



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

PAULO OLÍMPIO MAIA NETO

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE UMA MÁQUINA CNC *ROUTER* PARA
PROTOTIPAGEM DE CIRCUITOS IMPRESSOS**

CARAÚBAS

2019

PAULO OLÍMPIO MAIA NETO

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE UMA MÁQUINA CNC ROUTER PARA
PROTOTIPAGEM DE CIRCUITOS IMPRESSOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Rudson de Souza Lima
Coorientador: Prof. Me. José Ailton Leão
Barbosa Júnior

CARAÚBAS

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N469p

Neto, Paulo Olímpio Maia .

Projeto e fabricação de uma máquina CNC router para prototipagem de circuitos impressos / Paulo Olímpio Maia Neto. - 2019.

55 f. : il.

Orientador: Rudson de Souza Lima.

Coorientador: José Ailton Leão Barbosa Júnior.

Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e Tecnologia, 2019.

1. Construção. 2. Placas de circuitos impressos. 3. Máquina. 4. CNC. 5. Estrutura. I. Lima, Rudson de Souza, orient. II. Júnior, José Ailton Leão Barbosa, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PAULO OLÍMPIO MAIA NETO

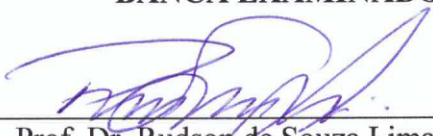
**PROJETO E FABRICAÇÃO DE UMA MÁQUINA CNC ROUTER PARA
PROTOTIPAGEM DE CIRCUITOS IMPRESSOS**

/

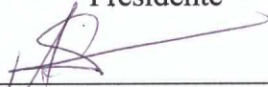
Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 14 /08 / 2019.

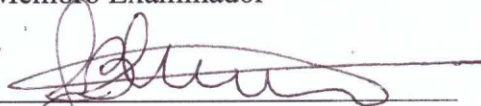
BANCA EXAMINADORA



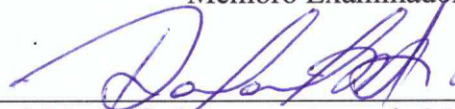
Prof. Dr. Rudson de Souza Lima (UFERSA)
Presidente



Prof. Me. José Ailton Leão Barbosa Júnior (UFERSA)
Membro Examinador



Prof. Dr. Jackson de Brito Simões (UFERSA)
Membro Examinador



Prof. Me. Rafael Bezerra Azevedo Mendes (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por sempre me incentivar e apoiar, sem sombras de dúvidas, vocês são à base da minha formação acadêmica e os principais responsáveis por tornar os meus sonhos realidade. Em especial, agradeço a minha mãe Solange, meu pai Everaldo, minha Avó Nita e a minha tia Lena que nunca medem esforços para me ajudar, dedico esse trabalho a vocês. As minhas irmãs, Samara, Emile e Marina por sempre serem minhas amigas e me incentivarem. Nada sem vocês seria possível.

Quero agradecer a todos os meus amigos de Belém do Brejo do Cruz e de Caraúbas que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho. A todos, serei eternamente grato pela força que me deram para percorrer esse trajeto. Agradeço em especial aos meus amigos Wedson, Jhonathan e Lucas por me ajudarem sempre no dia a dia e por sempre me apoiarem nas minhas escolhas. Agradeço de coração a minha colega, amiga e irmã, Géssica Moura. És o presente que a universidade me proporcionou.

Agradeço também a todos os meus amigos da residência, não é possível citar todos sem esquecer algum nome, afinal, são muitos; mas vocês sabem que foram peça chave para a realização desse projeto. Aos colegas do quarto 17 da ala masculina (meu quarto) faço um agradecimento especial. Obrigado por toda paciência e compreensão para comigo.

Quero agradecer de coração ao Técnico do Laboratório Samir Sena por ter me auxiliado nos momentos que precisei e por ter me ensinado coisas que jamais imaginei aprender, os conhecimentos que adquiri através de você acerca da utilização e funcionamento de máquinas e ferramentas foram fundamentais para a minha formação acadêmica.

Agradeço ao Professor Brito e ao seu aluno e membro de projeto Aleandro, por terem me ajudado na reta final do meu TCC, sem a ajuda de vocês, o trabalho não teria sido concluído. Então, expresso aqui, os meus mais sinceros agradecimentos aos dois, vocês foram peça chave para fazer o trabalho acontecer!

E por último, mas de maneira alguma menos importante, agradeço ao meu Orientador Rudson de Souza Lima e ao meu Coorientador José Ailton Leão Barbosa Júnior, que me guiaram e me motivaram neste projeto, se mostrando excelentes profissionais. A contribuição de vocês foi de fundamental importância para o meu crescimento pessoal e profissional. Obrigado principalmente por terem me compreendido em momentos que falhei e por toda a paciência que tiveram comigo durante esse trajeto. Agradeço, também, a banca examinadora pelo tempo disponibilizado na leitura e avaliação o meu trabalho.

RESUMO

Com a revolução industrial e a constante necessidade por produtos cada vez mais precisos e em larga escala de produção, as linhas de produção tem buscado constantemente por equipamentos para atender a essa demanda. Entretanto equipamentos de precisão estão, em sua maioria, estão associados a grandes investimentos iniciais. Dentro dessa perspectiva, esse trabalho aborda e apresenta o projeto e construção de um sistema baseado no conceito de controle numérico computadorizado para prototipagem de placas de circuito impresso (PCI). O foco desse projeto é um equipamento de pequeno porte, de baixo custo comparado a máquinas similares encontradas no mercado, e que terá grande utilidade para o desenvolvimento com circuitos eletrônicos, pois esta, quando realizada de maneira manual, pode ocasionar erros comprometedores. A estrutura da máquina possui um sistema mecânico de movimentação em três eixos cartesianos (X, Y e Z) e é inteiramente construída com materiais encontrados no mercado local.

Palavras-chave: Construção. Placas de circuito impresso. Máquina. Estrutura.

ABSTRACT

With an industrial revolution and a need for increasingly accurate and large-scale production products, as production lines have been constantly looking for equipment to meet this demand. Precision equipment is mostly associated with large upfront investments. The debate was held, the paper discusses and presents the design and construction of a system based on the concept of numerical control for prototyping printed circuit boards (PCI). The focus is on a small model, low cost to similar machines there is no market, and it is of great use for the development of electronic systems, because this, when done manually, can generate compromising errors. The machine frame has a Cartesian three-layer moving system (X, Y and Z) and is entirely built on the local market.

Keywords: Construction. Printed Circuit Board. Machine. Structure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de coordenadas de uma máquina CNC	18
Figura 2 – Sistema cartesiano de deslocamento de uma máquina CNC	19
Figura 3 - (a) Guia de rolamentos circulares e (b) prismáticas.	20
Figura 4 - (a) Barramento rabo de andorinha e (b) prismática em V.	20
Figura 5 - Classificação dos elementos de conversão de movimento	21
Figura 6 - Classificação dos elementos de conversão de movimento.	22
Figura 7 - Conjunto Pinhão/Cremalheira.....	23
Figura 8 - Fuso trapezoidal (esquerda) e fuso de esferas recirculantes (direita).	23
Figura 9 - Conjunto corrente de rolo/engrenagem.....	24
Figura 10 - Conjunto polia e correia sincronizada.	24
Figura 11 - Classificação dos elementos de acoplamento do movimento	26
Figura 12 - Comparação dos acionamentos rotativos.....	27
Figura 13 - Motor assíncrono	27
Figura 14 - Exemplo de Servomotor.	28
Figura 15 - Exemplo motor de passo.....	29
Figura 16 - Motor de relutância variável.	30
Figura 17 - Motor de ímã permanente.	30
Figura 18 - Motor Híbrido.	31
Figura 19 - Comparação dos sensores de fim de curso.	33
Figura 20 - Estrutura mecânica da máquina.	38
Figura 21 - Estrutura mecânica do eixo X.....	39
Figura 22 - Estrutura mecânica do eixo Y.....	39
Figura 23 - Estrutura mecânica do eixo Z.	40
Figura 24 - Sistema de deslocamento do eixo X.	41
Figura 25 - Sistema de deslocamento do eixo Y.	41
Figura 26 - Sistema de deslocamento eixo Z.....	42
Figura 27 - Exemplo do sistema de transmissão utilizado.	43
Figura 28 - Exemplos de aplicação dos rolamentos.	44
Figura 29 - Rolamento 608RS.	44
Figura 30 - Comparativo entre projeto e construção	48
Figura 31 - Estrutura mecânica do eixo X montada	48
Figura 32 - Estrutura mecânica dos eixos Y e Z montados.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade e preços das peças compostas de MDF	45
Tabela 2 - Quantidade e preço dos componentes metálicos	46
Tabela 3 - Quantidade e preço dos componentes impressos	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMAQ	Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos
CN	Comando Numérico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
PCI	Placa de Circuitos Impressos
MDF	Medium Density Fiberboard
IBM	Máquinas de Negócio Internacionais
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachussetts
A.C	Antes de Cristo
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
ULA	Unidade de Lógica e Aritmética
EIA	Eletronic Industries Alliance
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAM	Manufatura Assistida por Computador
FR	Frame Resistant
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semiárido
MEJ	Movimento Empresa Júnior

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
\$	Cifrão
°	Graus
°C	Graus Celsius
U\$	Euros
mm	Milímetros
mm ²	Milímetros Quadrados

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.2	BREVE HISTÓRICO do CN E CNC.....	17
2.3	ASPECTOS MECÂNICOS.....	18
2.3.1	Coordenadas e eixos de deslocamento de uma máquina CNC.....	18
2.3.2	Guias lineares.....	19
2.3.3	Transmissão dos movimentos.....	20
2.3.4	Sistemas de acoplamento	25
2.4	ASPECTOS ELETRÔNICOS	26
2.4.1	Dispositivos de acionamento	26
2.4.2	Motores assíncronos	27
2.4.3	Servomotores	27
2.4.4	Motores de passo	28
2.4.5	Microcontroladores.....	31
2.4.6	Sensores	32
2.5	COMANDO E CONTROLE.....	33
2.5.1	Programas CAD e CAM.....	34
2.6	PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	34
3	DESENVOLVIMENTO	36
3.2	MECÂNICA	36
3.2.1	Estrutura.....	36
3.2.2	Sistema de deslocamento eixo X, Y e Z	40
3.2.3	Sistema de tração	42
3.2.4	Rolamentos	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.2	Custos	45
4.3	FACILIDADE DE FABRICAÇÃO, MONTAGEM E ADAPTAÇÃO.....	47
5	CONCLUSÃO.....	50
6	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	51

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
----------------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, o homem sempre sentiu a necessidade de construir artefatos que facilitassem as tarefas do dia a dia. O uso de ferramentas robustas e primitivas se dá desde a pré-história onde eram utilizadas para a sobrevivência de modo geral. Com a evolução intelectual da espécie humana e com a introdução dos metais, surgem as primeiras máquinas.

A história da máquina operatriz moderna, capaz de modelar metais começa com a Revolução Industrial inglesa no século XVIII, quando James Watt criou um mecanismo a vapor para alimentar uma máquina, substituindo qualquer esforço humano ou animal. Para a Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ) (2006) a passagem da energia humana, hidráulica e animal para a motriz foi apenas o ponto culminante de uma evolução tecnológica, social e econômica que se vinha processando na Europa. Assim, dando início a indústria moderna.

Segundo Sincak, Dilda e Lermen (2016) a disputa tecnológica e comercial atrelada à busca por diferenciais competitivos fez surgir ferramentas antes não pensadas, como por exemplo, às máquinas automatizadas conhecidas também como máquinas como máquinas de controle numérico computadorizado.

