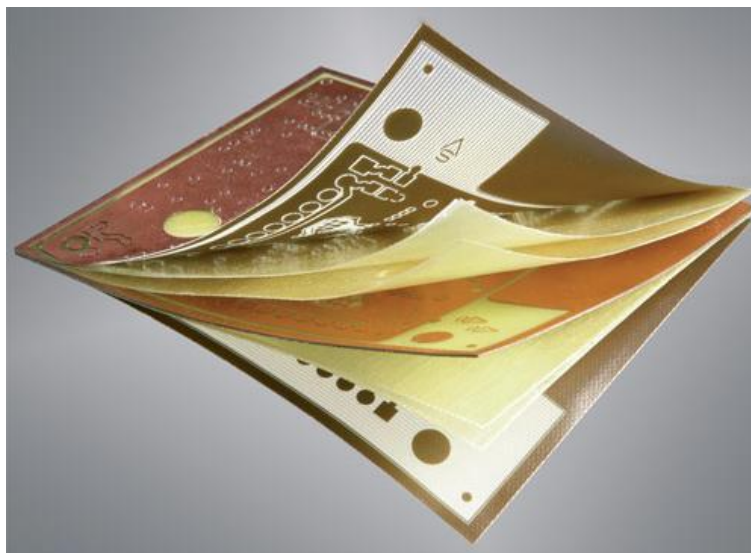
Figura 2 - Primeiros circuitos impressos  
Componentes numa face e circuito de cobre na outra



Fonte: Falcão, 2014

Já na década de 1960, segundo Falcão (2014), iniciou-se a produção de placas multicamadas (4 ou mais camadas) como na Figura 3.

Figura 3 - PCI com 5 camadas



Fonte: Falcão, 2014

Em 1980, segundo Falcão (2014), começaram a serem utilizadas com frequência as placas de circuito impresso, com os componentes de ligação superficial, em detrimento de componentes fixos na placa através de furos e solda (*through-hole*),



placa deve ser adaptável a estas mudanças e, dependendo do nível de complexidade atingido pela estrutura da PCI, tende-se a recorrer a ferramentas computacionais de projeto baseadas em modelação computacional (CAD - *Computer-aided design*).

### **2.5.3 Composição das Placas**

Atualmente, conforme afirma Falcão (2014), as placas de circuitos impressos (PCIs) são amplamente empregados em todos os tipos de equipamentos eletrônicos, principalmente quando se empregam em sua construção circuitos integrados. Também podem ser encontrados isolantes de papel-epoxy e poliéster. A utilização de determinado material condutor e isolante varia de acordo com as especificações do projeto; para tanto, comercialmente utiliza-se de forma mais ampla o cobre, como material condutor, e o fenolite, como isolante base.

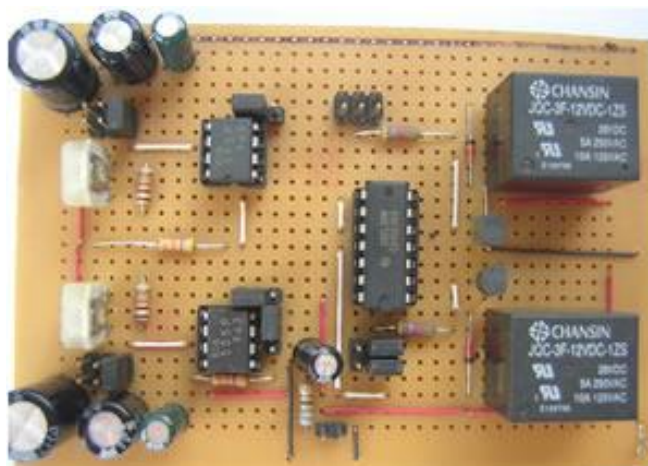
O material inicialmente usado para a fabricação de placas de circuito impresso (PCIs) foi uma chapa conhecida como fenolite. Na verdade, o nome fenolite era originalmente a marca comercial de um fabricante de chapas isolantes, muito usada pelos fabricantes de máquinas elétricas e transformadores. As chapas de fenolite são feitas com a mistura de uma resina fenólica com certa quantidade de papel picado ou serragem de madeira (carga), apresentando cor marrom claro ou escura, dependendo do tipo de carga utilizada, como ilustra a Figura 6. A mistura é moldada e prensada a quente na forma de chapas, com diferentes espessuras. O principal problema das chapas de fenolite para circuitos impressos decorre justamente do uso da carga à base de celulose, que a torna higroscópica. Ou seja, em um ambiente úmido as placas de fenolite absorvem certa quantidade de água, o que além de prejudicar as suas características isolantes frequentemente faz com que as placas empenem.

Na tentativa de corrigir os problemas apresentados pela fenolite, foram desenvolvidas na década de 1960, como alternativa de melhor qualidade, as placas conhecidas como fibra de vidro (FV), a Figura 7 ilustra um exemplo. Na verdade, estas chapas são feitas com resina epóxi e apenas há internamente uma fina manta de tecido de fibras de vidro. O uso da resina epóxi torna as placas de FV totalmente inertes à água, mas, por outro lado, produz uma placa extremamente difícil de ser cortada e perfurada. De fato, a dureza do epóxi é semelhante à do granito, fazendo com que sejam necessárias ferramentas especiais para fazer o corte e a furação das



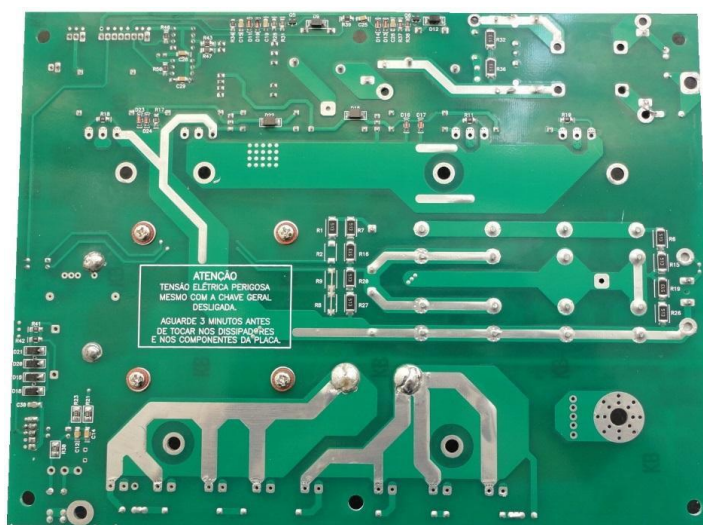
placas. Assim, o custo de produção fica cerca de 30% mais caro do que as placas de fenolite. Apesar disso, devido à sua excelente capacidade isolante e estabilidade dimensional, a grande maioria das placas de circuito impresso de equipamentos eletrônicos são fabricas com placas de FV, ficando a fenolite geralmente restrita a projetos de pouca qualidade ou quando se utiliza uma técnica mais artesanal na fabricação.

Figura 6 – Placa de circuito impresso em fenolite



Fonte: [eletronika.net](http://eletronika.net), 2016

Figura 7 - Placa de circuito impresso de fibra de vidro



Fonte: [bibliodigital.unijui.edu.br](http://bibliodigital.unijui.edu.br), 2016



#### 2.5.4 Constituição das PCIs

Atualmente, conforme afirma Falcão (2014), as placas de circuito impresso são constituídas por uma ou mais películas de material condutor separadas por material não condutor, assim como na Figura 8. O material não condutor não só separa as diferentes camadas nos circuitos com mais que uma camada, como fornece o suporte para o próprio circuito em si e para os componentes.

O cobre é o material predileto para condução de corrente elétrica e calor, sendo este o material base mais comum de ser encontrado nas chamadas “pistas” de uma PCI. Esta designação é atribuída a cada circuito impresso numa placa. Ligas de estanho, prata e ouro podem também ser usadas para efeitos de condução de eletricidade, embora sejam menos frequentes.

Já nas camadas que conferem o isolamento entre pistas e a integridade estrutural à placa, o material mais frequentemente utilizado é o FR-4, um material polimérico e, portanto, com fracas propriedades condutoras tanto de eletricidade como de calor. Paralelamente, é possível encontrar outros materiais poliméricos e/ou compostos no papel de isolador.

Conforme afirma Mehl (2008), a técnica de projeto de circuitos impressos evoluiu consideravelmente nos últimos anos e os circuitos atingiram um elevado grau de complexidade como resultado da evolução dos dispositivos eletrônicos, principalmente quanto às dimensões dos dispositivos. Dessa forma surgiu a necessidade de se projetar placas com trilhas em camadas intermediárias, além das trilhas normalmente existentes nas faces superior e inferior da placa. Algumas placas chegam a ter trilhas em 16 “camadas”, chamadas de *layers*. Por exemplo, um circuito com 5 *layers* significa que a placa de circuito impresso possui trilhas nas faces superior e inferior e também três camadas metálicas intermediárias, onde igualmente existem trilhas gravadas. Geralmente os *layers* intermediários são usados para a alimentação elétrica dos componentes; outros projetos usam *layers* intermediários ligados ao “terra” do circuito, para controle da emissão de ruído eletromagnético, funcionando nesse caso como “plano de terra”.

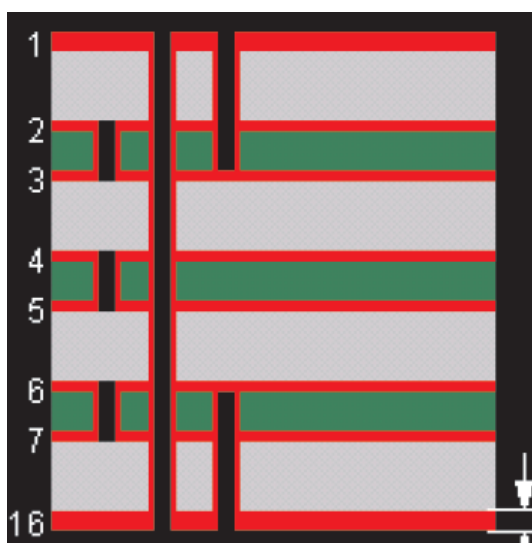
As trilhas existentes nas diferentes camadas são interligadas através de orifícios cuja superfície interna recebe um revestimento metálico, através de um processo eletroquímico. Estes orifícios metalizados são chamados de vias. Nos

projetos que empregam exclusivamente dispositivos para montagem em superfície, as vias servem unicamente como meio de interligação entre *layers*; se forem usados componentes tradicionais com terminais na forma de fios, os orifícios de vias podem ser usados também para a fixação e soldagem desses terminais.

Além da evolução dos dispositivos eletrônicos, com o tempo foram surgindo novas aplicações e circuitos que para serem atendidos perfeitamente necessitaram de placas específicas. Assim surgiram novas placas que buscam atender determinadas aplicações.

A PTFE foi uma solução desenvolvida para aplicações com frequência muito elevada ( $>10^{10}\text{Hz}$ ), PCIs de fenolite ou FV podem apresentar problemas de polarização dielétrica. Para isso, foram criadas as PTFEs onde o material isolante utilizado é o politetrafluoroetileno (PTFE), material mais conhecido pelo nome comercial Teflon (®Du Pont), cujo preço de mercado é muito elevado.

Figura 8 - PCI com 16 *layers*



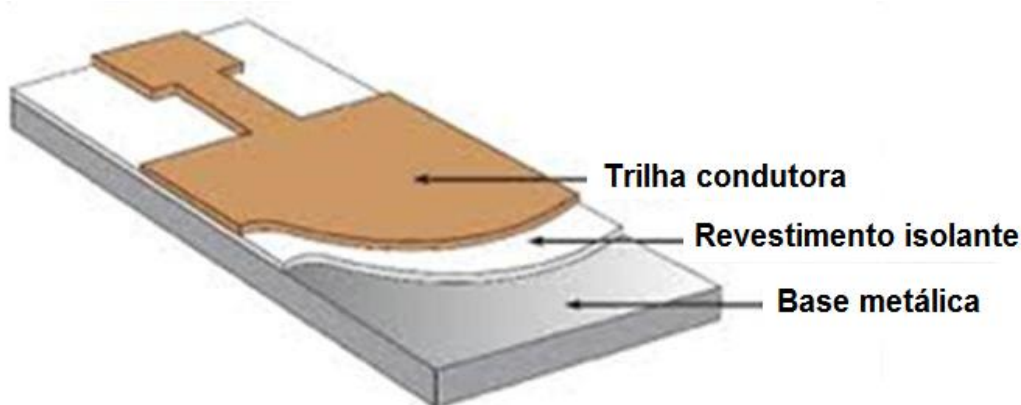
Fonte: eletrica.ufpr.br, 2016

Há também as placas confeccionadas em poliéster, que são utilizadas quando há necessidade de flexibilidade, como por exemplo em notebooks, agendas telefônicas, telefones celulares, tablets, *book readers*, entre outros. Sua fabricação demanda cuidados especiais e seu preço é relativamente elevado.

Uma outra solução específica são as placas tipo MCPCI, utilizadas com mais frequência nos últimos anos, a *Metal Clad Printed Circuit Board*. Consiste de uma placa de alumínio com 2mm a 3mm de espessura, sobre qual é depositada uma

camada de material dielétrico (geralmente óxido de alumínio) e uma camada condutora de cobre, como ilustra a Figura 9. Comumente utilizado quando se necessita de grande dissipação de calor. Sua principal aplicação é na montagem de diodos emissores de luz (LED) de alta potência, encontrando também uso em conversores DC-DC e em sistemas de injeção eletrônica de combustíveis.

Figura 9 - Esquema de construção de MCPCI



Fonte: eletrica.ufpr.br, 2016

Em todas as PCIs citadas, o material condutor utilizado é o cobre. A escolha deste metal se deve à sua excelente condutividade elétrica, somente superada pela prata, além de suas características mecânicas que permitem a produção de folhas de pequena espessura. O processo de deposição do cobre sobre as placas isolantes inicia-se pela aplicação de uma tinta à base de grafite. Em seguida as placas são ligadas ao polo negativo de uma fonte de corrente contínua e mergulhadas em uma solução saturada com sais de cobre, sendo tal solução ligada ao polo negativo da fonte. Ocorre então um processo eletroquímico de galvanoplastia, obtendo-se a deposição de uma fina camada de cobre metálico sobre a placa. Ao se obter a espessura de cobre desejada, a placa é retirada do processo de galvanoplastia e passada por uma calandra metálica aquecida, que fixa a camada de cobre à placa e deixa-a com uma superfície lisa e uniforme. Geralmente as placas de circuito impresso usadas em eletrônica são chamadas de “cobre a uma onça”; isto significa que a camada de cobre existente em uma área de um pé quadrado (*1 sq.ft.* - square foot) pesa uma onça (*one ounce* = 28,34 g). A tabela 1 mostra as características usualmente encontradas nas placas de FV (FR-4) disponíveis para a indústria de PCI.

Tabela 1: Características das chapas tipo FR-4, disponíveis para PCI.

Espessura da camada de Cobre	1/2 onça (espessura de 18µm)	1 onça (espessura de 35µm)
Largura mínima das trilhas (*)	8 mils = 0,08 inch	12 mils = 0,12 inch
Espessura da chapa isolante	0,8mm, 1mm, 1,2mm, 1,6mm (típico), 2mm e 2,4mm	

(\*) A largura mínima da trilha depende do processo de fabricação utilizado. Os valores citados são usuais nos prestadores de serviço de confecção de placas disponíveis no Brasil. Fonte: Mehl, 2008.

Apesar de pouco espessa, a camada de cobre existente na trilha de uma placa de circuito impresso possibilita a condução de corrente elétrica em níveis elevados. Para aplicações especiais, existem placas com camadas mais espessas de cobre, chamadas de “3 onças” e até mesmo “5 onças”.

### 2.5.5 Principais Processos de Fabricação das PCIs

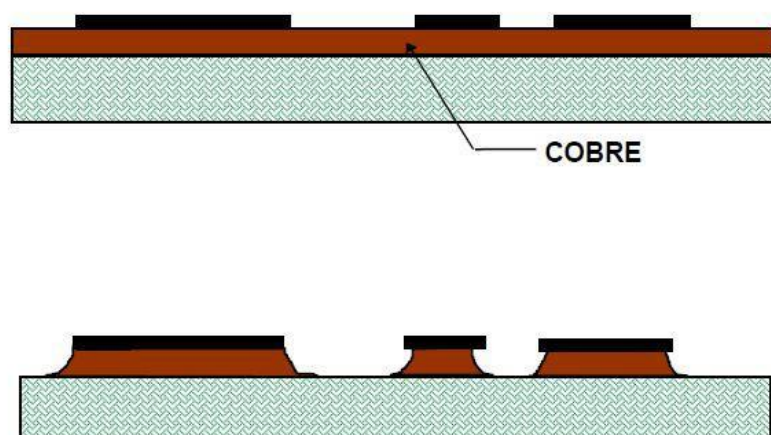
Falcão (2014) salienta que a produção de placas de circuito impresso, sejam estas com um ou mais circuitos, envolve um processo um tanto ou quanto complexo. Na verdade, os processos utilizados na indústria são de tal forma vastos e específicos de cada caso que seria impossível oferecer uma compilação de todos. Mas os processos de construção de PCI são categorizados por um parâmetro fundamental: meio de criação das pistas do circuito. Existem dois principais processos (químicos) distintos de construção destas pistas: o processo aditivo e processo subtrativo.

O processo aditivo é pouco frequente na indústria e prevê a deposição do elemento condutor sob uma base isoladora. Tecnicamente, é um processo simples e fácil de aplicar. No entanto, a cadeia de produção, o rigor e o custo associado a este processo tornam-no inviável para as grandes escalas presentes na indústria de PCI.

Em contrapartida, nos processos considerados subtrativos, a construção das pistas condutoras dá-se por um processo de extração de material previamente depositado. Nestes processos, em vez de trabalhar com uma base isoladora, utiliza-se uma base já laminada com o par isolador/condutor já interligado. Estas bases são constituídas por uma camada de substrato revestida de um ou de ambos os lados com uma fina camada de cobre (ou outro condutor). O traçado do circuito pretendido é marcado na camada de cobre e, posteriormente, remove-se o cobre das zonas que

não pertencem ao circuito elétrico. A Figura 10 ilustra o modelo subtrativo, destacando o cobre removido nos locais não demarcados, figurando o circuito traçado em corte.

Figura 10 - Vista em corte da placa antes (em cima) e depois (em baixo) do processo de corrosão parcial



Fonte: Falcão, 2014

#### 2.5.5.1 Técnicas de Prototipagem de Placas de Circuito Impresso

Atualmente existem várias técnicas de fabricação das PCIs, as maios comuns são destacadas abaixo.

##### 2.5.5.1.1 Transferência Térmica

Conforme afirma Lenz (2015), o método de transferência térmica é bastante conhecido e muito utilizado por hobbistas. Nesse processo, utiliza-se papel fotográfico para impressão das trilhas em uma impressora a laser e, em seguida, com auxílio de uma prensa térmica ou ferro de passar roupa, realiza-se a transferência da impressão para a superfície cobreada da placa de cobre virgem.

Após a transferência térmica, a placa de cobre virgem com as trilhas transferidas é imersa em uma solução de Percloreto de Ferro ( $\text{FeCl}_3$ ) por um determinado tempo, até que as partes de cobre não cobertas com as trilhas (tonner da impressora transferido através do processo térmico) seja removida pelo ácido, procedendo com a lavagem da placa de circuito impresso em seguida.

Após as trilhas feitas, é preciso realizar a furação da placa de circuito impresso, processo esse que pode ser manual ou automatizado.

Esse método possui algumas limitações que são:

- Dificuldade no alinhamento das furações com as trilhas, dificultando o encaixe de alguns componentes na placa, especialmente os circuitos integrados;
- Baixa precisão nas trilhas mais estreitas;
- Utiliza-se de componentes químicos nocivos para a saúde e que, em ambiente industrial, necessitam de condições especiais de armazenagem e pessoas capacitadas para seu manuseio.

Em suma, o processo de transferência térmica apresenta baixa precisão, necessidade de mão de obra especializada, baixo custo e tempo de fabricação de curto para moderado.

#### **2.5.5.1.2 Processo Serigráfico**

Segundo Lenz (2015), semelhante ao processo de transferência térmica, o processo serigráfico difere apenas na forma de transferir as trilhas do circuito impresso para a placa de cobre virgem. Ao invés de utilizar o processo térmico e papel fotográfico, são impressos fotolitos e produzidas telas de serigrafia para cada placa que se deseja fazer.

Depois da transferência aplica-se uma tinta fotossensível e exposição à luz ultravioleta por um determinado período de tempo para que as trilhas fiquem marcadas na placa de cobre virgem, sendo levada em seguida para o processo de corrosão em Percloreto de Ferro ( $\text{FeCl}_3$ ) e lavagem para retirada das sobras do sal.

Este processo apresenta as seguintes características:

- Dificuldade no alinhamento das furações com as trilhas, dificultando o encaixe de alguns componentes na placa, especialmente os circuitos integrados;
- Baixa precisão nas trilhas mais estreitas;
- Utilização de produtos químicos nocivos para a saúde e que, em ambiente industrial, necessitam de condições especiais de armazenagem e pessoas capacitadas para seu manuseio;

- Necessidade de ter uma serigrafia ou pelo menos telas serigráficas disponíveis e mão de obra capacitada para criação das telas serigráficas.

Comparado com o método por transferência térmica, no método por processo serigráfico há exigência de mão de obra experiente, apresenta um custo um pouco maior e (depois das telas prontas) é um processo relativamente rápido. Um dos seus maiores inconvenientes é a utilização de químicos e a necessidade de manter um processo serigráfico na empresa.

#### **2.5.5.1.3 Ferramenta de Prototipagem a Laser**

De acordo com Lenz (2015), o processo a laser é um processo que proporciona excelentes resultados em termos de precisão e acabamento, sendo possível atingir larguras de trilhas inferiores a 100µm (micrometros).

As máquinas de prototipagem são capazes de produzir protótipos de maneira rápida, eficiente e totalmente sem a utilização de produtos químicos nocivos à saúde e ao meio ambiente. Capazes de trabalhar com diversos materiais, tais como placas de fibra de vidro, fenolite, laminados de alumínio, material cerâmico, estruturas RF (rádio frequência) e materiais semi-flexíveis.

Além da confecção das trilhas, é possível realizar furações, metalização de furos e aplicação de máscara de solda. Por não haver necessidade de troca de ferramentas, o processo de confecção é rápido e com pouco barulho.

O maior entrave para o investimento em uma ferramenta de prototipagem a laser consiste no preço da tecnologia, muito superior a qualquer outra disponível no mercado.

As principais características que pode-se destacar deste processo são:

- Alta precisão de trilhas e furações;
- Tempo de produção relativamente curto;
- Suporte a diversos tipos de material para a confecção da placa de circuito impresso;
- Investimento inicial relativamente alto.

#### **2.5.5.1.4 Prototipagem com Ferramenta CNC**

As ferramentas de controle numérico são equipamentos eletromecânicos usados na usinagem de materiais. Diferentemente do que ocorre no torno, a ferramenta de corte se posiciona ortogonalmente em relação a peça a ser trabalhada. Elas podem existir de vários tamanhos e formas, tendo como característica a utilização de um processo rotativo para realizar cortes ou gravuras (OVERBY, 2010).

Nesse processo, afirma Lenz (2015), a exemplo da prototipagem a laser, ocorre a retirada do material indesejado da placa de cobre virgem, mudando apenas a forma como isso é feito, sendo que na prototipagem CNC esse processo é feito através de ferramentas de desbaste, furação e corte.

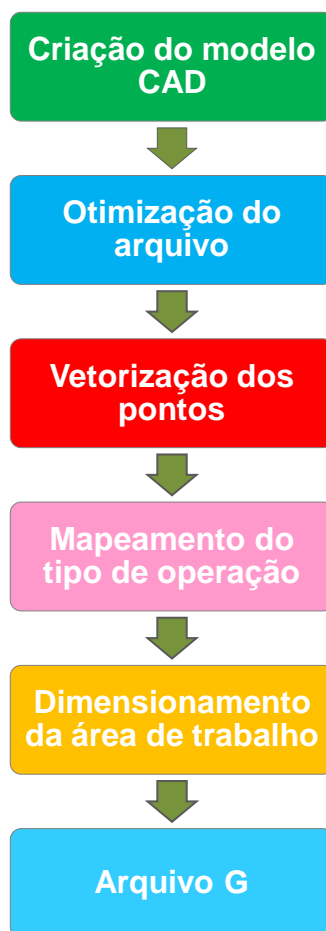
Esse tipo de ferramenta de prototipagem, segundo Lenz (2015), trabalha com uma gama menor de materiais, quando comparado com a ferramenta laser e possui uma precisão inferior, porém, permite a confecção de placas com boa performance e igualmente livres de qualquer produto químico. Possui um custo inicial de investimento muito inferior as ferramentas de laser, no entanto apresenta maior necessidade de manutenção com a substituição de ferramentas que apresentam desgaste após certo tempo de uso.

Em termos práticos o que pode-se destacar de suas características, são:

- Precisão na confecção de trilhas de média a alta e alta precisão em furações;
- Tempo de produção relativamente curto;
- Possui ferramentas de desbaste, corte e furação que necessitam de substituição periódica para correto funcionamento do equipamento;
- Possui um baixo custo de investimento inicial.

Em geral, o processo de prototipagem rápida desenvolvido nas ferramentas tipo CNC é formado por algumas etapas, conforme o fluxograma abaixo:





Estas etapas serão detalhadas no decorrer do trabalho.

### 2.5.6 Normas Nacionais

Atualmente o Brasil possui algumas normas que indicam quais as características as placas precisam possuir quando submetidas a determinados testes. Destas normas destaca-se a ABNT NBR IEC 62326-1:2007, que regulamenta e orienta quanto a composição química dos materiais e as características que as placas de circuito impresso devem possuir independente do processo de fabricação.

## 2.6 Considerações finais

Além do perfeito conhecimento das placas de circuito impresso é necessário o entendimento das características da ferramenta proposta. Esta será detalhada no capítulo 3.

### **3 FERRAMENTA CNC**

#### **3.1 Considerações iniciais**

A ferramenta CNC é o principal objeto de abordagem deste trabalho, será apresentada e detalhada nos próximos itens abaixo, juntamente com seus componentes e acessórios.

