

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Rafael Fiebig

PROTÓTIPO DE UM CNC ROUTER

Passo Fundo

2018

Rafael Fiebig

PROTÓTIPO DE UM CNC ROUTER

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Jocarly Patrocínio de Souza.

Passo Fundo

2018

Rafael Fiebig

Protótipo de um CNC Router

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Jocarly Patrocínio de Souza.

Aprovado em ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Orientador Jocarly Patrocínio de Souza - UPF

Prof. Ms. Amauri Fagundes Balotin - UPF

Prof. Dr. Mikhail Polonskii - UPF

RESUMO

O grande crescimento da tecnologia aumentou significativamente o uso de sistemas CNC nas indústrias moveleiras, porém com um elevado custo, impossibilitando o acesso das pequenas e médias empresas a este sistema. O presente trabalho tem por finalidade desenvolver uma CNC *Router* de baixo custo e menor complexidade. O protótipo consiste em um conjunto mecânico, sistema eletrônico e a utilização de softwares de interface. A estrutura mecânica da máquina permite a movimentação linear dos eixos X, Y e Z, através de um pórtico móvel enquanto a peça se mantém presa à mesa de trabalho. A movimentação dos eixos é realizada através de uma sequência de comandos gerados com o auxílio de softwares dedicados, que são carregados no sistema da máquina, onde são processados e posteriormente enviados para uma interface que exerce o controle dos motores da máquina. O protótipo mecânico é fabricado em MDF com espessura de 15mm, devido ao fácil acesso e baixo custo de fabricação, onde juntamente com os componentes mecânicos é capaz de realizar operações simultâneas de 3 eixos.

Palavras-Chave: CNC *Router*, fresamento, comando numérico computadorizado.

ABSTRACT

The great growth of technology has significantly increased the use of CNC systems in the furniture industries, but with a high cost, making it difficult for small and medium enterprises to access this system. The purpose of the present work is to develop a CNC Router with low cost and less complexity. The prototype consists of a mechanical assembly, electronic system and a use of interface software. A mechanical structure of the machine allows a linear movement of the X, Y and Z axes through a mobile gantry while a piece remains attached to the work table. The movement of the axes was performed through a sequence of commands generated with the aid of dedicated software, which are loaded without machine system, where they are processed and sent via interface that controls the machine's motors. The mechanical prototype will be manufactured in MDF with a thickness of 15mm, due to easy access and low manufacturing cost, where to place with mechanical components is capable of performing and simultaneous 3-axis.

Keywords: CNC Router, milling, computer numerical control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Operações de fresamento | 14 |
| Figura 2 – Esquema simplificado de um sistema CNC | 15 |
| Figura 3 – Aplicações do sistema CAD | 16 |
| Figura 4 – Ambiente de simulação da trajetória de um software CAM | 17 |
| Figura 5 – Sistema de coordenadas de uma fresadora CNC | 18 |
| Figura 6 – CNC <i>Router</i> | 19 |
| Figura 7 – Fuso de esferas com circuito recirculante | 21 |
| Figura 8 – Motor <i>Spindle</i> | 22 |
| Figura 9 – Diagrama resumido de um inversor de frequência | 23 |
| Figura 10 – Motor de passo | 24 |
| Figura 11 – Interior de um motor de passo | 25 |
| Figura 12 – Comparativo entre o acionamento de um motor unipolar e bipolar | 26 |
| Figura 13 – Placa controladora e suas conexões | 27 |
| Figura 14 – Modelo de circuito ponte H | 28 |
| Figura 15 – Diagrama do TB6600HG com exemplo de ligação | 28 |
| Quadro 1 – Endereços de um programa CNC | 29 |
| Quadro 2 – Exemplo de um programa CNC | 30 |
| Figura 16 – Desenho realizado pelo exemplo de programa CNC | 31 |
| Figura 17 – Diagrama do sistema proposto | 32 |
| Figura 18 – <i>Layout</i> da estrutura mecânica | 33 |
| Figura 19 – Estrutura mecânica montada | 34 |
| Figura 20 – Representação dos conjuntos de movimentação com seus componentes | 35 |
| Figura 21 – Especificações técnicas do motor de passo AK23/15FN1.8 | 39 |
| Figura 22 – Visão frontal do eixo X de movimentação | 40 |
| Figura 23 – Sistema de acionamento do eixo Y | 41 |
| Figura 24 – Diagrama de ligação do sistema eletrônico | 42 |
| Figura 25 – Placa controladora USB STB4100 | 43 |
| Figura 26 – <i>Driver</i> WD-TB6600 | 44 |
| Figura 27 – Sensores fins de curso do eixo de movimentação X | 45 |
| Figura 28 – Motor <i>spindle</i> Tecmaf e Inversor de frequência WEG | 46 |
| Figura 29 – Vista interna do quadro de comando | 47 |
| Figura 30 – Sonda para identificar o ponto zero da peça | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 31 – Desenho da peça a ser usinada e percurso de corte | 50 |
| Figura 32 – Simulação da peça a ser usinada | 51 |
| Figura 33 – Arquitetura Mach 3 e suas principais funções | 52 |
| Figura 34 – Reforço do pórtico móvel para eliminar as folgas | 53 |
| Quadro 3 – Teste de repetibilidade individual dos eixos | 54 |
| Figura 35 – Teste de precisão com paquímetro digital | 54 |
| Quadro 4 – Custos do projeto | 57 |

LISTA DE ABREVIATURAS

CN – Comando Numérico

CNC – Comando Numérico Computadorizado

MDF – Fibra de Média Densidade

CAD – Desenho Auxiliado por Computador

CAM – Manufatura Auxiliada por Computador

UPD – Unidade de Processamento de Dados

UC – Unidade de Controle

CIM – Manufatura Integrada por Computador

CC – Corrente Continua

CI – Circuito Integrado

USB – Universal Sinal Bus

PWM – Pulse Width Modulation

NF – Normalmente Fechado

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 CONTEXTO..... | 11 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL..... | 11 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 12 |
| 1.4 JUSTIFICATIVA | 12 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 13 |
| 2.1 USINAGEM | 13 |
| 2.1.1 Fresamento | 13 |
| 2.2 TECNOLOGIA CNC | 14 |
| 2.2.1 Sistemas CAD/CAM..... | 15 |
| 2.2.1.1 <i>Software CAD</i> | 16 |
| 2.2.1.2 <i>Software CAM</i> | 16 |
| 2.3 SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS | 17 |
| 2.4 CNC <i>ROUTER</i> | 18 |
| 2.5 COMPONENTES MECÂNICOS | 19 |
| 2.5.1 Estrutura | 19 |
| 2.5.2 Fuso de esferas | 20 |
| 2.5.3 Correia dentada | 21 |
| 2.6 MOTOR <i>SPINDLE</i> | 21 |
| 2.7 INVERSOR DE FREQUÊNCIA | 22 |
| 2.8 SISTEMA ELETRÔNICO | 23 |
| 2.8.1 Motores de passo..... | 23 |
| 2.8.1.1 <i>Princípios de funcionamento</i> | 24 |
| 2.8.1.2 <i>Tipos de estruturas</i> | 25 |
| 2.8.1.3 <i>Forma de operação</i> | 25 |
| 2.8.2 Placa controladora..... | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 2.8.3 Driver de acionamento | 27 |
| 2.9 SOFTWARE CNC | 29 |
| 2.9.1 Programação CNC | 29 |
| 3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO | 32 |
| 3.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA..... | 32 |
| 3.2 ESTRUTURA MECÂNICA DO PROTÓTIPO | 33 |
| 3.2.1 Movimentação linear | 34 |
| 3.2.2 Acionamento dos eixos lineares | 35 |
| 3.2.3 Dimensionamento da transmissão da máquina | 36 |
| 3.2.3.1 Dimensionamento do eixo Z..... | 36 |
| 3.2.3.2 Dimensionamento do eixo X..... | 37 |
| 3.2.3.3 Dimensionamento do eixo Y..... | 38 |
| 3.2.4 Resolução do movimento linear | 39 |
| 3.3 SISTEMA ELETRÔNICO | 41 |
| 3.3.1 Placa Controladora | 42 |
| 3.3.2 Acionamento dos motores de passo | 44 |
| 3.3.3 Limites de eixo | 45 |
| 3.3.4 Motor spindle | 46 |
| 3.3.5 Quadro de comando | 47 |
| 3.3.6 Sonda | 48 |
| 3.4 INTERFACE COMPUTADORIZADA..... | 49 |
| 3.4.1 Gerando o arquivo de instruções no software CAD/CAM | 49 |
| 3.4.2 Leitura e interpretação do código de instruções | 51 |
| 4 RESULTADOS | 53 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 56 |
| REFERÊNCIAS | 58 |
| APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DAS PRINCIPAIS PEÇAS | 61 |
| APÊNDICE B – AJUSTES E CONFIGURAÇÕES DE CADA EIXO | 62 |

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão mencionadas particularidades sobre a importância da tecnologia CNC na indústria moveleira, o objetivo geral proposto, listando os objetivos específicos desse trabalho.

1.1 CONTEXTO

A alta demanda e a expansão do mercado moveleiro gera a necessidade de ter máquinas confiáveis, controladas por computador e com excelente precisão na usinagem. Essas máquinas são chamadas de *Router* CNC, tendo como principais aplicações, trabalhos com madeiras, plásticos, borracha e metais não ferrosos. São máquinas de construção mecânica simples, porém com alta tecnologia embarcada para o controle dos eixos de movimentação.

Nos sistemas CNC modernos, o desenho de componentes é altamente automatizado, utilizando softwares específicos responsáveis pelo desenho da peça e pela fabricação da mesma. Estes softwares produzem um arquivo que é interpretado para extrair os comandos para operar a máquina através de um controlador.

Com a ajuda da tecnologia CNC, as máquinas hoje não se limitam às capacidades humanas e são capazes de fazer produtos de alta precisão de maneira muito mais rápida, com um grande volume de produção a um custo relativamente baixo.

1.2 OBJETIVO GERAL

O projeto tem como objetivo principal a construção de uma máquina CNC de baixo custo capaz de efetuar operações de fresamento. A mesma utilizará um software para que sejam enviadas informações provindas do desenho da peça a ser usinada. Essas informações são enviadas à placa controladora através de um arquivo composto por códigos de coordenadas denominado GCode, onde se encontra todas as características necessárias para a usinagem.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral desse trabalho são estabelecidos a seguir os objetivos específicos:

- 1) Aprofundar os conhecimentos em relação ao acionamento dos motores e movimento dos eixos;
- 2) Estudar os componentes para a construção do protótipo e seu quadro de comando;
- 3) Construir o protótipo para uma área útil de usinagem de 400x500mm;
- 4) Desenvolver uma interface amigável para o operador;
- 5) Realizar testes de movimento e precisão com diversas velocidades;
- 6) Desenvolver um equipamento prático para identificar de forma automática a espessura do material a ser usinado;
- 7) Fazer análise de custo de cada componente mantendo um alto padrão de qualidade e precisão;

1.4 JUSTIFICATIVA

Nas indústrias moveleiras observa-se uma grande necessidade no aumento de qualidade, alta velocidade de produção, redução de perdas e principalmente evitar riscos ao operador. Nos dias atuais (nas pequenas e médias empresas), a confecção de peças é feita de forma manual, onde o operador enfrenta risco de acidente constante, principalmente quando a peça possui pequenas dimensões e geometria complexa. Com isso estuda-se a possibilidade de construção de um CNC *Router* para usinagem de placas de fibra de média densidade (MDF), agilizando a confecção, de boa praticidade e confiabilidade, entregando o produto final com rapidez e precisão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo serão apresentados os temas pertinentes ao desenvolvimento do protótipo proposto, buscando obter o entendimento necessário para alcançar o objetivo final deste trabalho e integrar o leitor ao projeto e a sua área de aplicação. A pesquisa foi realizada tendo como embasamento livros, trabalhos, dissertações, teses e artigos relacionados com o assunto deste trabalho.

2.1 USINAGEM

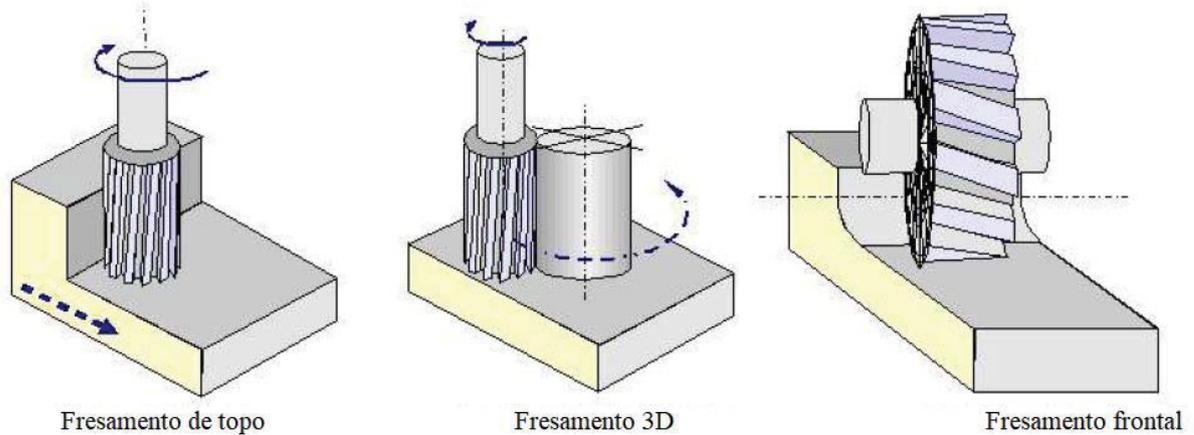
A usinagem corresponde a todo o processo de fabricação que resulta em remoção de material para se obter a forma desejada. Os principais processos de usinagem são a furação, torneamento e fresamento. A partir destes processos são fabricados diferentes formatos de peças. A aplicação varia de acordo com o modelo de produto realizado, sendo que em alguns casos, a usinagem é o principal método de produção. As operações de usinagem também podem ser caracterizadas como processo auxiliar, complementando processos de estampagem, fundição, extrusão, entre outros. (SOUZA; ULBRICH, 2013).