Hoje, as aplicações desse tipo de máquina na indústria são inúmeras, indo desde a indústria metalomecânica até a indústria eletrônica, onde são largamente utilizadas na prototipagem de circuitos impressos, que de acordo com Gobbi (2014) tem um papel fundamental no desenvolvimento tecnológico, caracterizando-se como um elemento indispensável que está presente em praticamente todos os produtos eletrônicos.

A criação de protótipos em universidades e centros de ensino muitas vezes se mostra inviável, pois segundo Carstens e Carstens (2015) uma das maiores dificuldades dos profissionais da área eletrônica é a prototipagem de PCI (placa de circuitos impressos) devido ao processo manual empregado na confecção do componente, cuja técnica ordinariamente utilizada para a formação do *layout* sobre a superfície metálica da placa é a transferência térmica do desenho impresso e posteriormente corrosão por ataque químico a base de Percloroeto de Ferro.

Esse método onde o *layout* do circuito é transferido para a superfície da placa utilizando papel especial e uma prensa térmica aquecida a cerca de 130 °C é bastante utilizado devido ao baixo custo da produção. Porém, na maioria das vezes o processo utilizado se mostra ineficiente, pois requer materiais adequados e de qualidade para o processo e uma

excelente noção de espaço tridimensional do projetista (CARSTENS, CARSTENS, 2015). De acordo com Perché (2013) a maior dificuldade técnica encontrada é repassar o circuito com precisão, podendo ser necessário realizar novas reimpressões. Outro fator preponderante é a corrosão, que quase sempre altera o formato original da trilha de cobre, de tal forma que o circuito venha a ser comprometido.

Uma máquina automática CNC pode trazer resultados bastante satisfatórios na confecção de PCI. Além de ser uma ferramenta que facilita o processo, o equipamento também permite automatizar uma ou mais etapas da fabricação como corte, perfuração da placa, usinagem das trilhas e isolamento dos circuitos elétricos. De acordo com Kugler (2004) a isolamento das trilhas se dá pela retirada do cobre com uma fresa mecânica. A principal finalidade do fresamento é a remoção do excesso de metal da superfície de uma peça para que essa assuma o formato desejado.

O valor da terceirização para a produção automatizada de placas de circuito impresso é diretamente proporcional à quantidade de placas encomendadas. Fator esse que se mostra vantajoso na produção de grande ou média escala (LUCCA, 2013). Que ainda segundo o autor, inviabiliza a encomenda de pequenas quantidades para a aplicação em protótipos e projetos em geral.

Infelizmente, as máquinas operatrizes controladas numericamente disponíveis no mercado são de difícil aquisição para o pequeno e médio empresário e até mesmo para instituições de ensino por se tratar de um equipamento com preço elevado, que segundo Perché (2013) chega a custar mais de U\$ 6.000,00. Outro problema que compromete a implementação de tecnologias como essas são os custos de manutenção da máquina e a necessidade de mão de obra especializada para a operação.

A quarta revolução industrial, conhecida também como Era das Máquinas Livres trouxe consigo uma série de aparatos que vão desde microcontroladores até plataformas gratuitas de programação e edição, que possibilitam a construção de aparelhos complexos, como uma máquina CNC de pequeno porte, capaz de operar e trabalhar sem a intervenção direta do operador (GOODRICH, 2012).

Tendo em vista as dificuldades encontradas na confecção de PCI de forma manual, propõe-se a fabricação de uma máquina CNC Router.

De modo a reduzir os custos do projeto, a estrutura mecânica será composta de *Medium Density Fiberboard* (MDF) com movimentação em três eixos cartesianos primários (X e Y) e um terceiro eixo (Z) com movimentação vertical.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Projetar e fabricar uma máquina CNC *Router* que seja capaz de usinar uma PCI.

1.2.2 Objetivos específicos

- a. Desenvolver o projeto mecânico estrutural da máquina-ferramenta;
- b. Fabricar os componentes mecânicos;
- c. Realizar a montagem da estrutura mecânica;
- d. Avaliar os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2 BREVE HISTÓRICO DO CN E CNC

As máquinas operatrizes são um legado da Revolução Industrial, e desde os anos 60 seu design original vem sendo levado a um novo nível de sofisticação. As maiores mudanças ocorreram na parte de controle.

A posição das ferramentas e a velocidade das máquinas eram controladas manualmente através de volantes, no início dos anos 50 os volantes passaram a ser controlados por cartões perfurados que acionavam uma sequência numérica exata, a sequência podia ser repetida e o processo foi chamado de controle numérico. O sistema foi inventado em 1947 quando John Parsons programou uma retífica com cartão perfurado da IBM (SEAMES, 2001).

O desenvolvimento de uma máquina totalmente programável com cartões perfurados deu início a uma nova era. Com o sucesso do projeto realizado pela *Parsons Corporation*, a força aérea americana visualizou um possível avanço tecnológico na fabricação de materiais bélicos voltados para uso em aeronaves e decidiu contratar a *Parsons*, patrocinando estudos e adaptações de controle numérico para máquina-ferramenta convencional. Deste modo, criaram o protótipo de uma máquina com tecnologia CNC que foi demonstrado em 1953 no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) (FALK, 2003).

O ímpeto dado pela força aérea americana permitiu um rápido desenvolvimento de uma variedade de controle de máquinas e sistema de armazenamento de dados. De acordo com Polastrini (2016) Essa tecnologia vem sendo aprimorada de forma contínua, se adaptando juntamente com o avanço tecnológico, possibilitando cada vez mais a automatização do processo de produção.

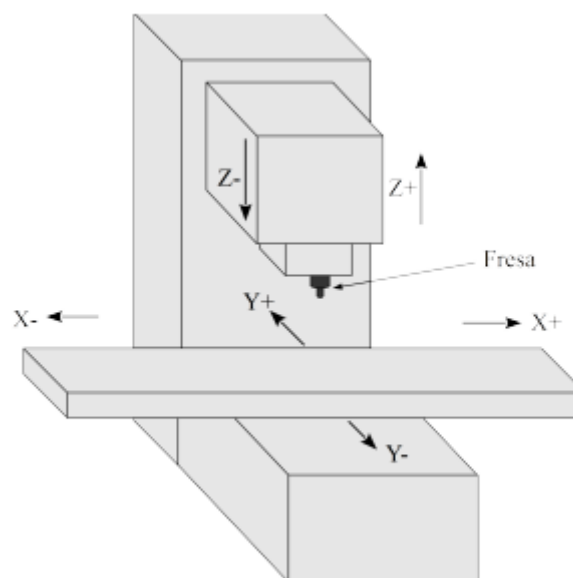
Segundo Machado (1986) a implementação de um sistema CNC em uma máquina possibilita a realização de uma sequência de operações lógicas através de comandos numéricos previamente programados. Esses comandos representam o sistema de coordenadas (X, Y, Z) e tornam a máquina capaz de executar a fabricação de qualquer perfil geométrico.

2.3 ASPECTOS MECÂNICOS

2.3.1 Coordenadas e eixos de deslocamento de uma máquina CNC

Uma máquina CNC é capaz de trabalhar em pontos específicos de uma peça sem que haja acompanhamento humano durante um ciclo de usinagem completo. A movimentação complexa de forma totalmente automatizada de uma fresadora é realizada com base em um sistema de coordenadas geométricas espacial (Figura 1). Algumas máquinas CNC modernas conseguem se movimentar em até sete eixos, possibilitando a produção de peças com um grau de complexidade avançado (MADISON, 1996; MASCARENHAS, 2013).

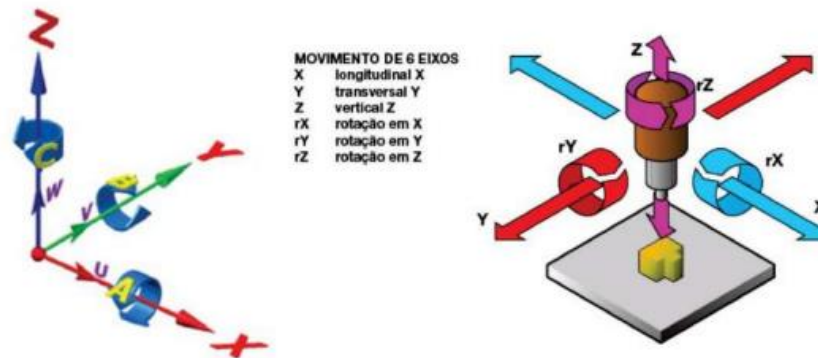
Figura 1 - Sistema de coordenadas de uma máquina CNC



Fonte: Adaptado de Madison (1996)

O eixo de uma máquina CNC refere-se à capacidade da máquina de se mover nos planos de coordenadas cartesianas. Quando a máquina tem a capacidade de se deslocar em três direções simultaneamente, pode-se afirmar que a máquina tem três eixos. As máquinas utilizadas para usinar peças com um alto grau de complexidade possuem eixos paralelos aos primários que possibilitam a rotação da ferramenta em torno do plano (X, Y e Z), resultando movimentos nos planos secundários (rX , rY , rZ) (Figura 2) (POLASTRINI, 2016; MADISON, 2006).

Figura 2 – Sistema cartesiano de deslocamento de uma máquina CNC



Fonte: Adaptado de Rocha e Karlo (Acesso em: 10 agosto 2016).

2.3.2 Guias lineares

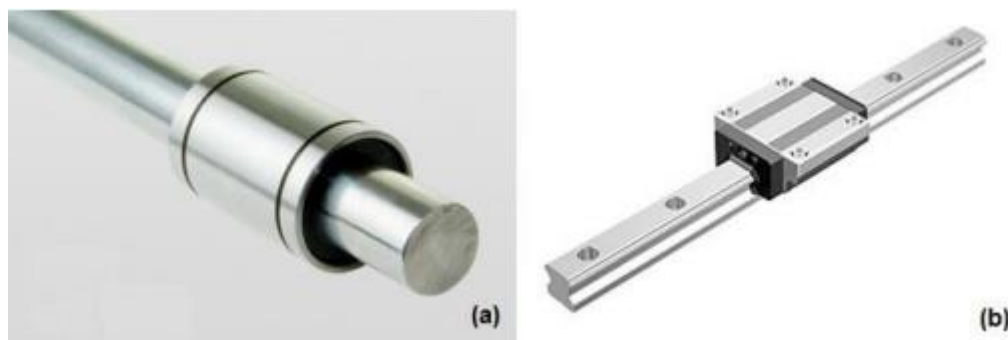
Há 1.100 anos A.C (antes de Cristo) os Assírios usaram o conceito básico da roda e aplicaram em alguns mecanismos simples baseados em elementos rolantes. Porém a aplicação de guias baseado em elementos rolantes lineares para uso em máquinas-ferramentas só aconteceu em 1932, quando Gretsh patenteou na França um sistema desenvolvido por ele. Tratava-se de uma guia com duas carreiras de esferas recirculantes montadas em um bloco que deslizava sobre um trilho com canais em forma circular (STOETERAU, 2004).

A principal finalidade da guia é manter um deslizamento suave e com o mínimo de atrito possível, permitindo o deslizamento de um componente sobre o outro em um padrão dado. Em guias lineares, o padrão de movimento é retilíneo e geralmente restrito a um grau de liberdade (STOETERAU, 2004).

Existem diversas configurações e formatos de guias lineares. As mais comuns encontradas em máquinas e no mercado é a guia linear de rolamento e a guia linear de deslizamento.

As guias de rolamento mais comuns são as circulares, conforme Figura 3 (a), por possuírem grande resistência e proporcionar uma boa precisão na movimentação da máquina, seguida pela guia linear prismática, Figura 3 (b), que é capaz de autolubrificar-se através de esponjas localizadas na sua extremidade, o que garante um bom funcionamento dos trilhos.