#### **3.2 Centro de Usinagem**

Um centro de usinagem é uma máquina-ferramenta totalmente automatizada, capaz de realizar diferentes operações de usinagem com controle numérico computadorizado reduzindo ao mínimo a intervenção humana no processo. Os operadores carregam e descarregam as peças, o que em geral demora bem menos que o tempo do ciclo da máquina, permitindo que os mesmos possam atender a mais de uma máquina. O fresamento e a furação são as operações tipicamente realizadas em um centro de usinagem (MIKELL, 2016).

#### **3.3 Furação**

A furação é uma operação de usinagem realizada para criar um furo circular em uma peça. Esta contrasta com o broqueamento que só pode ser realizado para ampliar um furo existente. A furação é geralmente realizada com ferramenta rotativa cilíndrica, que tem duas arestas de corte na sua extremidade útil. Essa ferramenta é chamada broca. A broca gira e avança na direção da peça parada a fim de realizar um orifício, cujo diâmetro é igual ao da broca. A furação geralmente é realizada com uso de uma furadeira, embora outras máquinas-ferramenta também executem essa operação (MIKELL, 2016).

Os furos podem ser passantes ou cegos. Nos furos passantes, ao final da operação, a broca sai do lado oposto à entrada da peça, enquanto que nos furos cegos, isso não acontece.

A máquina-ferramenta padrão para a furação é a furadeira, construída para desempenhar esta operação. Além da furadeira existem os modelos com controle numérico que realizam o gerenciamento da posição dos furos nas peças. Essas

máquinas são frequentemente equipadas com magazines para gerenciar várias ferramentas que podem ser indexadas no programa CNC. O termo furação CNC é usado para essas máquinas-ferramenta (MIKELL, 2016).

### **3.4 Fresamento**

O fresamento (ou fresagem) é a operação de usinagem em que a peça avança em direção a uma ferramenta rotativa cilíndrica com várias arestas de corte. O eixo de rotação da ferramenta de corte é perpendicular à direção de avanço. Essa diferença de orientação entre o eixo da ferramenta e a direção de avanço é uma das características que distingue o fresamento da furação. Na furação, a ferramenta de corte avança na direção paralela ao seu eixo de rotação. A ferramenta de corte, no fresamento, é denominada fresa, e as arestas de corte são chamadas dentes. A máquina-ferramenta convencional que realiza essa operação é uma fresadora (MIKELL, 2016).

O fresamento é uma operação de usinagem com interrupções, ou seja, os dentes da fresa entram e saem da peça a cada revolução. Essa ação de corte interrompido expõe os dentes a forças cíclicas de impacto e a choque térmico em cada rotação (MIKELL, 2016).

Existem dois tipos básicos de operações de fresamento: fresamento periférico ou fresamento cilíndrico tangencial e fresamento frontal (MIKELL, 2016).

#### **3.4.1 Fresamento Periférico**

Neste tipo de operação o eixo da ferramenta é paralelo à superfície a ser usinada, e a operação é realizada pelas arestas de corte que estão na periferia externa da fresa.

#### **3.4.2 Fresamento Frontal**

O eixo da fresa, neste tipo de operação, é perpendicular à superfície que está sendo fresada, e a usinagem é realizada tanto pelas arestas de corte, que estão na periferia, quanto pelas arestas secundárias, que estão na base da ferramenta. Para

este tipo de operação destacam-se as seguintes formas: fresamento de topo, no qual o diâmetro da fresa é menor que a largura da peça, ou seja, é gerado um rebaixo na peça; fresamento de borda, tipo de fresamento de topo no qual a periferia da peça é usinada com as arestas principais da fresa; e fresamento de cavidades, outro modo de fresa de topo usado para fresar cavidades ou bolsões em superfícies planas, também chamado fresamento mergulho ou rampa. Existem outras formas de fresamento tanto para o tipo frontal quanto periférico, mas estes não serão detalhados por serem aplicados a diferentes geometrias não relacionadas a este estudo (MIKELL, 2016).

Além da orientação da rotação do eixo, vertical ou horizontal, o qual classifica a fresadora como uma máquina-ferramenta, estas podem ser listadas como: fresadora de coluna e console, fresadora de mesa fixa, fresadora de arrasto, fresadora copiadora e fresadora CNC. Dentre estas, destaque para a última, a qual é controlada por informações alfanuméricas, ao invés de um modelo físico.

As fresadoras CNC são adequadas especialmente para fresamento de perfil, cavidades, contorno de superfícies e de matrizes, nos quais dois ou três eixos da mesa devem ser controlados de forma simultânea para alcançar a trajetória de corte requerida. Normalmente, é necessário que o operador troque as ferramentas e carregue e descarregue a peça na mesa da máquina-ferramenta.

Na fixação é necessário personalizar um arranjo para a peça em especial, a fim de garantir precisão no posicionamento da peça durante a usinagem, estes arranjos podem ser do tipo:

- Blocos paralelos;
- Cantoneiras;
- Grampos;
- Parafusos.

### 3.5 Fusos

O fuso é uma haste metálica maciça trabalhada no formato de parafuso que possui uma castanha (porca) integrada para conversão de movimentos rotativos em movimentos lineares e vice-versa.

Atualmente existem diversos tipos de fusos que se diferenciam no formato do eixo e tipo de castanha, cada um possui a finalidade de atender uma aplicação específica, por exemplo, alta rotação, alta lubrificação, precisão nos movimentos, alto torque mecânico, etc. Os mais utilizados são os fusos trapezoidais, fusos planetários e os fusos de esferas.

Os fusos de esferas recirculantes, são o modelo com o formato mais eficiente para se converter movimento rotativo ou movimento de torque em movimento linear e vice-versa. Este formato de eixo é o mais utilizado em máquinas industriais e máquinas de precisão por solucionar satisfatoriamente tarefas de transporte e posicionamento com acionamento de eixo ou porca. Ele é constituído por um eixo de parafuso e uma castanha (porca) integrada de alto rendimento mecânico devido ao baixo atrito das esferas que recirculam na castanha. As principais vantagens dos fusos de esferas são a alta precisão, reversibilidade, eficiência e altas velocidades lineares com cargas elevadas ou pequenos comprimentos (THK, 2016).

Os fusos de esferas são classificados de acordo com a forma construtiva do eixo, o que implica diretamente na forma construtiva das castanhas. Existem diversos tipos de fusos, cada um com uma fresagem específica do eixo e sua respectiva castanha com a construção específica para o melhor rendimento do conjunto. Os principais fusos que pode-se destacar são:

- **Fuso de esferas com gaiola** – Modelo que apresenta baixo nível de ruído, pequenas flutuações de torque e longo período de operação pequena necessidade de manutenção, utilizando uma gaiola para acomodação das esferas, conforme Figura 11 (THK, 2016).

Figura 11 – Fuso de esferas com gaiola



Fonte: thk.com, 2016

- **Fuso de esferas retificado** – Modelo com o eixo e castanha retificados para obter alta precisão de posicionamento, conforme Figura 12 (THK, 2016).

Figura 12 – Fuso de esferas retificado



Fonte: thk.com, 2016

- **Fuso de esferas de precisão / eixo estriado** - Uma unidade que integra acionamento e guiamento que tem os canais do fuso de esferas e canais do eixo estriado que se cruzam em um único eixo. As castanhas do fuso de esferas e do eixo estriado têm mancais de suporte diretamente embutidos na parte externa das castanhas, conforme Figura 13 (THK, 2016).

Figura 13 – Fuso de esferas retificado



Fonte: thk.com, 2016

- **Fuso de esferas laminado** – Modelo de fuso de esferas que obtém folga zero por meio de um método de pré-carga constante, esse sistema fica na parte central da castanha funcionando como se fosse uma estrutura de mola, conforme Figura 14 (THK, 2016).

Figura 14 – Fuso de esferas laminado

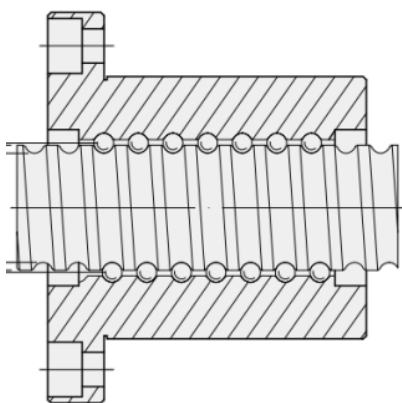


Fonte: thk.com, 2016

Os fusos de esferas podem alcançar uma eficiência maior que 90% por causa do contato das esferas entre o parafuso e a castanha. Portanto, a exigência de torque é de aproximadamente um terço comparado com os fusos convencionais (THK, 2016). A Figura 15 mostra um corte do fuso de esferas onde a eficiência mecânica dos fusos de esferas é muito maior que as convencionais. Através deste sistema de acionamento se obtém alta eficiência, no qual a esfera realiza um movimento helicoidal entre o eixo do fuso e a castanha com baixo atrito. Comparado com fuso

trapezoidal ou rosca quadrada convencional, esse produto necessita de um terço do torque de transmissão necessário, tornando-o mais adequado para economizar a energia de acionamento, conforme mostrado na Figura 16 (THK, 2016).

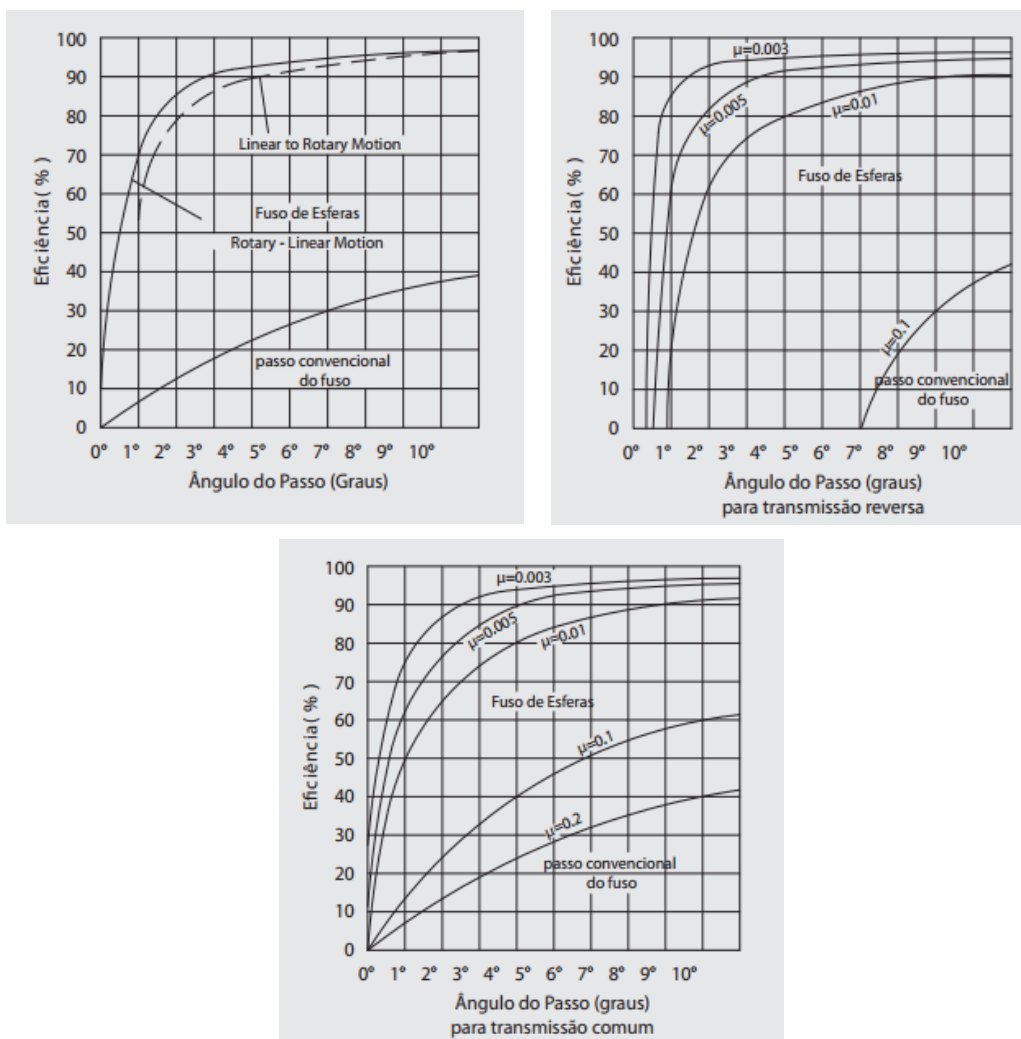
Figura 15 – Corte fuso de esferas laminado



Fonte: [mectrol.com.br](http://mectrol.com.br), 2016



Figura 16 – Eficiência mecânica dos Fusos de Esferas



Fonte: mectrol.com.br, 2016

Neste trabalho utiliza-se os fusos de esferas laminado. Os detalhes técnicos estão no item 1 do Apêndice A.

### 3.5 Acoplamento dos Fusos e Guias

Os acoplamentos dos fusos e dos guias são suportes fabricados em polímero rígido em formato próprio para fixação dos fusos e dos rolamentos que suportam os fusos.

Os detalhes construtivos dos acoplamentos utilizados neste trabalho estão detalhados no item 2 do Apêndice A.

### 3.6 Mesa de Trabalho

Convenciona-se por Mesa de Trabalho, ou Mesa de Sacrício, o local da máquina onde se fixa o material a ser usinado. A composição, o formato, os tipos de mesas disponíveis e a escolha dependerá do trabalho que será executado. Assim existem variações de mesas que visam atender de maneira adequada o trabalho de usinagem tais como fresar, cortar e acabamento. Dentre os vários tipos, pode-se destacar a Mesa Plana, *T-Slot*, *Pod and Rail* e a Vácuo Universal (NEMI, 2016).

A Mesa Plana é a composição mais básica utilizada em máquinas ferramenta, consistindo de uma base plana de material metálico ou madeira. A *T-Slot* é um tipo de mesa geralmente feita de alumínio extrudido. Suas ranhuras permitem diferentes opções de fixação facilitando muito o trabalho que será realizado. A *Pod and Rail* é um tipo de mesa onde as laterais geralmente são livres e a fixação da peça trabalhada é feita por suportação específica, de acordo com o material e peça que será fabricada. Comumente aplicada em equipamentos onde se deseja uma grande produção de peças, este tipo de mesa geralmente é composto de vários trilhos metálicos que permitam diversas combinações de suportação diferentes. Já a Vácuo Universal é uma mesa de vácuo com furos espaçados pela superfície onde uma bomba a vácuo irá fixar o material a ser usinado na superfície da mesa (NEMI, 2016).

Neste projeto a mesa de trabalho é do tipo Mesa Plana produzida em madeira prensada tipo MDF.

### 3.7 Acoplamentos dos motores

O acoplamento é um dispositivo mecânico flexível utilizado para interligar o eixo do motor ao fuso de esferas, compensando desalinhamentos, com a intensão de proporcionar estabilidade dinâmica a transferindo o mínimo de vibrações possível. Na Figura 17 tem-se um exemplo de acoplamento flexível (JDRELETRONICOS, 2016).

Figura 17 - Acoplamento flexível motor de passo



Fonte: [www.jdreletronicos.com.br](http://www.jdreletronicos.com.br), 2016

### 3.8 Softwares

O desenvolvimento de software não é uma atividade trivial. O grau de incerteza das partes interessadas é alto e a forma artesanal na qual sempre foi tratada ainda persiste em um significativo número de organizações. Desde a década de 1980, com o avanço da microeletrônica, os softwares tornaram-se fatores de maiores preocupações na medida em que seu custo de desenvolvimento superava o do hardware empregado, conforme afirma Mendes (2002). A dependência em escala crescente deixou ainda mais patente o ambiente caótico que envolve o desenvolvimento, levando ao fracasso um número significativo de projetos.

A solução encontrada para melhorar a qualidade e reduzir o custo de produção foi a introdução da disciplina de desenvolvimento conhecida como engenharia de software. De acordo com Carvalho (2001), a engenharia de software reúne metodologias, que por sua vez seguem métodos que se utilizam de ferramentas automatizadas para englobar as principais atividades do processo de produção de software. Os benefícios das metodologias no processo de desenvolvimento não aparentam ser motivos de discórdia, porém os métodos instituídos é objeto frequente de questionamento, resultando em novas metodologias cujo aperfeiçoamento, contribui, de alguma forma, para a evolução da engenharia de software de forma geral.

Para um controle total da máquina CNC, é necessária a utilização de uma interface para que o operador possa dispor de todos os comandos da fresadora a partir de um computador. Para obter esta interface necessita-se de softwares que

façam essa ligação computador/hardware. Os softwares têm como responsabilidade a confecção do desenho a ser usinado, e, a partir deste, gerar o código G e enviar o arquivo para o interpretador na memória do Arduino. No mercado atual existem diversos softwares para este fim, sendo alguns gratuitos.

### **3.8.1 SolidWorks**

O SolidWorks é um software CAD (computer aided design) cuja tradução literal “desenho assistido por computador”. Ele se baseia em computação paramétrica com o objetivo de criar corpos tridimensionais a partir de formas geométricas elementares, os esboços. No ambiente do programa, a criação de um sólido ou superfície necessariamente começa com a definição de um plano que serve como referencial para a criação um esboço 2D ou 3D. A topologia define o posicionamento no espaço e o esboço define a forma do elemento criado. O SolidWorks oferece condições para o processo de desenvolvimento de produto em 3D – projeto, simulação, comunicação e gerenciamento de dados em um ambiente integrado e relativamente fácil de usar (WIKIU, 2016).

Desenhos atribuídos a engenharia são utilizados desde tempos remotos como um meio de definir um produto graficamente antes que ele seja confeccionado. Anteriormente, o processo de construir um desenho envolvia ferramentas como: lápis, canetas nanquim, esquadros, réguas, etc. e demandava de muito tempo. A habilidade de construir esses desenhos em um computador trouxe uma revolução, porém os princípios e fundamentos do desenho aplicado à engenharia continuam os mesmos. Com este programa foram feitos os desenhos, projetos e detalhamentos de peças mecânicas que foram produzidas para a CNC deste trabalho (ver Apêndice A).

### **3.8.2 Software CAD - EAGLE**

O EAGLE (Easy Applicable Graphical Layout Editor) é um software de projeto de placas de circuito impresso (PCI), sob medida, desenvolvido para atender as necessidades dos projetistas, engenheiros, fabricantes e estudantes. Ele abrange todas as etapas do ciclo de desenvolvimento de uma PCI, desde a concepção do esquemático do circuito até a geração dos arquivos gerber para fabricação da placa.

Além de possuir uma vasta biblioteca de componentes prontos, o programa também permite que o usuário crie novos componentes ou altere os componentes existentes.

O EAGLE possui três módulos que facilitam o desenho do circuito: *Schematic*, *Layout* e *Autorouter*. O módulo *Schematic* faz o desenho esquemático do circuito impresso e verifica a integridade das conexões elétricas e a correlação do circuito esquemático com o *layout* da placa por meio de modelos pré-configurados. O módulo *Layout* define o modelo e a posição dos componentes eletrônicos no layout da PCI. O módulo *Autorouter* possui um algoritmo que desenha as trilhas dos circuitos, as trilhas são desenhadas de acordo com as especificações dadas como a largura mínima e máxima e também o número de camadas da placa de circuito impresso.

A simplicidade do software proporciona uma rápida aprendizagem, mesmo para novos projetistas de PCI ou estudantes do assunto. O conceito aberto do Eagle, mesmo sendo um software comercial, e de seus recursos de projeto, bem como as suas bibliotecas e encapsulamentos disponíveis de componentes extensas e abertas, facilitam o processo de desenvolvimento das placas de circuito (EMBARCADOS, 2016).

A flexibilidade do software EAGLE também é responsável por proporcionar uma grande gama de recursos e compatibilidade de fluxo de trabalho, o que é demonstrado pelas centenas de extensões abertas e disponíveis para todos os usuários e seu formato de arquivo XML estruturado. Com o módulo ULP, *User Language Program*, é possível programar em linguagem C integrado com os dados provenientes do EAGLE, com essa combinação inúmeras funções podem ser criadas, e uma delas é a criação de um CAM (*Computer-Aided Manufacturing*). As ULPs geradas permitem aos usuários exportar um arquivo IDF da placa de circuito. Este ficheiro é compatível com a maioria dos programas de desenho mecânico.

### 3.8.3 Código “G”

Conforme Sousa (1998), a linguagem de programação mais usada nas máquinas-ferramenta é conhecida como o código G de programação. Este código foi desenvolvido para traduzir as informações numéricas de usinagem da peça em comandos que pudessem ser lidos e processados automaticamente pelas máquinas-ferramenta. Não há um padrão rígido fechado seguido por todos os fabricantes para os diversos comandos do código G. Existe um padrão para o código G de

programação de máquinas-ferramenta estabelecido pelo Instituto Alemão de Padronização desde o foral da década de 1960, conhecido como DIN 66025. Este contém somente recomendações que procuram padronizar não apenas o significado dos diversos comandos como também a estrutura que se deve adotar nos programas em código G.

Entretanto, os comandos de sistemas CNC de fabricantes diferentes, apesar de serem baseados no padrão DIN 66025, não seguem o mesmo padrão, aproveitando-se principalmente do fato deste permitir uma certa flexibilidade na programação, uma vez que há códigos que não receberam significados específicos. Desta forma cada fabricante procura criar comandos que facilitem a programação em seu sistema específico. São definidas funções mais ou menos elaboradas, dependendo da sofisticação de cada sistema de controle particular.

Com o objetivo de facilitar a programação, e eventuais manutenções da ferramenta, uma linguagem simbólica de programação deve ser criada com o intuito de representar da forma mais compacta possível as informações de usinagem por meio de símbolos, seguindo-se regras fixas estabelecidas, e ao mesmo tempo deve possibilitar a leitura e interpretação sem maiores dificuldades por um operador humano (SOUSA, 1998).

Quando criada, a intenção dessa linguagem era que não fosse necessária a contratação de especialistas para o trabalho de programação. Ela deveria ser facilmente aprendida e se manter simples o suficiente para que o engenheiro de planejamento, com sua preocupação voltada principalmente para o processo a ser realizado na máquina pudesse aprendê-la sem maiores dificuldades. Atualmente, um programa em código G é gerado automaticamente por muitos programas CAD/CAM.

Um programa em código G é formado por linhas de comando contendo informações de usinagem na forma de frases CNC. Essas frases (ou comandos) são compostas de palavras CNC, as quais por sua vez são compostas em geral por um código de endereçamento alfanumérico. Esse endereço indica ao computador o tipo de informação que se segue. Cada letra de endereçamento (X, Y, Z, G, M, etc) informa ao controle o tipo de palavra que se está programando, e o número informa o valor desta palavra. Por exemplo, a instrução X -0.5 sinaliza ao controle que -0.5 é um valor de coordenada que se refere ao eixo X (SOUSA, 1998).

As instruções são lidas, interpretadas e executadas na ordem em que aparecem na programação. Porém, mesmo executando o programa comando a comando, o sistema de controle do CNC está constantemente lendo o comando seguinte programado, a fim de posicionar corretamente a ferramenta para a execução do comando a seguir. Essa tarefa é executada pelo *look-ahead buffer* (ou memória de trabalho) do controle. Essa particularidade do sistema de controle evita que haja uma parada completa da máquina a cada novo comando, assegurando uma movimentação suave da ferramenta na transição de um comando para outro. Essa parada seria extremamente prejudicial à qualidade do acabamento da peça obra e influenciaria diretamente no tempo de execução do trabalho (SOUSA, 1998).

Há ainda comandos como a compensação do raio da ferramenta nos quais esta leitura do comando seguinte é fundamental para que o controle possa calcular o ponto de finalização correto do comando atual. Quando a compensação do raio da ferramenta é utilizada em centros de torneamento, por exemplo, deve-se sempre posicionar o raio da ferramenta perpendicularmente tanto à superfície atual quanto à seguinte. Na compensação automática, o controle se encarrega de determinar o ponto correto para a finalização do comando atual a partir desta leitura do próximo comando. Assim, o ponto final do comando atual será calculado de forma diferente quando o próximo comando for um movimento circular tangente à superfície, sendo usinada e quando for um movimento linear que intercepta a direção atual de movimento, por exemplo. Uma vez dado o comando de compensação, a ferramenta será deslocada do valor correspondente no próximo movimento programado. Da mesma forma, quando a compensação é cancelada, a posição da ferramenta volta à sua posição sem compensação apenas no movimento seguinte programado.

Existem alguns comandos do código G com características especiais, eles permanecem ativos uma vez que são chamados. Comandos com essa característica são denominados modais. Desta forma, se o movimento atual da máquina for do mesmo tipo do movimento anterior (uma interpolação linear ou uma mesma velocidade de corte da ferramenta, por exemplo), não é necessário que o código correspondente seja repetido. Um comando modal só é desativado se for programado ou um comando de desativação específico ou um comando conflitante (uma interpolação linear, por exemplo, é cancelada se for programado um avanço rápido da ferramenta, para posicionamento). Outros comandos somente permanecem ativos na

linha de comando em que aparecem e são, portanto, conhecidos como comandos não modais. Se houver dúvida da necessidade de uma programação com comando redundante, não há problema algum em incluí-lo na programação. Com essa atitude pode-se garantir com uma maior segurança que a máquina-ferramenta ira se comportar conforme o esperado. Caso se trate realmente de um comando redundante, o controle irá simplesmente ignorá-lo (SOUSA, 1998).

Conforme citado anteriormente, as linhas de comando em um programa em código G são compostas por frases (ou comandos) CNC, estas são formadas por códigos de endereçamento alfanuméricos, ou palavras CNC. Essas palavras são constituídas por um endereço alfabético (letras de A a Z), seguido por um valor numérico, precedido ou não pelos sinais '+' ou '-'. Os códigos caracterizados pelas letras G (também conhecidos como funções preparatórias) e M (comumente chamados de funções miscelâneas) estão entre os mais importantes códigos CNC comumente utilizados (SOUSA, 1998).