2.1.1 Fresamento

No processo de fresamento a ferramenta de corte gira em torno de seu eixo e entra em contato com a peça, que executa os movimentos de avanço. Uma grande característica é a versatilidade na produção de geometrias diversas, além de garantir elevadas taxas de remoção de material. Nesse processo, a ferramenta gira enquanto a peça, presa a mesa, é responsável pelos movimentos de avanço longitudinal e transversal. Em algumas situações a peça pode ficar estática enquanto a ferramenta de corte realiza todos os movimentos. (MACHADO et al., 2015).

Segundo Stoeterau (2004), as operações de fresamento podem ser classificadas em três tipos básicos de acordo com o movimento da ferramenta: fresamento de topo, fresamento em três dimensões e fresamento frontal. Estes três tipos são mostrados na Figura 1.

Figura 1 – Operações de fresamento.



Fonte: Adaptado de (STOETERAU, 2004).

O fresamento de topo é utilizado para executar rebaiços, matrizes, gravações e fresar contornos, no fresamento 3D é possível à fabricação de peças em auto relevo realizando o desbaste na superfície, e por último, o fresamento frontal que é uma operação na qual os dentes da fresa estão na superfície frontal da ferramenta e o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada. (JÚNIOR; SOUZA, 2013).

2.2 TECNOLOGIA CNC

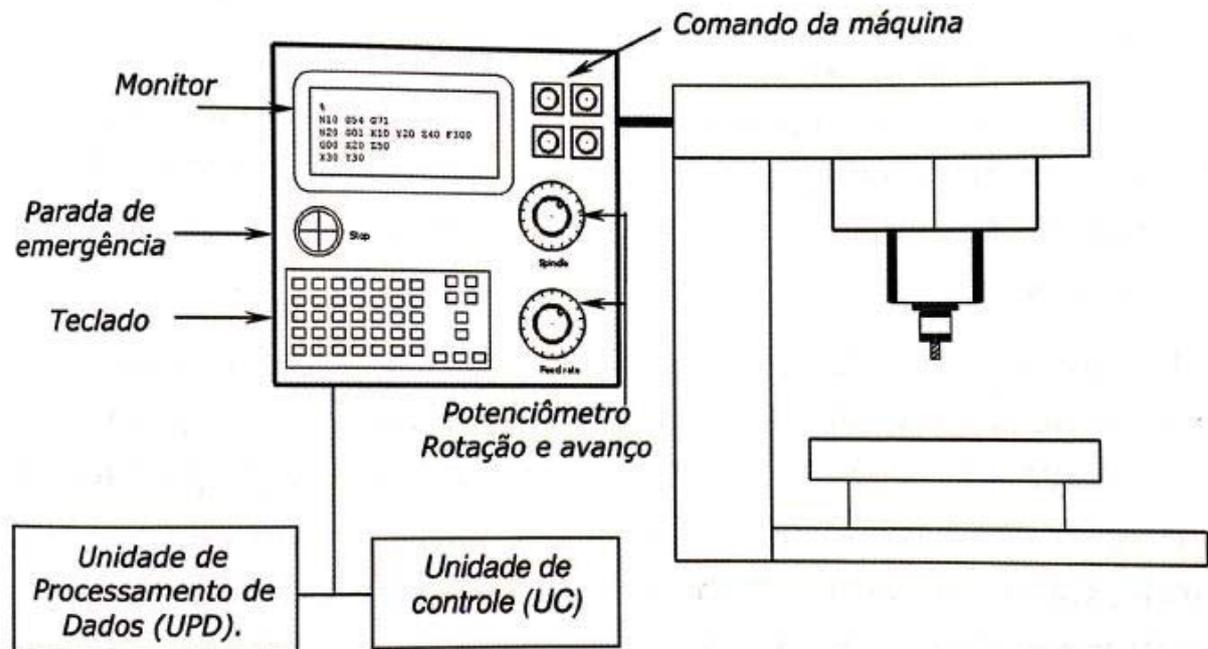
O Comando Numérico (CN) representa o acionamento de equipamentos por coordenadas numéricas. O Controle Numérico Computadorizado (CNC) representa o mesmo acionamento, agora controlado por um computador. (SOUZA; ULBRICH, 2013).

O CNC é um equipamento eletrônico que recebe informações da forma em que a máquina irá realizar uma operação, por meio de linguagem própria, denominado programa CNC, interpreta essas informações e as envia ao sistema de controle através de pulsos elétricos. (PEREIRA, 2003).

Para realizar os comandos, é necessário o hardware para ler e interpretar as instruções e converte-las em ações mecânicas da máquina. É composto por duas unidades, a unidade de processamento de dados (UPD), responsável por receber o programa CNC, interpretar e enviar informações para acionamento dos motores, e a unidade de controle (UC), que representa o sistema de comunicação e monitoramento da máquina, fornecendo o *feedback* para o sistema, com informações requeridas pela máquina, permitindo que ela possa trabalhar dentro de suas especificações de precisão. (SOUZA; ULBRICH, 2013).

A Figura 2 apresenta uma vista simplificada de um sistema CNC.

Figura 2 – Esquema simplificado de um sistema CNC.



Fonte: (SOUZA; ULBRICH, 2013).

2.2.1 Sistemas CAD/CAM

O uso de computador para auxiliar a programação CNC tem sido implementado há vários anos, sistemas CAD/CAM tem um importante papel na programação CNC por adicionar um aspecto visual. O objetivo total deste sistema é muito maior que apenas o desenho e programação, é a parte de tecnologia moderna conhecida como Manufatura Integrada por Computador (CIM). (PEREIRA, 2003).

Com o avanço tecnológico de ferramentas que auxiliam no desenvolvimento de projeto e manufatura, os sistemas CAD/CAM estão sendo utilizados para usinagem de peças complexas, levando em consideração todo o processo de usinagem, desde a modelagem de superfícies ou formas complexas do produto, até a programação no sistema, reduzindo o tempo total de usinagem. (MIRALLES, 2009).

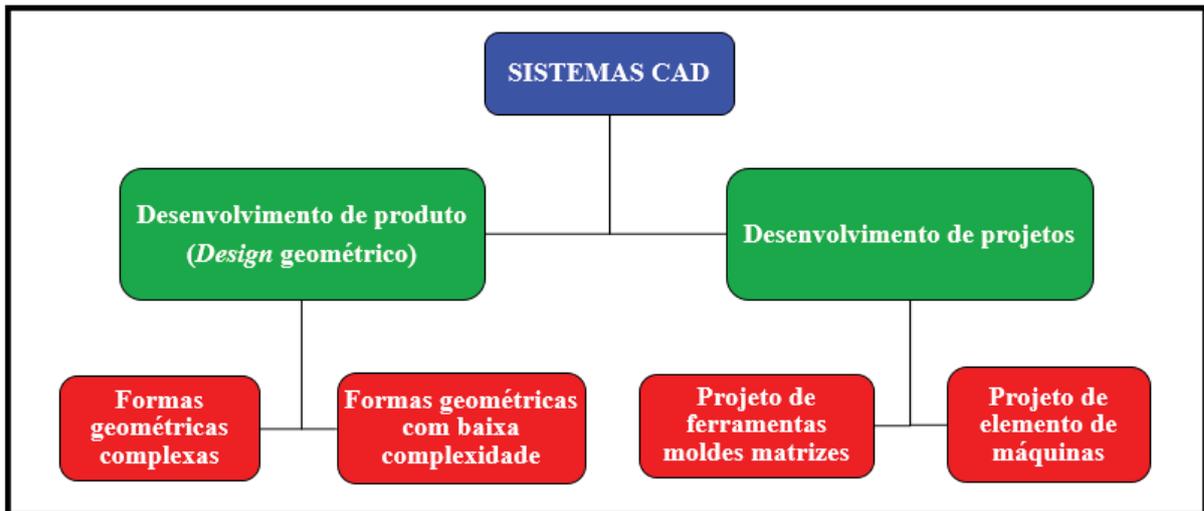
Segundo Costa e Pereira (2006), a tecnologia CN, associada à modelagem encontrada em sistemas CAD/CAM, suporta em grande parte a transferência do modelo de um produto para a máquina com pouca intervenção humana, além de proporcionar a substituição do meio de transmissão, papel ou verbal, para o eletrônico.

2.2.1.1 Software CAD

O Desenho Auxiliado por Computador (CAD) corresponde a uma ferramenta computacional que auxilia o projeto, desenho, modelamento e design industrial de produtos. Este tipo de software pode operar em formatos 2D e 3D para o modelamento geométrico, fornecendo as informações geométricas para o sistema de Manufatura Auxiliada por Computador (CAM). (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Um sistema CAD pode ser mais adequado para aplicações específicas, ou seja, existem sistemas CAD para suprir atividades de desenvolvimento de produtos e para desenho industrial, a Figura 3 apresenta estas diferentes aplicações.

Figura 3 – Aplicações do sistema CAD.



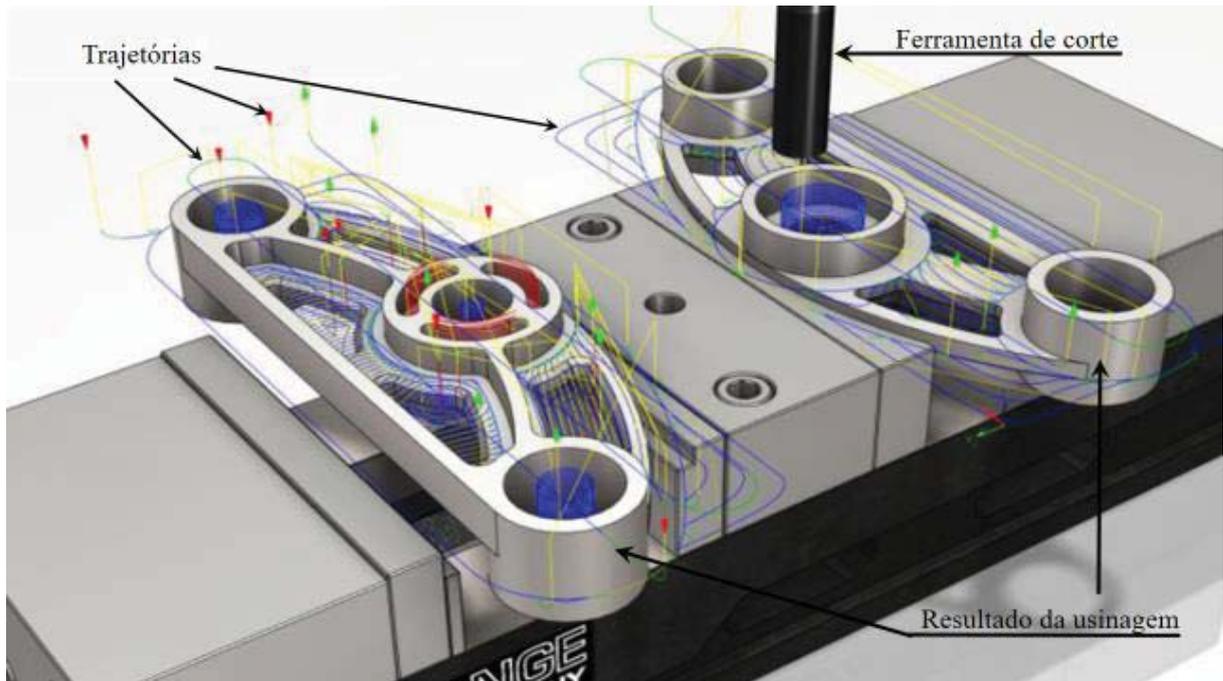
Fonte: Adaptado de (SOUZA; ULBRICH, 2013).

2.2.1.2 Software CAM

O software CAM utiliza os modelos e as montagens criadas no software CAD para gerar caminhos de ferramentas, que controlam as máquinas responsáveis por converter os projetos em peças físicas. Alguns softwares CAM ainda integram um ambiente de simulação da usinagem, sendo que nele pode ser configurado o modelo de fixação, dimensões da máquina e geometria da ferramenta. Esta simulação ajuda na criação da trajetória, sendo possível prever possíveis colisões ou deformações na peça, ocasionada por uma estratégia de usinagem inadequada. (AUTODESK, 2017).

Um software CAM é empregado na etapa de fabricação para a geração de programas para máquinas CNC via software, calculando as trajetórias da ferramenta de corte, permitindo verificar esta trajetória e o resultado final, antes de dar início à usinagem. (SOUZA; ULBRICH, 2013). A figura 4 mostra o ambiente de simulação da trajetória de um software CAM.

Figura 4 – Ambiente de simulação da trajetória de um software CAM.



Fonte: Adaptado de (AUTODESK, 2017).