Figura 3 - (a) Guia de rolamentos circulares e (b) prismáticas.



Fonte: Adaptado de OBR (2019).

Segundo Gordo e Ferreira (2005) as guias lineares de deslizamento mais populares são a “rabo de andorinha”, Figura 4 (a), e guias prismáticas em V, como pode ser observado na Figura 4 (b).

Figura 4 - (a) Barramento rabo de andorinha e (b) prismática em V.



Fonte: Adaptado de Kalatec (2019) e MIstatic (2019).

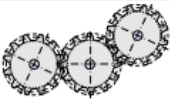
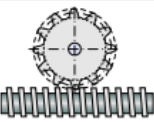
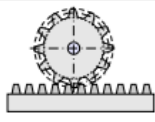
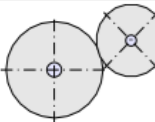
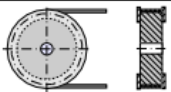
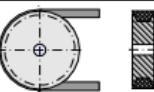
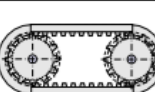
2.3.3 Transmissão dos movimentos

De acordo com Slocum (1992) a maioria das máquinas-ferramentas atuais usa um sistema de movimentação baseado na transformação do movimento rotativo proporcionado por uma máquina de ação rotativa em uma translação pura. Todos os movimentos de uma máquina-ferramenta, exceto a árvore principal, são deslocamentos lineares.

Segundo Stoeterau (2004) existe uma série de soluções mecânicas que permitem a conversão do movimento de rotação em uma translação, como por exemplo: trens de engrenagem, engrenagens/sem-fim, engrenagens/cremalheiras, polias em V, polias dentadas ou sincronizadas, correntes, rodas de atrito e outras.

A Figura 5 aborda os principais sistemas de conversão de movimento utilizados nas máquinas-ferramentas, classificando-os a partir de seus requisitos significativos. Sendo eles o custo, vibrações, sincronismo no movimento, capacidade de transmissão de força/torque, facilidade de manutenção e vida útil.

Figura 5 - Classificação dos elementos de conversão de movimento

Tipo	Trens de engrenagens	Engrenagens / Sem-fim	Engrenagens / Cremalheiras	Rodas de atrito
Requisitos				
Custo	Médio	médio	baixo	alto
Vibrações	alto	médio	alto	baixo
Sincronismo do movimento	alto	alto	médio	alto
Trans.forças/torque	alta	alta	alta	baixa
Facilidade de manutenção	média	média	média	baixa
Vida útil	alta	alta	alta	alta
Tipo	Polias			Correntes
	Planas	Em "V"	Sincronizadoras	
Requisitos				
Custo	baixo	baixo	baixo	baixo
Vibrações	baixo	médio	médio	alto
Sincronismo do movimento	médio	médio	alto	médio
Capacidade de transmissão de forças/torque	média	média	média	alta
Facilidade de manutenção	alta	média	média	alta
Vida útil	alta	alta	média	média

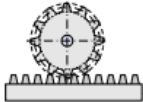
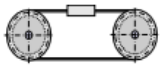
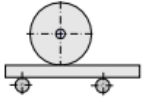
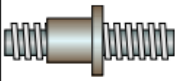
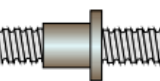
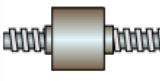
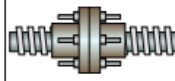
Fonte: Adaptado de Stoeterau (2004).

A conversão do movimento rotativo em linear é realizado por elementos de máquinas específicos, como por exemplo: Pinhão/cremalheira, fusos trapezoidais, fusos de esferas recirculantes, fusos epicicloidais, fusos hidrostáticos, polias, rodas de atrito, entre outros (STOETERAU, 2004).

Os elementos desta categoria influenciam diretamente no desempenho e na precisão do equipamento, alguns destes sistemas conseguem alcançar uma precisão de 0,1mm (décimos de milímetros) no deslocamento linear da máquina-ferramenta, outros conseguem superar esse número e atingir 0,01mm (centésimos de milímetros) (BARDELLI, 2005).

O custo, vibrações, exatidão no posicionamento, capacidade de transmissão de forças/torque, facilidade de manutenção, atrito e vida útil dos principais sistemas usados em máquinas-ferramentas são classificados na Figura 6.

Figura 6 - Classificação dos elementos de conversão de movimento.

<i>Tipo</i>	<i>Pinhão / Cremalheiras</i>	<i>Polias</i>	<i>Rodas de atrito</i>	
Requisitos				
Custo	baixo	baixo	alto	
Vibrações	alto	baixo	baixo	
Exatidão no posicionamento	baixa	média	Muito alta	
Capacidade de transmissão de forças/torque	alta	baixa	Muito baixa	
Facilidade de manutenção	alta	alta	baixa	
Atrito	baixo	baixo	alto	
Vida útil	média	alta	baixa	
<i>Tipo</i>	<i>Fusos</i>			
	<i>Trapezoidais</i>	<i>Esferas recirculantes</i>	<i>Epícicloidais</i>	<i>Hidrostáticas</i>
Requisitos				
Custo	baixo	médio	alto	Muito alto
Vibrações	médio	baixa	bai	baixa
Exatidão no posicionamento	baixa	alta	alta	alta
Capacidade de transmissão de forças/torque	alta	alta	alta	alta
Facilidade de manutenção	média	média	baixa	baix
Atrito	alto	baixo	baixo	Muito baixo
Vida útil	média	alta	alta	Muito alta

Fonte: Adaptado de Stoeterau (2004).

Cremalheira e pinhão (Figura 7) são elementos que trabalham em conjunto. A principal função da cremalheira é converter o movimento de giro (angular) do pinhão em movimento linear ou vice versa. As principais vantagens desse conjunto de transmissão são o desgaste reduzido e a capacidade de carga elevada (NORTON, 2004).

Figura 7 - Conjunto Pinhão/Cremalheira



Fonte: Adaptado de HRR do Brasil (2019).

Fuso é um elemento no qual é utilizada uma rosca infinita para promover o transporte. Seu principal objetivo é converter o movimento rotativo em movimento de translação linear (PEREIRA; HADAS, 2015). A rosca pode apresentar diversas configurações de geometria, sendo as principais a quadrada, trapezoidal ou com canais para esferas, cada uma com particularidades próprias (SMITH, 2008).

A Figura 8 exemplifica os dois tipos de fusos mais comuns usados em máquinas-ferramentas.

Figura 8 - Fuso trapezoidal (esquerda) e fuso de esferas recirculantes (direita).



Fonte: Adaptado de Reiman (2019).

As correntes são elementos metálicos de transmissão de potência que funcionam em conjunto com engrenagens (Figura 9) (Filho, 2009). Esse tipo de sistema normalmente é utilizado quando os eixos estão situados distantes um do outro.

As principais e melhores características desse tipo de mecanismo são o seu baixo custo e o desempenho de operação, que se mostra bastante satisfatório, pois, o mesmo possui a capacidade de operação em condições severas de utilização como alta umidade e altas

temperaturas. Outra grande vantagem é o sincronismo e a facilidade de montagem do sistema (PEREIRA; HADAS, 2015).

Figura 9 - Conjunto corrente de rolo/engrenagem.



Fonte: Adaptado de Brighenti Automação (2019).

As correias são elementos de transmissão de potência semelhantes às correntes de rolo, a principal diferença se encontra na composição, pois as correntes de rolo são compostas normalmente por aço, enquanto as correias são fabricadas normalmente com materiais poliméricos, revestidos internamente com fibras vegetais ou materiais metálicos.

Segundo Marco Filho (2009) a elasticidade proporcionada pelo material do qual as correias são fabricadas traz algumas vantagens ao sistema, como por exemplo, o baixo ruído, melhor absorção de choques, amortecimento, além de ser um sistema que apresenta facilidade de montagem e manutenção.

A Figura 10 apresenta o sistema composto por polia e correia.

Figura 10 - Conjunto polia e correia sincronizada.



Fonte: Adaptado de A.T.I (2019).

2.3.4 Sistemas de acoplamento

Acoplamento é um conjunto mecânico, constituído por elementos de máquinas, utilizados comumente para transmissão do movimento de rotação pela união/ligação dos eixos de uma máquina (BRAGAGNOLO, 2018).

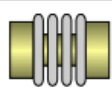
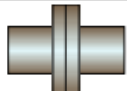
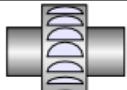
No projeto de máquinas-ferramentas e instrumentos de precisão, uma das tarefas consideradas mais difíceis é a de garantir o correto alinhamento entre eixo e acionamento. É função do sistema de acoplamento eliminar ou garantir que haja um mínimo de perda possível na transmissão da força, velocidade e rotação entregue pelo motor ao eixo (BARDELLI, 2005).

De acordo com Stoeterau (2004) existem diversas soluções mecânicas para a ligação dos eixos de uma máquina usando-se acoplamentos. Os acoplamentos podem ser divididos em dois grupos principais, sendo eles os permanentes e os não permanentes, também denominados de embreagens.

- Permanentes
 - 1) Rígidos;
 - 2) Flexíveis;
 - 3) Por atrito.
- Não permanentes
 - 1) Hidráulicos;
 - 2) Magnéticos;
 - 3) De forma.

Cada sistema de acoplamento é dotado de pontos fracos e fortes, que permitem compensar o desalinhamento em maior ou em menor grau, compensando, ou não, os erros de segmento. Na Figura 11 são exemplificadas as principais formas de acoplamento a partir do seu custo, rigidez, erro de segmento e compensação do desalinhamento onde: 5 é melhor e 1 pior.

Figura 11 - Classificação dos elementos de acoplamento do movimento

Tipo	Acoplamentos Permanentes		
	Rígidos	Flexíveis	Por Atrito
Requisitos			
Custo	5	3	3
Rigidez	5	5	4
Erro de segmento	5	4	3
Compensação do desalinhamento	1	5	1
Tipo	Embreagens		
	Hidráulicos	Magnéticos	Por Forma
Requisitos			
Custo	2	1	3
Rigidez	3	4	4
Erro de segmento	2	4	4
Compensação do desalinhamento	2	3	3

Fonte: Stoeterau (2004).

2.4 ASPECTOS ELETRÔNICOS

2.4.1 Dispositivos de acionamento

Para proporcionar o movimento da ferramenta em relação aos eixos de uma máquina CNC existem alguns dispositivos que podem ser utilizados para este fim, os quais são divididos de acordo com a sua forma de atuação, em de ação rotativa e ação linear. Cilindros hidráulicos, cilindros pneumáticos, servomotores, motores de passo são exemplos desses tipos de atuadores (PEREIRA, HADAS, 2015).

É predominante o uso de acionamentos rotativos durante o projeto de uma máquina CNC, tanto pela diversidade de oferta quanto pela facilidade de seleção. Em máquinas numericamente controladas existem três tipos básicos de acionamento rotativo, sendo eles os motores assíncronos, servomotores de corrente contínua, servomotores de corrente alternada e motores de passo (STOETERAU, 2004).

O motor elétrico é uma eficiente máquina capaz de transformar energia elétrica recebida de uma fonte em energia mecânica, trabalho de eixo; sem que haja muitas perdas no processo de conversão.

A Figura 12 exemplifica os tipos de acionamentos mais comuns encontrados em máquinas numericamente controladas, diferenciando-os pelo controle, manutenção, custo,

dinâmica, torque, cursos e precisão de giro, onde, na escala graduada, 5 é excelente, 4 – bom, 3 – moderado, 2 – regular, 1 – ruim e 0 não é aplicável.