Já as funções preparatórias, são caracterizadas pela letra de endereçamento G. São responsáveis por estabelecer, por meio do programa CNC, o modo de operação do sistema. As funções preparatórias são utilizadas para a seleção do sistema de coordenadas a ser utilizado, para a seleção do tipo de movimento a ser desenvolvido (se de posicionamento ou de interpolação), para a aplicação de compensações e para a seleção de sequências pré-programadas, entre outras. Isto é, uma função preparatória informa ao sistema de controle como interpretar códigos a ele apresentado. Por exemplo, uma linha de comando contendo a instrução G00 X10. Y-8. Z-0.5 indica que as coordenadas apresentadas definem o ponto para onde a ferramenta deverá ser deslocada (X10. Y-B. Z-0.5) segundo um posicionamento rápido (G00).

Segundo Sousa (1998), as funções miscelâneas são caracterizadas pela letra de endereçamento M e pode-se dizer que funcionam como interruptores programáveis. Elas controlam funções auxiliares como o liga/desliga do fluido de corte, o liga/desliga da rotação da ferramenta, a troca de ferramentas, paradas opcionais, entre outras.

A Tabela 2 abaixo indica os principais códigos de endereçamento que são utilizados nos sistemas CNC e seus respectivos significados. Um mesmo endereço pode ter significados diferentes, dependendo da função preparatória utilizada.



Tabela 2: Principais comandos Código G para controle da CNC.

<b>Função</b>	<b>Endereço</b>	<b>Significado</b>
Número do programa	O	Número do programa
Número de sequência	N	Numeração das linhas do programa
Função preparatória	G	Especifica um tipo de movimento (linear, arco, etc.)
Palavra referente à dimensão	X, Y, Z, U, V, W, A, B, C	Comando para o movimento segundo o eixo coordenado especificado
	I, J, K	Coordenada do centro do arco
	R	Raio do arco
Função velocidade de corte	F	Taxa de velocidade por minuto Taxa de velocidade por revolução
Função velocidade de rotação	S	Velocidade de rotação
Função para escolha da ferramenta	T	Número da ferramenta
Função auxiliar	M	Controle liga/desliga na máquina-ferramenta
Designação do número do programa	P	Número do subprograma
Número de repetições	P	Número de repetições do subprograma

Fonte: Sousa (1998)

Sousa (1998) afirma que a sintaxe de programas CNC especifica o formato que esses programas devem seguir para que os comandos existentes sejam corretamente interpretados pelo sistema de controle. A sintaxe a ser seguida por programas CNC varia entre os diferentes fabricantes dos equipamentos.

Considerando que cada linha de comando é um bloco de informações, um programa para CNC consiste em um grupo de blocos que determinam uma dada sequência de usinagem. Cada programa é especificado por um número de programa, geralmente composto por 4 dígitos decimais, permitindo uma numeração de 0001 a 9999. Cada bloco de um programa CNC é discriminado por um número chamado número de sequência ou número de bloco, que é normalmente precedido pela letra de endereçamento N. Este número não deve exceder 5 dígitos (pode ser 1 a 99999), e é conveniente numerar blocos sucessivos em uma sequência crescente, mas não

necessariamente igualmente espaçados. Por exemplo, pode-se identificar blocos sucessivos como N10... N14... N23.... Esta opção de pular alguns números na numeração dos blocos é um recurso comumente utilizado para facilitar a inclusão de linhas entre as já existentes, caso se verifique posteriormente que é preciso incluir códigos adicionais ao programa. Normalmente, um programa CNC passa por três fases distintas ao longo de sua vida útil, a saber as fases de criação, de otimização e de manutenção. Costumeiramente, na criação de um programa novo os números de blocos são uniformemente espaçados. Desta forma, inclusões posteriores que se fizerem necessárias na fase de otimização podem ser facilmente reconhecidas quando da manutenção do programa.

Os blocos de informações se iniciam com um número de sequência e são finalizados por um código de final de bloco.

#### **3.8.4 Universal G-Code Sender**

O Universal G-Code Sender (UCS) é uma plataforma de código livre baseada em Java, compatível com GRBL, responsável por emitir o G-Code para o microcontrolador a fim de testar as instalações.

Dados de movimentação axial são inseridos manualmente no programa e os motores movimentam conforme o desejado. Posteriormente, quando os motores estiverem testados e corretamente fixados aos eixos, o programa “GRBL Controller” tomará o lugar do “Universal G-Code Sender”, pois, ele receberá os dados de coordenadas do programa CAD utilizado para desenvolver o *layout* das placas de circuito impresso (EAGLE) e automaticamente enviará eles corretamente interpretados para o GRBL que está instalado no microcontrolador.

#### **3.8.5 CAM**

Conforme Pinto (2005), os softwares CAM (*Computer-Aided Manufacturing*), possibilitam a partir de um desenho gerar uma linguagem que as máquinas compreendam para gerar as peças. Permitem-nos, através das máquinas de comando numérico – CNC, a fabricação de peças em quantidades incriveis e com precisões admiráveis.

Pode-se definir CAM como auxílio via computador da preparação da manufatura, representando as tecnologias usadas na produção, dizendo não só a respeito da automação da manufatura, como: CNC (Comando Numérico Computorizado), CLP (Controle Lógico Programável), coletores de dados (DNC), como também a tomada de decisão, plano operacional, etc.

O termo CAM, apesar de toda esta abrangência, às vezes, ainda é sinónimo da programação CNC, conceito que ficou muito difundido com a sigla CAD/CAM, que representa módulos de programação CNC em sistemas CAM.

Os sistemas CNC normalmente são utilizados para o cálculo do caminho da ferramenta, a partir da representação geométrica da peça disponível na forma computacional. Outra possibilidade é a simulação final do programa, onde pode-se visualizar a maquinação. Com essas duas funções citadas é possível obter com boa precisão do tempo principal da operação, pois o seu cálculo é determinístico, dependendo dos movimentos da máquina.

Os comandos de um programa CNC são os responsáveis pelo acionamento de uma máquina CNC, informando todas as etapas de fabricação de uma determinada operação do conjunto. Uma linha de comando de um programa CNC pode conter informações sobre o movimento da ferramenta (movimento rápido, interpolação, etc.), informações tecnológicas (velocidade, avanço, etc.), ou informações que acionam funções auxiliares (ligar refrigerante, eixo da árvore, etc.). A obtenção dessas informações depende sobre tudo dos dados da peça a ser maquinada, considerando-se as limitações da máquina, as características do CNC e da ferramenta.

Atualmente existem três métodos mais utilizados para programar as máquinas CNC:

#### 3.8.5.1 Programação direta na máquina – MID (Material Data Input)

Método onde o programador, com a geometria à disposição, define o percurso da ferramenta e transforma-o em linguagem da máquina. É utilizado em eventuais modificações, para optimização de programas na máquina, e na programação de peças relativamente simples em oficinas de fabricação.

### 3.8.5.2 Programação manual

Metodologia onde o programador interpreta o desenho da peça, calcula os pontos da trajetória da ferramenta, preenchendo um formulário que poderá ser digitado na máquina, ou enviado diretamente para o operador da máquina, que também o digitará diretamente na máquina. Esse tipo de programação tem a facilidade da utilização de ciclos automáticos, sendo de fácil execução para geometrias não muito complexas.

### 3.8.5.3 Programação auxiliada por computador

O mais tradicional método de programação auxiliada por computador é o que utiliza a linguagem APT (Automatically Programmed Tool). A função do programador, utilizando esse método, é escrever o programa fonte, onde define a geometria da peça e/ou o percurso da ferramenta, via definição de forma padronizada pela linguagem de entes geométricos e funções auxiliares. Esse programa fonte é trabalhado por um processador, que realiza os cálculos geométricos, determina o contorno da ferramenta e gera um arquivo neutro (CLDATA ou CLFILE) independente da máquina.

Posteriormente esse arquivo é pós-processado, gerando um arquivo específico para o comando da máquina que está sendo operada.

Um segundo método é largamente executado pelos modernos sistemas CAD/CAM, onde a entrada é o desenho da peça ou o percurso da ferramenta. Interativamente, no módulo CAM do sistema, inicia-se a programação CNC que gerará um arquivo neutro.

Num terceiro novo conceito de programação CNC, conhecido na Alemanha como WOP (Wertattsortierte Programminerung), o utilizador inicia a programação a partir de um sistema CAD e trabalha interativamente, definindo os parâmetros geométricos, de ferramentas e tecnológicos, através de ícones gráficos. Gera-se também um arquivo neutro, que posteriormente será pós-processado.

### **3.8.6 Firmware GRBL**

O GRBL é um firmware gratuito, de código aberto, muito conhecido por ser concreto e bem desenvolvido. Ele é utilizado como um excelente interpretador de G-Code, com capacidade de processar junto dos tradicionais eixos, o controle de um spindle e flúido de usinagem.

Em 2009, Simen Svalle Skogsrud escreveu e lançou as primeiras versões do GRBL inspirado pelo Arduino G-Code Interpreter, de Mike Ellery. Foi concebido com o objetivo de simplificar a comunicação do hardware utilizado para controle de motores e os computadores mais modernos, que deixaram de possuir portas seriais, facilitando a transferência do código G.

Ele é escrito em linguagem “C” otimizado, utilizando todas as características inteligentes dos chips Atmega do Arduino para conseguir sincronização precisa e operação assíncrona. Ele é capaz de manter mais de 30kHz taxa de passo e oferece um excelente fluxo de pulsos de controle.

GRBL é largamente utilizado em máquinas de três eixos, não oferecendo suporte a eixo de rotação, apenas X, Y e Z. Apesar disto, movimentos lineares, circulares e helicoidais são totalmente suportados.

## **3.9 Componentes**

### **3.9.1 Motores de passo**

O motor elétrico é um equipamento cuja principal função é converter energia elétrica em energia mecânica. É o tipo mais utilizado de todos os tipos de motores (combustão, vapor, etc.), pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica – baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade no acionamento – com sua construção simples, custo baixo, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e o melhor rendimento, quando comparado aos outros tipos.

Quanto ao funcionamento do motor elétrico, ele tem por base os princípios do eletromagnetismo onde condutores posicionados em meio a um campo magnético variante e atravessados por corrente elétrica, sofrem a ação de uma força mecânica, essa força é chamada de torque (SANTOS, 2016).

O motor elétrico surgiu em 1821 através de estudos do cientista Michael Faraday e evoluiu ao longo do tempo com o objetivo de atender a diferentes aplicações que surgiram principalmente com a evolução industrial. A evolução dos motores elétricos ocorreu a partir do motor de corrente contínua que deu origem ao motor de corrente alternada que, por sua vez, segmentou-se em síncrono ou assíncrono, monofásico ou trifásico.

Com a modernização das máquinas e surgimento de diversas aplicações, surgiu a necessidade de controlar com exatidão a posição angular do eixo dos motores. Assim, em 1936, o engenheiro francês Marius Lavet desenvolveu um novo modelo de motor, o motor de passo. Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem sinal elétrico (digital) em torque, deslocando com movimentos precisos (passos) o eixo. Os motores de passo são divididos em três tipos: relutância variável, magneto permanente e híbridos.

A Figura 18 representa o motor de passo utilizado para realizar os movimentos dos fusos da CNC. Trata-se de um motor de passo híbrido (FITZGERALD, 2006).

Figura 18 - Motor de Passo Híbrido Utilizado no Trabalho



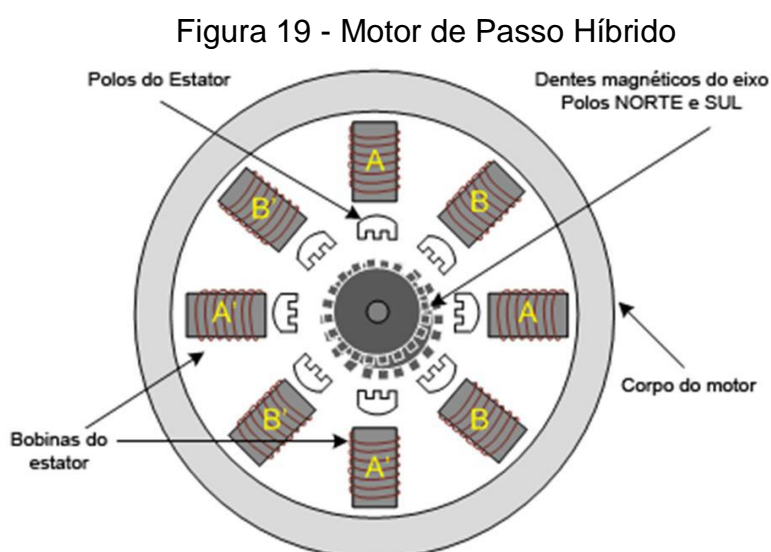
Fonte: Akiyama Automação, 2016

O motor de passo de relutância variável tem o rotor e o estator com os pólos salientes e as bobinas de excitação do campo magnético instaladas no estator, conforme ilustrado na Figura 19. Na maioria das construções o rotor é constituído de ferro doce e o estator de metal férreo laminado em finas chapas. Quando as bobinas referentes a certa fase é energizada, o rotor gira afim de encontrar a posição em que a relutância é a menor possível. Quando os pólos do rotor se alinham com os do estator, pode-se dizer que o motor rotacionou um passo. Como os pólos são salientes, o mesmo possui uma grande quantidade de alinhamentos possíveis entre os pólos,

principal característica na determinação da precisão dos motores de passo. Quanto mais alinhamentos possíveis o motor tiver entre os pólos, mais preciso ele será.

Já o motor de passo de ímã permanente, ou magneto permanente, não possui pólos salientes no estator, diferentemente do motor de passo de relutância variável. Uma de suas características é que ele possui uma quantidade menor de alinhamentos entre os pólos do rotor e do estator, se comparado ao motor de relutância variável, tendo assim uma precisão menor. Apesar dessa desvantagem, o motor de passo de ímã permanente se mostra bastante eficiente quando se leva em consideração o conjugado. Nesse modelo de motor o rotor tende a girar até que ambos os campos magnéticos se alinhem. Como tanto o rotor quanto o estator possuem campo magnético, esses campos se somam, dando um conjugado maior se comparado com os motores de passo de relutância variável. Mesmo quando a excitação do estator for removida, o rotor permanecerá na mesma posição devido a interação magnética com ímã permanente, sendo esta característica um diferencial em relação aos motores de relutância variável que não possuem excitação no estator e que quando o motor é desligado, o rotor gira livremente (FEIS, 2016).

Com a mecânica sofisticada do motor de relutância variável e com a potência do ímã permanente no eixo criou-se o motor de passos híbrido com um melhor desempenho com relação ao conjugado, velocidade e resolução de passo. Ângulos de passo típico de motores híbridos estão entre  $3,6^\circ$  a  $0,9^\circ$  (100-400 passos por volta).

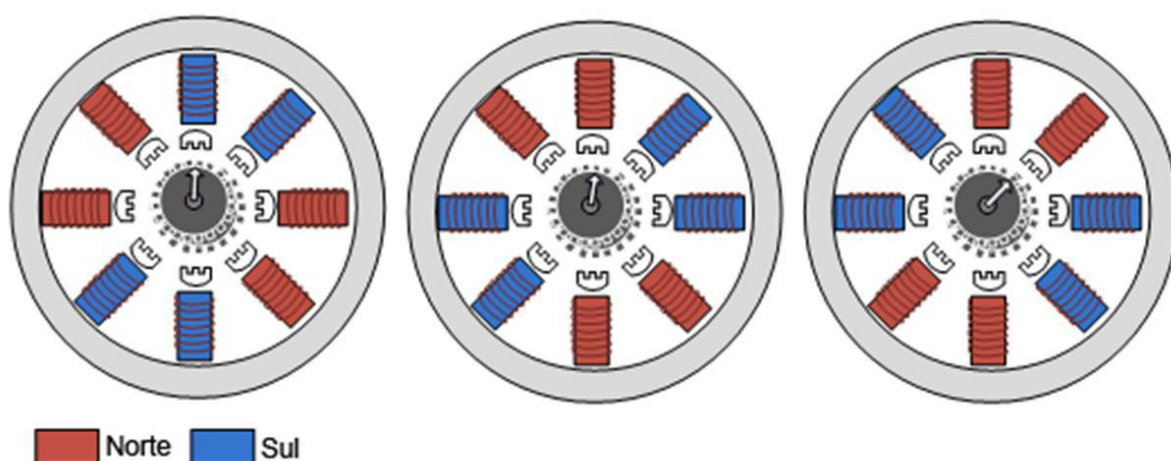


Perceba que os polos NORTE e SUL  
do motor são separados

Fonte: [www.feis.unesp.br](http://www.feis.unesp.br), 2016

Fisicamente o eixo do motor é construído com dois grupos de dentes, um com o PÓLO SUL saliente e o outro com o PÓLO NORTE, de modo que os dentes fiquem alternados. De forma semelhante aos tipos anteriores, as bobinas devem ser ligadas em sequência para o eixo poder girar, conforme ilustra a Figura 20 abaixo:

Figura 20 – Funcionamento do motor de passo híbrido



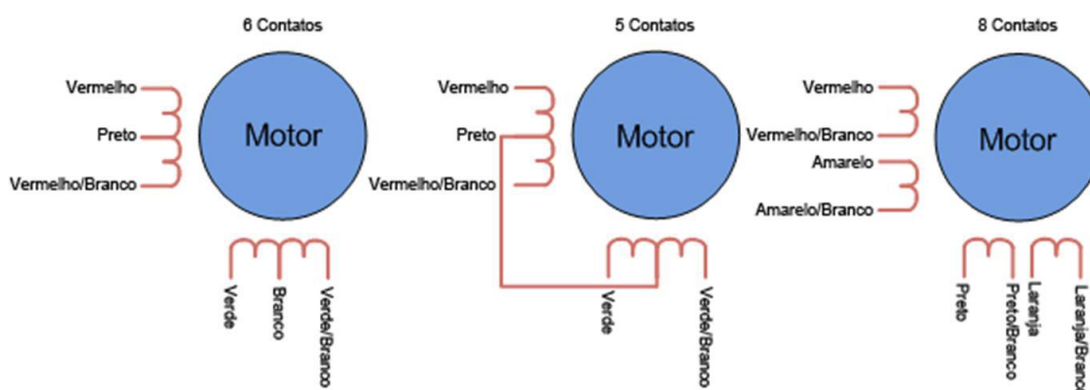
Fonte: [www.feis.unesp.br](http://www.feis.unesp.br), 2016

Os motores híbridos, geralmente, possuem duas fases, porém, podem ser encontrados com uma quantidade maior de fases em sua forma construtiva. Assim, é comum classifica-los como unipolares ou bipolares.

Nos motores de passo híbridos unipolares são usados dois enrolamentos por fase e possuem um contato em comum, resultando em cinco, seis ou oito conexões. Nos modelos onde há separação na conexão comum dos dois pólos, são seis conexões externas e nos modelos onde a conexão comum é soldada internamente, são cinco conexões externas. Nos modelos de oito conexões externas a conexão em comum dos dois pólos é separada para facilitar a ligação em série ou paralela das bobinas. Os unipolares de oito conexões facilitam o projeto por não necessitar de ligação reversa nos pólos. Já os modelos com cinco ou seis conexões têm as bobinas ligadas em série e necessitam da capacidade de reverter as ligações entre as bobinas. A Figura 21 ilustra o motor unipolar de duas fases e suas possíveis ligações (FEIS, 2016).



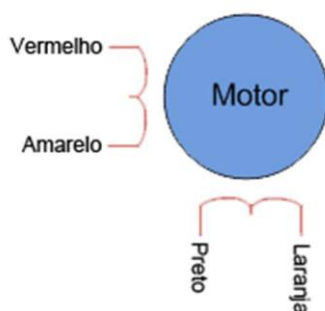
Figura 21 - Motor de passo híbrido unipolar



Fonte: [www.feis.unesp.br](http://www.feis.unesp.br), 2016

O motor de passo bipolar usa uma ligação por pólo e através do circuito de controle possa reverter o sentido da corrente para acionar as bobinas de acordo com a necessidade. A Figura 22 ilustra o motor bipolar de duas fases e suas ligações (FEIS, 2016).

Figura 22 - Motor de passo híbrido bipolar



Fonte: [www.feis.unesp.br](http://www.feis.unesp.br), 2016

### 3.9.2 Motor *Spindle* (Tupia)

Os motores spindle são motores de altas velocidades, ou seja, necessita de altas frequências. São utilizados principalmente em máquinas de usinagem manuais e CNC, polimento, etc. Estes motores variam de 6.000RPM até 40.000RPM, dependendo do fabricante e da aplicação. Geralmente estes motores possuem alta velocidade com baixo torque. A refrigeração pode ser realizada através da ventoinha

traseira acoplada no eixo (autoventilado), ar comprimido, ventoinha elétrica ou por meio líquido. A Figura 23 ilustra um modelo de motor *spindle* (MOTORSYSTEM, 2016).

Figura 23 - Motor *spindle* (tupia) Makita



Fonte: [www.ledmaisled.com.br](http://www.ledmaisled.com.br), 2016

### 3.10 Sensores Fim de Curso

Uma chave ou sensor fim de curso é um termo genérico usado para referir-se a um comutador elétrico que é capaz de ser atuado por uma força física.

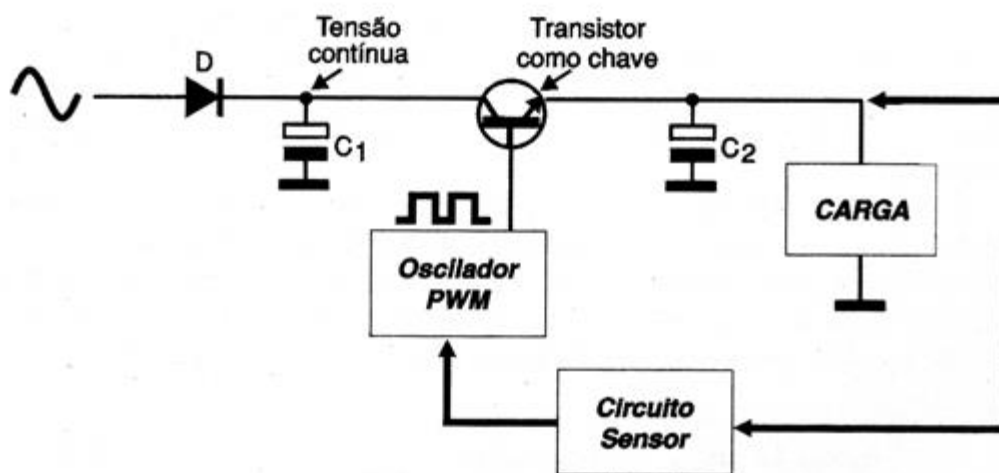
Este equipamento é muito comum devido ao seu pequeno custo e extrema durabilidade, normalmente maior que 1 milhão de ciclos e acima de 10 milhões de ciclos para modelos destinados a aplicações pesadas.

### 3.11 Fonte de alimentação

As fontes chaveadas, comutadas ou do inglês SMPS (Switched Mode Power Supply) são fontes que controlam a tensão numa carga abrindo e fechando um circuito comutador transistorizado de modo a manter pelo tempo de abertura e fechamento deste circuito a tensão desejada. Neste circuito há um transistor que funciona como uma chave controlando a tensão aplicada no circuito de carga.

Este circuito geralmente está ligado a um oscilador que gera um sinal retangular com largura de pulso controlada por um circuito sensor. A Figura 24 ilustra por diagramas de blocos um exemplo construtivo de uma fonte chaveada (NEWTONCBRAGA, 2016).

Figura 24 - Fonte chaveada – diagrama de blocos



Fonte: [www.newtoncbraga.com.br](http://www.newtoncbraga.com.br), 2016

Se o tempo de condução do transistor for igual ao tempo em que ele permanece desligado, ou seja, se ele operar com um ciclo ativo de 50%, na média a tensão aplicada na carga será de 50% da tensão dos pulsos.

Ocorre então que durante o tempo em que a corrente demora para ir de zero até o máximo e vice-versa, o transistor passa por um estado "intermediário" em que energia é transformada em calor. Isso significa que mesmo as fontes comutadas geram calor, mas, ele é muitas vezes menor que as fontes comuns lineares.

Estas fontes se caracterizam pelo seu alto rendimento, não necessitando de grandes dissipadores de calor e chegando a fornecer toda energia que os circuitos de das cargas precisam para o funcionamento normal. A Figura 25 destaca uma fonte chaveada comercial (NEWTONCBRAGA, 2016).

Figura 25 - Fonte chaveada – diagrama de blocos



Fonte: [www.newtoncbraga.com.br](http://www.newtoncbraga.com.br), 2016

### 3.12 Placa de Potência

A placa de potência é constituída do conjunto de controle, supervisão e acionamento dos motores e supervisão do funcionamento da CNC.

#### 3.12.1 Arduino

O Arduino é uma plataforma de computação física de código aberto, ou livre, para prototipação eletrônica com auxílio de software. A plataforma é composta por hardware (placa controladora) e software (ambiente de desenvolvimento), ambos de código aberto com grande flexibilidade, fácil utilização e muito acessível.

O projeto surgiu em 2005 quando estudantes italianos de um curso de Design de Interação na Itália, entre eles Massimo Banzi, criaram uma alternativa ao hardware do curso, que era caro e complexo para os estudantes. Em seguida, o projeto original foi refinado por pesquisadores para se tornar mais leve, mais acessível e mais barato.

O software da plataforma Arduino é chamado de *Integrated Development Environment* (IDE), ele é gratuito e obtido em diferentes sites na internet. O IDE foi desenvolvido em Java com base na linguagem de programação *Processing*. Além de possuir código aberto, a plataforma possui uma grande gama de softwares utilizados para aplicações comuns.

O hardware do Arduino é composto por uma pequena placa com um microcontrolador Atmel de 8 bits, especialmente os *ATmega8*. Além disso, a placa possui conectores padrão expostos para conexão de módulos adicionais, conhecidos como *shields*, e pinos de entradas e saídas, além dos conectores de alimentação externa e comunicação (USB e etc.). A Figura 26 ilustra uma placa de Arduino UNO.