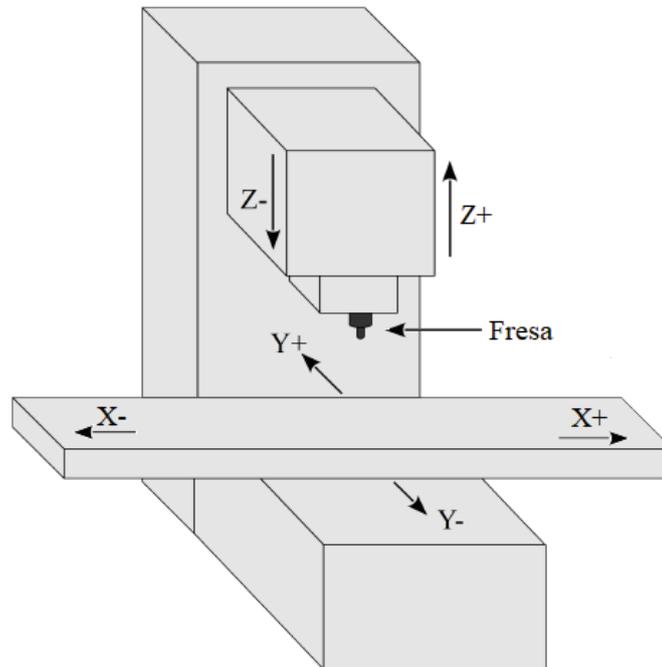
2.3 SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS

Segundo Pereira (2003), as fresadoras são máquinas designadas a usinar peças com a ferramenta de corte (fresa), movimentando-a ao longo de pelo menos três eixos cartesianos (X, Y e Z), removendo o excesso de material para no final dar forma a uma peça.

Os movimentos de máquinas fresadoras são realizados com parâmetros em um sistema de coordenadas cartesianas e o posicionamento da ferramenta é calculado em relação a um ponto de referência fixo, denominado ponto zero, esse ponto zero pode ser estipulado na peça ou na máquina. (SMID, 2008).

A Figura 5 apresenta o sistema de coordenadas de uma fresadora, mostrando a direção e o sentido de movimento de cada eixo.

Figura 5 – Sistema de coordenadas de uma fresadora CNC.



Fonte: Adaptado de (GOBBI, 2014).

2.4 CNC ROUTER

Router refere-se a uma máquina ferramenta, que é utilizada para realizar trabalhos manuais em madeiras, responsável por transformar um material bruto em qualquer peça com alguma complexidade geométrica. *CNC Router* é uma máquina controlada através de um computador, tendo como principais aplicações, trabalhos com madeiras, plásticos, borrachas, entre outros. (JARAGUÁ CNC, 2017).

Routers CNC possuem os chamados pórticos móveis, que é a movimentação da ferramenta de corte sobre a mesa de trabalho, ou seja, o conjunto de movimentação dos três eixos é suspenso e desliza ao longo da mesa de trabalho. No caso das fresadoras CNC, a ferramenta de corte se mantém parada, enquanto a mesa realiza os movimentos. (SOUZA; ULBRICH, 2013).

O movimento dos eixos de uma *CNC Router*, é realizado pelo sistema de controle que faz a interface do operador com a máquina, ou seja, um equipamento em que o operador pode visualizar em que posição a máquina se encontra, se está no avanço correto entre outros parâmetros, este equipamento é chamado de software de interface ou software CNC. (EICH, 2014).

Na figura 6 pode-se verificar um exemplo de *CNC Router*, nota-se a característica de que a peça a ser usinada fica fixa à mesa, e a ferramenta de corte que faz o movimento através do seu pórtico móvel.

Figura 6 – CNC Router



Fonte: Adaptado de (JARAGUÁ CNC, 2017)

Atualmente são comercializados *CNC Routers* para diversas aplicações e possuem um investimento inicial de R\$ 20.000,00, esse valor varia de acordo com o tamanho da máquina e o sistema de movimentação. (JARAGUÁ CNC, 2017).

2.5 COMPONENTES MECÂNICOS

O projeto mecânico de uma máquina deve obedecer algum requisito estipulado de qualidade superficial e tolerâncias dimensionais, sem depender da habilidade do operador. Para atingir um desempenho competitivo nestes requisitos, é de grande importância a correta seleção dos elementos aplicados no projeto. (STOETERAU, 2004).

2.5.1 Estrutura

Segundo Stoeterau (2004), a estrutura de uma máquina corresponde a uma base onde são fixados todos os elementos que a compõem, também é necessário que atenda aos requisitos de

rigidez, estabilidade térmica, facilidade de manipulação, acessibilidade aos componentes internos da máquina e custo.

Os formatos de estrutura de *Routers* diferenciam-se principalmente pela forma que os componentes se deslocam nos eixos de trabalho. A estrutura tipo pórtico, é um formato estrutural muito empregado quando se torna necessário atingir uma grande área de trabalho em relação à área ocupada pela máquina. (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Este formato de estrutura atribui a movimentação dos eixos X, Y e Z à ferramenta de corte que é fixa por uma estrutura suspensa, mantendo a peça fixa à mesa de trabalho. Quando a aplicação é voltada para trabalhos de grandes dimensões, devido ao peso das peças usinadas, é vantajoso que não se aplique movimento à mesa de trabalho. (MIRALLES, 2009).

2.5.2 Fuso de esferas

O fuso é basicamente uma barra cilíndrica rosqueada. O parafuso é o elemento responsável pela transformação do movimento rotacional para o movimento de translação linear, ao girar o eixo, a porca desloca-se, este movimento é análogo ao funcionamento dos eixos de uma máquina CNC. (LYRA, 2010).

Segundo Juvinal e Marshek (2008), o atrito de deslizamento do fuso de esferas é dado pelo contato do rolamento com a pista do parafuso e da porca. Esse tipo de parafuso tem por principal vantagem a diminuição drástica do atrito e apresenta uma eficiência que pode chegar a 90%, enquanto o parafuso normal do tipo barra roscada chega no máximo a 50%. Em virtude do baixo atrito, os fusos de esferas não são autotravantes, isso significa que quando for utilizado para movimentação de cargas verticais deverá ser utilizado um sistema de freio.

Segundo Lyra (2010), foi desenvolvido o fuso de esferas com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema porca parafuso, que é um conjunto de acionamento que possui esferas como elementos de giro, porém, para conseguir um movimento contínuo no fuso de esferas, é necessário ter um circuito de recirculação. A Figura 7 mostra um fuso de esferas com circuito recirculante.

Figura 7 – Fuso de esferas com circuito recirculante.



Fonte: <http://omicrom.com.br/geral/fusos-esfera-2/>.

2.5.3 Correia dentada

Quando existe a necessidade em um projeto mecânico de se transmitir um movimento de rotação entre dois eixos paralelos, a transmissão por correia dentada é um método eficiente e que envolve componentes simples. A correia dentada é feita de um tecido emborrachado e revestido, sendo que em muitos modelos usa-se em seu interior fios de aço para permitir maior resistência. As polias ou engrenagens que compõem o conjunto de transmissão devem ter o perfil compatível com os dentes da correia, eliminando assim, possibilidades de escorregamento, garantindo precisão na transmissão. (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

2.6 MOTOR *SPINDLE*

Os motores *spindles* são muito utilizados para usinagem de materiais como madeira, plástico, alumínio e ligas leves de aço. A grande variedade de potência, aliada a alta velocidade de rotação permite a flexibilidade de utilização para cada aplicação. Seus rolamentos são de contato angular de altíssima precisão suportando altas rotações, a maioria dos motores possuem refrigeração por ventoinha, os modelos mais sofisticados contam com refrigeração líquida.

(TECMAF, 2017). A rotação do *spindle* é controlada através de um inversor de frequência, podendo ser alterada de acordo com o material a ser usinado.

A Figura 8 apresenta um motor *spindle*.

Figura 8 – Motor *spindle*.



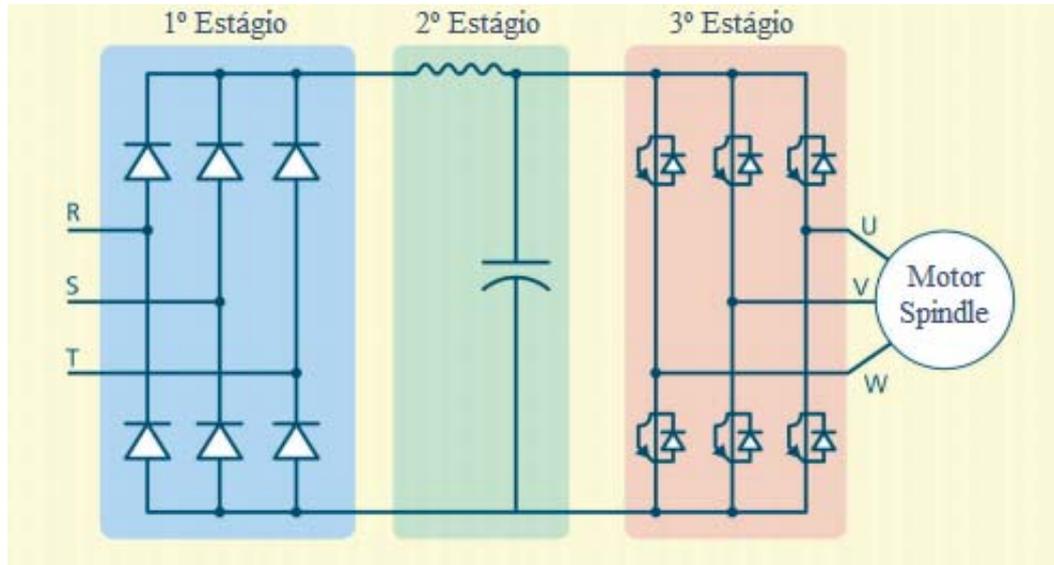
Fonte: (TECMAF, 2017).

2.7 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Os inversores de frequência possuem como função controlar a velocidade de giro do eixo do motor elétrico através da variação da frequência na sua saída, isso é realizado através da retificação de uma tensão de entrada e chaveamento da tensão para a saída na frequência desejada. (ARTACHO, 2015).

O inversor é ligado à rede, e em sua saída há uma carga (motor *spindle*) que necessita de uma frequência variável. Por tanto, o primeiro estágio do inversor conta com um circuito retificador responsável por transformar a tensão alternada em contínua, o segundo estágio é composto por um banco de capacitores e circuitos de filtragem de alta frequência, e por fim, o terceiro estágio é responsável por transformar a tensão contínua do barramento de corrente contínua (CC), para alternada, e com frequência desejada pela carga. (SEGUNDO; RODRIGES, 2015). A Figura 9 apresenta um diagrama resumido de um inversor.

Figura 9 – Diagrama resumido de um inversor de frequência.



Fonte: Adaptado de (SEGUNDO; RODRIGUES, 2015).

2.8 SISTEMA ELETRÔNICO

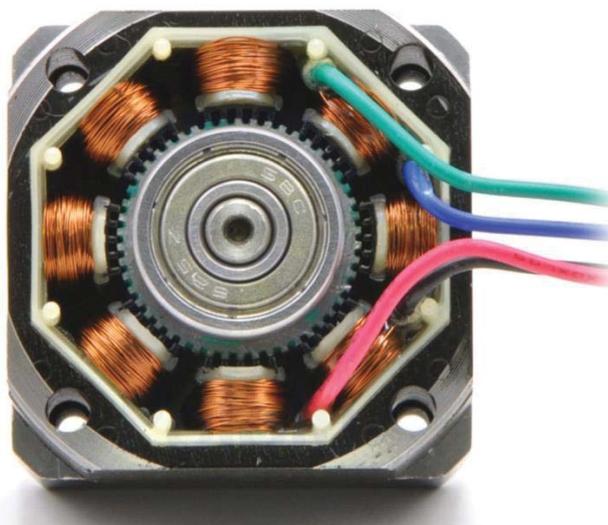
As opções voltadas ao controle da movimentação dos eixos de uma CNC *Router* variam de acordo com o nível de tecnologia utilizada. Para permitir uma maior precisão sobre os movimentos realizados, máquinas mais sofisticadas utilizam um sistema de malha fechada de controle, com a utilização de servo motores. (SOUZA; ULBRICH, 2013). Este sistema é muito utilizado para aplicações industriais, porém exigem um investimento maior.

Uma CNC *Router* pode ser controlada com o uso de motores de passo que possibilitam um posicionamento preciso aliado à um sistema mecânico eficiente. A aplicação deste tipo de motor é possível em máquinas voltadas para aplicações leves onde não são exigidos grandes esforços no trabalho de usinagem. (LYRA, 2010).

2.8.1 Motores de passo

Motor de passo corresponde a um tipo de motor elétrico síncrono que permite movimentar o eixo em pequenos incrementos angulares a partir de pulsos elétricos controlados nos terminais, permitindo controlar a posição, velocidade e direção. (BRITES; SANTOS, 2008). A Figura 10 mostra um exemplo de motor de passo.