Figura 12 - Comparação dos acionamentos rotativos.

	SERVOMOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA CC		SERVOMOTORES DE CORRENTE ALTERNADA CA		MOTORES DE PASSO		
	COMUTAÇÃO MECÂNICA	COMUTAÇÃO ELETRÔNICA	ASSÍNCRONOS	SÍNCRONOS	RELUTÂNCIA VARIÁVEL	IMÃ PERMANENTE	HÍBRIDOS
CONTROLE	5	5	1	3	5	5	5
MANUTENÇÃO	5	5	0	0	5	5	5
CUSTO	5	5	5	3	5	5	3
DINÂMICA	4	4	4	4	4	4	4
TORQUE	4	5	4	4	3	3	4
CURSOS	5	5	5	5	5	5	5
Precisão de giro	5	5	2	2	3	3	5

Fonte: Stoeterau (2004).

2.4.2 Motores assíncronos

O barateamento e algumas mudanças como à diminuição das dimensões de frequência permitiu que o motor (Figura 13) fosse utilizado em uma ampla gama de velocidades, com variações contínuas e sincronizadas. Nos últimos anos diversos estudos sobre o funcionamento de motores assíncronos em malhas de controle realimentadas vêm sendo realizados, os resultados obtidos não se mostram satisfatórios o suficiente, o que torna o motor mais eficiente em áreas que não é exigida alta precisão (STOETERAU, 2004).

Figura 13 - Motor assíncrono



Fonte: Portal eletricista

2.4.3 Servomotores

A principal diferença entre os servomotores de corrente contínua (CC) e o de corrente alternada (CA) está na forma como é controlados. Enquanto os servomotores de corrente

contínua tem sua movimentação angular controlada através da variação de tensão, os servomotores de corrente alternada tem sua velocidade controlada pela variação da frequência. Um produz mais torque e o outro produz mais potência (FERRARI, 2011).

Ambos os motores são dotados de um sistema de posicionamento inteligente no qual um sistema de *feedback* é responsável por comparar o resultado desejado enviado ao servomotor com o posicionamento final do equipamento. A Figura 14 ilustra um servomotor.

Figura 14 - Exemplo de Servomotor.



Fonte: Tpnewtech (2019).

2.4.4 Motores de passo

O motor de passo foi inventado em 1936 por um engenheiro francês chamado Marius Lavet. Hoje, dispositivos como esse podem ser encontrados em diversos aparelhos onde a precisão é importante, como: Impressoras, plotters, scanners, máquinas CNC, automação industrial, entre outros.

Um motor de passo (Figura 15) tem a função de converter os pulsos elétricos recebidos em movimentos mecanicamente discretos (PERCHÉ, 2013). Denomina-se “passo” a variação do ângulo produzido no eixo do motor de forma contínua, onde o tamanho do ângulo é proporcional à quantidade de pulsos elétricos recebidos pelo motor, assim como a sua velocidade (BRITES, SANTOS, 2008).

Uma das principais características qualitativas desse tipo de motor é a sua extrema capacidade de vencer a inércia, sendo capaz de produzir altas taxas de aceleração, permitindo-lhe atingir a velocidade máxima em um curto intervalo de tempo, o mesmo ocorre na mudança do sentido de rotação ou frenagem (CARSTENS, CARTENS, 2015).

Figura 15 - Exemplo motor de passo.



Fonte: Curtocircuito (2019).

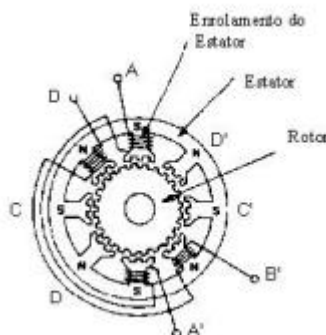
Os motores de passo rotativos são classificados quanto a sua estrutura de funcionamento, as quais serão descritas nas subseções a seguir.

2.4.4.1 Relutância variável (V.R.)

Relutância magnética é a oposição de fluxo magnético através dos materiais, cada elemento possui uma característica própria de circulação de fluxo, sendo que os ferrosos possuem menor relutância, ou seja, maior facilidade para circulação de fluxo magnético (CARSTENS, CARSTENS, 2015).

Este tipo de motor é o mais antigo, logo, possui uma estrutura mais simples, é basicamente composto por um rotor de ferro doce multidentado e um estator laminado com enrolamentos (Figura 16). Pela ausência de ímãs, quando energizado o torque estático é nulo (SILVA, ZANIN, 2011).

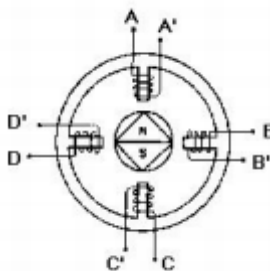
Após a energização dos enrolamentos com corrente DC os polos ficam magnetizados e assim a rotação ocorre pela atração dos dentes do rotor pelos polos do estator que está energizado, devido à força que aparece para que o sistema apresente a menor relutância (SOUZA, 2007; BRITES, SANTOS, 2008).

Figura 16 - Motor de relutância variável.

Fonte: Brites e Santos (2008).

2.4.4.2 Ímã permanente (P.I.)

Neste modelo de motor, o eixo do rotor é cilíndrico e não possui dentes, como o próprio nome sugere, este tipo de motor possui ímãs permanentes adicionados de maneira que formem polos magnéticos no próprio rotor. O rotor é construído com ímãs permanentes (material alnico ou ferrite e é magnetizado radialmente), e não possuem dentes, devido a isto o torque estático não é nulo. O custo desse tipo de motor é relativamente baixo e os seus incrementos angulares possuem baixas resoluções, com passos típicos de $7,5^\circ$ a 15° , o que resulta numa quantidade de cerca de 48 a 24 passos para que uma revolução completa seja realizada. Os polos magnetizados do rotor proporcionam uma maior intensidade de fluxo magnético e por isto o motor de ímã permanente (Figura 17) exibe uma melhor característica de torque, quando comparado ao de relutância variável (BRITES, SANTOS, 2008; SILVA, ZANIN, 2011; PERCHÉ, 2013; CARSTENS, CARSTENS, 2015).

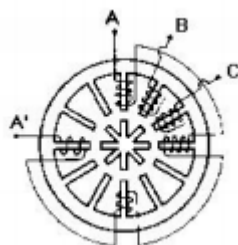
Figura 17 - Motor de ímã permanente.

Fonte: Brites e Santos (2008).

2.4.4.3 Híbrido

O motor de passo híbrido (Figura 18) possui um custo mais alto quando comparados aos dois outros tipos de motores já descritos, porém, provém melhor desempenho com respeito à resolução dos incrementos angulares “passos”, torque e velocidade. Os passos de motores híbridos variam de $3,6^\circ$ a $0,9^\circ$, sendo necessário de 100 a 400 passos para que o eixo do motor realize uma volta completamente, o que garante uma precisão maior em relação aos motores citados anteriormente. De fato, o motor híbrido também é um motor misto, pois é a combinação das melhores características dos motores de relutância variável e de ímã permanente. O rotor é multidentado como o motor de relutância variável e possui um ímã magnetizado axialmente concêntrico em torno do seu eixo. O dente do rotor provém um melhor caminho que ajuda a guiar o fluxo magnético para locais preferidos no GAP de ar (espaço que existe entre o rotor e estator). Para que o rotor avance um passo (CUNHA, 1983; BRITES, SANTOS, 2008; PERCHÉ, 2013).

Figura 18 - Motor Híbrido.



Fonte: Brites e Santos (2008).

2.4.5 Microcontroladores

Um microcontrolador é um pequeno componente eletrônico composto por circuitos integrados capaz de realizar tarefas específicas a partir de uma inteligência programável. Esse chip possui uma unidade lógica e aritmética – ULA de processamento, memória, periféricos de entrada e saída, temporizadores, dispositivos de comunicação serial, entre outros (SOUZA, 2005; PERCHÉ, 2013; PENIDO, TRINDADE, 2013).

Segundo Penido e Trindade (2013) os microcontroladores são uma evolução natural dos circuitos digitais devido ao emprego de tecnologia no componente, tornando-o mais versátil e complexo.

Em 1969, a INTEL deu a missão aos seus engenheiros de projetar uma calculadora com um número reduzido de circuitos integrados. Marcian Holff, engenheiro chefe da equipe, sugeriu uma maneira inovadora de projetar a calculadora. Segundo ele, era possível construir uma máquina capaz de mudar sua funcionalidade com base em um programa armazenado em uma memória. Com a contribuição do engenheiro Frederico Faggin, Holff conseguiu desenvolver o primeiro microcontrolador para a INTEL. (CORTELLETTI, 2006).

Em 1977 a INTEL lançou para o público o seu primeiro microcontrolador, denominado de “8048”. Com o sucesso do produto e com a sua evolução, o microprocessador 8048 deu origem a família “8051”, esse é programado na linguagem *Assembly* e possui um poderoso conjunto de instruções (PENIDO, TRINDADE, 2013).

2.4.6 Sensores

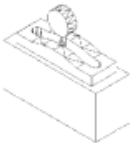
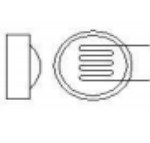
Um sensor pode ser definido como um dispositivo que tem a capacidade de alterar sua característica física interna devido a um fenômeno físico externo, ou seja, através da aplicação de fenômenos físicos como, por exemplo, mecânicos, elétricos e químicos os sensores conseguem fornecer informações úteis ao sistema de automação, podendo ser aplicados na medição de variáveis lógicas, booleanas ou analógicas (ROSÁRIO, 2005).

A fim de prevenir e/ou evitar possíveis quebras de equipamentos, perda de precisão e qualquer tipo de acidente, o uso de sensores na indústria é cada vez mais intensificado (CAPELLI, 2008). Segundo Stoeterau (2004), atualmente existe uma ampla e variada gama de sensores no mercado que permitem a medição da maior parte das grandezas físicas conhecidas. Em máquinas-ferramentas os principais sinais são obtidos com sensores para a detecção de força, potência efetiva, temperaturas, deformações, emissão acústica, mecânica ou por via fluídica, vibrações, distâncias e outros.

As fresadoras em geral, possuem um sistema de sensores que são responsáveis por dar um *feedback* na orientação da máquina, servindo para monitorar erros de precisão e até mesmo falhas críticas, podendo também em modelos mais avançados, detectar invasão no perímetro de trabalho (BRAGAGNOLO, 2018).

A Figura 19 apresenta um comparativo entre os principais sensores de fim de curso usados em máquinas-ferramentas convencionais onde, na escala numérica, 5 é melhor e 1 pior.

Figura 19 - Comparação dos sensores de fim de curso.

PRINCÍPIO	ELETEOMECÂNICO	CAPACITIVO	INDUTIVO	ÓPTICO-ELETRÔNICO
REQUISITOS FUNCIONAIS				
Custo	5	4	4	4
Vida útil	4	3	3	2
Eficiência	5	3	4	2

Fonte: Stoeterau (2004).

2.5 COMANDO E CONTROLE

Os aplicativos de controle são responsáveis por instruir a máquina-ferramenta CNC, são eles que possibilitam o movimento de forma controlada, indicando como e o que a máquina precisa fazer para realizar o processo de usinagem como, por exemplo, qual velocidade a máquina deve possuir em determinado instante, qual a direção do movimento, entre outras ações (PERCHÉ, 2013).