Figura 26 – Placa Arduino UNO



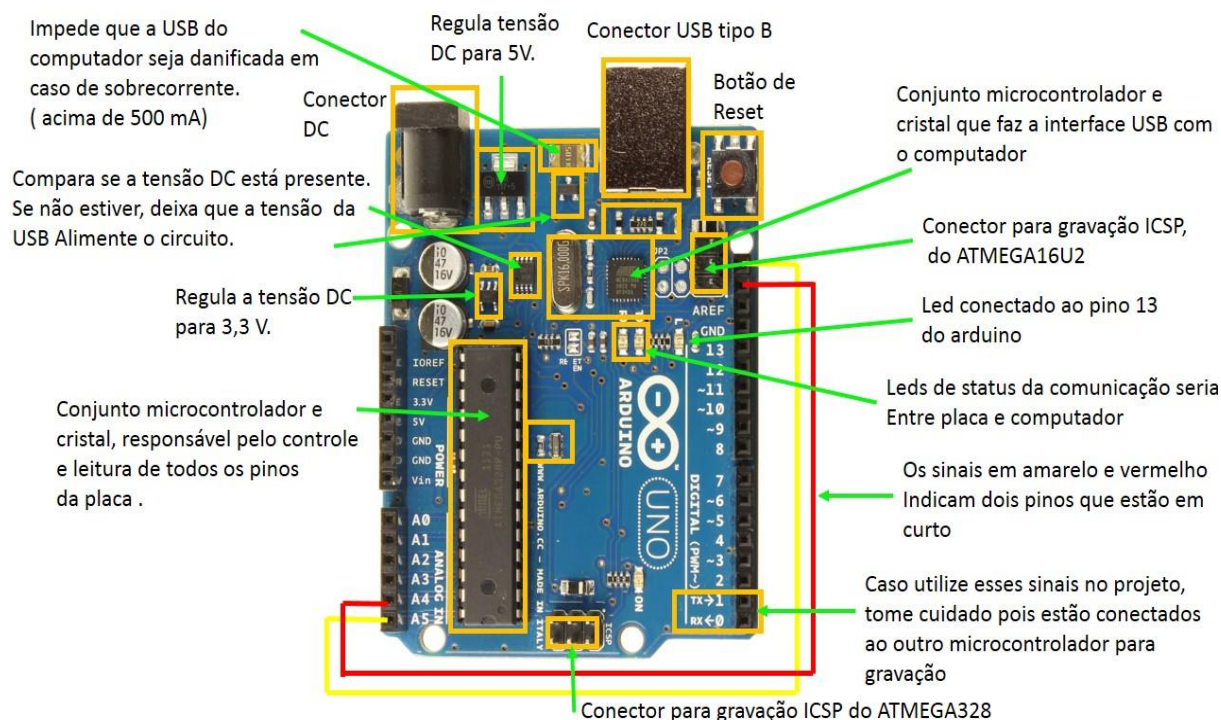
Fonte: [www.filipeflop.com](http://www.filipeflop.com), 2016

O Arduino Uno é uma versão do hardware baseado no microcontrolador ATmega328. Ele tem 14 pinos de entrada/saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação, uma conexão ICSP e um botão de reset. O Uno contém todos os componentes necessários para suportar o microcontrolador, e realizar a conexão com um computador pela porta USB. A alimentação da placa pode ser feita por meio da porta USB, com uma fonte ou com uma bateria externa.

O Uno possui 14 pinos digitais que podem ser utilizados como uma entrada ou uma saída utilizando-se as funções “pinMode()”, “digitalWrite()” e “digitalRead()”. Cada pino opera com 5V podendo fornecer ou receber um máximo de 40mA e tem um resistor pull-up interno (desconectado por padrão) de 20-50kΩ. Além dos pinos digitais, o Uno tem 6 entradas analógicas, etiquetadas de A0 a A5, cada uma tem 10 bits de resolução. Por padrão estas medem de 0 a 5V, embora seja possível alterar o limite superior utilizando o pino “AREF” e a função “analogReference()”.

Para comunicação o Arduino Uno fornece comunicação serial UART TTL (5V) disponibilizada nos pinos digitais 0 (RX) e 1 (TX), além de possuir um ATmega8U2 na placa que canaliza esta comunicação para a USB e aparece como uma porta virtual para o software no computador. O firmware do '8U2' utiliza os drivers padrão USB COM e nenhum driver externo é necessário. A Figura 27 ilustra uma placa do Arduino Uno com suas principais partes e componentes (MESTREACASA, 2016).

Figura 27 – Placa Arduino UNO – principais partes



Fonte: mestreacasa.gva.es, 2016

### 3.12.2 Shield Arduino para CNC

Um dos fatores determinantes para a enorme versatilidade e popularidade da plataforma Arduino são os shields. Shields são circuitos que podem ser conectados ao Arduino, encaixando-se perfeitamente, e expandindo suas capacidades e possibilidades de utilização. Estas placas podem conter displays de LCD, sensores, módulos de comunicação ou relês, por exemplo. A capacidade de expansão possibilita uma infinidade de aplicações de maneira simples e rápida.

Dentre estes shields destaca-se o desenvolvido para máquinas CNC. O CNC Shield V3 foi desenvolvido especialmente para aplicação em impressoras 3D e



máquinas de gravação, onde possibilita a conexão de drivers A4988, os quais são reconhecidos internacionalmente pela eficiência no controle de motores de passo.

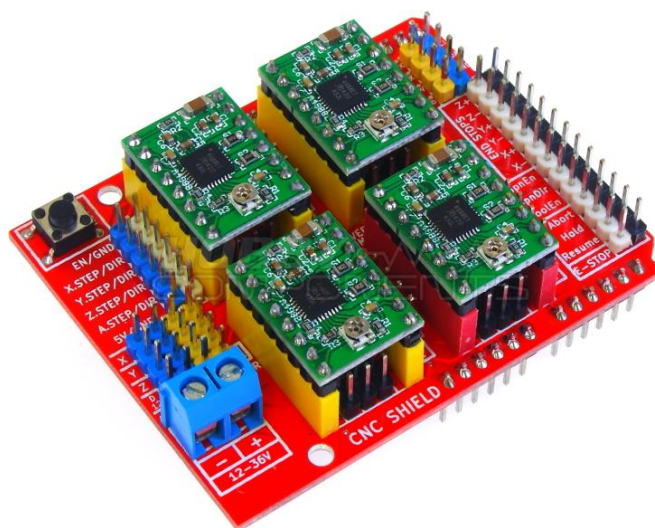
Com 4 slots, o CNC Shield Arduino pode controlar até 4 drivers A4988, atuando com duas portas digitais para cada motor, o que significa dizer que, por exemplo, utiliza seis portas digitais para controlar três motores de passo.

O mesmo shield conta com bornes a parafuso para alimentação externa dos motores, podendo receber tensões entre 12V a 36VDC, possuindo ainda um botão reset incorporado à sua placa.

Atuando em conjunto com Arduino Uno, o shield para CNC apresenta uma grande eficiência na transformação dos comandos de código em sinais de passo para os motores, suportando 4 eixos (X, Y, Z, A), podendo optar por duplicar X, Y ou Z, ou mesmo trabalhar com um quarto eixo personalizado, por meio dos pinos D12 e D13.

O CNC Shield conta com 2 conectores fim de curso para cada eixo, sendo que cada par de eixos compartilham o mesmo pino digital. Enfim, o CNC Shield mostra-se um dispositivo de fácil operação, mostrando-se ideal para atuar junto de impressoras 3D e máquinas ferramenta. A Figura 28 abaixo ilustra um exemplo de CNC Shield para controle de até quatro drivers (USINAINFO, 2016).

Figura 28 – Placa Shield CNC



Fonte: [forum.hobbycomponents.com](http://forum.hobbycomponents.com), 2016

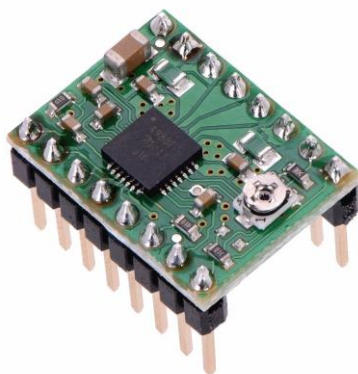
### 3.12.3 Drives dos motores de passo A4988

Os drives são módulos responsáveis pelo acionamento dos motores. Atualmente existe uma grande diversidade de drives que podem trabalhar em conjunto com o hardware do Arduino, porém o mais utilizado é o módulo A4988. Este módulo é controlado pelo chip Allegro A4988, e pode ser alimentado com tensões entre 3 e 5.5V. Também permite alimentação externa de 8 à 35V. Um potenciômetro na placa permite a regulação da corrente de saída.

O controle básico de um motor de passo é feito por meio de dois pinos do microcontrolador, ligados aos pinos “STEP” (passo) e “DIR” (direção) do módulo.

Uma das grandes vantagens desse módulo é a possibilidade de utilizar micropassos, configurando esta função por meio dos pinos MS1, MS2 e MS3. Apesar de reduzir a velocidade de trabalho, a utilização do modo micropasso reduz o torque do motor, em média, 30% em comparação com o modo de passo completo (full-step). A Figura 29 abaixo ilustra o drive A4988 (ARDUINOECIA, 2016).

Figura 29 – Drive A4988



Fonte: [www.arduinoecia.com.br](http://www.arduinoecia.com.br), 2016

Este drive também regula a corrente necessária para o correto funcionamento do respectivo motor por ele acionado. Esta regulação é feita através da tensão de referência do drive, conforme a fórmula a baixo:

$$V_{ref.} = I_{(motor)} / 2,5$$



A regulação de corrente de saída do drive é feita no potenciômetro existente no corpo do mesmo com o drive energizado, aferindo a tensão contínua entre o gnd e o próprio potenciômetro até a tensão  $V_{ref}$ .

Os parâmetros e diagrama elétrico do drive se encontram no item 2 do Apêndice B.

### **3.13 Considerações finais**

Após o conhecimento da ferramenta proposta neste trabalho, o próximo capítulo tratará do projeto executado e sua respectiva composição.

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Considerações iniciais**

Este capítulo detalha o trabalho desenvolvido juntamente com seus componentes e acessórios. Conhecendo a dificuldade dos estudantes de engenharia elétrica e engenharia de controle e automação da Pontifícia Universidade Católica de Goiás para a fabricação de placas de circuito impresso com a finalidade de realizar simulações de circuitos eletrônicos no desenvolvimento dos seus cursos, buscou-se uma solução que se apresentasse viável para fabricação destas placas. Desta forma, um pequeno centro de usinagem CNC com as funções de fresagem, furação e corte se apresentou como a melhor solução para o problema.

Assim, desenvolveu-se um largo estudo de diversas propostas de máquinas-ferramenta com o objetivo de sintetizar um projeto que melhor se adequasse as condições locais da universidade e dos estudantes, com o menor custo possível e com produtos acessíveis no mercado nacional.

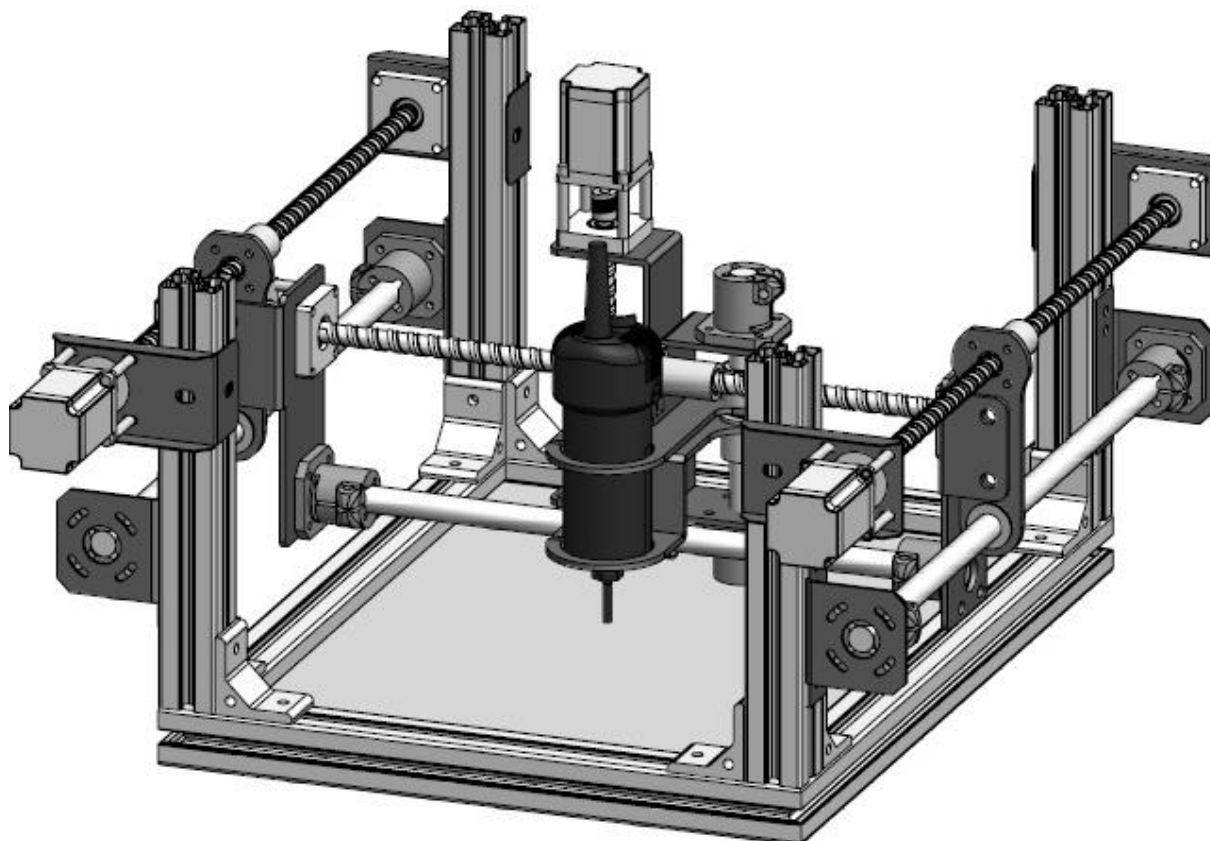
### **4.2 Projeto da máquina-ferramenta**

O projeto idealizado partiu do estudo de diversas máquinas tipo CNC para fresagem de peças em materiais diversos, com o objetivo de construção de uma ferramenta multifuncional e modular que, de acordo com a demanda, possa ser adaptável para várias aplicações diferentes como fresagem de madeira, acrílico, polímeros, bem como através de pequenas modificações, poderá ser transformada em uma impressora 3D. Assim, o desenho construtivo foi desenvolvido com auxílio do software SolidWorks e montou-se um projeto conforme a Figura 30.

A fabricação de uma máquina-ferramenta demanda conhecimentos em mecânica, instalações, máquinas e acionamentos elétricos, além de diversos softwares. Também é determinante o conhecimento multidisciplinar que integre todas as partes distintas do trabalho. Para efeito de análise o desenvolvimento foi segmentado em quatro partes: montagem mecânica, montagem elétrica, incluindo o hardware, e software. O primeiro corresponde a estrutura geral da máquina, seleção e criação das peças que farão parte dos eixos, etc. O segundo corresponde ao acionamento dos atuadores, alimentação elétrica, proteções elétricas e o estudo do

controlador que encerra sobre a plataforma de prototipagem escolhida. Finalmente o sistema, que se refere aos softwares de testes, interface e controle da máquina (GESSER; POZZOBON; BONACORSO; SILVA, 2007).

Figura 30 – Máquina-ferramenta proposta



Fonte: Autoria própria, 2016

### 4.3 Montagem mecânica

Com a finalidade de suportar todo o sistema de movimentação, fresagem, furação e corte, a utilização de vergalhões em alumínio para composição da estrutura da mesa se apresentou como a melhor solução.

Em razão da disponibilidade do material, foi utilizado o perfil modelo 45x45R, com porcas “T” M6 para rachura 8mm, parafusos allen em inox M12x30, cantoneiras em alumínio para perfil 45x45 com parafuso “T” M8x30L e capa de fechamento 45x45. Os referidos perfis são anodizados para um melhor acabamento com alta resistência a abrasão e corrosão e, mesmo tendo suas junções feitas com parafusos,

proporcionam união segura e resistente, suficientes para os esforços estáticos e dinâmicos da aplicação (Para ficha técnica do perfil ver Anexo A).

O local de trabalho da máquina foi considerado um local de impacto, com possibilidade de ser danificado durante a execução dos trabalhos da máquina. Por estas razões foi utilizado neste local uma placa de MDF de 3mm com cobertura de uma manta de borracha colada ao mesmo, com o objetivo de evitar deslizamentos sobre a mesa. Assim, a estrutura da mesa de sacrifício ficou conforme a Figura 31.

Figura 31 – Estrutura da mesa

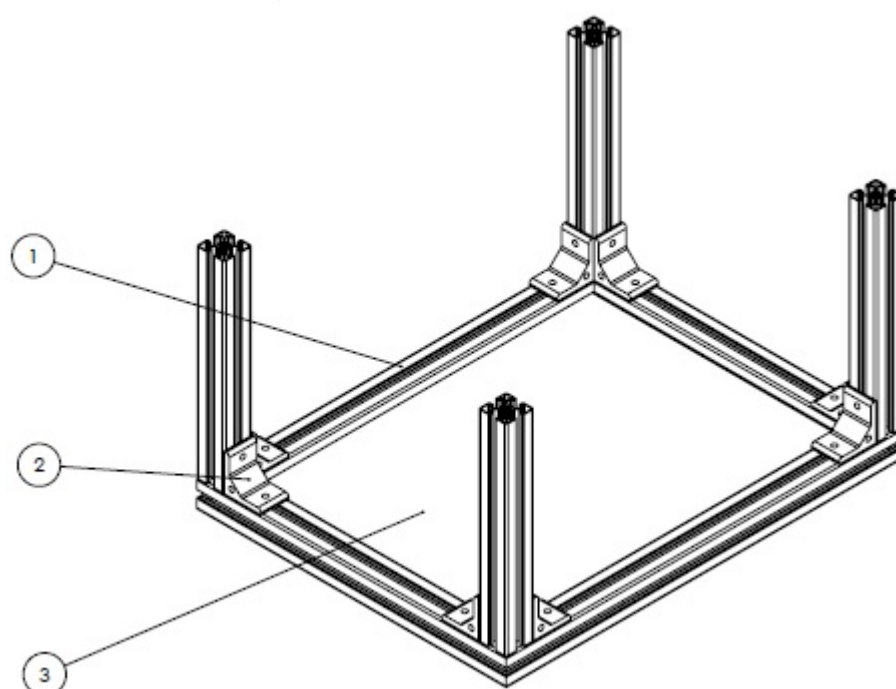


Tabela 3: Lista de materiais mesa de trabalho

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO DA PEÇA	QTD.
1	Perfis de alumínio	8
2	Cantoneira de trava	8
3	Placa de MDF	1

Fonte: Autoria própria, 2016

Com a finalidade de suportar todo o conjunto de movimentação do eixo Y e proporcionar a movimentação do atuador (tupia) no sentido longitudinal, a utilização de fusos laminados compostos com castanhas de esferas recirculantes se apresentou como a melhor solução em razão da exatidão dos movimentos lineares e menor atrito.

Estes fusos foram acoplados a estrutura por mancais com rolamentos e aos motores por acoplamentos flexíveis devidamente dimensionados para o diâmetro do

eixo dos motores de passo. Para auxílio nos movimentos do conjunto foram utilizados guias de 16mm de diâmetro em aço maciço que, fixados as castanhas e dotados de buchas de borracha, proporcionou estabilidade ao conjunto. Estes eixos são fixados a estrutura da mesa por chapas metálicas devidamente projetadas para a função. A Figura 32 detalha o mecanismo do eixo Y (Ver apêndice A).

Figura 32 – Mecanismo de movimentação do eixo Y

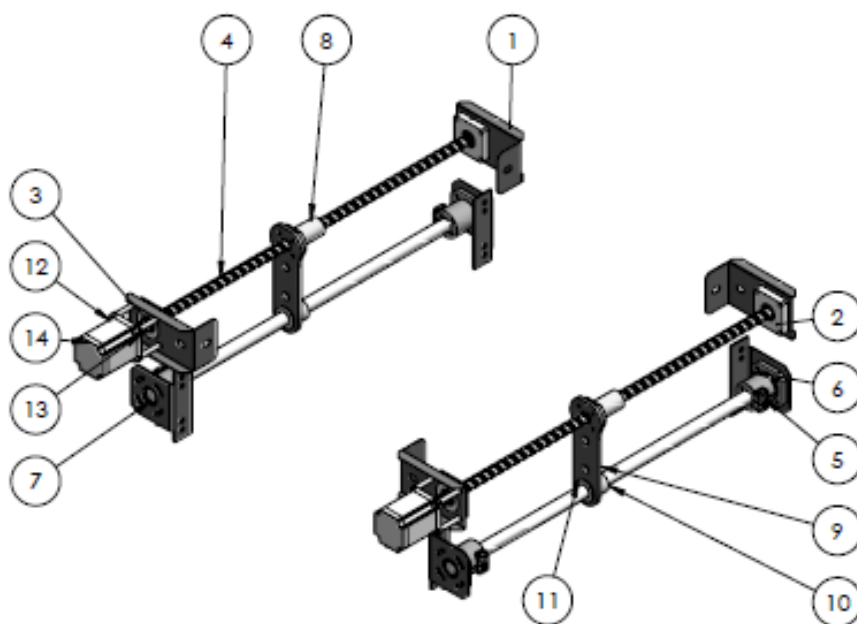


Tabela 4: Lista de materiais eixo Y

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO DA PEÇA	QTD.
1	Chapa trava bloco	4
2	Mancal do fuso	4
3	Rolamento fuso	4
4	Fuso Y	2
5	Trava do tubo	4
6	Chapa de trava do tubo	4
7	Eixo 20mm	2
8	Castanha	2
9	Chapa da castanha	2
10	Bucha do tubo	2
11	Suporte bucha do tubo	2
12	Parafuso motor	2
13	Acoplamento motor	2
14	Motor NEMA 23	2

Fonte: Autoria própria, 2016

No eixo X, também com o objetivo de suportar todo o conjunto de movimentação e proporcionar a movimentação do atuador (tupia) no sentido perpendicular ao eixo Y, a utilização do fuso laminado composto com castanha de esferas recirculantes se apresentou como a melhor solução em razão da exatidão dos movimentos lineares e menor atrito.

Este fuso foi acoplado aos suportes do eixo Y por dois chassis devidamente projetados para a função. Em um dos chassis foi fixada a estrutura de suporte do fuso dotada de mancal com rolamento e, no outro chassi oposto, o motor foi fixado e acoplado com acoplamento flexível devidamente dimensionados para o diâmetro do eixo do motor de passo. Para auxílio nos movimentos do conjunto foi utilizado um guia de vergalhão circular de 16mm de diâmetro em aço maciço que, fixado a castanha e dotado de bucha de borracha, proporcionando estabilidade ao conjunto. A Figura 33 detalha o mecanismo do eixo X (Ver apêndice A).

Figura 33 – Mecanismo de movimentação do eixo X

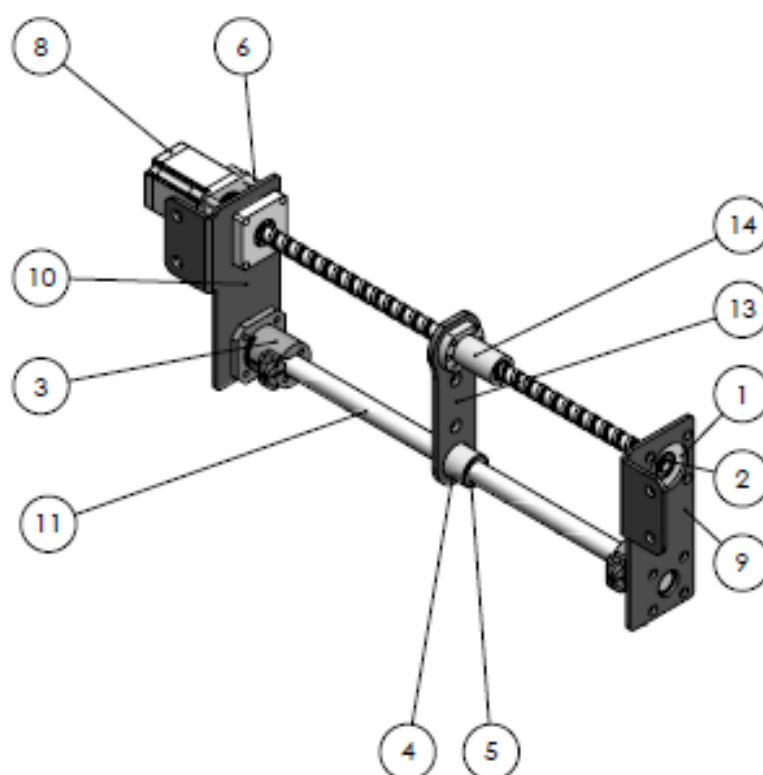


Tabela 5: Lista de materiais eixo X

<b>Nº DO ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO DA PEÇA</b>	<b>QTD.</b>
1	Mancal do fuso	2
2	Rolamento do fuso	2
3	Trava do tubo	2
4	Suporte bucha do tubo	1
5	Bucha do tubo	1
6	Parafuso motor	1
8	Motor NEMA23	1
9	Chassi mancais esquerda	1
10	Chassi mancais direita	1
11	Eixo 20mm	1
12	Fuso Y	1
13	Chapa da castanha	1
14	Castanha	1

Fonte: Autoria própria, 2016

No eixo Z, para suporta  o do conjunto de movimentac  o e proporcionar a movimentac  o do atuador (tupia) no sentido perpendicular aos eixos X e Y, a utiliza  o do fuso laminado composto com castanha de esferas recirculantes se apresentou como a melhor soluço em razão da exatidão dos movimentos lineares e menor atrito.

Este fuso foi acoplado ao suporte guia do eixo Y por uma base devidamente projetada para a fun  o. Nesta base foi fixada a estrutura de suporte do fuso dotada de mancal com rolamento e o motor fixado com parafusos e conectado com acoplamento flexível devidamente dimensionado para o diâmetro do eixo do motor de passo. Para auxílio nos movimentos do conjunto do eixo Z foi utilizado um guia posicionado em outra base, fixada paralela a primeira, de vergal  o circular de 16mm de diâmetro em aço maciço que, fixado a castanha e dotado de bucha de borracha, proporcionando estabilidade ao conjunto.

Com o devido suporte, foi posicionada a tupia, conectada ao fuso de movimentac  o e ao guia metálico. A Figura 34 detalha o mecanismo do eixo Z (Ver apêndice A).