Figura 11 – Interior de um motor de passo



Fonte: (POLULU CORPORATION, 2017)

2.8.1.2 Tipos de estruturas

Existem três tipos de motores de passo: ímã permanente, relutância variável e híbrido (BRITES; SANTOS, 2008):

- Ímã permanente: O rotor é construído com ímãs permanentes e não possui dentes, os polos magnetizados do rotor provém de uma maior intensidade de fluxo magnético, e por isto, exibe melhor característica de torque, porém com menor resolução;
- Relutância variável: Possui um rotor de ferro, com múltiplos dentes e um estator com enrolamentos, quando os enrolamentos são energizados os polos ficam magnetizados, então os dentes do rotor são atraídos para os polos do estator energizado, gerando assim um passo;
- Híbrido: É o motor com melhor desempenho em relação a resolução de passo, torque e velocidade, seu rotor é multi-dentado como no rotor de relutância variável, e contém um ímã permanente ao rotor do eixo;

2.8.1.3 Forma de operação

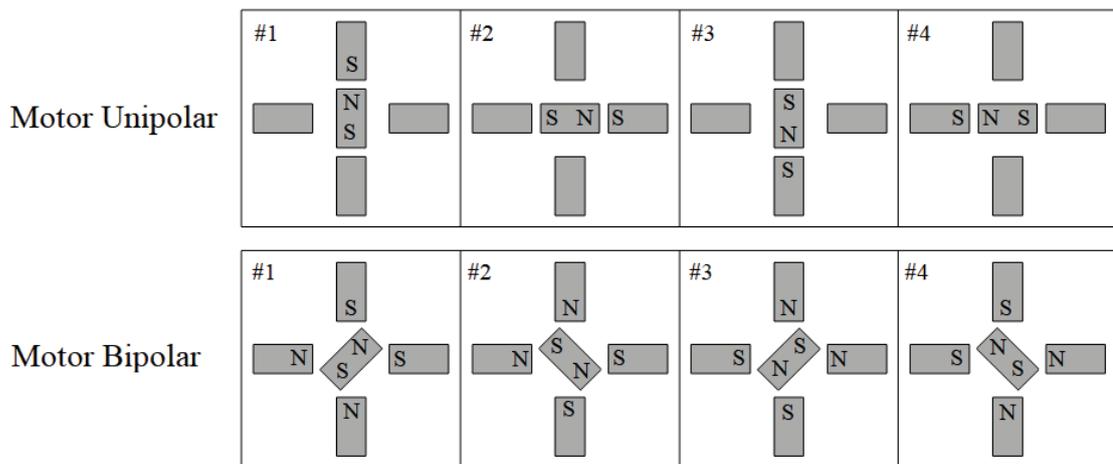
Para energizar as bobinas de um motor de passo, é possível utilizar dois tipos de ligações, sendo elas unipolares e bipolares.

Em uma ligação unipolar, o par de bobinas é energizado com uma derivação central, o que permite que o sentido do fluxo magnético seja invertido juntamente com a inversão no

sentido da corrente. De uma maneira mais simples pode-se dizer que para cada posição apenas uma bobina que compõem o par é acionada, atraindo apenas um dos polos do rotor. (BRITES; SANTOS, 2008).

Na ligação bipolar, o acionamento das bobinas sempre é feito em conjunto, atraindo os dois polos das extremidades opostas do rotor. Esse tipo de ligação necessita de um circuito de controle mais sofisticado, pois a corrente em cada enrolamento é bidirecional. (POLONSKII, 2017). A representação do acionamento os modos unipolar e bipolar pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12 – Comparativo entre o acionamento de um motor unipolar e bipolar.



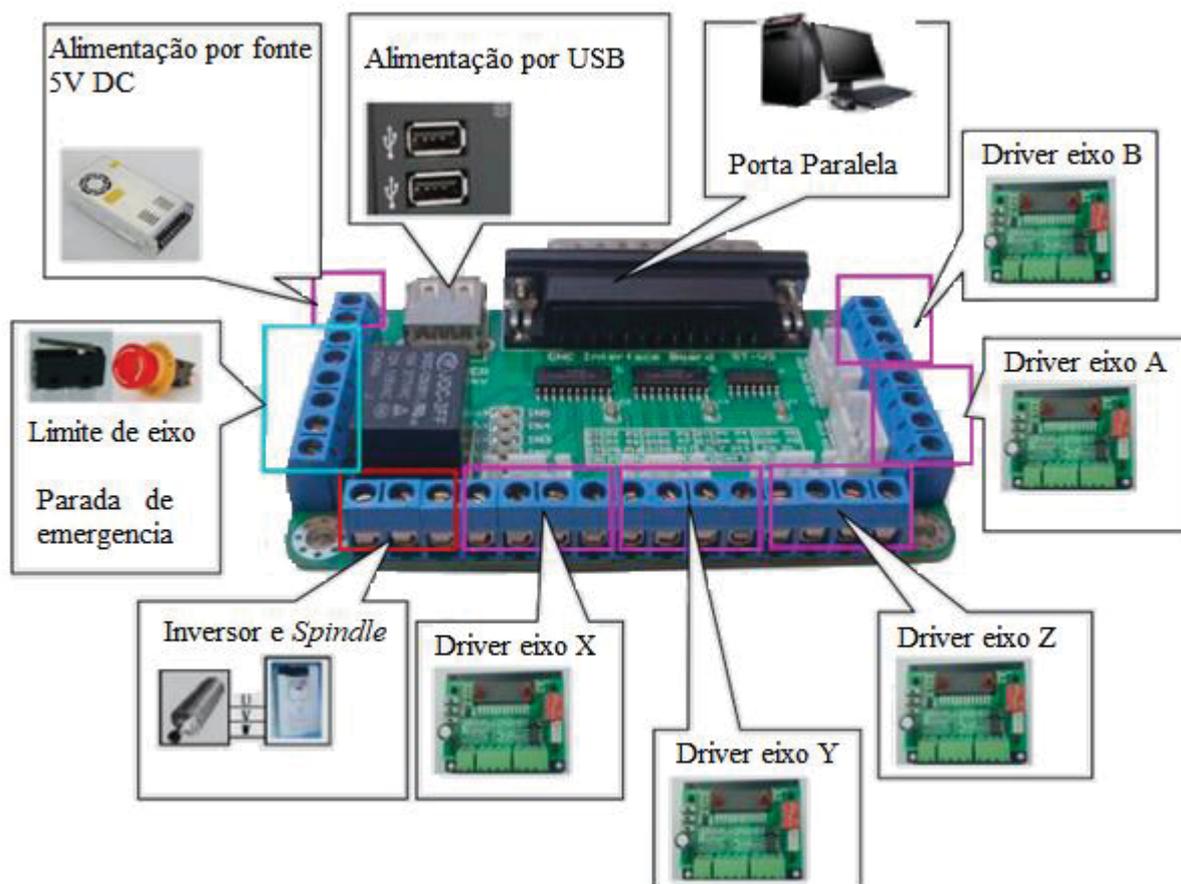
Fonte: Adaptado de (BRITES; SANTOS, 2008).

2.8.2 Placa controladora

A placa controladora é um dispositivo de controle CNC que utilizado junto com o software CNC, permite controlar a máquina, ou seja, ela é capaz de comandar a operação dos *drivers* dos motores de passo por meio do processamento de sinais vindos do computador, apresentando alta eficiência quando em operação. A grande característica da placa controladora é a facilidade com que ela se comunica com o software CNC. Ela disponibiliza portas de entradas que podem ser configuradas como limite de eixo, ponto inicial e parada de emergência. (POLICOMP, 2017).

Atualmente existem poucos modelos de placas controladoras, cada uma com suas limitações de aplicação, algumas placas disponibilizam saídas para controle de até 6 eixos. A Figura 13 mostra uma placa controladora para 5 eixos e suas conexões.

Figura 13 – Placa controladora e suas conexões.



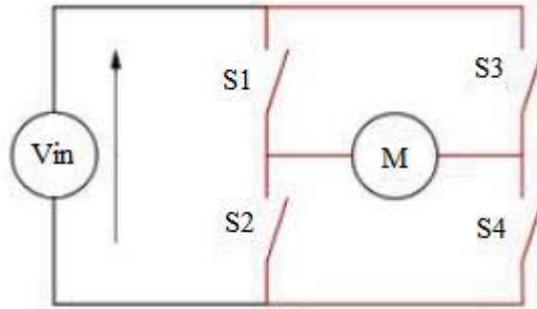
Fonte: adaptado de (POLICOMP, 2017).

2.8.3 Driver de acionamento

O *driver* é um circuito eletrônico responsável por amplificar sinais digitais de baixa potência para acionamento de um atuador. Para o acionamento das bobinas de um motor de passo, os *drivers* são compostos por um sistema de chaveamento utilizando transistores ou mosfets formando uma ligação de ponte H. (PAZOS, 2002).

Como mostra a Figura 14, a distribuição dos componentes da ponte H permite controlar o sentido da corrente aplicada, tornando possível selecionar a direção de rotação do motor. Ao acionar um dos pares de chaves opostas diagonalmente (S1 e S4), o motor girará para o sentido horário. Já o outro par (S2 e S3) fará o motor girar para o sentido oposto. (SUBRAMANIAN; KAYE; CHOPRA, 2012).

Figura 14 – Modelo de circuito ponte H.

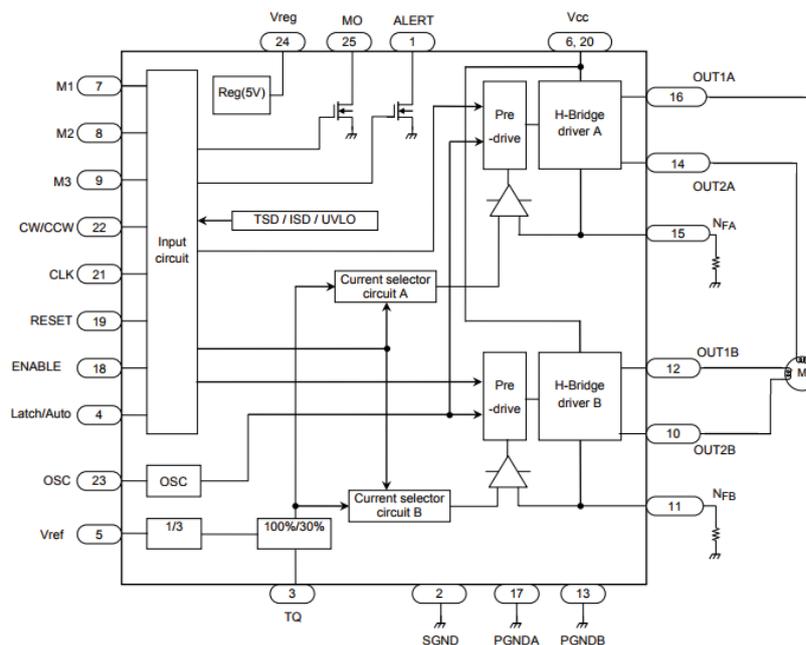


Fonte: Adaptado de (SUBRAMANIAN; KAYE; CHOPRA, 2012).

Pelo fato do controle dos motores de passo bipolar serem mais complexos, diversos fabricantes de semicondutores possuem Circuitos Integrados (CIs) específicos para o seu acionamento. A utilização deste tipo de componente resulta na simplificação do sistema de acionamento e facilita a integração com o sistema de controle. (COLUSSI, 2015).

O CI TB6600HG fabricado pela Toshiba opera por meio de duas pontes H, controladas por um sistema PWM que permite a configuração da largura de pulso de acionamento. Ainda permite a configuração do acionamento das bobinas dividindo em até 16 vezes o passo do motor, aumentando assim sua resolução. A tensão máxima de chaveamento é de 50 V e a corrente máxima de saída é de 5 A. (TOSHIBA, 2016). A Figura 15 mostra o diagrama de aplicação do circuito.

Figura 15 – Diagrama do TB6600HG com exemplo de ligação.



Fonte: (TOSHIBA, 2016).

2.9 SOFTWARE CNC

Atualmente existem vários tipos de softwares de controle para máquinas CNC. Eles são responsáveis pela interpretação dos códigos gerados pelo software CAM, convertendo-os para pulsos digitais e acionando os motores, com o auxílio da placa controladora. Muitos destes softwares executam a comunicação com a placa controladora através da porta paralela do computador, porém devido a padronização das portas de comunicação, podem ser encontradas placas controladoras que utilizam uma porta USB para esta comunicação. (LYRA, 2010).

2.9.1 Programação CNC

Um programa CNC é formado por uma sequência lógica de instruções codificadas contendo as informações necessárias para usinar uma peça. Os elementos que compõe o programa são caracteres, palavras e blocos. As palavras são a combinação de caracteres e representa uma instrução para a máquina. Cada linha de um programa é considerada um bloco e pode conter uma ou mais palavras. (SMID, 2008).

As instruções que formam o programa CNC sempre começam por uma letra, essa letra é conhecida como endereço, e aponta para uma variável do sistema de controle. A letra é seguida de números e símbolos e correspondem ao valor numérico da variável. (GOBBI, 2014). No Quadro 1 são apresentados alguns endereços utilizados.

Quadro 1 – Endereços de um programa CNC.

| Endereço | Descrição |
|----------|--|
| G | Função preparatória |
| X | Valor da coordenada X |
| Y | Valor da coordenada Y |
| Z | Valor da coordenada Z |
| F | Velocidade de avanço (<i>Feedrate</i>) |
| M | Função miscelânea |
| T | Função de ferramenta |
| S | Velocidade do <i>Spindle</i> |

Fonte: Adaptado de (SMID, 2008).

As trajetórias de ferramenta são descritas por valores numéricos baseados em eixos de um sistema de coordenadas, podendo ser referenciados de dois modos diferentes: absoluto e incremental. O modo é selecionado através dos seguintes códigos: (SOUZA; ULBRICH, 2013).

- G90 (Absoluto): o posicionamento é feito como referência ao ponto de origem;
- G91 (Incremental): Utiliza a posição atual da ferramenta como referência para deslocamento;

As funções miscelâneas de endereço M, são ações e definições complementares à usinagem, ou seja, podem ativar funções internas da máquina. Essas funções são muito utilizadas para controle do *spindle*. Por exemplo, o código M03 aciona o *spindle* no sentido horário e o M04 no sentido anti-horário, enquanto o M05 desabilita o *spindle*. (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Com as principais funções apresentadas, um exemplo simples de programa CNC é mostrado no Quadro 2, a fim de demonstrar o princípio básico da linguagem e a maneira como é aplicada.