É o sistema de controle em conjunto com a eletrônica da máquina-ferramenta CNC o responsável por gerenciar todas as informações relevantes da máquina, essas podem ser divididas em informações primárias e secundárias. As informações primárias são responsáveis pelo controle dos movimentos principais da máquina, como rotação da árvore e as translações dos eixos, incluindo direção, aceleração, velocidade de avanço e tamanho dos deslocamentos. As informações secundárias são usadas em máquinas com um maior grau de tecnologia empregada e sua principal função é o controle dos sistemas auxiliares, tais como refrigeração, aspiração e transporte de cavaco, pressão nas linhas de ar comprimido e fluido hidráulico, vácuo, temperatura e estado de deformação da estrutura, níveis de vibrações, potência consumida e etc. provendo ao usuário informações gerais sobre o estado da máquina e o andamento do processo. O sistema de controle serve de interface entre o usuário externo e a máquina (STOETERAU, 2004).

Segundo Perché (2013) a comunicação entre o microcomputador e a máquina acontece através de códigos específicos, onde é necessário transformar um desenho, ou *layout*, do projeto em números e letras.

Para facilitar o processo de manufatura através de usinagem CNC definiu-se o sistema ISO chamado linguagem G ou G-Code como padrão.

A linguagem ISO, comumente chamada de “código G”, é o conjunto de instruções sequenciais sobre a peça a ser usinada como, por exemplo, geometria, movimentos da

ferramenta de corte e várias outras funções da máquina CNC. Também conhecida como o padrão RS274D da extinta Electronic Industries Alliance (EIA). Seu funcionamento baseia-se em comandos sequenciais de coordenadas, absolutas ou relativas, em relação ao ponto zero da máquina-ferramenta (LEAL, RIBAS, 2015).

2.5.1 Programas CAD e CAM

CAD e CAM em outras palavras significam Computer-Aided, ou melhor, assistido por computador. CAD se refere ao desenho assistido por computador e é usado durante o processo de desenvolvimento e dimensionamento da peça, onde o usuário cria através de uma interface gráfica um desenho bidimensional ou tridimensional. Este desenho fornece informações como largura, altura e espessura, além de particularidades como furos e rebaixos que o objeto possa ter. O programa CAM (manufatura assistida por computador) é empregado após a criação do desenho no *software* e é o responsável por converter as informações do desenho em coordenadas numéricas e simbólicas que a ferramenta terá que percorrer para fabricar o objeto (POLASTRINI, 2016).

2.6 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Não se sabe ao certo quem foi o inventor da PCI, a maioria das publicações acerca do assunto dá o crédito a um engenheiro austríaco chamado Paul Eisler que em 1936 patenteou um método de corroer uma camada de cobre depositada sobre uma superfície isolante. Por outro lado, em 1925 o norte-americano Charles Ducas registrou uma patente onde propunha depositar uma trilha condutiva sobre um substrato isolante (MEHL, 2011).

Contudo, as placas de circuitos impressos começaram a ser usadas em larga escala durante a Segunda Guerra Mundial onde era necessário que os rádios comunicadores dos militares funcionassem em situações extremamente adversas. Com o fim da segunda guerra, os componentes eletrônicos começaram a se difundir cada vez mais e ganharam diversas aplicações (MEHL, 2011; ALCÂNTARA, PEREIRA, SANTANA, 2015).

O desenvolvimento da placa de circuito impresso possibilitou a miniaturização de componentes eletroeletrônicos por substituir as antigas e grandes válvulas a vácuo. Atualmente, a PCI é largamente utilizada na indústria eletrônica e está presente em quase todos os tipos de equipamentos, sua constituição se dá basicamente pelo depósito de cobre sobre uma fina placa de material dielétrico, conhecido como laminado, dando forma ao

circuito. As principais funções da PCI são de prover a conectividade elétrica e sustentação mecânica dos componentes do circuito (MELO, RIOS E GUTIERREZ, 2009).

As PCI's compostas por laminado são produzidas com diversos tipos de materiais, as que possuem mais destaque são Fenolite e Fibra de Vidro. De acordo com a norma NBR 8188/83, as chapas para circuito impresso de Fenolite recebem a nomenclatura de FR-2 e a de Fibra de Vidro FR-4, a sigla FR (*Frame Resistant*) significa resistente ao fogo (MEHL, 2011).

Fuse (1999) e Mehl (2011) classificam a PCI em três tipos básicos, sendo:

- Face simples (*single-sided*): apenas uma das faces do laminado com uma camada de cobre;
- Dupla face (*double-sided*): As duas faces da placa são cobertas com cobre;
- Multicamadas (Multi-layer): Além das camadas externas, há também camadas no interior da placa.

3 DESENVOLVIMENTO

A fim de facilitar a compreensão do leitor acerca do projeto e fabricação de uma máquina automatizada capaz de prototipar placas de circuitos impresso, a metodologia do trabalho foi dividida em subitens que abordam o detalhamento mecânico, fabricação e montagem da máquina.

3.2 MECÂNICA

Neste capítulo serão abordados os componentes estruturais e mecânicos da máquina-ferramenta. De modo a facilitar o acesso e entendimento a usuários com pouca ou nenhuma experiência na área, os complexos cálculos estruturais da máquina não serão considerados.

Autores como (SILVA, ZANIN, 2011), (PERCHÉ, 2013), (FACHIM, 2013), (GOBBI, 2014), (CARSTENS, CARSTENS, 2015), (LEAL, RIBAS, 2015), (PEREIRA, HADAS, 2015), (POLASTRINI, 2016), (BRAGAGNOLO, 2018), entre outros, desenvolveram em seus trabalhos máquinas CNCs bastante satisfatórias no qual foram adotadas soluções mecânicas diversificadas para a modelagem tridimensional e fabricação dos componentes mecânicos. O diferencial do presente trabalho é a utilização de uma impressora 3D para a fabricação da maioria dos componentes que se movimentam utilizados na máquina, o que possibilitou o desenvolvimento de uma configuração mecânica singular, além de reduzir significativamente o custo do projeto.

3.2.1 Estrutura

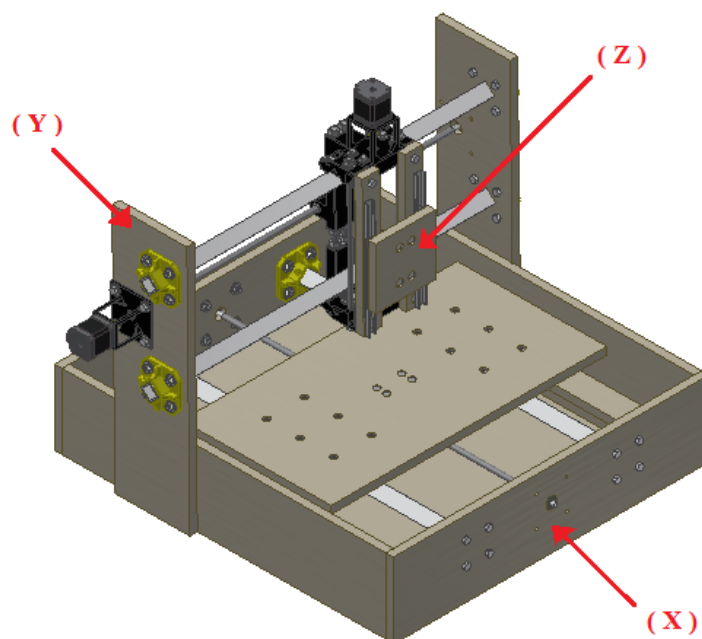
Para a construção de uma máquina numericamente controlada (CNC) alguns parâmetros devem ser estabelecidos antes da construção propriamente dita. Esses parâmetros são determinantes para a modelagem tridimensional, pois é de acordo com eles que as dimensões da máquina-ferramenta são estabelecidas, além de serem fundamentais para a escolha dos componentes e materiais utilizados para a fabricação. Adotou-se como principais parâmetros para o projeto a área útil de usinagem que se deseja obter, o tipo de material que será usinado, assim como a tolerância da usinagem, o número de eixos e motores que a máquina deve possuir, torque do motor utilizado e grau de complexidade que se almeja alcançar na usinagem.

Uma variedade de materiais como alumínio, aço, tecnil, fibra, madeira, entre outros, podem ser utilizados para a construção de uma fresadora, cada material possui características únicas que serão diretamente proporcionais ao desempenho e ao custo da máquina. Por exemplo, uma estrutura construída em alumínio será mais rígida do que uma estrutura construída em madeira, esse fator é extremamente importante na diminuição de ruído e vibração da máquina, conseqüentemente na melhoria de precisão, porém, a madeira é mais barata, portanto, mais acessível. Além de ser um material com resistência aceitável. Determinaram-se os componentes estruturais pensando na facilidade de aquisição no mercado local e no custo-benefício do produto.

A estrutura da máquina é composta quase que em totalidade de *Medium Density Fiberboard* (MDF) com 15mm de espessura. As peças estruturais em MDF são a base, suportes da base, laterais, cabeceiras, mesa de usinagem (sacrifício), pórticos, suportes do eixo Z e suporte da ferramenta. Optou-se por usar perfis quadrados de metalon como guias lineares por ser um material com elevada resistência a esforços e facilmente encontrado em casas de ferragens e construção, além de ser um material significativamente barato quando comparado com guias lineares utilizadas em outros projetos e trabalhos.

A máquina CNC apresentada neste trabalho é composta de partes mecânicas (Figura 20) que, em conjunto, possibilitam a movimentação do sistema nos eixos cartesianos X, Y e Z. Um atuador é utilizado para gerar movimento em cada eixo da máquina, esse movimento de rotação é convertido em uma translação pura, possibilitando assim a movimentação da ferramenta sobre a peça a ser usinada. A ferramenta tem capacidade de deslocar-se 300mm no eixo X e 500mm em Y, resultando em uma área útil de usinagem total de 150000mm². O deslocamento vertical do eixo Z é de 100mm.

Figura 20 - Estrutura mecânica da máquina.



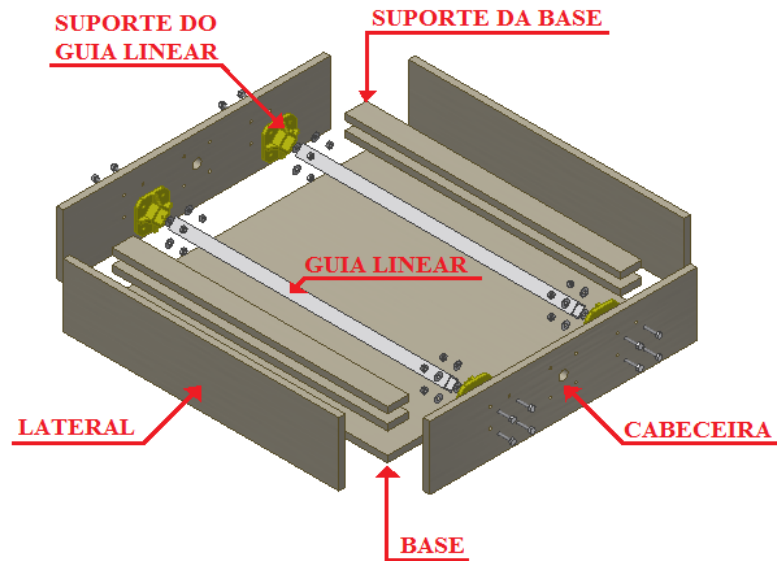
Fonte: O autor.

Para uma melhor visualização, a estrutura mecânica que compõe os eixos X, Y e Z serão mostradas em vistas explodidas. Para este fim, utilizou-se a ferramenta Standard do Autodesk Professional Inventor 2016. A principal vantagem desse tipo de representação é que a montagem estrutural da máquina-ferramenta torna-se autoexplicativa a partir da imagem.