Figura 34 – Mecanismo de movimentação do eixo Z

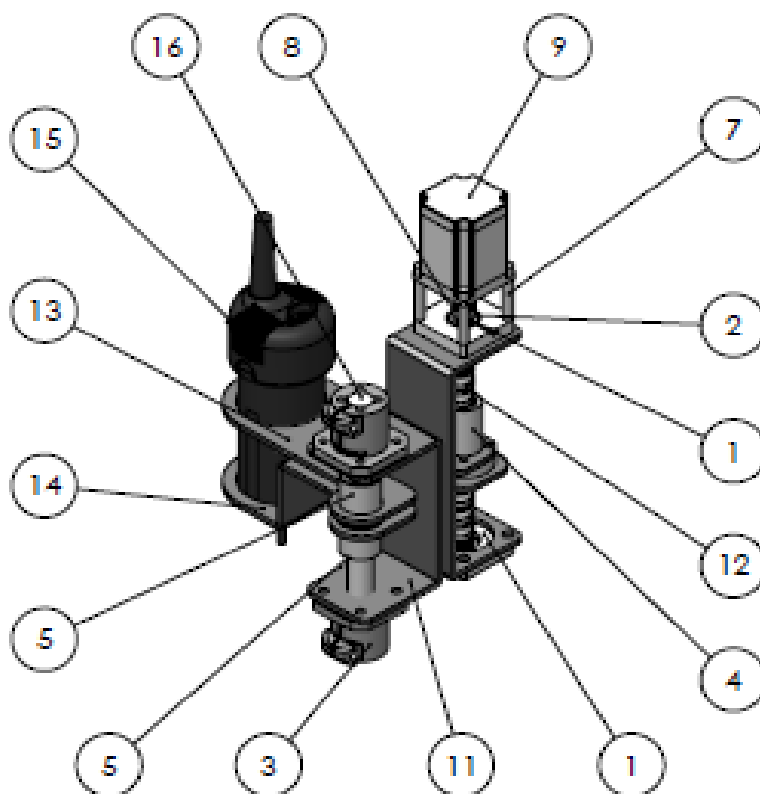


Tabela 6: Lista de materiais eixo Z

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO DA PEÇA	QTD.
1	Mancal do fuso	2
2	Rolamento do fuso	2
3	Trava do tubo	2
4	Castanha	1
5	Bucha do tubo	2
6	Suporte bucha do tubo	2
7	Parafuso do motor	1
8	Acoplamento do motor	1
9	Motor NEMA23	1
10	Chapa base Z 1	1
11	Chapa base Z 2	1
12	Fuso Z	1
13	Chapa base mancais inferior	1
14	Chapa base mancais principal	1
15	Tupia	1
16	Eixo 20mm	1

Fonte: Autoria própria, 2016



#### 4.4 Montagem elétrica

Concluída a montagem mecânica da máquina, iniciou-se a montagem elétrica do sistema de acionamento e controle de movimentação da mesma.

Diante da necessidade de movimentos exatos para geração das peças e da topologia da máquina idealizada optou-se pelo uso de motores de passo acoplados aos fusos através de um elemento flexível que reduzisse ao máximo a transferência de vibração entre as partes. Também, o controle de posição dos motores de passo através de pulso, sem a necessidade de sensores, foi determinante na escolha dos mesmos. Com três motores de 10kgf.cm de 6 fios, sendo usados dois para o eixo Y e um para o eixo Z, e um motor de 15kgf.cm de 8 fios aplicado ao eixo X, todos padrão Nema 23, o desempenho dos conjuntos de movimentação se mostraram satisfatórios, pois, o carregamento deles dependerá apenas do atrito do conjunto fuso-castanha e guia linear-bucha e da peça que será trabalhada, estes motores conseguem suprir toda a carga mecânica demandada. Os quatro motores de acionamento dos eixos X, Y e Z foram conectados ao Shield CNC por meio de ligação bipolar série, sendo os motores do eixo Y posteriormente configurados para trabalharem em sincronismo, conforme Figura 22 e 35 (Ver Apêndice B).

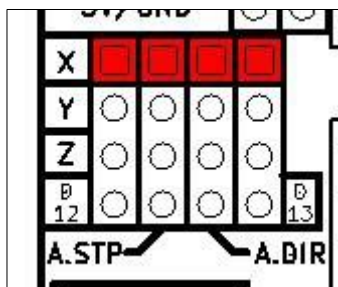
Para a fresagem das placas de circuito impresso, a decisão por um motor de alta velocidade que suportasse as fresas necessárias para a tarefa foi determinante. Também o preço de mercado e a facilidade de aquisição e manutenção do mesmo equipamento foi considerada. Assim o motor *spindle*, também conhecido como tupia, se mostrou mais adequado para a aplicação, sendo posicionado no seu devido suporte fixado no eixo Z da máquina.

O acionamento da tupia se dá no corpo da mesma, porém, os motores de passo são acionados por meio drives. Partindo desta necessidade e, com base em outros projetos de máquinas semelhantes, buscou-se um sistema de controle de baixo custo, didático e encontrado no mercado local. Assim o drive A4988, de fabricação da Allegro MicroSystems®, se mostrou o mais indicado, pois, em conjunto com o Arduino UNO e a Shield CNC atendem ao objetivo do projeto (Ver Apêndice B).

A Shield CNC por sua vez, para um perfeito funcionamento, necessita de alimentação em tensão contínua de 12 a 36Vcc, esta suprida por uma fonte chaveada de 20A. Também foram conectados os quatro drives por meio de conectores

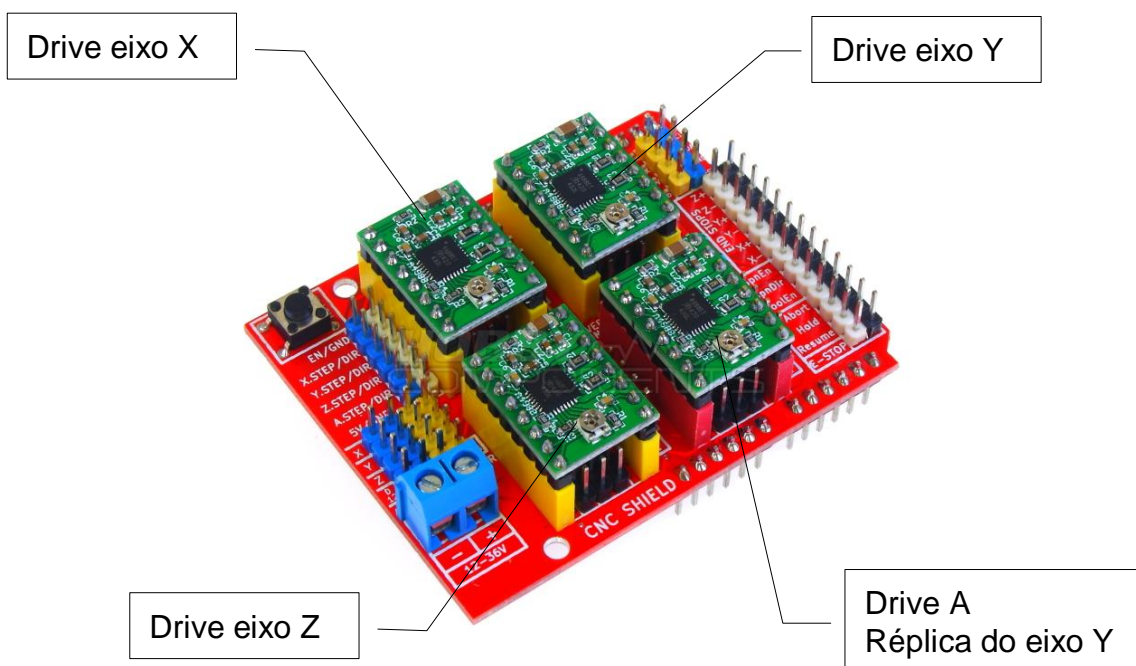
apropriados. Além dos drives, foi feita a conexão para replicação dos comandos do eixo Y para o drive A, conforme as Figuras 35 e 36.

Figura 35 – Shield CNC – replicação do eixo Y



Fonte: [blog.protoneer.co.nz](http://blog.protoneer.co.nz), 2016

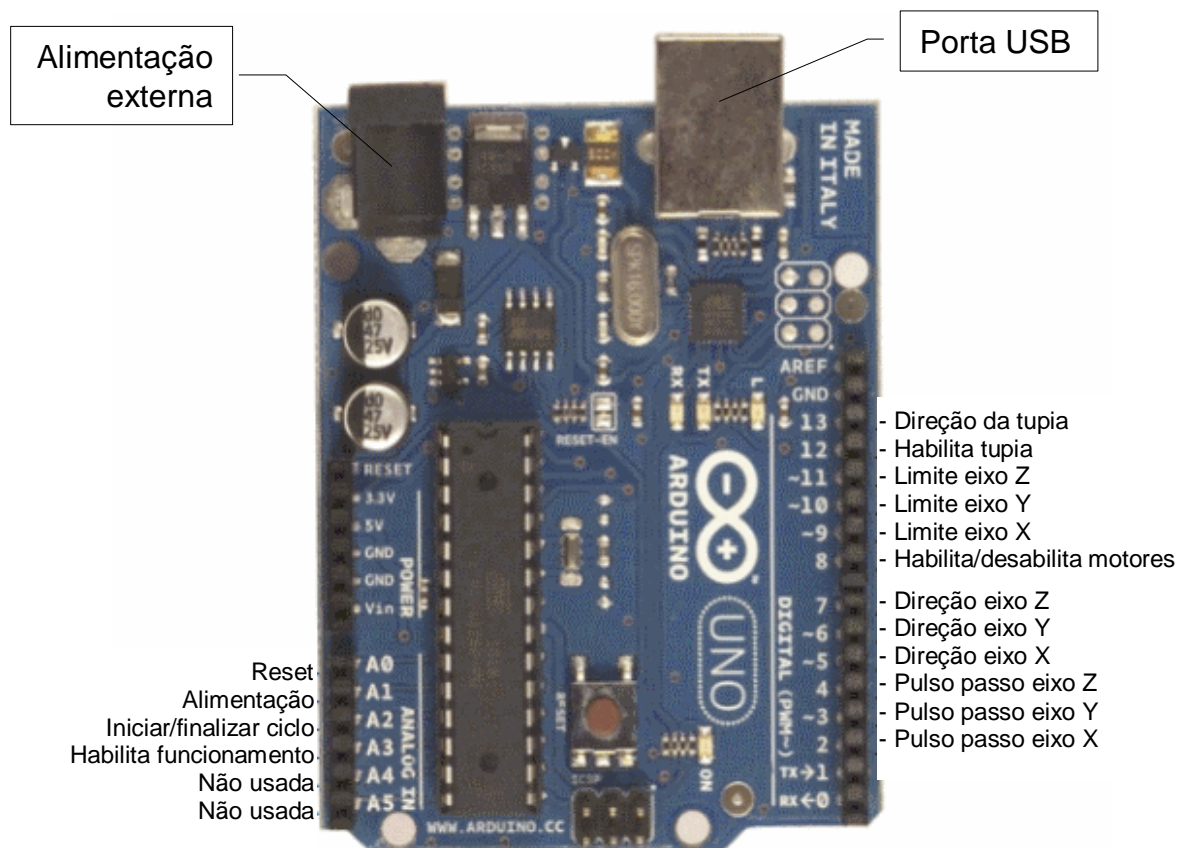
Figura 36 – Shield CNC – Drives de controle dos eixos



Fonte: [forum.hobbycomponents.com](http://forum.hobbycomponents.com), 2016

Após a montagem dos drives na Shield CNC, a mesma foi conectada ao Arduino UNO. Este por sua vez, foi conectado a fonte de alimentação externa, ao computador, via porta USB, e aos motores conforme indicado na Figura 37.

Figura 37 – Placa Arduino UNO – conexões



Fonte: [blog.protoner.co.nz](http://blog.protoner.co.nz), 2016

Por fim conectou-se a tupa e a fonte chaveada a um barramento com tensão alternada para alimentação geral da máquina.

#### 4.5 Software

A busca por softwares livres e didáticos foi determinante para escolha dos mesmos, influenciando inclusive na definição do hardware também. Assim, com base em pesquisas de outras máquinas o G-Code se apresentou como adequado ao projeto, principalmente considerando sua interpretação pelo firmware GRBL utilizado no arduino.

Uma vez definidos os softwares que seriam utilizados, foram feitos vários estudos buscando compreender as necessidades do sistema que seria controlado e a melhor forma de fazê-lo. Desta forma, fez-se necessário o uso do software Universal G-Code Sender para execução dos testes manuais da máquina, além do IDE do

Arduino e da correta parametrização do microcontrolador, de acordo com os dados da CNC e a função de cada parâmetro, conforme a Tabela 7 abaixo.

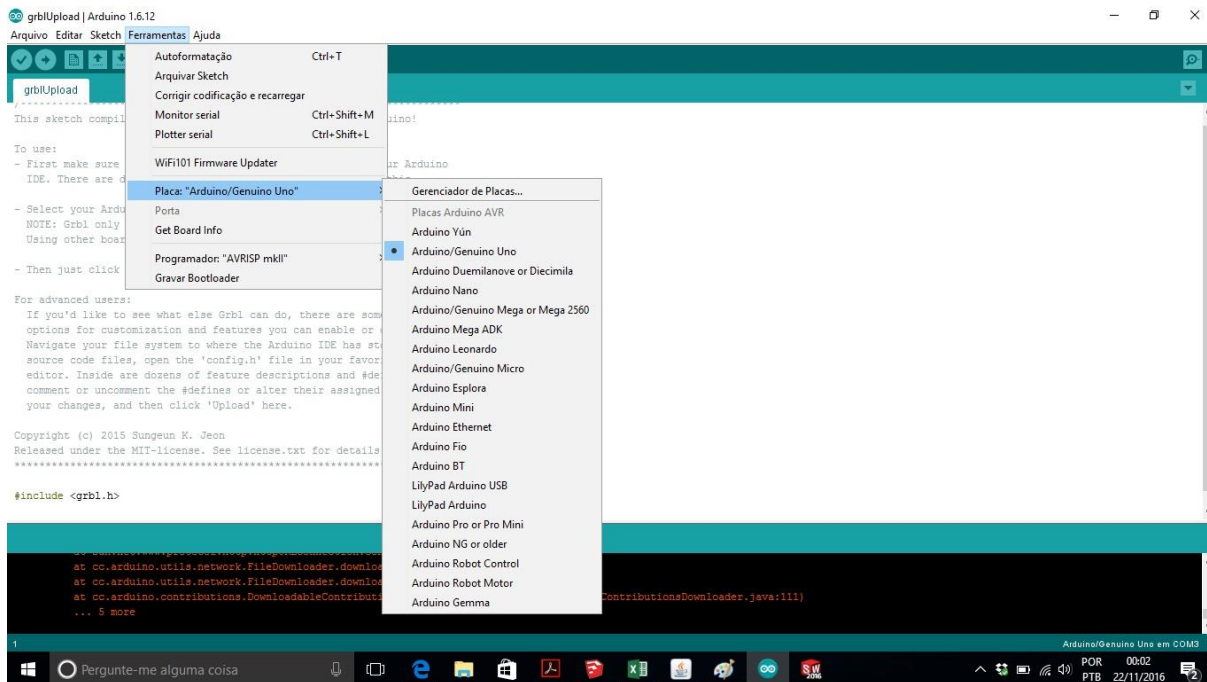
Tabela 7: Lista de parâmetros GRBL

<b>Parâmetro</b>	<b>Função</b>
\$0	Tamanho do pulso em microsegundos
\$1	Atraso da inatividade do motor em milisegundos
\$2	Máscara para inversão do sinal dos passos
\$3	Máscara para inversão da direção
\$4	Inverter o Enable do controlador
\$5	Inverter os limites
\$6	Inverter o Probe
\$10	Relatório de status
\$11	Desvio de junções
\$12	Tolerância de arco em milímetros
\$13	Relatório de posição polegadas
\$20	Limites da máquina por software
\$21	Limites da máquina por hardware (fim de curso)
\$22	Ciclo de Homing
\$23	Máscara para inversão da direção do Homing
\$24	Homing feed em mm/min
\$25	Homing seek em mm/min
\$26	Homing debounce em milisegundos
\$27	Homing pull-off em milímetros
\$100	Passos eixo X por milímetros
\$101	Passos eixo Y por milímetros
\$102	Passos eixo Z por milímetros
\$110	Taxa máxima de mm/min eixo X
\$111	Taxa máxima de mm/min eixo Y
\$112	Taxa máxima de mm/min eixo Z
\$120	Aceleração em mm/s <sup>2</sup> eixo X
\$121	Aceleração em mm/s <sup>2</sup> eixo Y
\$122	Aceleração em mm/s <sup>2</sup> eixo Z
\$130	Tamanho da área útil em mm eixo X
\$131	Tamanho da área útil em mm eixo Y
\$132	Tamanho da área útil em mm eixo Z

Fonte: [www.atividademaker.com.br](http://www.atividademaker.com.br)

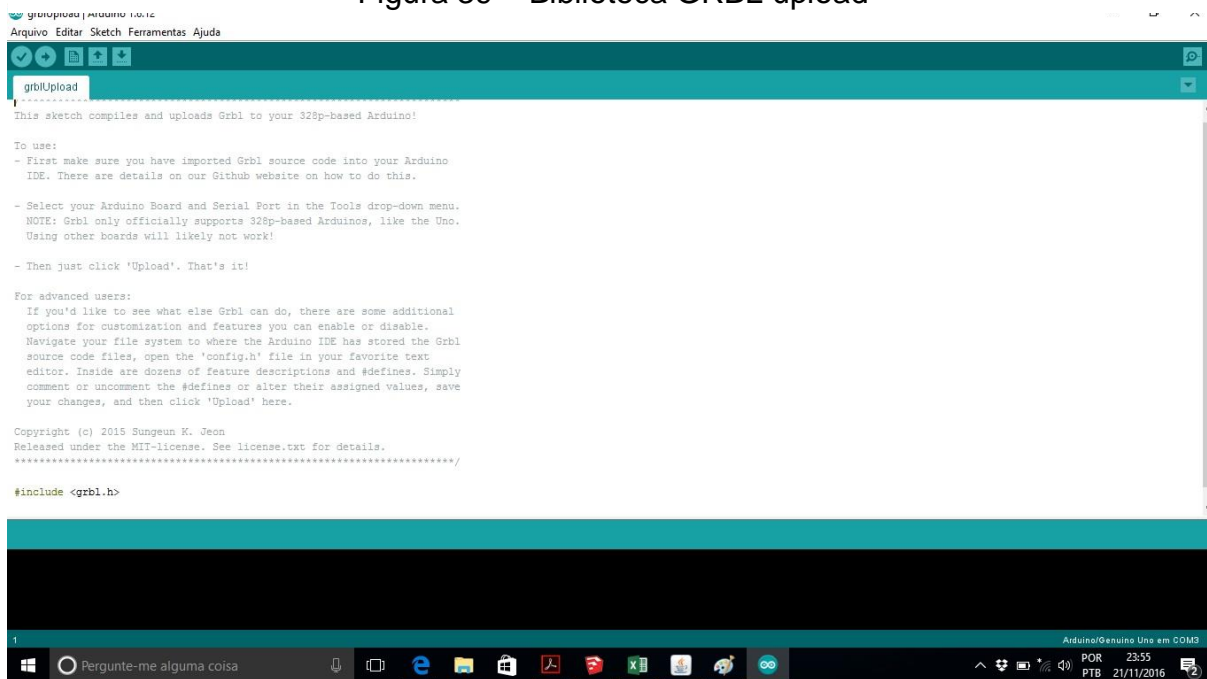
As Figuras 38 e 39 retratam a realização das configurações da máquina.

Figura 38 – Configuração da placa



Fonte: Autoria própria, 2016

Figura 39 – Biblioteca GRBL upload



Fonte: Autoria própria, 2016

#### **4.6 Considerações finais**

Após a fase de execução do projeto faz-se necessário os testes de funcionamento do conjunto completo.

## **5 TESTES**

### **5.1 Considerações iniciais**

Neste capítulo serão apresentados os testes realizados.

### **5.2 Testes realizados**

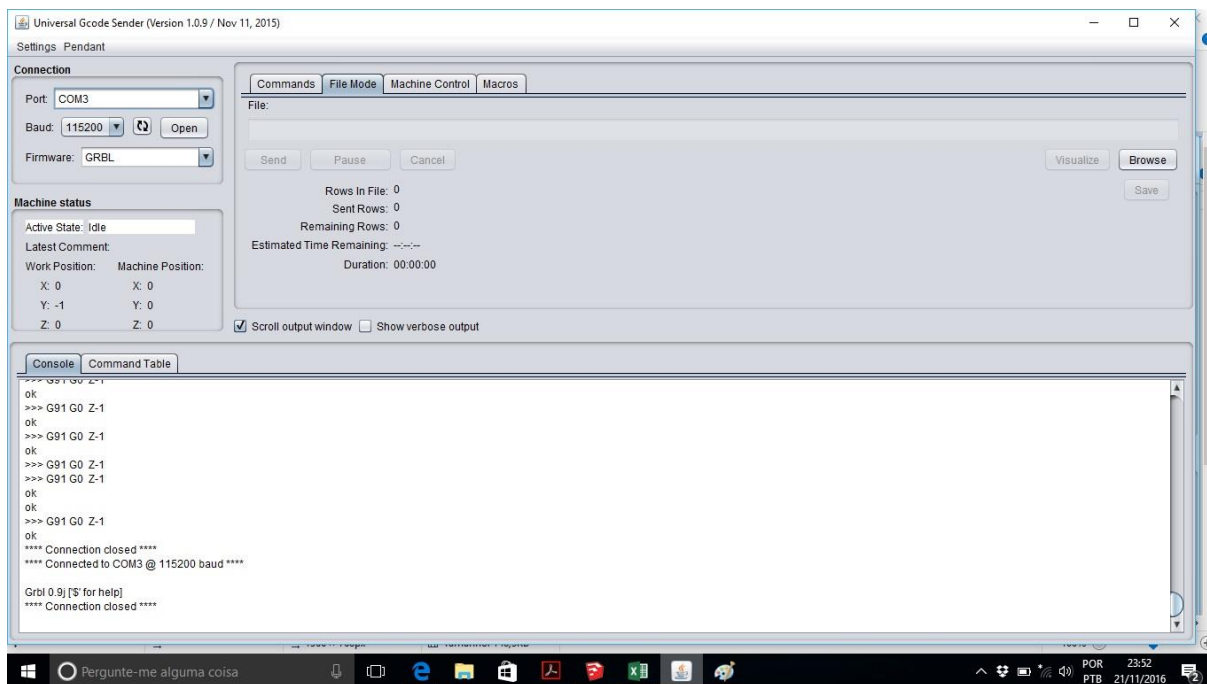
Finalizados os ajustes das peças em separado, iniciou-se a montagem dos conjuntos de movimentação e testes do funcionamento de cada conjunto, onde novamente surgiu a necessidade de ajustes nos conjuntos de origem mecânica. Estes foram realizados por especialistas da área, com experiência na resolução destes problemas. Finalizados os ajustes, foram feitos os testes manuais de movimentação dos conjuntos separadamente e depois acoplados.

Após a montagem mecânica, foi feita a montagem elétrica do conjunto e finalmente iniciaram-se os testes de funcionamento.

Os testes elétricos realizados iniciaram com a energização da fonte chaveada, tupa, Arduino UNO, com a Shield CNC e os drives, e dos motores desacoplados dos conjuntos de movimentação. Uma vez testados estes, foi feita a regulagem de corrente dos drives que permite controlar a potência elétrica demandada pelos motores através de uma tensão de referência, através da qual pode-se conhecer a corrente disponibilizada aos circuitos.

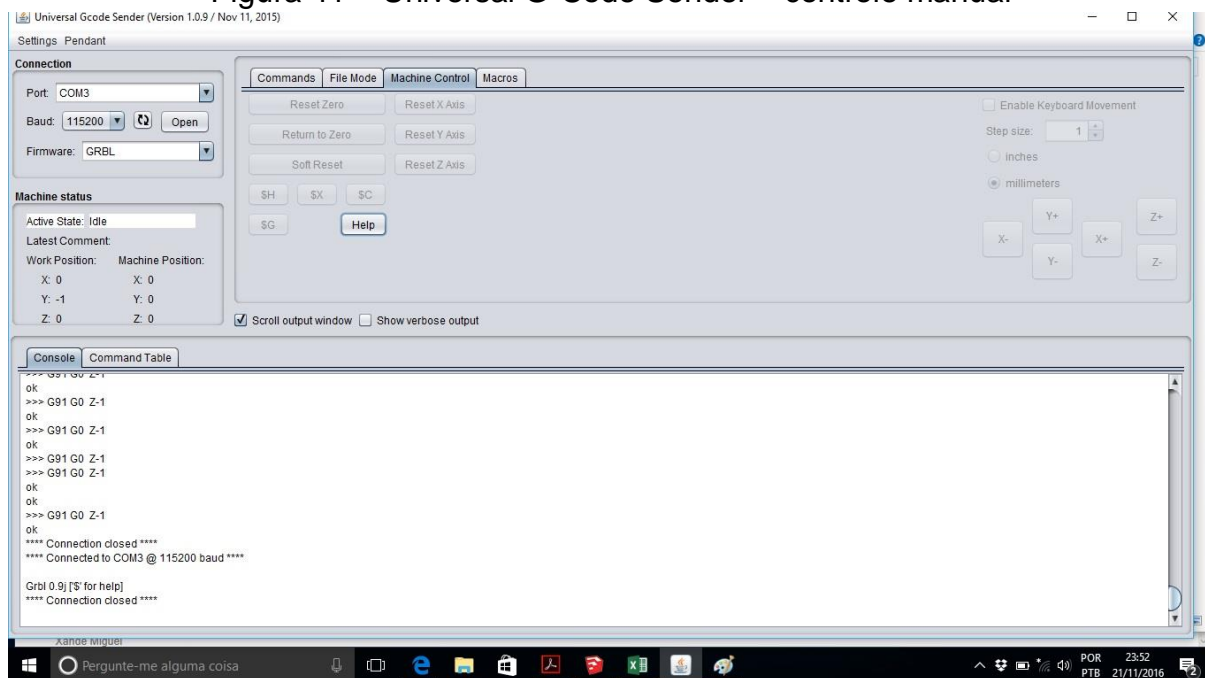
Após o teste de energização, foi feita a instalação do IDE do arduino, a configuração do GRBL através da biblioteca grbl-master e, posteriormente, do Universal G-Code Sender, conectado ao hardware e testados os eixos X, Y e Z. Primeiro foi feito o teste de movimentação dos três eixos separadamente. Finalizado, iniciou-se o teste de alinhamento do eixo Y, a integração do eixo X e seu alinhamento e, por fim, a integração e alinhamento do eixo Z. Todos estes feitos de maneira manual via Universal G-Code Sender para o devido alinhamento e calibragem dos eixos. As Figuras 40 e 41 abaixo retratam as configurações para os testes de movimentação, alinhamento e calibragem realizados.