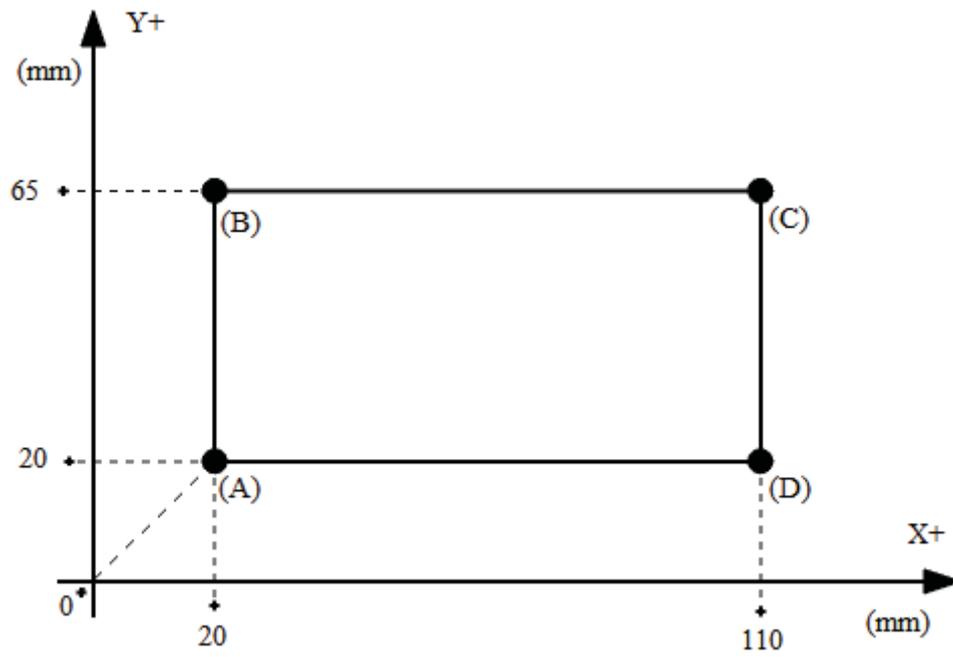
Quadro 2 – Exemplo de um programa CNC.

| Comando | Descrição |
|----------------|--|
| G21 | Define as coordenadas em milímetros |
| G91 | Define o modo de coordenada incremental |
| M03 S15000 | Aciona o <i>spindle</i> a uma velocidade de 15.000 RPM |
| G00 X20 Y20 Z0 | Avanço rápido para Ponto A |
| G01 Y45 F1200 | Avanço linear para Ponto B com velocidade de 1200 mm/min |
| G01 X90 | Avanço linear para o Ponto C |
| G01 Y-45 | Avanço linear para o Ponto D |
| G01 X-90 | Avanço linear para o Ponto A |
| M05 | Desliga o <i>spindle</i> |
| M02 | Fim do programa |

Fonte: Adaptado de (GOBBI, 2014).

O programa do Quadro 2 é responsável pelo desenho de um retângulo de 90mm por 45mm a partir do Ponto A, com ambas as coordenadas X e Y em 20mm e Z em 0mm. A Figura 16 mostra uma ilustração do resultado esperado.

Figura 16 – Desenho realizado pelo exemplo de programa CNC.



Fonte: Próprio autor.

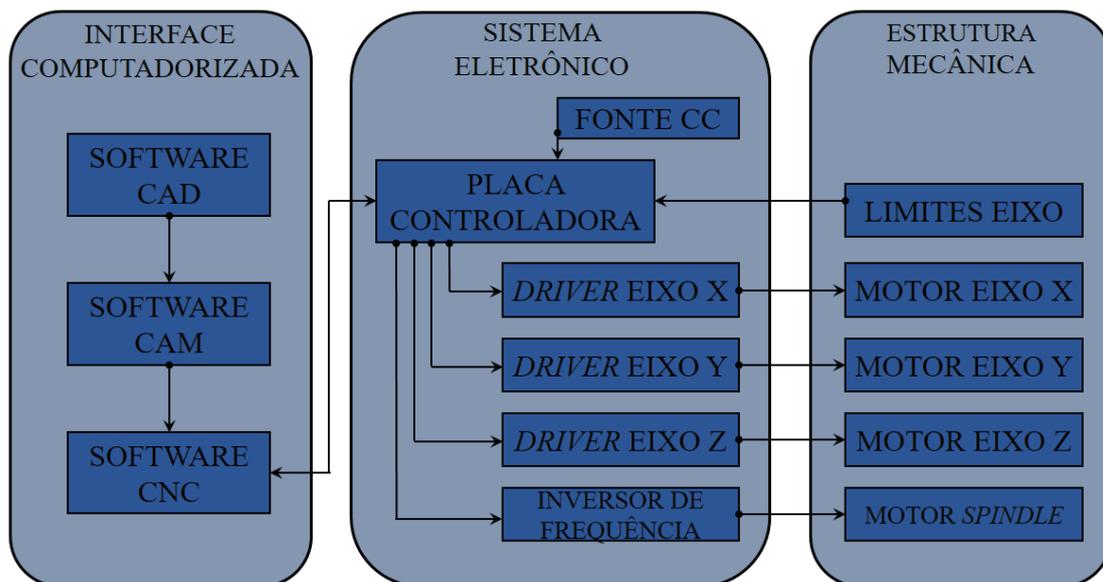
3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

O protótipo proposto consiste no desenvolvimento de um sistema CNC de pequeno porte com a finalidade de automatizar a usinagem de MDF. O sistema desenvolvido é capaz de usinar a peça exatamente de acordo com o desenho realizado.

3.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA

Em uma visão geral, o sistema proposto é composto por uma estrutura mecânica, um sistema eletrônico de controle e uma interface computadorizada, o esquemático do mesmo é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Diagrama do sistema proposto.



Fonte: Próprio autor.

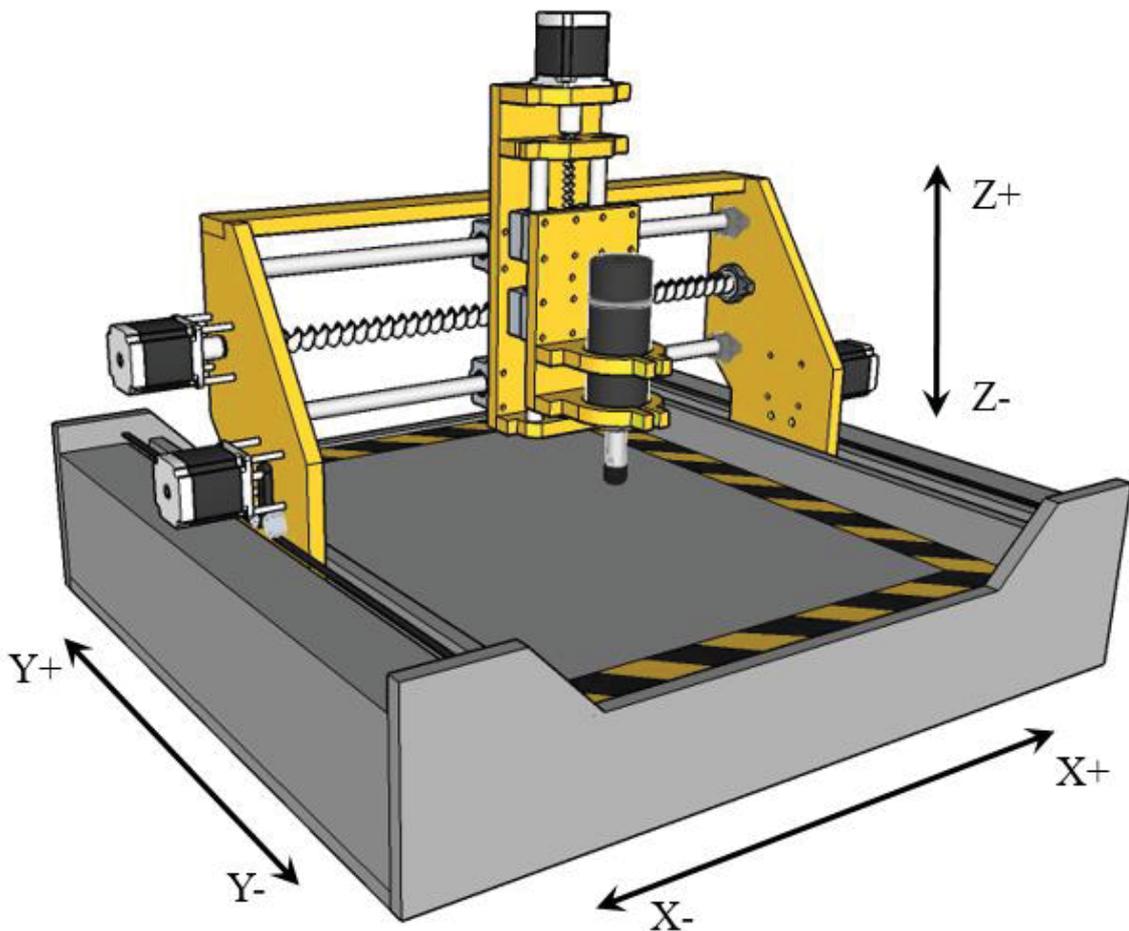
A estrutura mecânica é responsável pelo deslocamento da ferramenta nos eixos X, Y e Z, sobre a mesa fixa, através de seu pórtico móvel. Essa movimentação é realizada pelos motores de passo ao transformar o movimento rotacional em movimento de translação linear, esses são acionados por meio de *drivers* facilitando seu controle de direção e passo. O controle de posição dos eixos é realizado em uma placa controladora através da interpretação de instruções do software CNC, instruções geradas pelo software CAM a partir do desenho da peça a ser usinada.

3.2 ESTRUTURA MECÂNICA DO PROTÓTIPO

O conjunto mecânico foi projetado utilizando o conceito de estrutura tipo pórtico, onde o conjunto de movimentação dos eixos X, Y e Z desliza ao longo da mesa de trabalho. A estrutura foi dimensionada para garantir um espaço útil de trabalho de 500mm de comprimento e 400mm de largura no plano horizontal, ou seja 500mm no eixo Y e 400mm no eixo X. Para o eixo Z o curso é de 100mm, o suficiente para usinagem de MDF e para troca de ferramenta.

Na Figura 18 é apresentado um *layout* da estrutura desenvolvido no software SketchUp Make 2017.

Figura 18 – *Layout* da estrutura mecânica.



Fonte: Próprio autor.

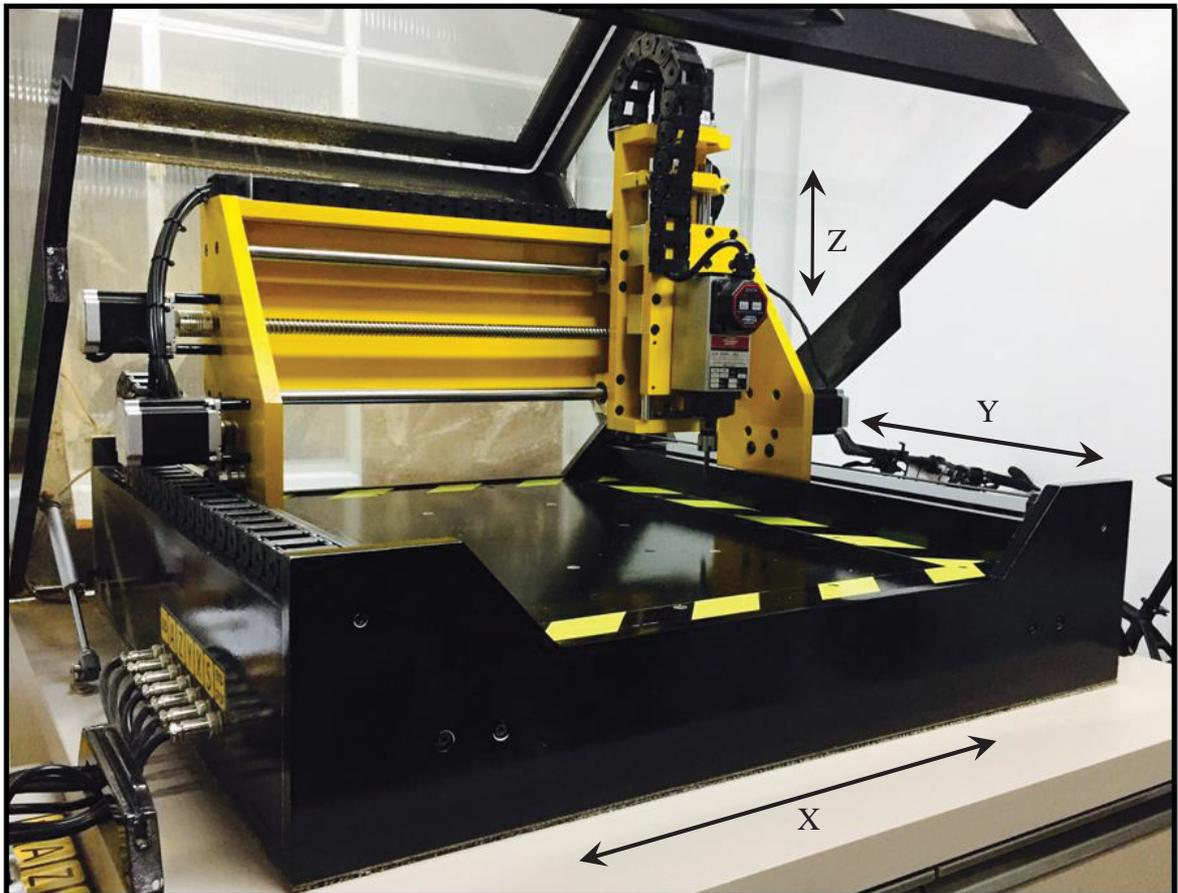
Para estabelecer as dimensões dos componentes mecânicos foi utilizado o software SketchUp Make 2017. Esta ferramenta computacional permite, além do desenho tridimensional

dos componentes, a simulação da montagem e da movimentação dos eixos. Etapa de suma importância para minimizar os erros durante a montagem do protótipo.