Com o intuito de facilitar a modelagem em CAD, fabricação e montagem, todas as peças em MDF possuem geometria retangular. De modo a garantir máxima precisão dimensional no corte das peças compostas de MDF, as mesmas foram cortadas em uma esquadrejadeira de precisão.

Os componentes que compõem a estrutura responsável pela movimentação no eixo X são mostrados na Figura 21. Observa-se que o grau de dificuldade de montagem do sistema é extremamente baixo. A base é o componente que vai comportar todas as outras peças da estrutura.

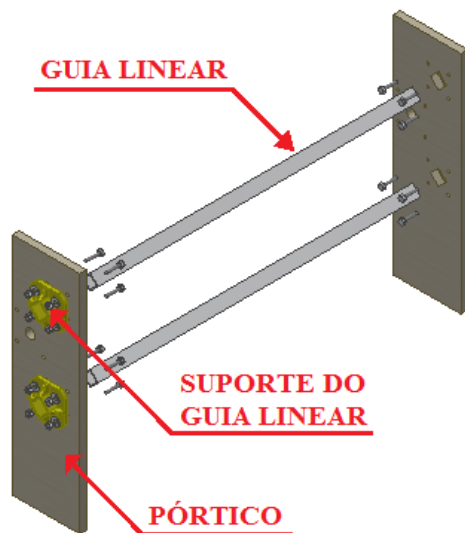
Figura 21 - Estrutura mecânica do eixo X.



Fonte: O autor.

O pórtico, suporte do guia linear e guia linear são as peças que compõem o sistema estrutural do eixo Y da máquina (Figura 22). O suporte do guia linear é unido no pórtico e cabeceira por parafusos sextavados M6x30.

Figura 22 - Estrutura mecânica do eixo Y.

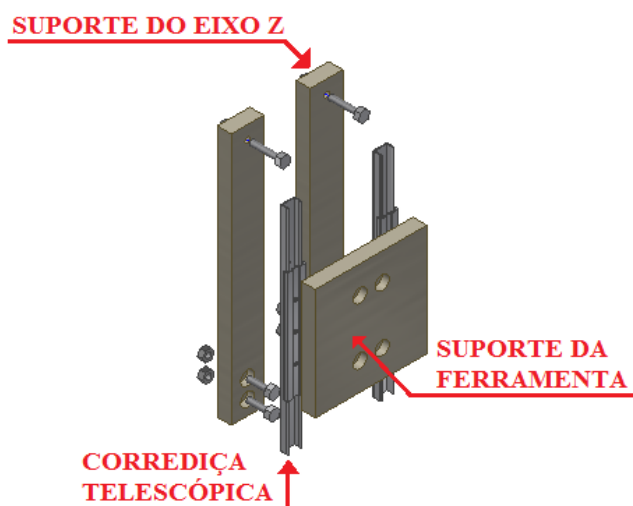


Fonte: O autor.

A estrutura mecânica do eixo Z é formada por apenas dois componentes em MDF (suporte do eixo Z e suporte da ferramenta) e corredeiras telescópicas comumente encontradas em gavetas (Figura 23). A montagem do sistema se torna um pouco mais complexa em

relação aos outros sistemas devido ao fato de ser necessário retirar uma das partes móveis que constituem a corrediça com o propósito de diminuir a folga no componente.

Figura 23 - Estrutura mecânica do eixo Z.



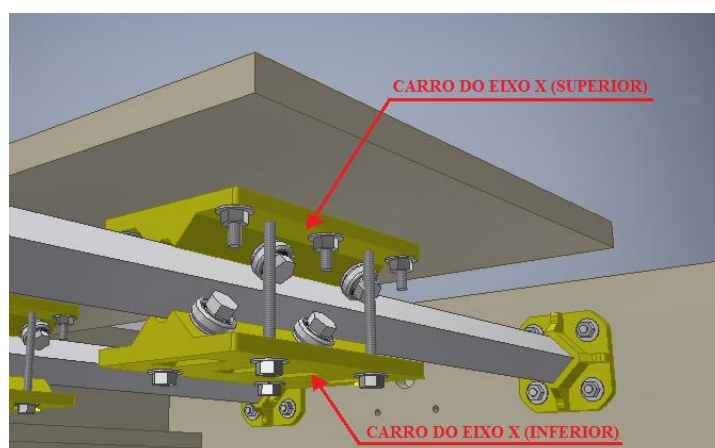
Fonte: O autor.

3.2.2 Sistema de deslocamento eixo X, Y e Z

O sistema de deslocamento do eixo X é semelhante ao utilizado no eixo Y da máquina. Ambos os sistemas usam “carrinhos” projetados para possibilitar a movimentação da estrutura sobre guias lineares quadradas (25mm x 25mm) de Metalon. Os perfis utilizados como guias lineares para o eixo X e Y possuem comprimento de 650mm e 720mm, respectivamente. A função e a disposição dos carros de movimentação em ambos os eixos são semelhantes, divergindo apenas no *design*.

O deslocamento da ferramenta sobre a matéria prima posicionada sobre a mesa de sacrifício produz a peça projetada. Para tornar possível o movimento da mesa de usinagem ao longo do eixo X projetou-se carros que utilizam rolamentos como “rodas”. A forma como os rolamentos são dispostos permitem a movimentação do sistema sobre as guias lineares. De modo a inibir qualquer folga vertical, utilizou-se carros superiores e inferiores ligados por haste roscada e porca. A mesa de usinagem é conectada diretamente aos carros superiores por parafusos. A Figura 24 ilustra o sistema utilizado.

Figura 24 - Sistema de deslocamento do eixo X.

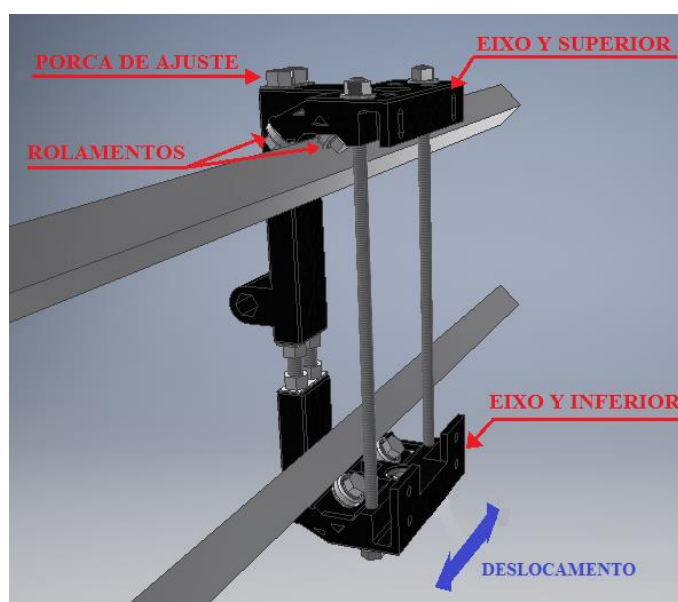


Fonte: O autor.

No eixo Y, o carro e a estrutura mecânica (eixo Y inferior e superior) que se movimenta fazem parte da mesma peça (Figura 25). O deslocamento acontece quando rolamentos acoplados nas peças denominadas de eixo Y superior e inferior são dispostos sobre as guias lineares. Esta junção permite que a estrutura onde os rolamentos se encontram acoplados tenha liberdade de movimentação ao longo do trilho.

Como o próprio nome sugere, as porcas de ajuste são utilizadas para ajustar o espaçamento entre o eixo Y superior e inferior. O ajuste de forma adequada pode reduzir ou eliminar a folga entre parte móvel e guia linear, tornando o deslocamento do componente mais suave e preciso.

Figura 25 - Sistema de deslocamento do eixo Y.

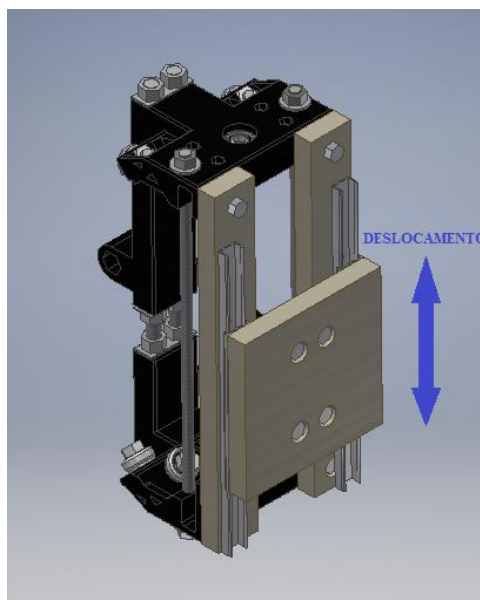


Fonte: O autor.

Para o sistema de movimentação do eixo Z (Figura 26) foram utilizadas corrediças telescópicas com 250mm de comprimento. Essa solução se mostrou bastante eficiente e prática, além de possuir um baixo custo e ser facilmente encontrada no mercado local. Outros fatores preponderantes para tal escolha é atrito e folga mínimos oferecidos pelo mecanismo; esses fatores são importantes quando se trata de uma máquina que requer precisão e agilidade no movimento.

Devido à dificuldade e consequentemente o tempo gasto para tal atividade, as corrediças telescópicas representadas no desenho tridimensional não foram desenhadas de acordo com sua forma geométrica original, porém, suas dimensões estão de acordo com o produto, exceto a largura.

Figura 26 - Sistema de deslocamento eixo Z.



Fonte: O autor.

3.2.3 Sistema de tração

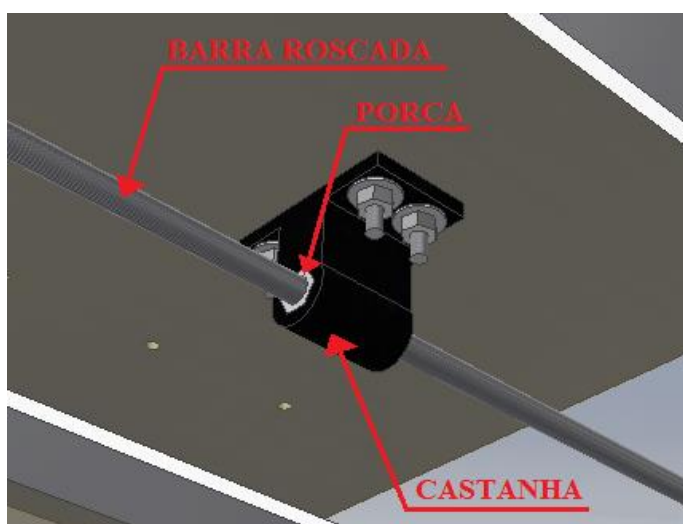
Para que o movimento da fresadora seja possível, é necessário que a rotação do motor seja transformada em translação. Diversos sistemas de tração podem ser adotados para solucionar esse problema como, eixos, fusos, cremalheiras, correias dentadas e etc. As principais características qualitativas dos sistemas citados são mostradas na Figura 6.

Neste projeto, adotou-se um sistema simples e barato de tração, porém robusto e eficiente. Utilizou-se barras roscadas de 10mm para os três eixos da máquina. Os comprimentos das barras roscadas usadas foram de 700mm, 720mm e 295mm para o eixo X,

Y e Z, respectivamente. As barras roscadas foram usinadas em suas extremidades de modo a deixá-las com 8mm de diâmetro. A razão da usinagem é devido o rolamento utilizado para servir como mancal da barra possuir 8mm de diâmetro na pista interna.

O princípio de funcionamento do sistema de transmissão dos três eixos é igual. O conjunto porca-castanha (Figura 27) será responsável por transferir o movimento e fazer link entre barra roscada e estrutura móvel da máquina. Ao rotacionar a barra, o movimento de rotação da mesma é convertido em translação pela porca, logo, o eixo se desloca linearmente, devido ao fato de as guias lineares possuírem somente um grau de liberdade.