Figura 40 – Universal G-Code Sender



Fonte: Autoria própria, 2016

Figura 41 – Universal G-Code Sender – controle manual



Fonte: Autoria própria, 2016

Após o alinhamento e calibração dos eixos, foram elaborados alguns códigos G-Code para movimentação automática do conjunto, sendo testadas movimentações no plano cartesiano XYZ, a Tabela 8 a seguir apresenta exemplos de códigos G e



seus respectivos movimentos de avanço aplicados ao sistema para realização do trabalho.

Tabela 8: Códigos G

CÓDIGO G	MOVIMENTO RETANGULAR
G1F60 X0Y0Z0 Z0 X20 Y20 X0 Y0 Z5	
CÓDIGO G	MOVIMENTO DIAGONAL COM RETORNO
G54 G00 X10 Y10 G53 G00 X20 Y20 G59  G01 X0 Y0 F60	
CÓDIGO G	INTERPOLAÇÃO LINEAR
G1 X10 Y10 Z0 F60 X20 Y3	

Fonte: Autoria própria, 2016

As respostas aos movimentos apresentados na tabela comandados via software Universal G-Code Sender, apresentaram respostas favoráveis, sendo que a mecânica de deslocamento dos eixos apresentou alguns travamentos durante a execução do trabalho, devido a necessidade de melhor lubrificação das guias centralizadoras e fusos laminados, respondendo com menos atrito e mais fluidez aos comandos após a aplicação de graxa nestas peças.

Em seguida foram determinados os limites da máquina afim de protegê-la contra a ultrapassagem dos eixos, com possibilidade de danos a estrutura mecânica, pensando nisto foram instalados sensores fim de curso configurados no limite da mesa em modo de operação normalmente aberto, ou seja, na posição máxima positiva, sendo X+ Y+ Z+, os quais após definição dos limites máximos, foram conectados a Shield CNC através dos pinos End Stop X+ Y+ e Z+, e suas posições em seguida foram alteradas no código GRBL, no parâmetro \$21 apresentado na Tabela 7, que define o limite de hardware quando habilitado para a posição 1.

Diante desta definição, outros parâmetros, como \$22 responsável por habilitar o *homming*, o \$23 para definição das posições do fim de curso na máquina, neste caso, eixos positivos, \$24 a velocidade de ida e vinda após encontrar as chaves fim de curso e \$25 velocidade da procura.

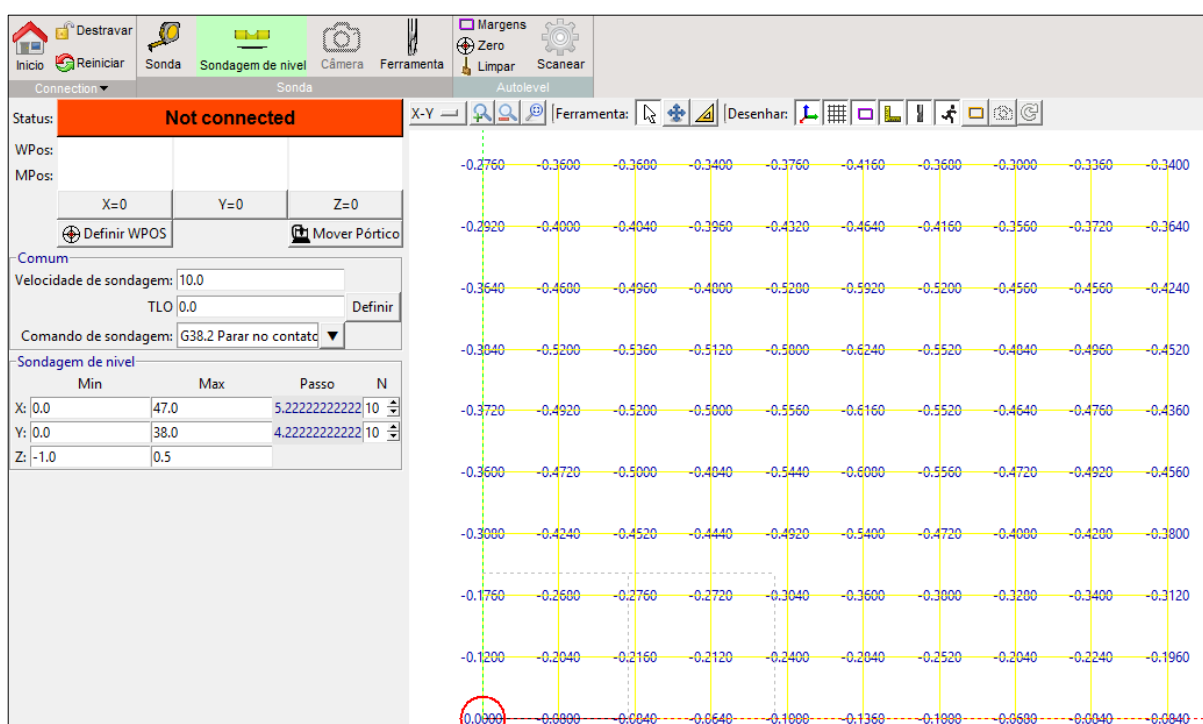
Com os pontos máximos definidos, fez necessário a parametrização dos pontos zeros, esta localização é importante para a máquina, pois orienta o movimento dos eixos a posição de início de trabalho, sempre que esta é ligado, ou após a finalização de algum trabalho, deixando o equipamento pronto para iniciar o próximo comando numérico, a localização deste ponto a priori foi definida do lado oposto aos pontos máximos da máquina, ou seja, nos limites mínimos X- Y- e Z-, os quais foram definidos manualmente através do software Universal G-Code Sender,

Definidos os pontos máximos e mínimos, foi elaborado um suporte em MDF afim de permitir melhores condições de fresagem, furação e corte da placa de fibra de vidro, considerada uma mesa de sacrifício extra para estes tipos de serviços, a qual contempla furos específicos para fixação das placas utilizando terminais de encaixe para acoplamento.

Com um área de trabalho definida e um local apropriado para a fixação e instalação da placa de fibra de vidro, o próximo passo foi a realização do nivelamento do eixo Z, configuração responsável pela posição limite de descida da tupia, esta

operação é denominada de sondagem de nível, que realiza o mapeamento de toda a peça a ser usinada, identificando relevos que podem afetar no afastamento da ferramenta no momento da operação, ocasionando em falhas no processo de fresagem, afetando na qualidade do trabalho realizado. A sondagem de nível é realizada através dos pinos scl e gnd do Shield CNC, o pino scl é conectado através de um fio, possuindo em sua extremidade uma garra metálica, mais conhecida como garra jacaré, a qual é fixada a ferramenta da tupia. No pino gnd o mesmo processo é realizado, com a diferença que a garra é fixada a placa de fibra, feito isto, o software bCNC foi utilizado no menu sonda na operação sondagem de nível, a partir daí foi definido o tamanho da peça e a aproximação do eixo z, em seguida ocorreu a configuração da área pretendida, onde por meio de uma matriz foi parametrizada conforme o tamanho da área de trabalho disponível, a Figura 42 apresenta a sondagem realizada para uma placa de fibra de vidro de tamanho 20cmx15cm, em uma matriz 10x10.

Figura 42 – bCNC sondagem de nível



Fonte: Autoria própria, 2016

O funcionamento da operação de sondagem acontece da seguinte forma: após as parametrizações dos pontos máximos e mínimos, matriz de mapeamento e velocidade de sondagem, o comando scanear é acionado e a máquina percorre todos

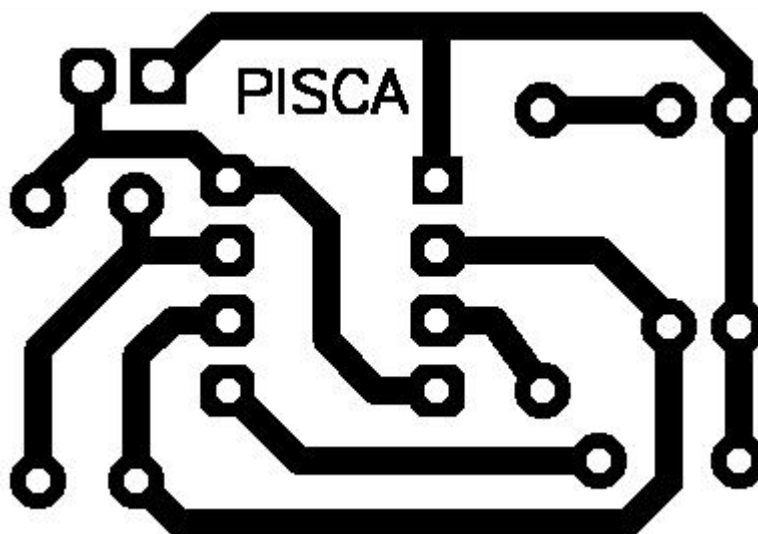
os pontos de sobreposição de linha versus coluna da matriz definida, iniciando no ponto zero ela caminha em sentido horizontal ao longo do eixo X, deslocando em Y ao final de cada linha mapeada, a cada posicionamento nos pontos de sobreposição os eixos X e Y permanecem parados e então é acionado o eixo Z, que realiza uma descida na velocidade definida pelo usuário até fechar o contato com a placa de fenolite através do toque da ferramenta com a peça, é enviado um comando ao Shield CNC, que entende que ocorreu o toque, em seguida o eixo Z sobe e os eixos X e Y são acionados para a próxima sobreposição, repetindo a operação até varrer toda a matriz.

Na Figura 42 é apresentada a matriz configurada neste trabalho, a qual apresenta para cada toque ocorrido nos pontos de sobreposição, diferentes valores em milímetros que correspondem ao relevo da peça naquela posição, estes valores informarão ao programa no momento da operação de usinagem que naquela posição o eixo Z deverá subir ou descer o valor correspondente ao ponto sinalizado, descontando ou acrescentando incrementos naquele local, evitando assim afastamento ou excesso de aproximação a peça, minimizando falhas durante a realização do trabalho. Ao final deste processo a tarefa foi salva em extensão probe, para garantir a sua utilização no momento de realização da usinagem propriamente dita.

Com os parâmetros de nivelamento definidos seguimos a etapa de geração do código G da placa PCI, o qual foi realizado através do software PCIToGCode, responsável por configurar o desenho em três etapas, sendo elas: GCode Fresagem, GCode Furação e GCode Recorte, como o próprio nome sugere cada um desses arquivos realiza um processo diferente de usinagem da peça e como são gerados separadamente permite a troca da ferramenta para cada um dos processos correspondentes. Este aplicativo tem a função de converter a imagem de uma placa de circuito impresso em um arquivo de códigos G, desta forma através da digitalização do layout da placa PCI em uma resolução mínima de 150DPI este software é capaz de converter os traçados necessário para estampagem da imagem na placa a ser usinada.

Na Figura 43, é apresentado o circuito escolhido para o processo de prototipagem, sendo um circuito pisca LED.

Figura 43 – bCNC Sondagem de Nível



Fonte: Toni Eletronica One, 2012

Ao abrir o layout da PCI no software PCIToGCode, algumas etapas foram necessárias até a obtenção do código de fresagem, todas elas executadas através do aplicativo, onde após o fim de cada etapa o arquivo era salvo com um nome específico a etapa, sendo:

- Otimização, melhoramento da qualidade da imagem separando os traços na cor preta e na cor branca, distinguindo as áreas importantes no processo de prototipagem;
- Vetorização, mapeamento e detecção das trilhas onde a placa será fresada;
- Configurações:
  1. Definir curso do eixo Z, Figura 44;

Figura 44 – Deslocamento do Eixo Z

**Deslocamentos do eixo Z**

Profundidade de fresagem: 0,3 mm

Profundidade dos furos: 2,3 mm

Altura para deslocamento: 1,5 mm

Profundidade do recorte: 2,1 mm

Número de passes para o recorte: 4

Avanço do eixo Z a cada passe: 0,525 mm

Velocidade do Spindle: 1300 RPM

O nível zero do eixo Z é a superfície da placa!

OK

Fonte: <http://file.guiacnc.com.br/data/arquivosblogguiaCNC/PCITOGCODE.pdf>, 2016

## 2. Definir velocidade de fresagem dos eixos, Figura 45;

Figura 45 – Deslocamento do Eixo Z

**Definir velocidade dos eixos**

**Definir as velocidades dos eixos XY e Z.**

60 mm/minuto do eixo Z decendo

60 mm/minuto do eixo XY fresando

60 mm/minuto do eixo XY recortando

OK

Fonte: <http://file.guiacnc.com.br/data/arquivosblogguiaCNC/PCITOGCODE.pdf>, 2016

- Geração de coordenadas numéricas a partir dos vetores obtidos no processo de vetorização, estes dados são utilizados para gerar o código G.
- Mapa de fresagem, processamento das coordenadas dos vetores gerados, com as linhas envermelho representando as áreas fresadas e as amarelas representando o deslocamento da ferramenta até o próximo ponto de início de fresagem.
- Dimensionamento da placa, informação pertinente ao tamanho real da placa em centímetros, informação que formará o arquivo de fresagem que será gerado.

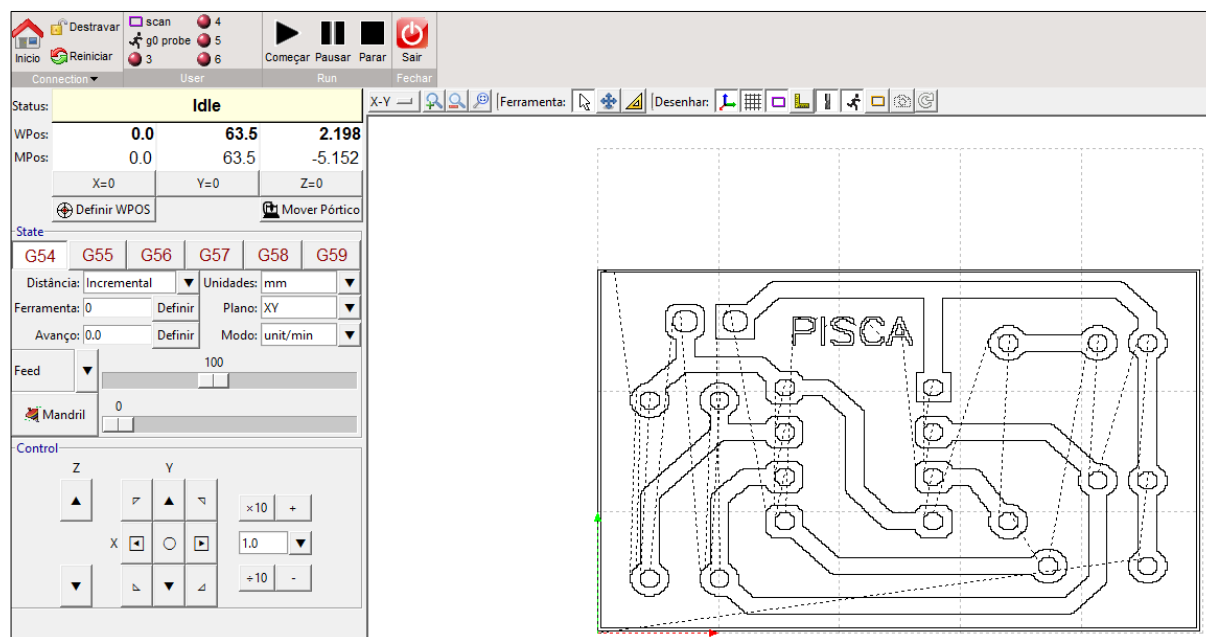
- Geração de arquivo de fresagem, código G correspondentes a união das etapas de vetorização, coordenadas numéricas, mapeamento da fresagem e dimensionamento da placa, segue trecho do código G gerado para realização da fresagem.

```
( Arquivo de Fresagem de PCI )
( Gerado pelo programa PCIToGCode )
( Arquivo Convertido: C:\Users\Romulo\Google Drive\TCC 1 - Prototipagem de PCI\PCB\Modelos de
PCB\Pisca LED\PCI - Pisca LED.bmp )
( Tamanho da placa: X = 10 Cm   Y = 6 Cm )
G90
G21
M08
M03 S1300
M07
N0 G00 X0 Y0 Z1.5
N1 G00 X0 Y60 Z1.5
N2 G01 X0 Y60 Z-0.3 F60
N3 G01 X0 Y60 Z-0.3 F60
N4 G01 X99.5294 Y60 Z-0.3 F60
N5 G01 X99.5294 Y0.421 Z-0.3 F60
N6 G01 X0 Y0.421 Z-0.3 F60
N7 G01 X0 Y59.789 Z-0.3 F60
N8 G01 X0 Y60 Z-0.3 F60
N9 G01 X0.2352 Y60 Z-0.3 F60
N10 G01 X2.1176 Y60 Z-0.3 F60
N11 G01 X2.3529 Y60 Z-0.3 F60
N12 G00 X2.3529 Y60 Z1.5
N13 G00 X0.4705 Y59.578 Z1.5
N14 G01 X0.4705 Y59.578 Z-0.3 F60
N15 G01 X0.4705 Y59.578 Z-0.3 F60
```

Fonte: Autoria própria, 2016

Após gerar o código G para fresagem, foram realizadas as etapas similares para geração dos códigos de furação e recorte da placa, em seguida com os arquivos prontos, a mesa de sacrifício foi preparada com a placa de fenolite fixada aos terminais, afim de receber o arquivo gerado para fresagem, o qual foi aberto no software bCNC conforme Figura 46, logo após a máquina foi ligada os eixos foram zerados para os seus pontos mínimos em XY e no eixo Z foi realizado a aproximação manual para o seu ponto zero.

Figura 46 – Layout do Circuito PISCA Led no bCNC





Fonte: Autoria própria, 2016

Na sequência foram enviados dois trabalhos intercalados com troca de ferramentas para a fresagem do circuito Pisca LED apresentado na Figura 46, sendo utilizado, um adaptador de fresas 3,175mm para pinças de 6,35mm afim de acoplar a fresa a tupa, desta forma um trabalho foi realizado com uma fresa topo de 1mm e outro foi realizado com uma fresa topo de 5mm, para estes testes realizados não foi aplicado ao desenho o arquivo probe gerado na etapa de sondagem de nível, esta situação foi gerada propositalmente afim de identificar as falhas devido o afastamento, ou aproximação do eixo Z, como resultados seguem imagens das placas de cobre sendo uma com a fresa de 1mm e outra com a de 5mm, conforme Figura 47.



Tabela 9 – Resultados obtidos no processo de fresagem sem autonivelamento

Fresa de 1mm	Fresa de 5mm
	

Fonte: Autoria própria, 2016

A ausência do arquivo probe ou autonivelamento do eixo Z, para o arquivo em código G deixou claro as falhas de aproximação deste em relação as peças de fenolite testadas, sendo assim novos testes foram realizados, desta vez com o arquivo probe de nivelamento da sonda, o qual foi gerado novamente para posterior sobreposição ao arquivo de fresamento. Na sequência foram enviados dois trabalhos intercalados com troca de ferramentas para a fresagem do circuito Pisca LED apresentado na Figura 46, sendo utilizado, um adaptador de fresas 3,175mm para pinças de 6,35mm afim de acoplar a fresa a tupa, desta forma um trabalho foi realizado com uma fresa topo de 1mm e outro foi realizado com uma fresa topo de 5mm, para estes testes realizados não foi aplicado ao desenho o arquivo probe gerado na etapa de sondagem de nível, esta situação foi gerada propositalmente afim de identificar as falhas devido o afastamento, ou aproximação do eixo Z.

### 5.3 Considerações finais

No próximo capítulo será apresentado a conclusão do trabalho.

## **6 CONCLUSÃO**

O desenvolvimento deste trabalho foi de grande importância na aplicação dos conceitos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Elétrica, além de agregar conhecimentos primordiais na área de fabricação de produtos, área esta ligada a Engenharia Elétrica e Mecânica, e conhecimentos referentes a resistência dos materiais e mecânica dos sólidos relacionada diretamente a várias outras engenharias.

Ao longo do desenvolvimento do projeto novos desafios se mostraram presentes, com ênfase na busca de precisão e exatidão para a operação da máquina CNC, o que levou a aplicação dos fusos de esferas recirculantes, peças fundamentais e de grande relevância no funcionamento do equipamento pelo alcance da precisão almejada, em contrapartida esta impôs grandes obstáculos devido a sua complexidade e falta de mão de obra especializada na região, para reparos e recuperação de elementos presentes nesta peça. Buscou-se ainda trazer mais uma vez toda a versatilidade da plataforma arduino e de suas extensões, ou Shields, funcionalidades com valor agregado enorme, em contrapartida do baixo custo, sendo algo surpreendente em relação a sua operação.

## **7 TRABALHOS FUTUROS**

- Tratar um sistema de cabine transparente fechada para segurança e exaustão de pó;
- Acrescentar um botão de proteção e parada total da máquina, para questões de segurança;
- Instalar os fins de curso ópticos para melhorar à precisão;
- Zerar a posição inicial de forma automática, via rotina de programação.

## 8 REFERÊNCIAS

DORF, Richard C. **Introdução aos circuitos elétricos**, 7º ed. Rio de Janeiro: Editora Performa, 2006.

**TECMUNDO**. Como as placas de circuito impresso são produzidas. Disponível em: < <http://www.tecmundo.com.br/como-e-feito/18501-como-as-placas-de-circuito-impresso-sao-produzidas.htm>>. Acesso em: 20 março 2016, 23:36 horas.

CADSOFT. Eagle Manual. Disponível em: < <http://www.cadsoftusa.com/>> Acesso em: 20 novembro. 2016, 10:20 horas.

MENDES, A. **Arquitetura de Software - Desenvolvimento orientado para arquitetura**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2002.

CARVALHO, A. M. B. R.; CHIOSSI, T. C. S. **Introdução à Engenharia de Software**. São Paulo: Editora da UNICAMP, 2001.

SOUSA, Flávia Maria Guerra de. **Controle de Fresadora para a Prototipagem de Circuitos Impressos**. Campinas – SP: Universidade Estadual de Campinas – Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial, 1998.

Universal G-Code Sender

Disponível em: <<https://automacaoifrsrg.wordpress.com/2013/12/>> Acesso em: 20 novembro. 2016, 15:30 horas.

GORNI, Antonio Augusto. **Introdução à prototipagem rápida e seus processos**. Revista Plástico Industrial Online: Editora Aranda, 2003. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/protrap.html>>. Acesso em: 15 março 2016, 00:19 horas.

FACTORIES, Factory of. **RP – Prototipagem rápida**. Disponível em: <[http://www.factoryoffactories.com/fof\\_br/rapidprotot\\_br.htm](http://www.factoryoffactories.com/fof_br/rapidprotot_br.htm)>. Acesso em: 18 março 2016, 01:40 horas.

AVELLAR, Marcos Tadeu Vinicius; PINTO, Alex Retamero Dias Filipe Martins. **Introdução aos processos de fabricação – Fresagem**. Rio de Janeiro – Campos dos Goytacazes, 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABVTcAL/introducao-aos-processoa-fabricacao-fresagem>>. Acesso em: 15 março 2016, 00:19 horas.

SCHAPLA, Adriano *et al.* **Fresadora**. Universidade Regional Integral do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim, 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABJ3MAK/fresadora-fresamento>>. Acesso em: 18 março 2016, 01:50 horas.

FALCÃO, Eduardo Filipe de Carvalho Almeida. **Modelação Térmica de Placas de Circuito Impresso**. Minho - Portugal: Universidade do Minho - Escola de Engenharia, 2014.

CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Disponível em: <[http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI\\_Conceitos\\_fundamentais.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf)>. Acesso em: 21 abril 2016, 17:00 horas.

LENZ, Mauro Luiz, **Utilização de Ferramentas de Prototipagem Rápida em Indústria Eletro-eletrônica com Ênfase na Redução do *Time to Market* e dos Custos de Desenvolvimento**. Panambi – RS: Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, 2015.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C. Jr., **Máquinas Elétricas. Tradução Anatólio Laschuk**. Bookman, 2006. 418p.

SANTOS, Marco Aurélio Da Silva, **"Eletricidade: Acionamento de Motores Elétricos"**; Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilescola.uol.com.br/fisica/eletricidade-acionamento-motores-eletricos.htm>>. Acesso em: 01 outubro 2016, 14:00 horas.

### Conjuntos de fusos

Disponível em: <<https://www.boschrexroth.com/pt/br/produtos/grupos-de-produtos/tecnologia-de-acionamento-linear/fusos/index>>. Acesso em: 17 outubro 2016, 20:00 horas.

### Mesa de trabalho

Disponível em: <<http://nemi.com/index.aspx>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 16:00 horas.

### Fresadora

Mikell P. G. **Introdução aos Processos de Fabricação**. tradução Anna Carla Araujo; tradução e revisão técnica André Ribeiro de Oliveira...[et al.] – 1. Ed. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2016.

### Tipos de fusos

Disponível em: <<http://www.thk.com/>> Acesso em: 22 outubro 2016, 05:00 horas.

### SolidWorks

Disponível em: <<http://www.wikiu.com.br/5172250-Curso-de-SolidWorks-2013-e-2014-Cursos-completos-Certificado-Brindes>> Acesso em: 22 outubro 2016, 06:00 horas.

### EAGLE

Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/tutorial-eagle-introducao/>> Acesso em: 23 outubro 2016, 00:30 horas.

### Código G

Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/tutorial-eagle-introducao/>> Acesso em: 23 outubro 2016, 00:30 horas.