A estrutura projetada é composta basicamente por chapas de MDF, pois facilita a montagem, torna a estrutura mais leve, e reduz consideravelmente o custo final do projeto. O desenho técnico das principais peças da estrutura estão apresentadas no Apêndice A.

A Figura 19 mostra uma imagem da estrutura mecânica que foi montada de acordo com o modelo gráfico projetado. O equipamento possui as dimensões externas de 850 x 750 x 700 (mm) para os eixos X, Y e Z respectivamente.

Figura 19 – Estrutura mecânica montada.



Fonte: Próprio autor.

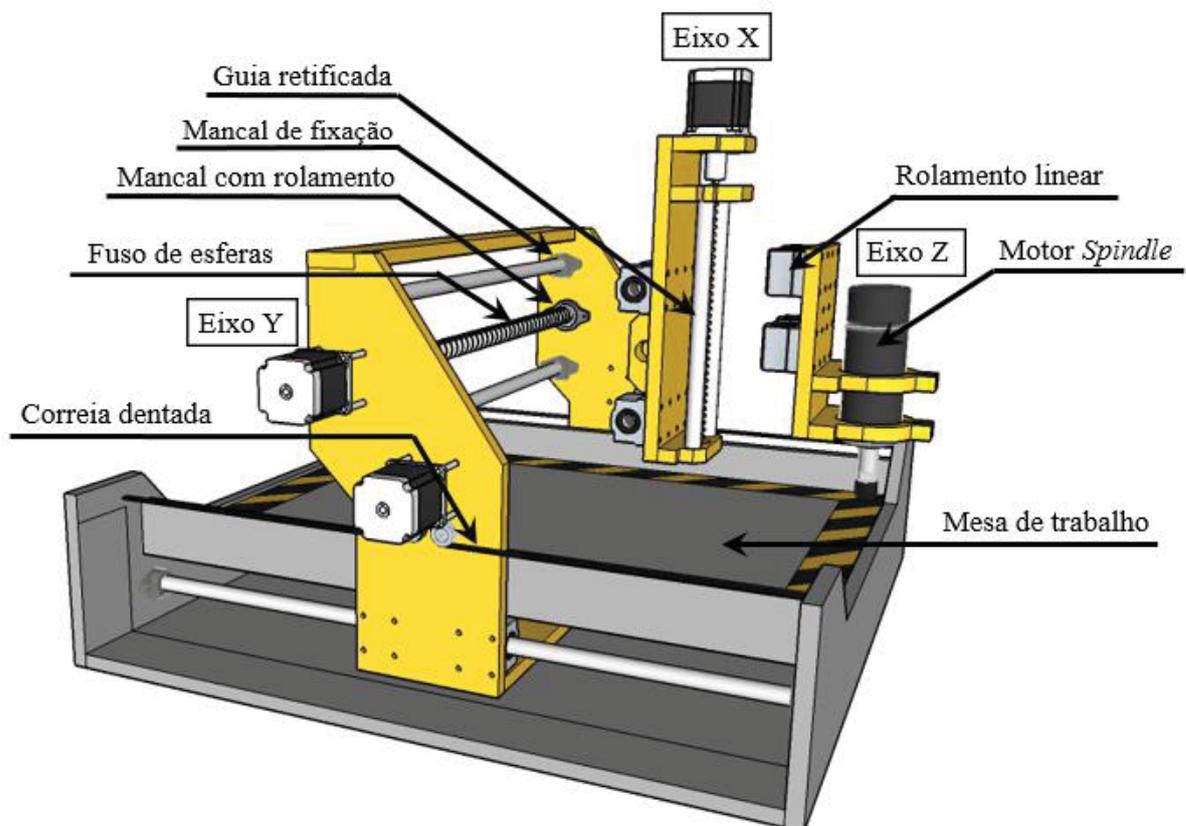
3.2.1 Movimentação linear

O conjunto de movimentação da ferramenta no sistema cartesiano X, Y e Z é por meio dos deslizamentos de rolamentos lineares sobre guias retificadas, possibilitando um

deslocamento com pouco atrito e reduzindo as folgas do mecanismo. Para fornecer uma grande estabilidade e eliminar possíveis movimentos de flexão nas estruturas móveis, são utilizados mancais com rolamentos nos eixos que serão movimentados através do sistema de fuso de esferas. As guias lineares serão fixadas com mancais individuais parafusados nos conjuntos estruturais, permitindo o alinhamento das mesmas.

Para melhor entendimento do protótipo elaborado a Figura 20 mostra a vista geral dos conjuntos de movimentação juntamente com seus componentes.

Figura 20 – Representação dos conjuntos de movimentação com seus componentes.



Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Acionamento dos eixos lineares

Para a movimentação do eixo X e Z, foi utilizado o sistema de acionamento por fuso de esferas, para reduzir o atrito os parafusos serão fixados na estrutura por meio de mancais com rolamentos.

Para o movimento do eixo Y foi utilizado o sistema de correia dentada, e adicionado um motor escravo, onde dois motores serão responsáveis pelo acionamento das polias, mantendo um torque elevado e reduzindo os possíveis desalinhamentos causados devido à dimensão do

protótipo. Os dois motores receberão o mesmo número de pulsos, ou seja, os dois juntos movem-se todas as vezes em resposta aos movimentos do software CNC, mas cada um será alimentado separadamente através de seu *driver* de acionamento.

3.2.3 Dimensionamento da transmissão da máquina

Para iniciar o dimensionamento, foi preciso analisar as necessidades que deverão compor a máquina. Suas dimensões foram estabelecidas em 500mm de comprimento (eixo Y), 400mm de largura (eixo X) e 100mm de altura (eixo Z), sendo essa a capacidade da mesa de usinagem, ou seja, a área útil de corte.

Para o princípio do dimensionamento dos itens pertinentes a transmissão, utilizaram-se as massas do conjunto de cada eixo a ser dimensionado, que foram obtidas através do auxílio de um software de CAD 3D. Após definidas as massas e o comprimento dos eixos, definiram-se os componentes dessa transmissão, levando em consideração características do equipamento e dos componentes da transmissão que são: Fuso de esferas, correia dentada e motores de passo.

Abaixo estão descritas as massas que deverão ser deslocadas em cada eixo correspondente e a sua distância.

- Eixo Y 12kg, comprimento 500mm;
- Eixo X 8kg, comprimento 400mm;
- Eixo Z 5kg, comprimento 100mm;

3.2.3.1 Dimensionamento do eixo Z

No dimensionamento do eixo Z, utilizou-se a equação (1) para encontrar a carga axial que o motor e o fuso deverão suportar durante o trabalho do sistema, onde F_{AZ} é a carga axial durante a aceleração no eixo Z, M_Z é a massa a ser deslocada, g é a gravidade e α a aceleração. Para o cálculo, adota-se uma aceleração de 1m/s^2 e gravidade de $9,81\text{m/s}^2$, para este caso, não foi considerada a resistência na superfície da guia f e desprezado o momento de inércia no fuso. (THK, 2017).

$$F_{AZ} = (M_Z \times g) + f + (M_Z \times \alpha) \quad (1)$$

$$F_{AZ} = (5 \times 9,81) + 0 + (5 \times 1) = 54,05N$$

Levando em consideração a força necessária para elevação da carga, o motor de passo escolhido deverá possuir uma força superior a 54,05N.

3.2.3.2 Dimensionamento do eixo X

No eixo X, utilizou-se a equação (2) para encontrar a carga axial para saber a força que o motor deverá suportar para movimentar a estrutura, onde F_{AX} é a carga axial durante a aceleração no eixo X, M_X é a massa a ser deslocada, g é a força de gravidade e α a aceleração. Para o cálculo, adota-se uma aceleração de 1m/s^2 e gravidade de $9,81\text{m/s}^2$, para este caso, não foi considerada a resistência na superfície da guia f .

$$F_{AX} = (M_X \times g) + f + (M_X \times \alpha) \quad (2)$$

$$F_{AX} = (8 \times 9,81) + 0 + (8 \times 1) = 86,48\text{N}$$

Como o eixo X faz parte do plano horizontal, deve ser somada a força axial com a força de corte, utilizou-se a equação (3) para encontrar a força de corte, onde F_c representa a força de corte, K_{S1} é a constante específica do material, b é a largura do corte, h é a espessura do corte e por fim, z é uma constante adimensional que representa os parâmetros relativos a usinagem (NÉRI, 2003).

Para encontrar as constantes K_{S1} e z , foi escolhida a ferramenta com dois cortes retos paralelos, 4mm de diâmetro, indicada por grande parte dos fabricantes de MDF, resultando nos valores de 2,35 e 0,29 para K_{S1} e z respectivamente, a espessura do corte foi definida em 6mm.

$$F_c = K_{S1} \times b \times h^{1-z} \quad (3)$$

$$F_c = 2,35 \times 4 \times 6^{1-0,29} = 33,54\text{N}$$

Por fim, pode-se calcular a força total que o motor irá exercer para movimentar o eixo, para isso, será utilizada a equação (4), onde F_{TX} é a força total, F_{AX} é a força axial no eixo X, e F_c é a força de corte.

$$F_{TX} = F_{AX} + F_c \quad (4)$$

$$F_{TX} = 88\text{N} + 33,54\text{N} = 121,54\text{N}$$

Levando em consideração a força necessária para movimentação da carga e a força para cortar o material, o motor de passo escolhido deverá possuir uma força superior a 121,54N.

3.2.3.3 Dimensionamento do eixo Y

Para o dimensionamento do eixo Y, utilizou-se a equação (5) para encontrar a carga axial que o motor e a correia dentada deverão suportar durante o trabalho do sistema, onde F_{AY} é a carga axial durante a aceleração no eixo Y, M_Y é a massa a ser deslocada, g é a gravidade e α a aceleração. Para o cálculo, adota-se uma aceleração de 1m/s^2 e gravidade de $9,81\text{m/s}^2$, para este caso, não foi considerada a resistência na superfície da guia f .

$$F_{AY} = (M_Y \times g) + f + (M_Y \times \alpha) \quad (5)$$

$$F_{AY} = (12 \times 9,81) + 0 + (12 \times 1) = 129,72\text{N}$$

Assim como o eixo X, o eixo Y faz parte do plano horizontal, portanto deve ser realizada a soma das duas forças para obter a força total, para isso, será utilizado a equação (6), onde F_{TY} é a força total no eixo Y, F_{AY} é a força axial e F_C a força de corte.

$$F_{TY} = F_{AY} + F_C \quad (6)$$

$$F_{TY} = 129,72\text{N} + 33,54\text{N} = 163,26\text{N}$$

Neste caso, porém, no eixo Y serão utilizados dois motores para a melhor movimentação, devido à grande dimensão da máquina, evitando desalinhamentos na estrutura, portanto, a força total deve ser dividida por dois para saber a força necessária em cada motor. Nessa situação a força para cada motor deverá ser superior a 81,63N.

Os motores de passo escolhidos, levando em consideração o torque necessário em cada eixo e os recursos limitados para aquisição dos materiais, foram quatro motores idênticos fabricados pela AKIAMA MOTORS modelo AK23/15F6FN1.8 com torque de 150N. A Figura 21 mostra as especificações técnicas do modelo de acordo com o fabricante.

Figura 21 – Especificações técnicas do motor de passo AK23/15F6FN1.8.

| NEMA | Conexão | Holding torque (kgf.cm) | Corrente (A/fase) | Tensão (V/fase) | Resistência (Ω /fase) | Indutância (mH/fase) |
|------|-----------------|-------------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|----------------------|
| 23 | Bipolar - série | 15.0 | 2.1 | 4.2 | 2.0 | 8.0 |
| | Unipolar | 10.5 | 3.0 | 3.0 | 1.0 | 2.0 |

| Item | Especificação |
|-------------------------------|-------------------------|
| Ângulo do passo | 1.8° |
| N° de passos | 200 |
| Enrolamento | Espiras bifilares |
| Temperatura máx, de operação | 80 °C |
| Temperatura ambiente | -10°C ~ 50°C |
| Resistência de isolamento | 100 Ω / 500 Vdc |
| Rigidez dielétrica | 500 Vac / 1 min. |
| Classe de isolamento | B |
| Folga máx. radial | 0.03 mm - carga = 500 g |
| Folga máx. axial | 0.03 mm - carga = 700 g |
| Detent torque | 400 gf.cm |
| Inércia do rotor | 370 g.cm ² |
| Quantidade de fios | 6 |
| Peso | 0.98 Kg |
| Sugestão de driver compatível | AKDMP16-4.2A |

Fonte: (AKIAMA MOTORS, 2018).