Figura 27 - Exemplo do sistema de transmissão utilizado.

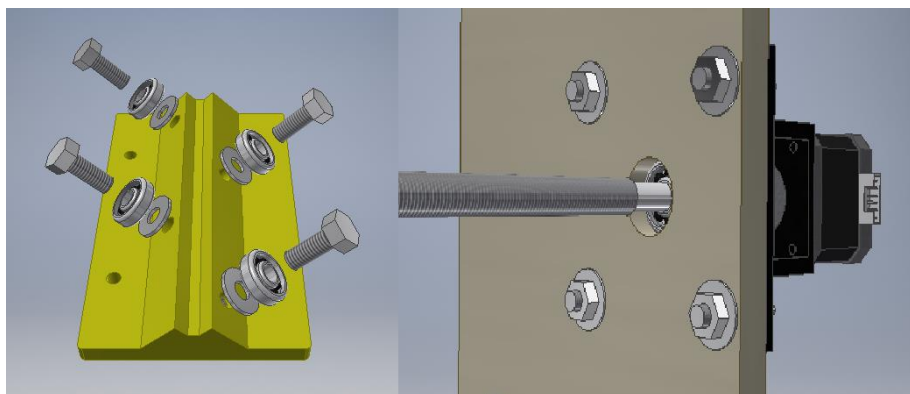


Fonte: O autor.

3.2.4 Rolamentos

Tendo definido o sistema de movimentação da máquina e o sistema de conversão de movimento, foi possível escolher o rolamento dentre as diversas opções oferecidas no mercado. O rolamento precisa atender os seguintes requisitos dimensionais: diâmetro externo de 22mm e 8mm de diâmetro na pista interna. Neste projeto os rolamentos são utilizados como “rodas” para os “carrinhos” do sistema de movimentação e como mancal para as barras roscadas (Figura 28).

Figura 28 - Exemplos de aplicação dos rolamentos.



Fonte: O autor.

A partir da seleção dos trilhos de movimentação e da barra roscada de transmissão, definiu-se o rolamento. O escolhido foi o LMX 608RS (Figura 29). Este modelo possui diâmetro interno de 8mm, 22mm de diâmetro externo e 7mm de largura. O rolamento 608RS é bastante difundido no mercado, tornando-se um produto barato e fácil de ser encontrado.

Figura 29 - Rolamento 608RS.



Fonte: O próprio autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.2 CUSTOS

Esta seção apresenta os custos estimados do projeto. Por se tratar de uma máquina realizada no âmbito acadêmico, torna-se praticamente impossível mensurar o custeio com mão de obra, uso de ferramentas e componentes trabalhados ou fabricados internamente, desta forma, optou-se por apresentar nas Tabelas 1, 2 e 3 apenas os gastos com materiais utilizados.

Tabela 1 - Quantidade e preços das peças compostas de MDF

Descrição	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total Parcial (R\$)
Base	1	INDEFINIDO	120,00
Suporte da Base	4	INDEFINIDO	
Lateral	2	INDEFINIDO	
Cabeceira	2	INDEFINIDO	
Pórtico	2	INDEFINIDO	
Mesa de Sacrifício	1	INDEFINIDO	
Suporte do Eixo Z	2	INDEFINIDO	
Base do Eixo Z	1	INDEFINIDO	
Mão de Obra - Corte MDF	X - X - X	INDEFINIDO	

Fonte: O próprio autor.

Tabela 2 - Quantidade e preço dos componentes metálicos

Descrição	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total Parcial (R\$)
Rolamento 608RS	30	1,50	45,00
Metalon (25x25) mm	3 Metros	13,00	13,00
Barra Roscada 10mm	3 Metros	6,35	19,05
Barra Roscada 6mm	1 Metro	4,40	4,40
Barra Roscada 8mm	1 Metro	5,65	5,65
Parafuso Sextavado M5X20	4	0,55	2,20
Arroela M5	4	0,05	0,20
Porca M5	4	0,06	0,24
Arroela M6	96	0,07	6,72
Porca M6	90	0,08	7,20
Parafuso Sextavado M6X30	42	0,36	15,12
Parafuso Cabeça Oval - Fenda M6X30	24	0,50	12,00
Porca M8	28	0,10	2,80
Parafuso Sextavado M8X20	24	0,77	18,48
Porca Sextavada M10	14	0,06	0,84

Fonte: O próprio autor.

Tabela 3 - Quantidade e preço dos componentes impressos

Descrição	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total Parcial (R\$)
Suporte do Guia Linear	8	10,19	81,52
Eixo Y Superior	1	51,95	51,95
Eixo Y Inferior	1	51,95	51,95
Carro Superior	2	27,51	27,51
Carro Inferior	2	27,51	27,51
Castanha Eixo X	1	10,19	10,19
Castanha Eixo Z	1	10,19	10,19
Suportes dos Motores	3	10,19	30,57

Fonte: O próprio autor.

A estimativa dos valores das peças fabricadas através de impressão 3D foi realizada pela Engrenagem Jr. A Engrenagem Jr é uma empresa vinculada ao Movimento Empresa Júnior (MEJ), gerida por alunos (voluntários) dos cursos de Engenharia Mecânica e

Bacharelado em Ciência e Tecnologia da Ufersa Campus Caraúbas. A empresa presta serviço nas áreas de refrigeração e climatização, inspeção em vasos de pressão, consultoria para segurança do trabalho, gestão da manutenção e impressão 3D.

Somando os valores das tabelas 1, 2 e 3 chega-se a um valor total de R\$ 564,29. Deve-se ressaltar que as peças impressas utilizadas para a realização desse projeto foram custeadas pela Universidade.

4.3 FACILIDADE DE FABRICAÇÃO, MONTAGEM E ADAPTAÇÃO

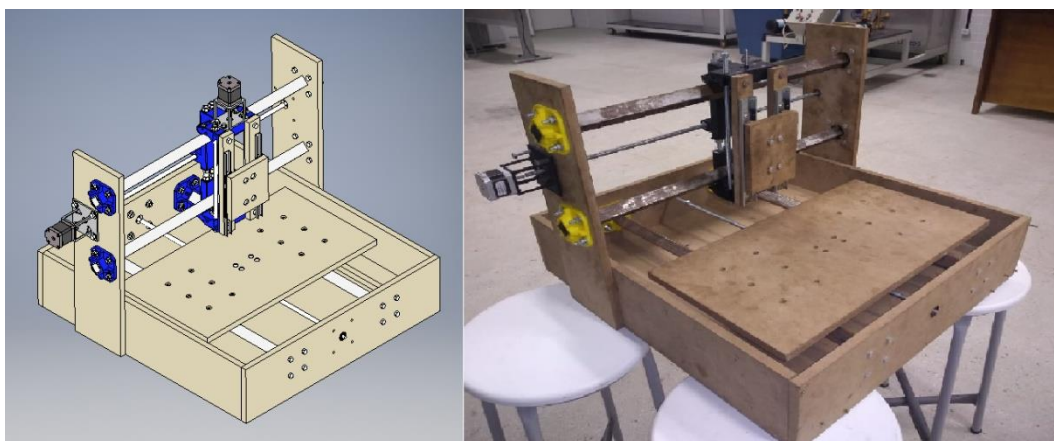
Diante das restrições financeiras e das limitações de fabricação, todo o modelamento tridimensional da máquina foi realizado com base nos recursos disponíveis encontrados no comércio local. O projeto contém poucas partes distintas e a maioria dos componentes é fabricado utilizando-se o mesmo material. Existe a possibilidade do corte das peças compostas de *Medium Density Fiberboard* (MDF) ser realizado de forma terceirizada, desse modo, o projeto requer confecção mínima de componentes por parte do construtor. Todas as partes móveis e algumas partes imóveis da estrutura mecânica foram confeccionadas por impressão 3D, fator esse que se mostrou vantajoso no modelamento geométrico das peças de maneira diferenciada.

A montagem dos componentes é facilitada devido ao acesso ao projeto virtual em 3D, que possibilita a visualização da posição, localização e nome do componente que o usuário tenha dúvida. A fim de facilitar a fabricação e montagem, todas as peças fabricadas em MDF possuem geometria retangular. Esse fator permite que as medidas para a furação da peça sejam tiradas a partir de uma aresta qualquer e marcadas diretamente no componente a ser furado.

Todas as peças utilizadas para a construção da máquina podem ser facilmente adaptadas ou substituídas por outras mais eficientes. A utilização de MDF como material constituinte da estrutura, metalon como guia linear e barra roscada como sistema de transmissão surgiram como soluções mecânicas devido ao déficit orçamentário. Porém, caso se deseje obter resultados mais satisfatórios quanto à rigidez, folga e atrito dos componentes e precisão da máquina, componentes mais eficientes como alumínio, fusos e guias lineares de rolamentos circulares podem ser utilizados sem que haja necessidade de fazer mudanças drásticas na estrutura da máquina.

A figura 30 mostra o comparativo entre desenho técnico realizado no Autodesk Inventor Professional 2016 e a máquina construída. As partes em azul no desenho técnico representam as peças impressas em 3D. É notória a semelhança entre projeto e execução.

Figura 30 - Comparativo entre projeto e construção



Fonte: O autor.

Como citado anteriormente, a máquina é composta por partes mecânicas que em conjunto possibilitam a movimentação nas coordenadas X, Y e Z. A Figura 31 apresenta a conclusão da montagem da estrutura mecânica do eixo X.

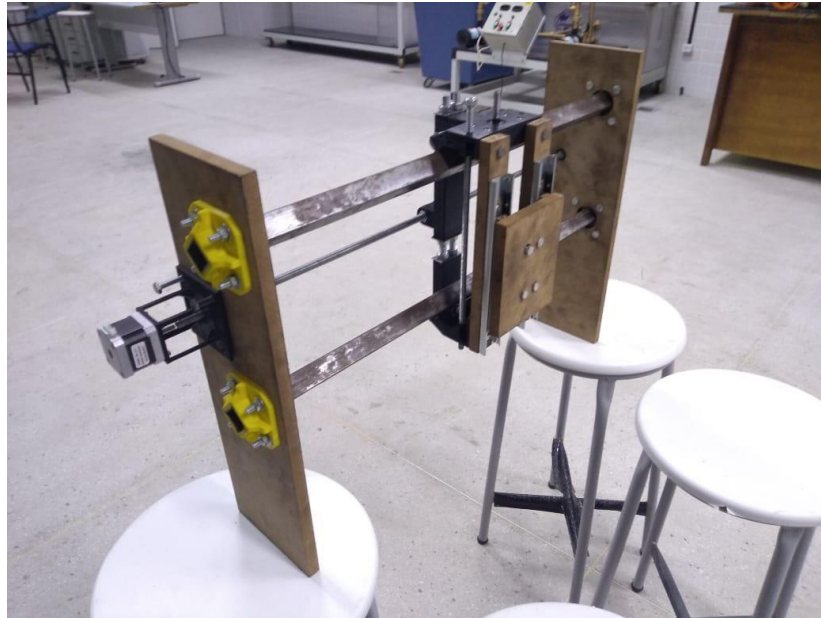
Figura 31 - Estrutura mecânica do eixo X montada



Fonte: O autor.

A movimentação do eixo X em conjunto com a movimentação dos eixos Y e Z proporcionam o deslocamento da ferramenta em três dimensões. O resultado da fabricação e montagem da estrutura mecânica dos eixos Y e Z podem ser observados na Figura 32.

Figura 32 - Estrutura mecânica dos eixos Y e Z montados.