DANGAYACH, G. S.; PATAK, S. C. & SHARMA, A. D. **Advanced Manufacturing Technology: a way of improving technological competitiveness**. *International Journal of Global Business and Competitiveness*, v. 2, n.1, pp. 1-8, 2006.

Chan F. T. S. *et al.* Investment appraisal techniques for Advanced Manufacturing Technology (AMT): a literature review. *Integrated Manufacturing systems*. 12(1):35-47, 2001.

Torno: a mais antiga das máquinas-ferramenta

Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/7118-torno-a-mais-antiga-das-maquinas-ferramenta](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7118-torno-a-mais-antiga-das-maquinas-ferramenta)> Acesso em: 29 outubro. 2016, 02:00 horas.

Histórico do CNC

Disponível em: <<http://www.cnctecnologia.com.br/historico.htm>> Acesso em: 29 outubro. 2016, 03:00 horas.

Conceitos Básicos de Usinagem CNC

Disponível em: <<http://www.protoprimus.com.br/conceitos-basicos-de-usinagem-cnc/>> Acesso em: 29 outubro. 2016, 04:00 horas.

Pinto, F. B. e S.; Ribeiro, R. A. C. **Reengenharia de Sistema Produtivo Integrado para Fins Educacionais - Conceitos Gerais de CAD/CAM/CAE/CIM**. Disponível em: <[http://paginas.fe.up.pt/~ee00073/documents/Manuais/RESPIFE\\_CGER\\_v1](http://paginas.fe.up.pt/~ee00073/documents/Manuais/RESPIFE_CGER_v1)> Acesso em: 29 outubro. 2016, 05:00 horas.

GRBL

Disponível em: <<http://bengler.no/grbl>> Acesso em: 20 novembro. 2016, 11:50 horas.

Motor de Faraday.

Disponível em: <[http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2007/RaphaelS-Saa\\_F609\\_RF2.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2007/RaphaelS-Saa_F609_RF2.pdf)> Acesso em: 19 novembro. 2016, 08:54 horas.

Motores de passo e sua aplicação na indústria.

Disponível em: <[http://www.rioar.ind.br/temp/\\_202hBd75znr.pdf](http://www.rioar.ind.br/temp/_202hBd75znr.pdf)> Acesso em: 19 novembro. 2016, 09:30 horas.

### Motor de Passo

Disponível em:

<<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula3-motor-de-passo-2013-1-13-03-2013-final.pdf>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 11:20 horas.

### Motor Spindle

Disponível em: <<http://www.motorsystem.com.br/arquivos-toshiba/apostila-de-informativos-tecnicos-304.pdf>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 13:00 horas.

### Fontes chaveadas

Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/8397-como-funcionam-as-fontes-chaveadas-art1448>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 16:20 horas.

Arduino: Conheça esta plataforma de hardware livre e suas aplicações.

Disponível em: <<http://blog.fazedores.com/arduino-conheca-esta-plataforma-de-hardware-livre-e-suas-aplicacoes/>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 19:50 horas.

Banzi, Massimo. **Primeiros Passos com o Arduino**, 2ª edição São Paulo: Novatec Editora, 2015.

### Arduino

Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 20:50 horas.

### Arduino UNO

Disponível em: < <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 21:15 horas.

### Arduino Uno

Disponível em: < <https://multilogica-shop.com/arduino-uno-r3>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 22:00 horas.



### Shield CNC para Arduino UNO

Disponível em: <<http://www.usinainfo.com.br/impressora-3d-e-cnc/cnc-shield-v3-impressora-3d-arduino-para-4-drivers-a4988-3819.html>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 23:40 horas.

Desenvolvimento e Construção de uma Fresadora CNC de Baixo Custo Destinada a Confecção de Pranchas de Surf. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2007/files/161037342.pdf>>. Acesso em 22 novembro de 2016, as 15:15 horas.

### Figura 1

Disponível em: <<http://www.ssplprints.com/image/132030/hills-jennie-radio-with-the-first-printed-circuit-board-by-paul-eisler-1942>>

Acesso em: 21 abril. 2016, 17:00 horas.

### Figuras 2, 3 e 10

FALCÃO, Eduardo Filipe de Carvalho Almeida. **Modelação Térmica de Placas de Circuito Impresso**. Minho - Portugal: Universidade do Minho - Escola de Engenharia, 2014.

### Figura 4

Disponível em: <<http://www.motionxcorp.com/through-hole-printed-circuit-board-assembly-pcb.html>>

Acesso em: 10 Junho. 2016, 8:45 horas.

### Figura 5

Disponível em: <<http://www.shutterstock.com/pic-366716246/stock-photo-microchip-on-pcb-printed-circuit-board.html?src=pe9uzJtO75kut26BJH3pRg-1-24>>

Acesso em: 10 Junho. 2016, 8:50 horas.

### Figura 6

Disponível em: <<http://www.eletronika.net/wp/tecnica-montagem-circuito-eletronico>>

Acesso em: 10 Junho. 2016, 12:00 horas.

## Figura 7

Disponível

em:

<[http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3108/MONOGRAFIA%20PGLS\\_JONATAN%20WEILER%202015%20final%20corrigido.pdf?sequence=1](http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3108/MONOGRAFIA%20PGLS_JONATAN%20WEILER%202015%20final%20corrigido.pdf?sequence=1)>

Acesso em: 27 Maio. 2016, 19:53 horas.

## Figuras 8 e 9

Disponível

em:

<[http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI\\_Conceitos\\_fundamentais.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf)>.

Acesso em: 21 abril. 2016, 17:00 horas.

## Figuras 11, 12, 13 e 14

Disponível em: < <http://www.thk.com/>> Acesso em: 22 outubro 2016, 05:00 horas.

## Figuras 15 e 16

Disponível

em:

<<http://www.mectrol.com.br/arquivo/pt/index/download/arquivo/L3VwbG9hZC9wcm9qZXRVL2NhdGFsb2dvcy9iYWxsc2NyZXctaW4tcG9ydHVndWVzZS5wZGY=>>

Acesso em: 01 outubro 2016, 15:00 horas

## Figura 17 (acoplamento do motor)

Disponível em: <<http://www.jdreletronicos.com.br/pd-1d73d3-acoplamento-flexivel-motor-passo-eixo-6-35-x-8mm-cnc.html>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 16:00 horas.

## Figura 18

AKIYAMA, Automação. Datasheet Motor de Passo AK23/10F8FN1.8.

## Figura 19, 20, 21 e 22

Disponível

em:

<<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula3-motor-de-passo-2013-1-13-03-2013-final.pdf>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 11:20 horas.

## Figura 23

Disponível

em:

<<https://www.ledmaisled.com.br/Imagens/Produtos/Tupia%20Makita%20530W%20Mod%203709%20220V%201062%201.jpg>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 15:38 horas.

## Figura 24 cto fonte chaveada

Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/8397-como-funcionam-as-fontes-chaveadas-art1448>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 16:35 horas.

## Figura 25 Foto fonte chaveada

Disponível em: <<http://www.megatecenergia.com.br/fonte-chaveada-colmeia-fte-12v-10a-para-cftv-led-e-fechadura-el-tric>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 16:35 horas.

## Figura 26 Foto Arduino Uno

Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-6b58d-placa-uno-r3-cabo-usb-para-arduino.html>> Acesso em: 19 novembro. 2016, 22:35 horas.

## Figura 27 Foto Arduino Uno

Disponível

em:

<[http://mestreacasa.gva.es/c/document\\_library/get\\_file?folderId=500011499242&name=DLFE-551311.jpg](http://mestreacasa.gva.es/c/document_library/get_file?folderId=500011499242&name=DLFE-551311.jpg)> Acesso em: 19 novembro. 2016, 22:40 horas.

## Figura 28 e 36 Placa Shield CNC

Disponível em: <<http://forum.hobbycomponents.com/viewtopic.php?f=40&t=1747>> Acesso em: 20 novembro. 2016, 01:15 horas.

## Figura 29 Drive a4988

Disponível em: <<http://www.arduinoecia.com.br/2015/03/controle-motor-de-passo-bipolar-driver-A4988.html>> Acesso em: 20 novembro. 2016, 01:15 horas.

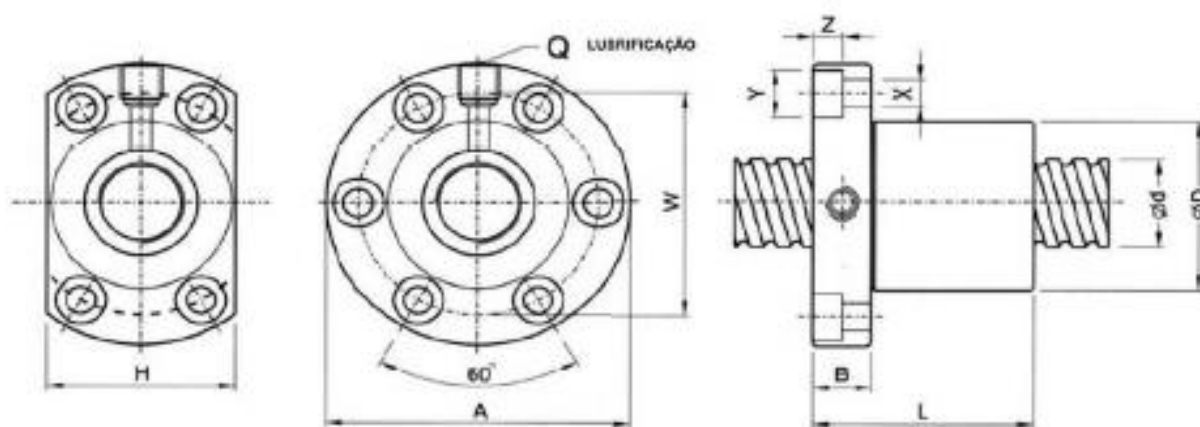
Figura 35 e 37 Shield CNC jumper

Disponível em: <<http://blog.protoneer.co.nz/arduino-cnc-shield-v3-00-assembly-guide/>> Acesso em: 22 novembro. 2016, 18:00 horas

## APÊNDICE A – Estrutura Mecânica

### 1. FUSOS DE ESFERAS LAMINADO

Os fusos utilizados neste trabalho possuem as seguintes dimensões:



Dimensões das castanhas

EIXO	Dimensões (mm)																
	d	l	Da	D	A	B	L	W	H	X	Y	Z	Q	n	Ca	Coa	K
X	16	10	3.175	34	58	10	57	45	-	5,5	9,5	5,5	M6	3	833	1249	15
Y	16	5	3.175	30	49	10	50	39	34	4,5	8	4,5	M6	4	780	1790	20
Z	16	5	3.175	30	49	10	50	39	34	4,5	8	4,5	M6	4	780	1790	20

l: passo;

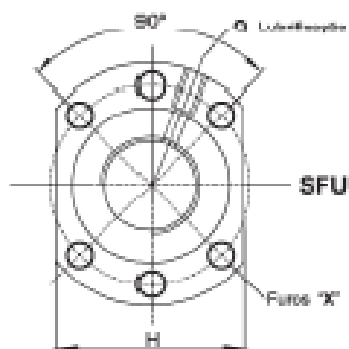
Da: diâmetro das esferas;

n: número de circuitos;

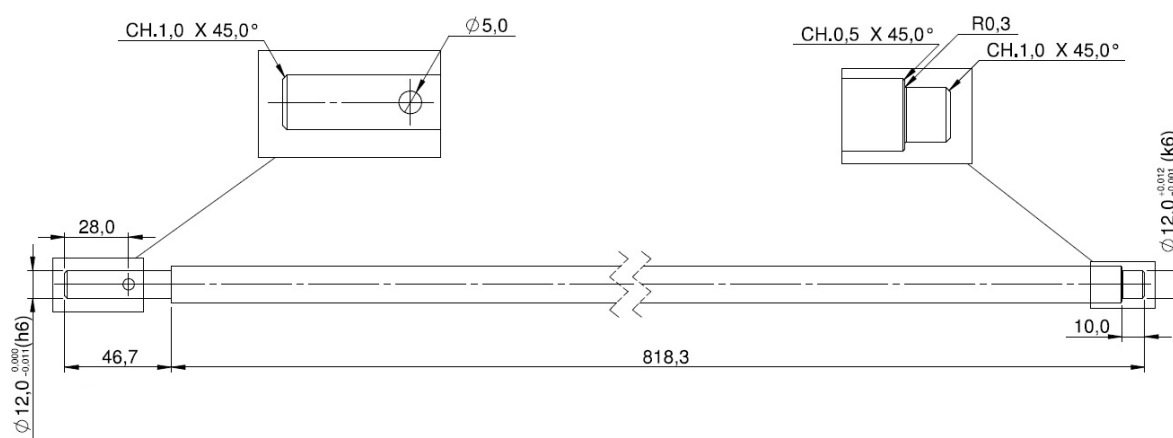
K: rigidez (kg/μm);

Ca: capacidade de carga dinâmica (kgf).

**Modelo SFU padrão DIN69051 Forma B**



Indicações em corte frontal da castanha

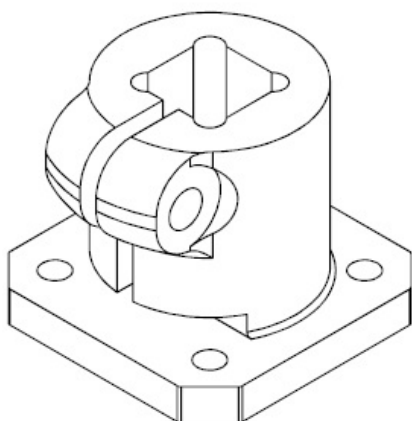


Dimensões dos fusos do eixo "X"

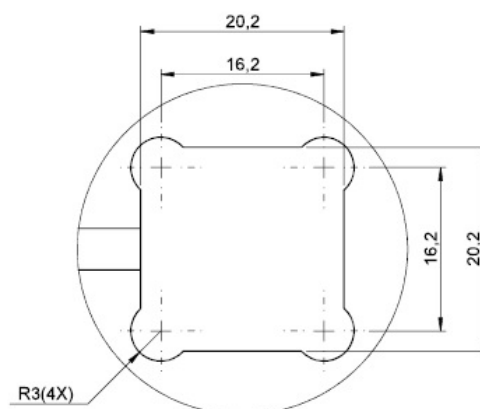
## 2. ACOPLAMENTOS E GUIAS DOS FUSOS DE ESFERAS

Os suportes dos fusos utilizados neste trabalho estão indicados abaixo com as suas respectivas dimensões.

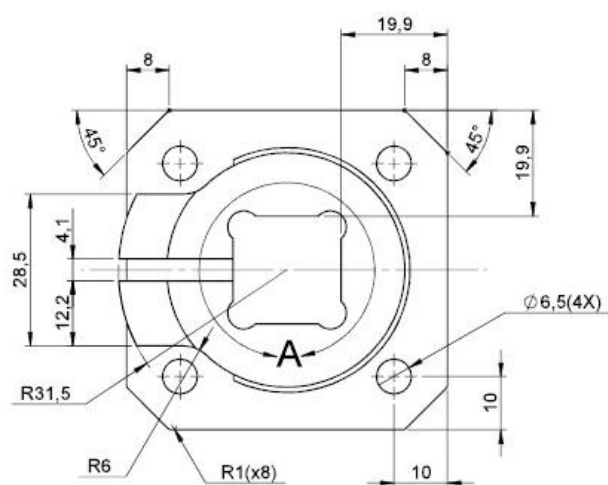
### Acoplamentos dos fusos:



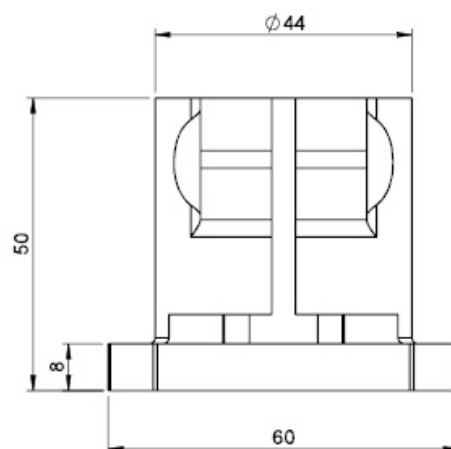
## Visão geral



Vista inferior

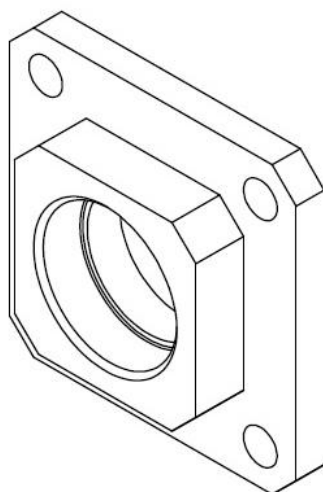


Vista superior

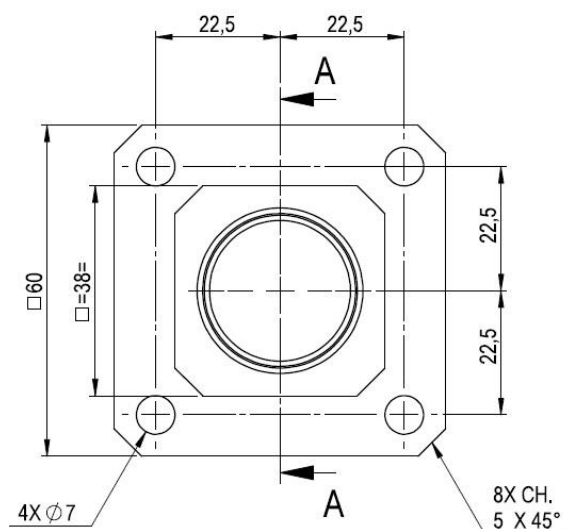


### Vista lateral

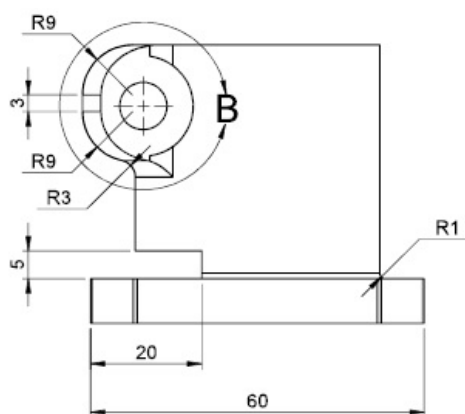
## Guias dos fusos:



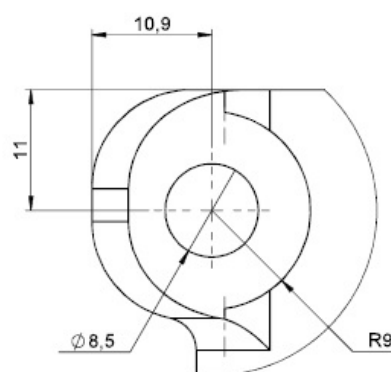
## Visão geral



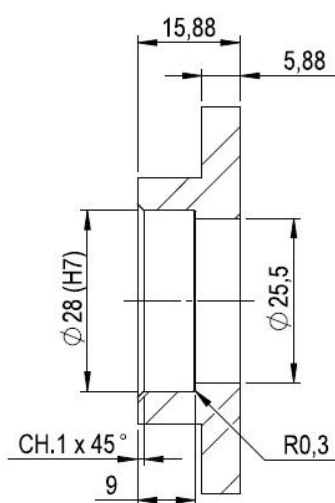
Vista frontal



### Detalhe da furação



## Cotas da furação

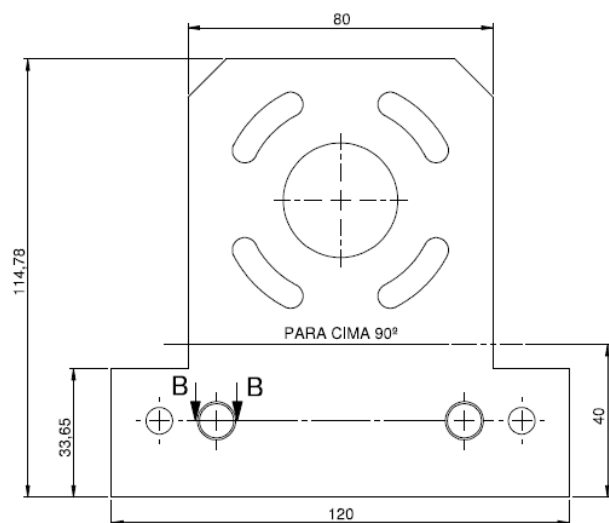


Seção A

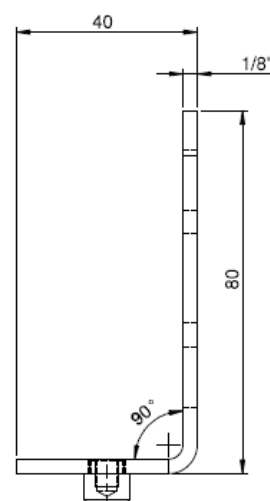


### 3. SUPORTES PARA ACOPLAMENTOS E GUIAS

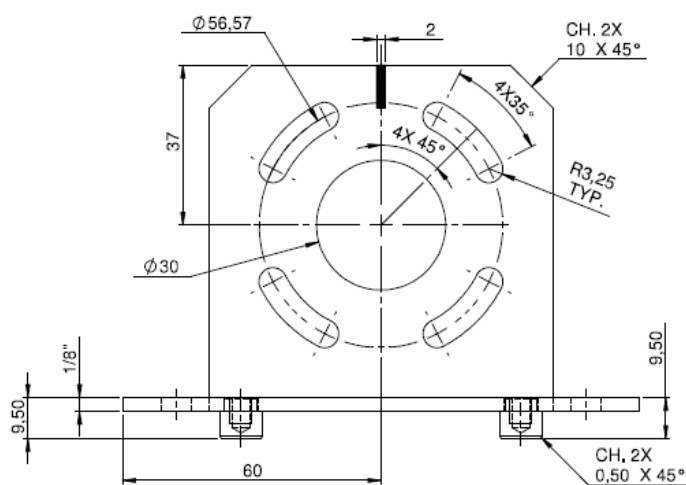
Os suportes metálicos dos acoplamentos dos fusos e guias utilizados neste trabalho estão indicados abaixo com as suas respectivas dimensões.



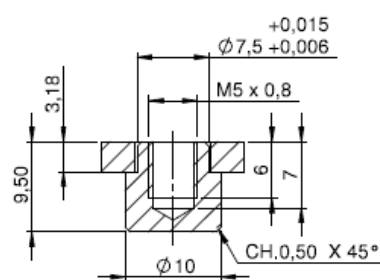
Vista frontal



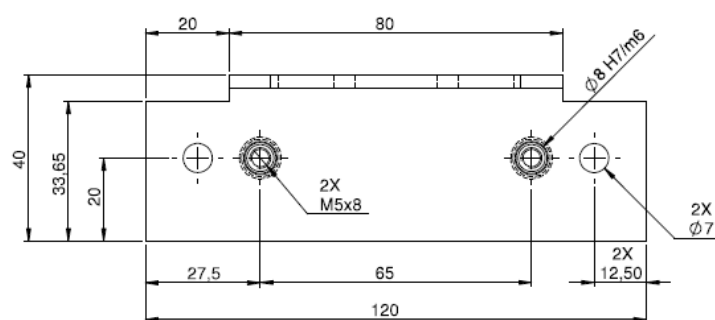
Vista lateral



Vista posterior



Seção B

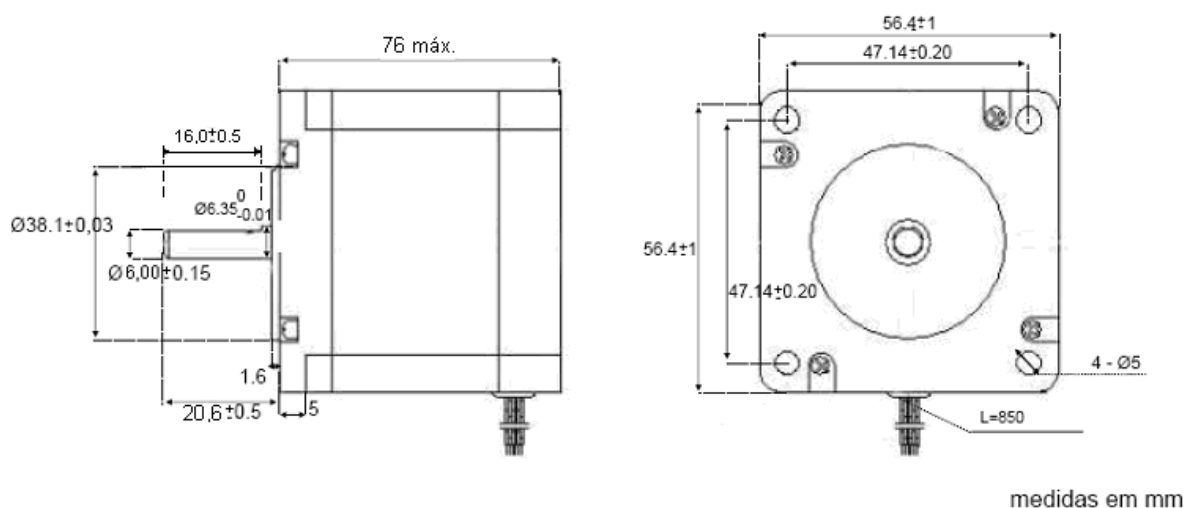


Vista inferior

## APÊNDICE B – Equipamentos Elétricos

### 1. MOTORES

Os servo motores utilizados neste trabalho para acionamento dos eixos dos fusos de posicionamento possuem as seguintes características:



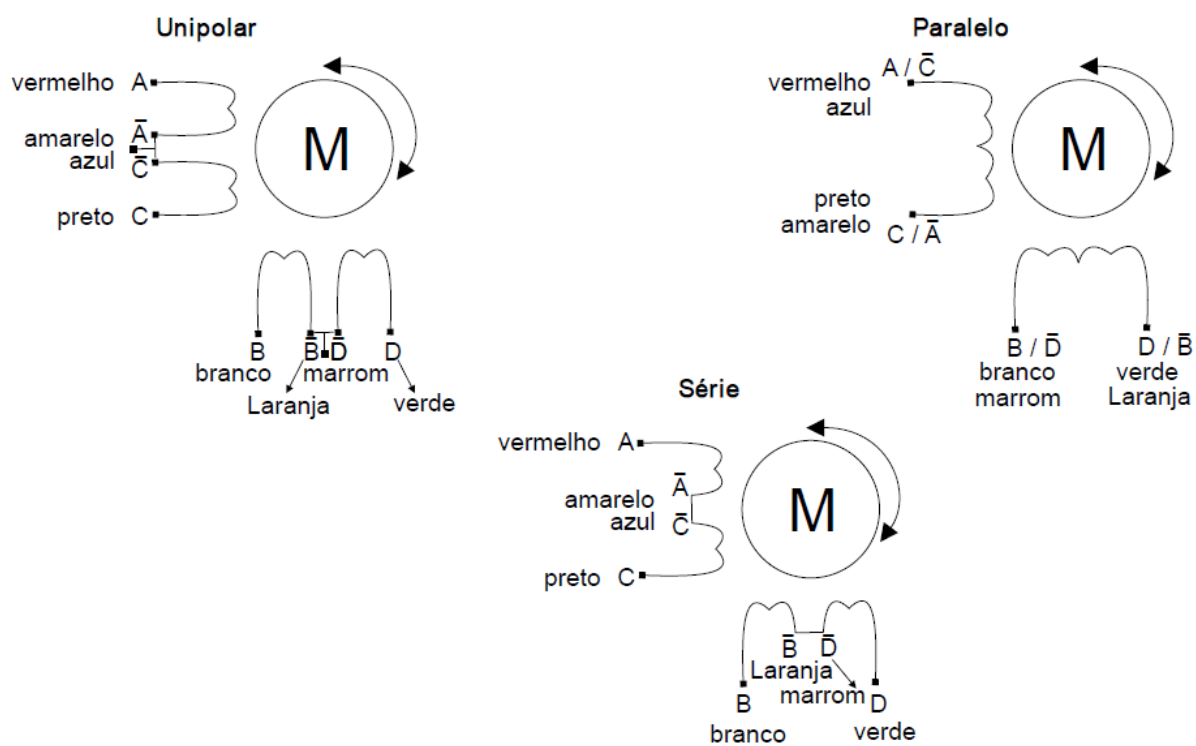
Dimensões do servo motor

Especificações Técnicas:

Modelo	Ângulo de passo	Número de fios	Classe de isolamento	Temperatura máxima operação	Peso (kg)
AK57H8/5.4-1.8	1.8°	8	B	80°C	1,0

Conexão	Holding (kgf.cm)	Tensão Fase (V)	Corrente Fase (I)	Resistência fase (Ω)	Indutância (mH)
Série	15	5,4	1	5,4	12
Paralela		2,6	2	1,3	3
Unipolar	10	3,7	1,4	2,7	6

Esquemas de ligação:



Ligação Unipolar	
Fios do motor	Terminal do Driver
Vermelho	A+
Preto	A-
Branco	B+
Verde	B-
Amarelo / Azul	Comum fase A
Laranja / Marron	Comum fase B

Ligação Bipolar Série	
Fios do motor	Terminal do Driver
Vermelho	A+
Preto	A-
Branco	B+
Verde	B-
Amarelo / Azul	Unidos
Laranja / Marron	Unidos

Ligação Bipolar Paralela	
Fios do motor	Terminal do Driver
Vermelho	A+
Preto	A-
Branco	B+
Verde	B-

## 2. DRIVES

### Características eléctricas drives A4988

Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ. <sup>2</sup>	Max.	Units
Output Drivers						
Load Supply Voltage Range	V <sub>BB</sub>	Operating	8	–	35	V
Logic Supply Voltage Range	V <sub>DD</sub>	Operating	3.0	–	5.5	V
Output On Resistance	R <sub>DS(ON)</sub>	Source Driver, I <sub>OUT</sub> = –1.5 A	–	320	430	mΩ
		Sink Driver, I <sub>OUT</sub> = 1.5 A	–	320	430	mΩ
Body Diode Forward Voltage	V <sub>F</sub>	Source Diode, I <sub>F</sub> = –1.5 A	–	–	1.2	V
		Sink Diode, I <sub>F</sub> = 1.5 A	–	–	1.2	V
Motor Supply Current	I <sub>BB</sub>	f <sub>PWM</sub> < 50 kHz	–	–	4	mA
		Operating, outputs disabled	–	–	2	mA
Logic Supply Current	I <sub>DD</sub>	f <sub>PWM</sub> < 50 kHz	–	–	8	mA
		Outputs off	–	–	5	mA
Control Logic						
Logic Input Voltage	V <sub>IN(1)</sub>		V <sub>DD</sub> ×0.7	–	–	V
	V <sub>IN(0)</sub>		–	–	V <sub>DD</sub> ×0.3	V
Logic Input Current	I <sub>IN(1)</sub>	V <sub>IN</sub> = V <sub>DD</sub> ×0.7	–20	<1.0	20	μA
	I <sub>IN(0)</sub>	V <sub>IN</sub> = V <sub>DD</sub> ×0.3	–20	<1.0	20	μA
Microstep Select	R <sub>MS1</sub>	MS1 pin	–	100	–	kΩ
	R <sub>MS2</sub>	MS2 pin	–	50	–	kΩ
	R <sub>MS3</sub>	MS3 pin	–	100	–	kΩ
Logic Input Hysteresis	V <sub>HYS(IN)</sub>	As a % of V <sub>DD</sub>	5	11	19	%
Blank Time	t <sub>BLANK</sub>		0.7	1	1.3	μs
Fixed Off-Time	t <sub>OFF</sub>	OSC = VDD or GND	20	30	40	μs
		R <sub>OSC</sub> = 25 kΩ	23	30	37	μs
Reference Input Voltage Range	V <sub>REF</sub>		0	–	4	V
Reference Input Current	I <sub>REF</sub>		–3	0	3	μA
Current Trip-Level Error <sup>3</sup>	err <sub>I</sub>	V <sub>REF</sub> = 2 V, %I <sub>TRIPMAX</sub> = 38.27%	–	–	±15	%
		V <sub>REF</sub> = 2 V, %I <sub>TRIPMAX</sub> = 70.71%	–	–	±5	%
		V <sub>REF</sub> = 2 V, %I <sub>TRIPMAX</sub> = 100.00%	–	–	±5	%
Crossover Dead Time	t <sub>DT</sub>		100	475	800	ns
Protection						
Overcurrent Protection Threshold <sup>4</sup>	I <sub>OCPST</sub>		2.1	–	–	A
Thermal Shutdown Temperature	T <sub>TSD</sub>		–	165	–	°C
Thermal Shutdown Hysteresis	T <sub>TSDHYS</sub>		–	15	–	°C
VDD Undervoltage Lockout	V <sub>DDUVLO</sub>	V <sub>DD</sub> rising	2.7	2.8	2.9	V
VDD Undervoltage Hysteresis	V <sub>DDUVLOHYS</sub>		–	90	–	mV

<sup>1</sup>For input and output current specifications, negative current is defined as coming out of (sourcing) the specified device pin.

<sup>2</sup>Typical data are for initial design estimations only, and assume optimum manufacturing and application conditions. Performance may vary for individual units, within the specified maximum and minimum limits.

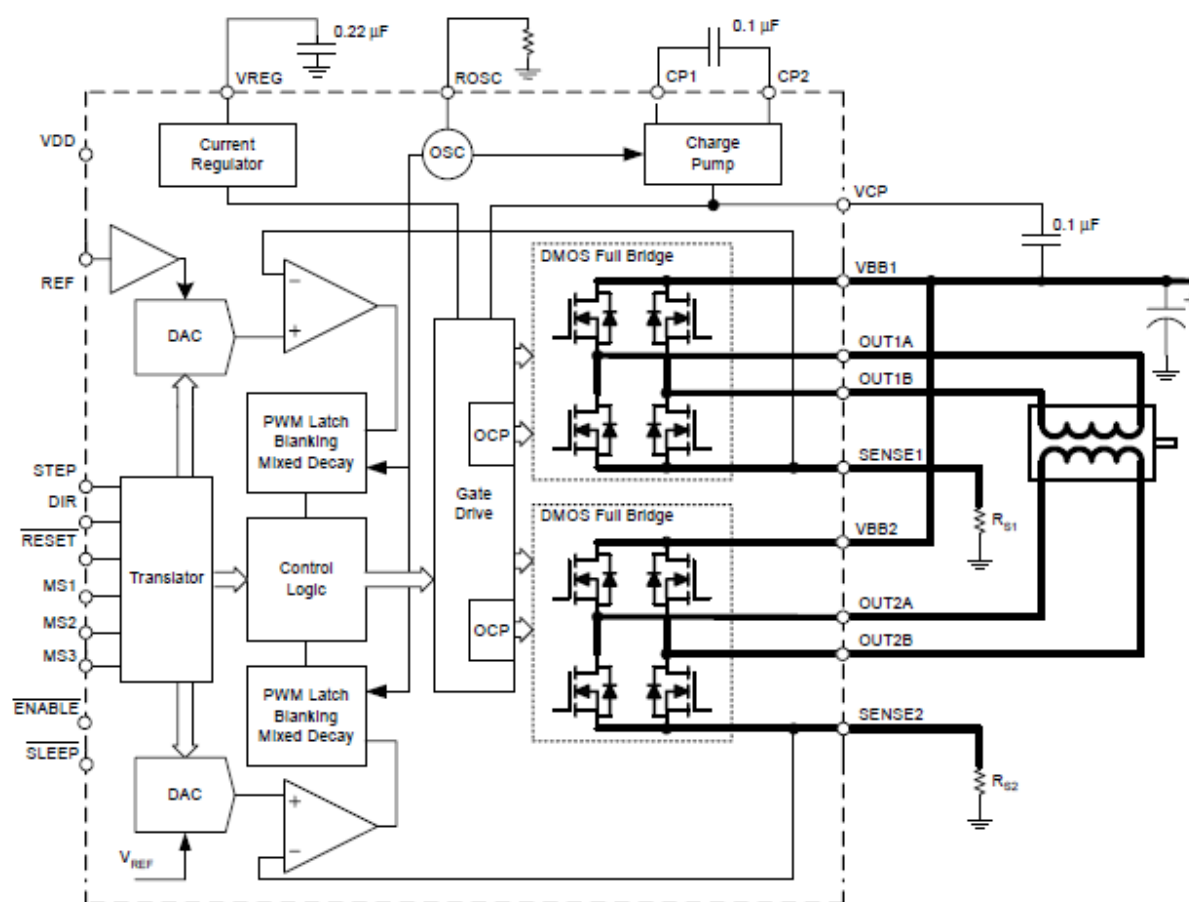
<sup>3</sup> $V_{ERR} = [(V_{REF}/8) - V_{SENSE}] / (V_{REF}/8)$ .

<sup>4</sup>Overcurrent protection (OCP) is tested at  $T_A = 25^{\circ}$ C in a restricted range and guaranteed by characterization.

## Limites de trabalho dos drives A4988

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Load Supply Voltage	$V_{BB}$		35	V
Output Current	$I_{OUT}$		$\pm 2$	A
Logic Input Voltage	$V_{IN}$		-0.3 to 5.5	V
Logic Supply Voltage	$V_{DD}$		-0.3 to 5.5	V
Motor Outputs Voltage			-2.0 to 37	V
Sense Voltage	$V_{SENSE}$		-0.5 to 0.5	V
Reference Voltage	$V_{REF}$		5.5	V
Operating Ambient Temperature	$T_A$	Range S	-20 to 85	°C
Maximum Junction	$T_J(max)$		150	°C
Storage Temperature	$T_{stg}$		-55 to 150	°C

## Diagrama elétrico do drive A4988



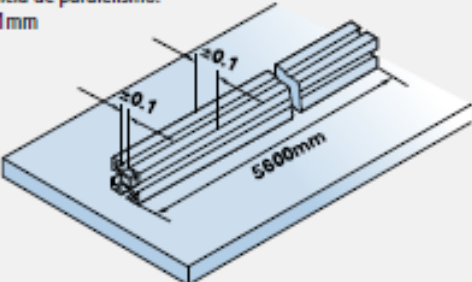
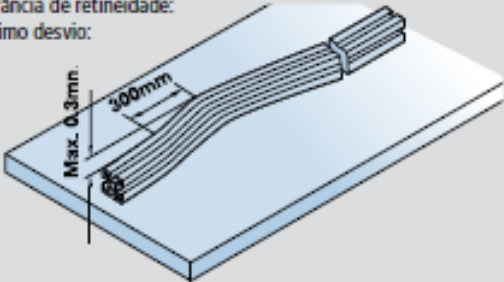
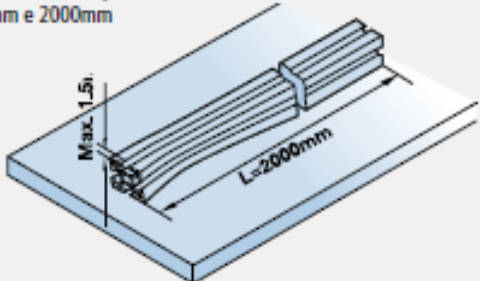
### 3. ARDUINO UNO

#### Especificações do Arduino UNO

Micro controlador	ATmega328P
Voltagem operacional	5V
Voltagem de alimentação (recomendada)	7-12V
Voltagem de alimentação (limites)	6-20V
Pinos I/O digitais	14 (6 podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógica	6
Corrente contínua por pino I/O	40 mA
Corrente contínua para o pino 3.3V	50 mA
Memória flash	32 KB (2KB para o <i>bootloader</i> )
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidade de clock	16 MHz

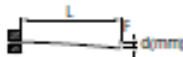
## ANEXO A – Fichas Técnicas

## 1. PERFIS EM ALUMÍNIO


Especificações Técnicas	
Composição do Material	AlMgSi0.5F25
Material Normalizado	Al6063-T5
Resistência Mínima à Tração	250N/mm <sup>2</sup>
0,2% escoamento:	160N/mm <sup>2</sup>
Alongamento A <sub>5</sub> :	10%
Alongamento A <sub>10</sub> :	8%
Módulo de Elasticidade:	70.000N/mm <sup>2</sup>
Dureza Brinell:	75HB
Coefficiente de Expansão Térmica:	(-50...+20°C) = 21,8 x 10 <sup>-6</sup> 1/K (+20...+100°C) = 23,8 x 10 <sup>-6</sup> 1/K
Espessura da anodização	10 µ
Dureza:	300HV
Tolerância de paralelismo: +/- 0,1mm	
Tolerância de retineidade: Máximo desvio:	
Tolerância de torção: 1,5mm e 2000mm	

## Cálculos de Deflexão


Deflexão do perfil na condição de carga estática

$$d_1 = \frac{F \times L^3}{3E \times I \times 10^4}$$


⊗ Barra fixa em uma das extremidades

$$d_2 = \frac{F \times L^3}{48E \times I \times 10^4}$$


⊗ Barra apoiada

$$d_3 = \frac{F \times L^3}{192E \times I \times 10^4}$$


⊗ Barra fixa em ambas as extremidades

Deflexão do perfil na condição da massa

$$d_1 = \frac{9,8 \times P \times L^4}{8E \times I \times 10^7}$$

$$d_2 = \frac{5 \times 9,81 \times P \times L^4}{348E \times I \times 10^7}$$

$$d_3 = \frac{9,81 \times P \times L^4}{384E \times I \times 10^7}$$

Verificação da tensão conforme o diagrama acima

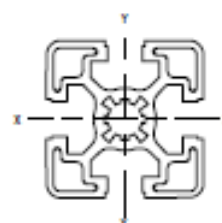
$$\sigma_{\max} < 200\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_1 = \frac{F \times L}{W \times 10^3}$$








$$\sigma_2 = \frac{F \times L}{4W \times 10^3}$$

$$\sigma_3 = \frac{F \times L}{8W \times 10^3}$$

E = 70.000N/mm<sup>2</sup> (módulo de elasticidade)  
 L = Comprimento da barra (mm)  
 F = Carga (N)  
 I = Momento de inércia (cm<sup>4</sup>)  
 D = Deflexão do perfil (mm)  
 W = Módulo de resistência (cm<sup>3</sup>)  
 P = Massa do perfil (Kg/m)



### Capacidades das Conexões Quanto à Aplicação de Carga

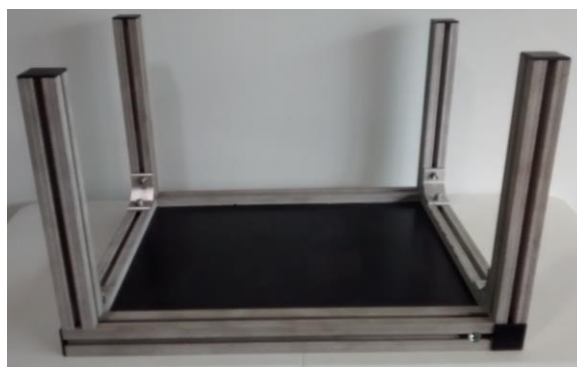
					
Conexões do Perfil	Carga Direta (N)	Carga Balanceada (L x F) Nm		Torção Nm	Posição na Junta
		Posição A	Posição B		
Cantoneira 36x36	1800	150	300	20	Posição A 
Cantoneira 42x43	2000	90	180	12	
Cantoneira 42x88	4000	180	360	30	Posição B 
Cantoneira Angular	2000	100	80	12	
Cantoneira Interna	800		80	10	
Cantoneira Interna	800		8	10	
Parafuso M8x30	1500		80	-	
Parafuso M12x30	3000		200	-	

Fonte: OBR Equipamentos Industriais Ltda



**ANEXO B – Fotos das Peças**

Perfis de alumínio



Mesa de trabalho montada



Cantoneira de trava



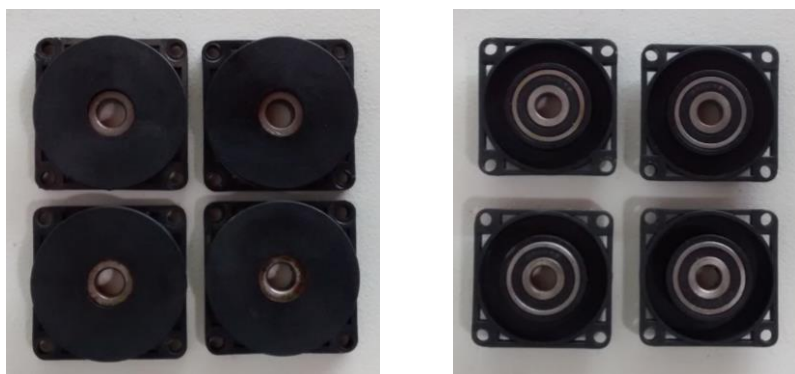
Chapas das castanhas dos eixos X e Y



Castanhas com esferas recirculantes



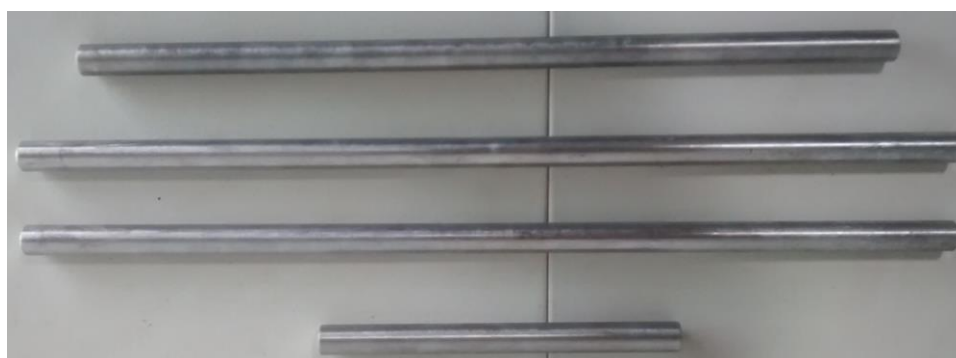
Fusos com suas respectivas castanhas



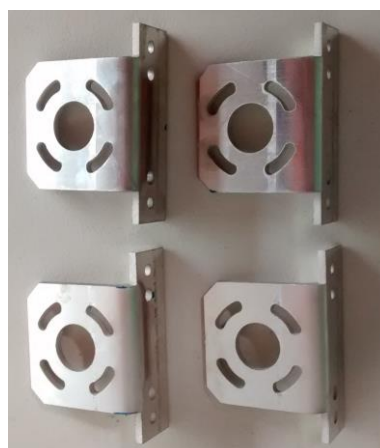
Mancais dos fusos



Travas dos tubos guias



Tubos guias



Chapas base das travas dos tubos



Chapas base dos mancais



Chassis de suporte do eixo X

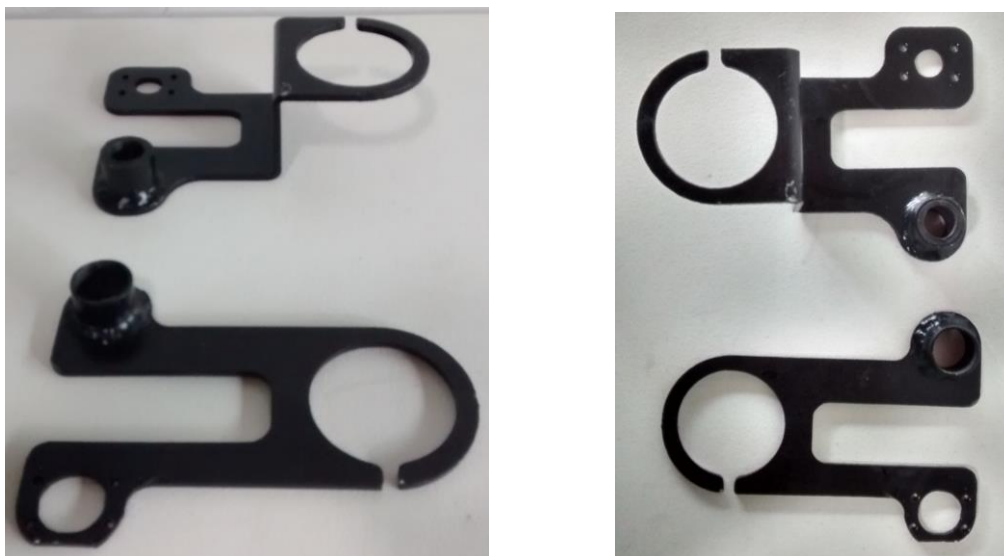


Chapa base Z 1



Chapa base Z 2





Chapa base da tupia inferior e principal



Motores dos eixo Y e Z



Motor do eixo X



Fonte chaveada 24Vcc

### ANEXO C – Custos da CNC

O projeto proposto da máquina-ferramenta tipo CNC pode de ser replicado por qualquer pessoa que tenha interesse no assunto. No entanto, a execução possui um custo considerável para seu desenvolvimento. Assim, seguem abaixo três planilhas destacando os custos envolvidos na construção da máquina.

#### CUSTO DOS COMPONENTES MECÂNICOS

ITEM	PEÇAS	QTD.	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
1	Cantoneiras	8	R\$ 30,00	R\$ 240,00
2	Chapa em MDF	1	R\$ 20,00	R\$ 20,00
3	Chapa cantoneira 1"	4	R\$ 30,00	R\$ 120,00
4	Trava tubular 1"	8	R\$ 30,00	R\$ 240,00
5	Eixo 16mm x, y e z (guia linear)	1	R\$ 21,18	R\$ 21,18
6	Fuso Y com castanha 1605	2	R\$ 230,00	R\$ 460,00
7	Fuso X com castanha 1605	1	R\$ 230,00	R\$ 230,00
8	Fuso Z com castanha 1605	1	R\$ 230,00	R\$ 230,00
9	Rolamento fuso	4	R\$ 3,00	R\$ 12,00
10	Bloco rolamento	6	R\$ 10,00	R\$ 60,00
11	Bloco fuso	8	R\$ 20,00	R\$ 160,00
12	Suporte alumínio para bloco	4	R\$ 60,00	R\$ 240,00
13	Perfil estrutural de alumínio 370mm	4	R\$ 40,00	R\$ 160,00
14	Perfil estrutural de alumínio 600mm	2	R\$ 60,00	R\$ 120,00
15	Chapa trava bloco	4	R\$ 100,00	R\$ 400,00
16	Chapa base mancais lateral	3	R\$ 40,00	R\$ 120,00
17	Trava corredeira eixo Z	2	R\$ 70,00	R\$ 140,00
18	Rolamento linear	6	R\$ 16,00	R\$ 96,00
19	Nema23	4	R\$ 220,00	R\$ 880,00
20	Chapa base mancais principal	1	R\$ 80,00	R\$ 80,00
21	Parafusos allen m4, m5, m6, m7	50		R\$ 100,00
22	Arruelas	50		R\$ 40,00
23	Porcas	50		R\$ 70,00
24	Chapa base mancais inferior	1	R\$ 80,00	R\$ 80,00
25	Acoplamento	4	R\$ 15,00	R\$ 60,00
26	Tupia Makita modelo 3709	1	R\$ 307,90	R\$ 307,90
27	Base para acoplamento tupia	1	R\$ 37,00	R\$ 37,00
28	Fresas e acoplamentos para pcb	4	R\$ 17,50	R\$ 70,00
		Total Geral		R\$ 4.714,08



**CUSTO DOS DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS**

ITEM	PEÇAS	QTD.	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
1	Arduino uno	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00
2	Fonte de alimentação 220Vac/ 24Vcc, 10A	1	R\$ 350,00	R\$ 350,00
2	CNC shield	1	R\$ 26,00	R\$ 26,00
3	Driver A4988	4	R\$ 4,00	R\$ 24,00
4	Interruptor kW11 (fim de curso)	8	R\$ 2,50	R\$ 20,00
5	Eixo 16mm X, Y e Z (guia linear)	1	R\$ 21,18	R\$ 21,18
6	Borne sindal	4	R\$ 7,00	R\$ 28,00
7	Fio 0,5mm ligação arduino	4	R\$ 2,74	R\$ 10,96
8	Fio ligação fonte de alimentação	2	R\$ 2,00	R\$ 2,00
		Total Geral		R\$ 532,14

**CUSTO DOS SERVIÇOS**

ITEM	SERVIÇOS	QTD.	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
1	Serviços mecânicos / ajustes	1	R\$ 480,00	R\$ 480,00
2	Serviços de usinagem	8	R\$ 50,00	R\$ 400,00
3	Serviços de pintura	14	R\$ 40,00	R\$ 560,00
		Total Geral		R\$ 1.440,00