3.2.4 Resolução do movimento linear

A resolução do movimento linear está relacionada com a revolução do motor e o passo do parafuso ou correia dentada. Para obter o valor final do conjunto é utilizado a equação (7), onde S é o número de passos que o motor deverá dar para mover o conjunto por 1mm, D é a divisão do passo configurada no *driver*, R é a revolução do motor de passo, e P é o passo do sistema de acionamento.

$$S = \frac{D \times R}{P} \quad (7)$$

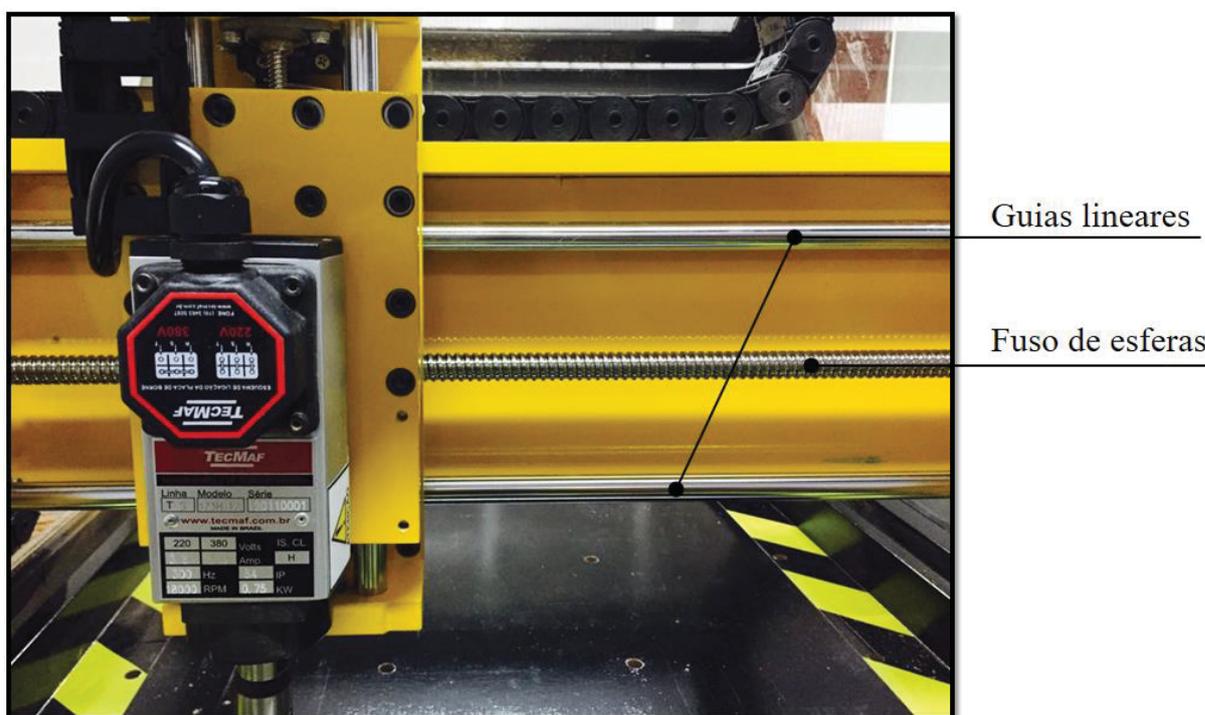
Os motores escolhidos possuem resolução de 1,8° por passo, ou seja, 200 passos para uma volta completa. Nos cálculos realizados, foi estipulado atingir uma resolução de 0,01 milímetro.

Para o eixo X, foi adquirido um fuso de esferas com 16 mm de diâmetro e com passo de 5 mm, a configuração feita no *driver* de acionamento foi de 1/2 passo, dessa forma o número

de passos por milímetro calculado através da equação (7) resulta em 80 passos/mm, ou seja, o motor precisará realizar 80 passos para mover o eixo 1 mm, isso resulta em uma resolução de 0,0125 mm.

A Figura 22 traz uma visão frontal, onde pode ser melhor observado o arranjo de movimentação do eixo X, na figura, podem ser vistas três barras paralelas horizontais, sendo duas guias lineares de sustentação da estrutura, e o fuso de esferas localizado exatamente entre as guias.

Figura 22 – Visão frontal do eixo X de movimentação.



Fonte: Próprio autor.

Para o eixo Z, foi utilizado fuso com 8 mm de diâmetro e 8mm de passo, a configuração no *driver* de acionamento foi de 1/4 passo, dessa forma o número de passos por milímetro calculado através da equação (7) resulta em 100 passos/mm, ou seja, o motor precisará realizar 100 passos para mover o eixo 1 mm, ocasionando em uma resolução de 0,01 mm.

No eixo Y foi utilizado correia dentada juntamente com uma polia acoplada diretamente no eixo do motor, a correia dentada possui a distância de 2 mm por dente e a polia contém 20 dentes, esse conjunto faz com que o passo do sistema de acionamento aumente consideravelmente em relação aos demais, sendo necessário uma configuração de 1/16 passo no *driver* de acionamento para atingir a resolução estipulada, dessa forma, o resultado da equação (7) é de 80 passos/mm, resultando em uma resolução de 0,0125 mm.

A Figura 23 mostra o sistema de acionamento do eixo Y, note que foram instalados rolamentos para manter a correia esticada e também aumentar o ângulo de abraçamento com a polia, evitando assim possíveis percas de passo.

Figura 23 – Sistema de acionamento do eixo Y.



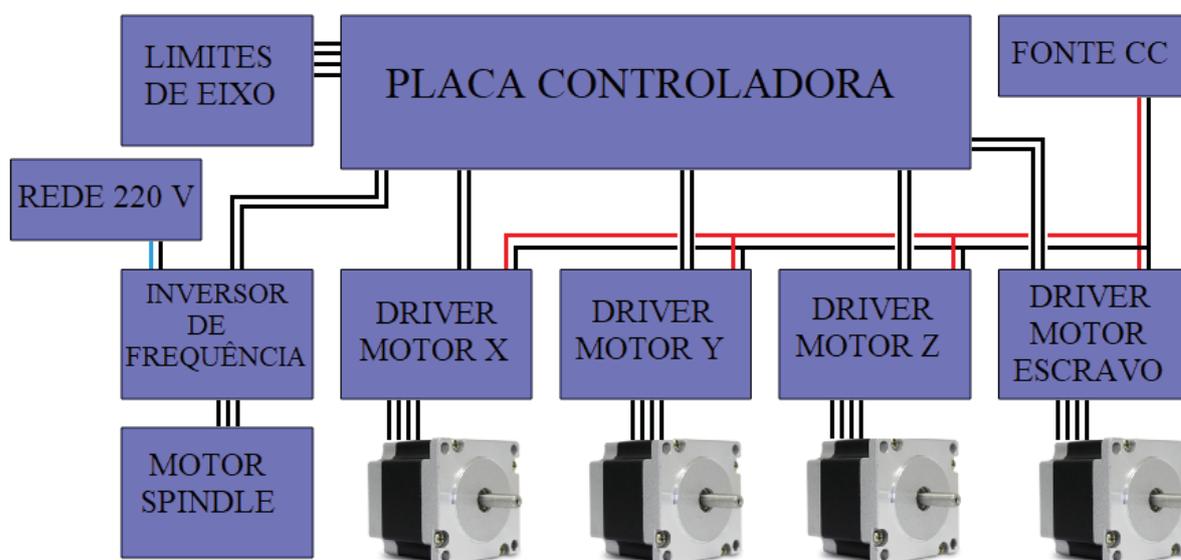
Fonte: Próprio autor.

No Apêndice B, são apresentados os ajustes e configurações feitas no software CNC referente a cada eixo de movimentação, também é possível visualizar a rampa de aceleração e a velocidade máxima alcançada em movimentos onde não existe força de corte.

3.3 SISTEMA ELETRÔNICO

O sistema eletrônico é responsável pela interligação dos componentes responsáveis pelo controle da máquina, formado pela placa controladora, *drivers* para acionamento dos motores de passo e inversor de frequência para acionamento do *spindle*. O diagrama de ligação é mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Diagrama de ligação do sistema eletrônico.



Fonte: Próprio autor.

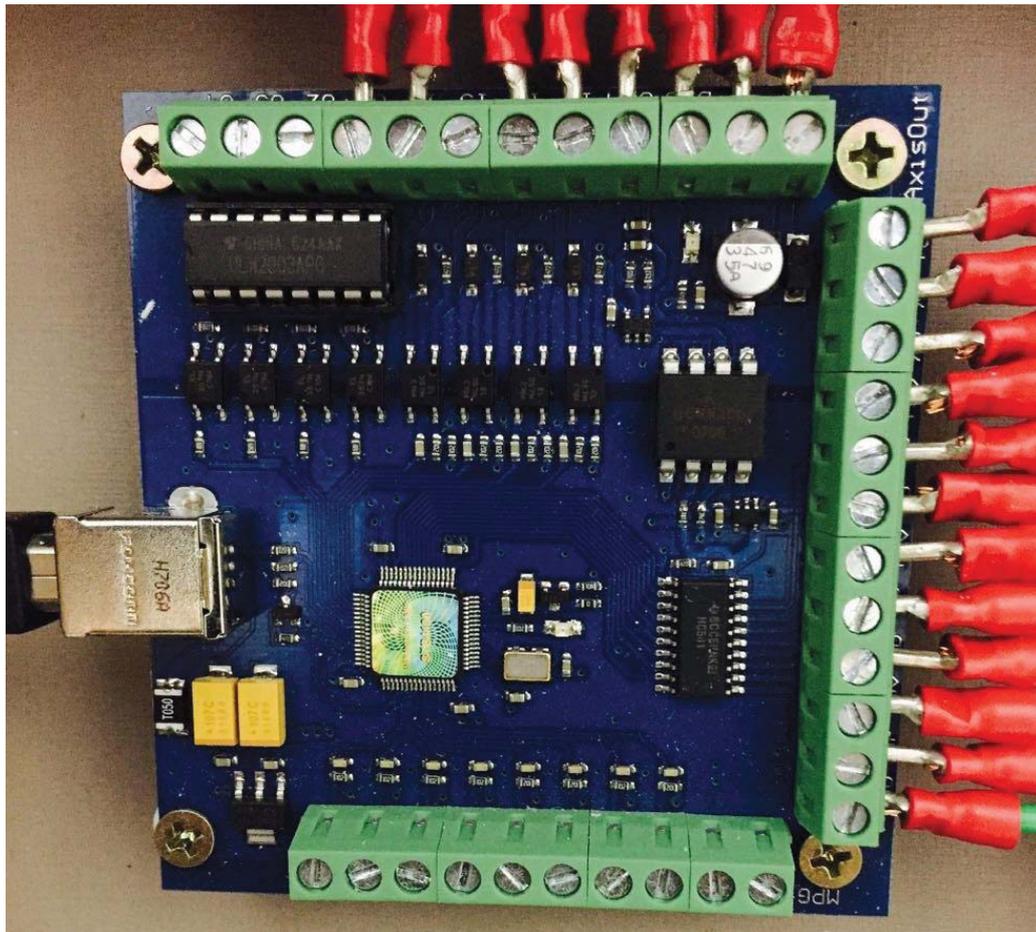
O principal componente do sistema é a placa controladora, ela é responsável por ler e interpretar o programa da peça para controlar a ferramenta que cortará a mesma, após esta interpretação, irá enviar sinais de pulso e direção para os *drivers* de acionamento, enfim, cada *driver* irá acionar seu motor. Para o *driver* do motor escravo, é utilizado o mesmo pulso e direção do *driver* do eixo Y, porém as bobinas do motor são ligadas de forma inversa ao motor Y, para que quando espelhados possam movimentar a máquina para o mesmo sentido.

A placa controladora possui entradas de interrupções, que permite a instalação de chaves fim de curso para limites de eixo e parada de emergência, também tem uma saída disponível para controlar a velocidade do *spindle* através de um sinal modulado da largura de pulso (PWM), e o mais importante, tem saídas para o controle de pelo menos três eixos simultâneos.

3.3.1 Placa Controladora

Na placa de controle é implementada a parte lógica do sistema embarcado responsável pelo controle de acionamento dos motores de passo, *spindle*, e monitoramento de interrupções. Optou-se por utilizar a placa controladora STB4100, que possui diversas entradas e saídas que podem ser configuradas de acordo com a necessidade do usuário. A Figura 25 mostra a placa STB4100 utilizada.

Figura 25 – Placa controladora USB STB4100.



Fonte: Próprio autor.

Algumas das principais características da placa STB4100 são:

- Suporte para ligação de até quatro eixos;
- Quatro entradas com isolamento com optoacopladores de uso geral;
- Saída de sinal 0-10V para controle de velocidade do *spindle*;
- Quatro saídas a relé isoladas para uso geral;

Um dos motivos da escolha de usar a placa STB4100 é a presença de uma conexão USB, que proporciona um canal de comunicação serial reconhecido automaticamente pelo sistema operacional, a qual foi utilizada para a transferência de dados com a interface de usuário do *Notebook*.

3.3.2 Acionamento dos motores de passo

Para o acionamento das bobinas dos motores de passo de forma sequencial, foi projetado um sistema de acionamento composto por quatro *drivers*. O modelo utilizado foi o WD-TB6600 que corresponde a um acionamento de motor de passo baseado no CI TB6600HG da Toshiba, suportando uma tensão máxima de 36V e permite o controle de corrente em até 5A. O *driver* ainda disponibiliza a seleção de diferentes modos de chaveamento, sendo possível fracionar o passo em 2, 4, 8 e 16 vezes, permitindo o aumento da resolução no posicionamento do eixo do motor.

Este modelo de *driver* foi escolhido por permitir o acionamento com características compatíveis ao motor de passo utilizado, além de permitir um sistema simples de operação, dispondo de *DIP Switches* no painel para configuração dos modos de trabalho, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – *Driver* WD-TB6600.



Fonte: (WOTIOM, 2016).