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÃO

Tomando como base os objetivos estabelecidos, pode-se concluir que foi possível construir a máquina fielmente como idealizada no projeto. A partir do software Autodesk Inventor Professional 2016 a estrutura pode ser apresentada de forma detalhada evidenciando, assim, os elementos chaves envolvidos nas etapas de projeto e fabricação dos componentes envolvidos.

A fresadora apresentou ótima movimentação nos três eixos, que apesar de não ter sido realizada a programação para que a máquina funcionasse automaticamente nos três eixos de forma simultânea, foram feitos testes de movimentação com motor elétrico independente, o qual respondeu de forma satisfatória, conforme o esperado. Ao acionar o motor, notou-se que a vibração no sistema de movimentação é mínima, chegando a ser quase imperceptível. Vale ressaltar que o motor utilizado para teste não possui movimentação baseado em pequenos incrementos angulares no eixo, portanto, o teste foi realizado com velocidade de movimentação maior do que a convencional para esse tipo de máquina.

A idealização da máquina possui um custo extremamente baixo quando comparado com modelos vendidos pelo mercado específico. Tendo em vista que uma máquina do mesmo porte custa em torno de R\$ 6.000,00 no Brasil, a economia total é de cerca de 90,6%. Para o barateamento do projeto, foi crucial a aplicação conceitual de soluções mecânicas vistas durante o curso.

Os materiais alternativos, não comumente utilizados nesse tipo de equipamento (Metalon, barra roscada, MDF, etc) atendeu de forma satisfatória nas aplicações do projeto. Como citado anteriormente, a vibração dos componentes mecânicos quando solicitados foram praticamente imperceptíveis. A forma como os carros foram dispostos no perfil de metalon foi de fundamental importância para a anulação quase que em totalidade da folga entre parte móvel da máquina e eixo.

6 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Estando a fresadora concluída, devemos agora observá-la com olhar crítico, para corrigir eventuais problemas e inovar as tecnologias empregadas. Com os resultados satisfatórios do projeto, visa-se como projeto futuro:

- Desenvolver o sistema eletroeletrônico da máquina, tornando-a de fato uma máquina-ferramenta;
- Mudar o sistema de movimentação e transmissão por um mais eficiente, e realizar um teste comparativo entre o atual sistema e o novo;
- Desenvolver um sistema de fixação do elemento a ser usinado;
- Propõe-se a implementação de troca automática de ferramentas e a criação de uma interface microcontrolada que permita a leitura e envio do G-code através de pen drives e cartões de memórias diretamente para a máquina sem o uso de um computador conectado a mesma durante o processo de usinagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMAQ. Associação brasileira de máquinas e equipamentos. **A história das máquinas abimaq 70 anos**. São Paulo: Magma Cultural e Editora, 2006. 168 p. il. color. Disponível em: < <http://www.abimaq.org.br/Arquivos/Html/Publica%C3%A7%C3%B5es/Livro-A-historia-das-maquinas-70-anos-Abimaq.pdf>>. Acesso em 03 abril 2019.

A.T.I. Brasil. [S.l.]. CONJUNTO correia e polia sincronizada. [2019]. Disponível em: <<https://www.atibrasil.com.br/produtos/111-correias-e-polias.html>>. Acesso em 10 Julho 2019.

BARDELLI, Rubens. Bard HP. 2012. Disponível em <<http://www.vabsco.com/bardhp>>. Acesso em 23 Jun 2019.

BRAGAGNOLO, Rodrigo Pires. **DESENVOLVIMENTO DE UMA FRESADORA DIDÁTICA DE COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO DE PEQUENO PORTE**. 2018. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Unijuí, Panambi, 2018.

Brighentti ltda. [S.l.]. CORRENTE de rolo e engrenagem. [2019]. Disponível em: <www.brighentti.com.br>. Acesso em 10 Julho 2019.

BRITES, Felipe G.; SANTOS, Vinicius P. de A. **Motor de Passo**. Niterói, 2008. Disponível em: <<https://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf>>. Acesso em: 04 maio 2019.

CARSTENS, Samuel Filipe; CARSTENS, Tiago Alexandre. **PROJETO E FABRICAÇÃO DE UMA FRESADORA CNC PARA PROTOTIPAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**. 2015. 188 f. TCC (Graduação) - Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Campus Joinville, Joinville, 2015.

CORTELLETI, Daniel. Dossiê Técnico: Introdução à programação de microcontroladores Microchip PIC. Centro Tecnológico de Mecatrônica. SENAI – RS, 2006.

CUNHA, H. Tipos e especificações de motores de passo. Revista Controle e Instrumentação, p 24 - 32. Dezembro de 1983.

Curtocircuito. [S.l.]. MOTOR de passo. [2019]. Disponível em: <<https://www.curtocircuito.com.br/motor-de-passo-nema-17-4-8-kgf-cm-1-0a.html>>. Acesso em: 10 agosto 2019.

FERRARI, Cristiano D. Implantação de um sistema de comando numérico computadorizado (CNC) por retrofitting em um torno mecânico universal. Catanduva, 2011. Disponível em: < http://ctd.ifsp.edu.br/~cristiano.ferrari/images/Arquivos/Artigo_Fatec.PDF>. Acesso em 05 jul. 2019.

GOBBI, Marco Antonio. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA PROTOTIPAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**. 2014. 58 f. TCC

(Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2014.

GOODRICH, Marcia (2012). **Quarta revolução industrial: A Era das Máquinas Livres**, Inovação Tecnológica. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=quarta-revolucao-industrial-era-das-maquinas-livres&id=010170120922>>. Acesso em 12 de abril 2019.

GORDO, Nívia; FERREIRA, Joel. Módulo de Elementos de Máquinas: guias. v16. p.7. Cursos Essel online. 2005.

HENR DAN FALK, W. S. R. **The Enhanced Machine Control** - Developer Handbook. New York: [s.n], 2003.

HRR do Brasil. [S.l.]. **ENGRENAGEM** dente reto e barra cremalheira., [2019]. Disponível em : <<http://hrrdobrasil.com.br/produtos/engrenagens-industriais-e-agricolas>>. Acesso em 10 Agosto 2019.

Kalatec Automação Ltda. [S.l.]. **GUIAS lineares.**, [2019]. Disponível em: <<https://www.kalatec.com.br/produtos/guias-lineares/>>. Acesso em: 10 Agosto 2019.

KARLO, Apro. **Secrets of 5-Axis Machining**. [S.l: s.n., 200-]. Disponível em: <<https://www.globalspec.com/reference/76593/203279/multi-axis-machine-configurations>>. Acesso em: 10 Agosto 2019.

KUGLER, Mauricio. **Projeto de Placas de Circuito Impresso**. 2004. Disponível em: <http://www.com/publications/pcb_mauricio_kugler.pdf >. Acesso em: 05 de maio 2019.

LEAL, João Felipe; RIBAS, Matheus Taborda. **FRESADORA CNC MICROCONTROLADA PARA CONFECÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**. 2015. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

LUCCA, Jardel. **PLOTTER DE BAIXO CUSTO PARA PROTOTIPAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**. 2013. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrônica/telecomunicações, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

Machado, A. (1986). **Comando numérico aplicado às máquinas-ferramenta**. São Paulo: Cone Editora.

MADISON, James. **CNC Machining Handbook: Basic Theory, Production Data, and Machining Procedures**. Norwalk: Industrial Press Inc., 1996.

MARCO FILHO, Flávio. **Elementos de transmissão flexíveis**. 2 ed. Departamento de Engenharia Mecânica, Poli/UFRJ, 2009. 143 p.

MASCARENHAS, Rafael. **Introdução ao sistema de coordenadas na programação CNC**. 2013. Disponível em: <<https://cad.cursosguru.com.br/introducao-ao-sistema-de-coordenadas-na-programacao-cnc/>>. Acesso em: 07 de maio 2019.

MEHL, Ewaldo, L. de M. Conceitos Fundamentais Sobre Placas de Circuito Impresso. 2011. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf>. Acesso em: 02 maio 2019.

MELO, Paulo R. de S; RIOS, Evaristo C. D.; GUTIERREZ, Regina M. V. **Placas de Circuito Impresso: Mercado atual e Perspectivas**. Rio de Janeiro: 2009. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set1406.pdf>. Acesso em: 03 maio 2019.

NORTON, R.L. Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. 2 ed. Bookman, 2004. 932 p.

OBR equipamentos industriais Ltda. [S.l.]. EIXOS e rolamentos lineares., [2019]. Disponível em: <<https://www.obr.com.br/series/eixos-e-rolamentos-lineares/>>. Acesso em: 10 Agosto 2019.

PENIDO, Édilus de Carvalho Castro, TRINDADE, Ronaldo Silva. Microcontroladores. – Ouro Preto: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais; Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria ; Rede e-Tec Brasil, 2013.

PERCHÉ, Carlos Felipe de Paiva. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE PROTOTIPAGEM PARA PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESSOS**. 2013. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia da Computação, Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira, Itabira, 2013.

PEREIRA, Dhyogenes da Cunha Reis; HADAS, Maurílio Vagetti. **FRESADORA CNC DIDÁTICA: OTIMIZAÇÃO PARA PROJETO DE BAIXO CUSTO**. 2015. 95 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

POLASTRINI, Fernando Henrique. **DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA CNC DE BAIXO CUSTO COM SOFTWARE E HARDWARE ABERTOS**. 2016. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal Minas Gerais – Campus Formiga, Formiga, 2016.

Portal eletricista. [S.l.]. ESTUDANDO o funcionamento dos motores de indução trifásico. [2019]. Disponível em: <<https://www.portaleletricista.com.br/motores-de-inducao/>>. Acesso em: 10 agosto 2019.

Reiman Ltda. [S.l.]. FUSOS., [2019]. Disponível em: <<http://www.reiman.pt>>. Acesso em: 10 Junho 2019.

ROCHA, João. **O que é a fabricação digital?**. [S.l: s.n., 200-]. Disponível em: <<http://site.designoteca.com/2012/01/20/fabricacao-digital/>>. Acesso em: 10 Agosto 2019.

ROSÁRIO, João Maurício. Princípios da mecatrônica. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 366 p. il.

SEAMES, W, S. Computer Numerical Control: Concepts and Programming. Stanford: Cengage Learning, 2001.

SILVA, L, A; ZANIN, M, J. Montagem de fresa CNC. Relatório (Graduação em Tecnologia em Manutenção Industrial) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Medianeira, Medianeira, 2011.

SINCAK, Carlos Henrique; DILDA, Vanessa; LERMEN, Richard Thomas. Projeto, construção e funcionamento de uma máquina CNC com plataforma livre - arduíno. **Revista de Empreendedorismo, Inovação e Tecnologia**, [s.l.], v. 3, n. 2, p.67-76, 23 dez. 2016. Complexo de Ensino Superior Meridional S.A.. <http://dx.doi.org/10.18256/2359-3539/reitimed.v3n2p67-76>.

SLOCUM, A. H., Precision Machine Design, Prentice Hall, 1992.

SMITH, Fred. What makes a CNC-ready milling machine?, 2008. Disponível em . Acesso em 21 jun. 2019.

SOUZA, Marco Antonio Alves de. **Implementação de sistema controlador de motor de passo em malha fechada utilizando tecnologia baseada em controlador digital de sinas**. 2007. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em eletrônica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007

STOETERAU, R. L. Introdução ao Projeto de Máquina Ferramentas Modernas, Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

Tpnewtech [S.l.]. AC brushless servomotor. [2019]. Disponível em: <<http://www.tpnewtech.com/en-US/btd3-0325/btd-series/625/1861/product>>. Acesso em: 10 agosto 2019.