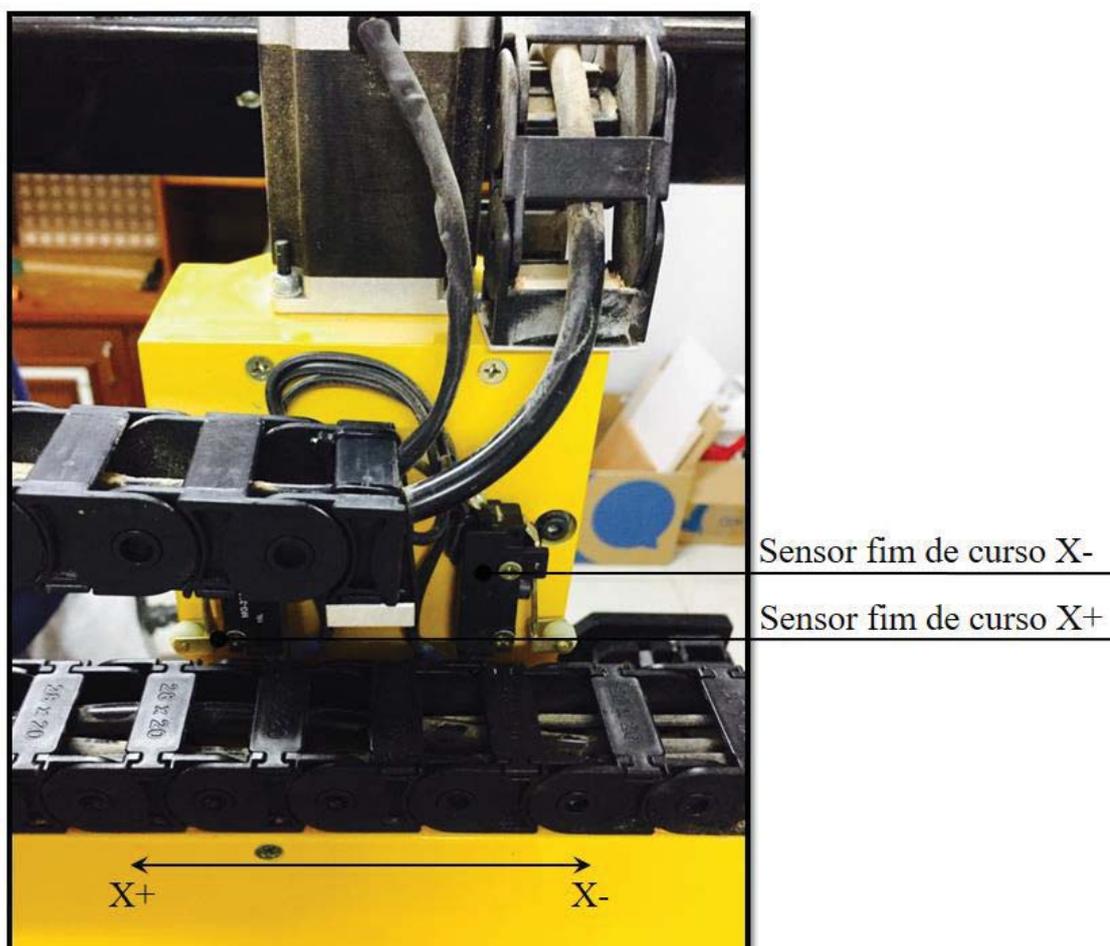
A ligação do *driver* com o motor de passo é feita através de quatro fios, caracterizando uma ligação bipolar. Para o controle do acionamento, são disponibilizadas as entradas correspondentes a pulso e direção. A interface com a placa controladora é protegida por meio de optoacopladores em ambas as entradas de controle.

A alimentação do *driver* foi feita através de uma fonte chaveada de 24V, conectando nos *bornes* DC+ e DC-. A mesma fonte é responsável pela alimentação da placa controladora, que por sua vez, também recebe 24V conforme orientação do fabricante.

3.3.3 Limites de eixo

Para prevenir que o movimento ultrapasse o limite de deslocamento disponível e acabe danificando a estrutura, foram instalados sensores fins de curso nas extremidades de cada eixo, sendo um no início e outro no fim do curso. A Figura 27 apresenta uma visão posterior da estrutura, podendo-se visualizar a localização dos sensores do eixo de movimentação X.

Figura 27 – Sensores fins de curso do eixo de movimentação X.



Fonte: Próprio autor.

A implementação do sistema de limites de eixo foi feita com a ligação dos sensores fins de curso em paralelo, utilizando apenas uma entrada da placa controladora. O software CNC

não é capaz de realizar a identificação de qual extremidade atingiu o limite, portanto assim que acionado o fim de curso, o software interpreta como uma função de prioridade, e entra em modo de emergência.

3.3.4 Motor *spindle*

O motor *spindle* escolhido para este projeto foi fabricado pela Tecmaf modelo TVS.1Z3M.12 com potência nominal de 0,750KW (1HP), seu acionamento foi feito através de um inversor de frequência fabricado pela WEG modelo CFW300. A Figura 28 apresenta o conjunto *spindle* e inversor de frequência.

Figura 28 – Motor *spindle* Tecmaf e inversor de frequência WEG.



Fonte: Próprio autor.

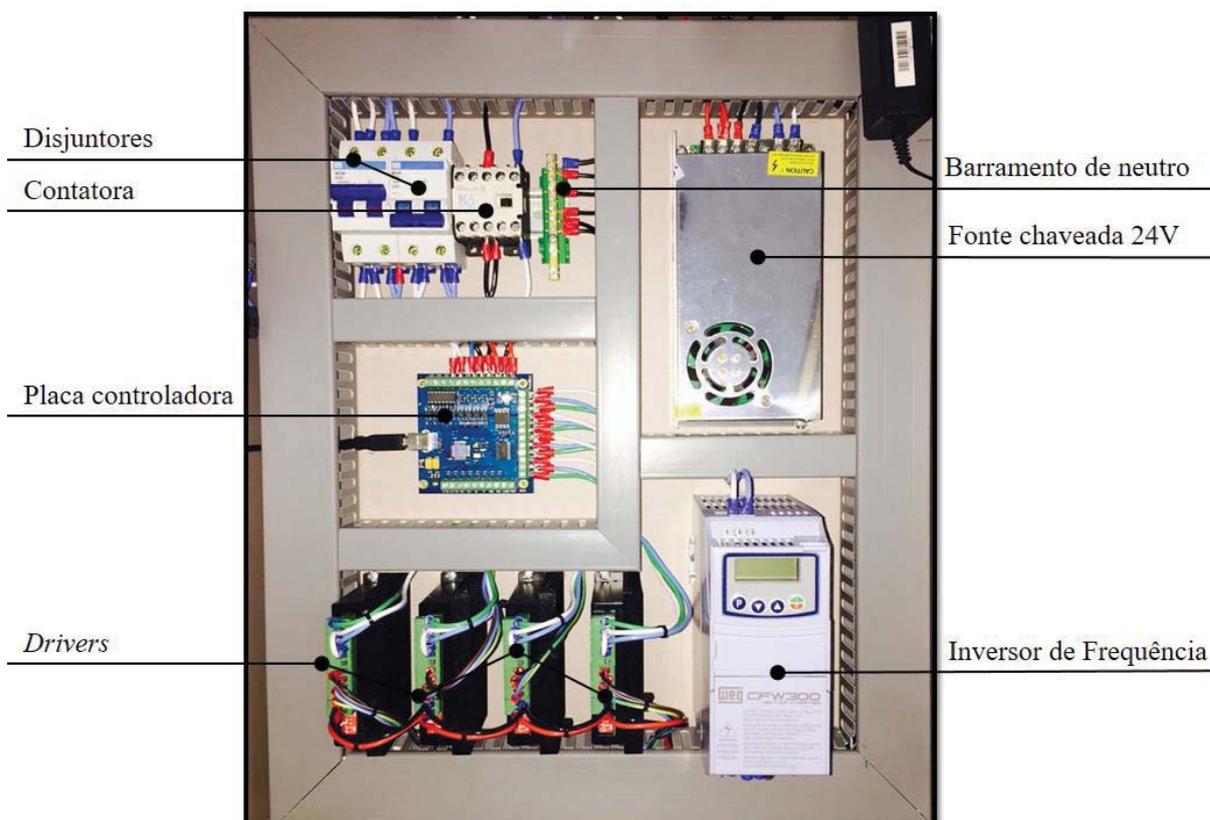
A utilização do inversor de frequência é fundamental para o funcionamento do *spindle*, que necessita de alimentação trifásica, e controle de velocidade através da variação da frequência. O acionamento do *spindle* é feito através da entrada *start/stop* presente no inversor e juntamente com a entrada 0-10V permite o total controle da velocidade da rotação, ambos os sinais são recebidos da placa controladora através de instruções do software CNC.

3.3.5 Quadro de comando

Para melhor organização das conexões, foi fabricado um quadro de comando em MDF onde se encontram todos os equipamentos que compoem o sistema eletrônico do projeto, e fixado junto a bancada da máquina.

Na parte externa do quadro, foi disponibilizado um conjunto de chaves seletoras para acionamento de funções pertinentes ao funcionamento da máquina e principalmente um botão de emergência de fácil acesso. Na parte interna, foi instalado todo o sistema eletrônico do projeto. A Figura 29 mostra uma vista interna do quadro de comando e todo o sistema eletrônico.

Figura 29 – Vista interna do quadro de comando.



Fonte: Próprio autor.

Como método de prevenção foi instalado dois disjuntores bipolares do tipo DIN, sendo um para a fonte chaveada e outro para o inversor de frequência, a utilização de disjuntores bipolares se teve ao motivo de ser uma bancada móvel, desse modo o fio fase sempre estará protegido passando pelo disjuntor.

Pelo fato do software CNC estar instalado em um *notebook*, estudou-se uma maneira de evitar com que o programa continue rodando durante uma possível queda de energia, já que o mesmo possui bateria como fonte de alimentação. Então optou-se pela utilização de uma contatora normalmente fechada (NF), alimentando a bobina diretamente na rede e um de seus contatos ligado na placa controladora, então assim que identificada a queda de energia o software CNC aciona a emergência e trava o programa.

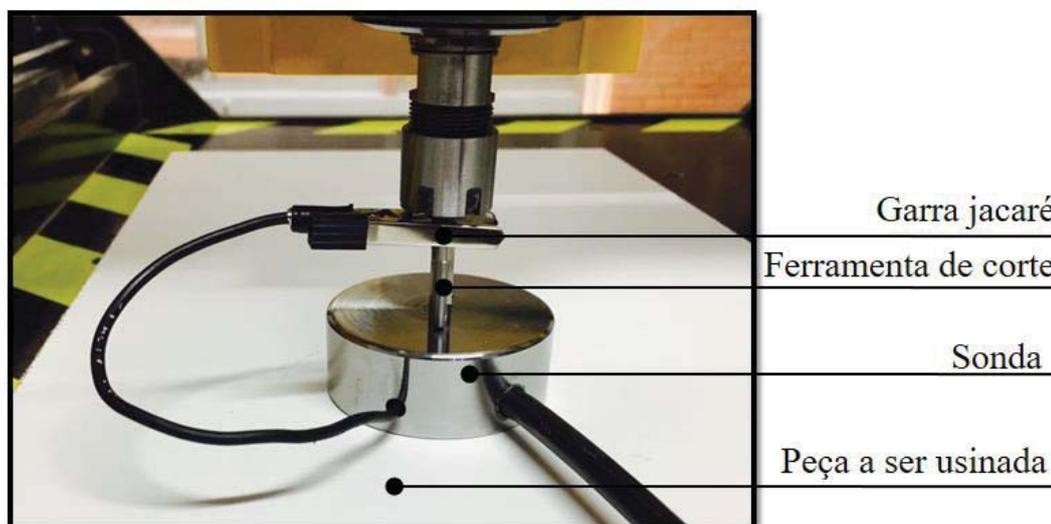
3.3.6 Sonda

Um dos parâmetros de grande importância no momento de iniciar a usinagem é a configuração do ponto zero da peça, onde a máquina precisa ser zerada nos três eixos para então ter este ponto como referência de trabalho.

Uma vez configurado o ponto zero da peça, a máquina utiliza esta referência até concluir a usinagem, porém, muitas vezes é preciso utilizar mais de uma ferramenta de corte na mesma peça, e esta troca de ferramenta, ocasiona a perda do ponto zero no eixo Z.

Pensando neste problema foi desenvolvido um equipamento prático para identificar de forma automática a espessura do material a ser usinado, uma sonda de altura. Fabricada com material condutor, a sonda é colocada em cima da peça, e no momento que a ferramenta de corte entra em contato com a sonda, gera uma interrupção para a placa controladora. Logo é informado ao software CNC, e através de uma lógica de programação, identifica que o ponto zero se encontra abaixo da sonda. A Figura 30 mostra a sonda que foi desenvolvida.

Figura 30 – Sonda para identificar o ponto zero da peça.



Fonte: Próprio autor.

3.4 INTERFACE COMPUTADORIZADA

A interface computadorizada é composta por um computador que executa os softwares necessários para esta etapa do projeto, desde a criação do desenho, até a interface com a máquina.

O software CAD escolhido para utilização neste projeto foi o Aspire 8.0 fabricado pela Vectric, devido a fácil interação com o ambiente gráfico, e também, por possuir a característica do software CAM, permitindo que após o desenho da peça, gere o arquivo de instruções para posteriormente enviar ao software de controle da CNC.

O software escolhido para o controle da máquina foi o Mach 3, software prático, com facilidade na interação entre o operador e a máquina, e que atende perfeitamente as características exigidas neste projeto, sendo elas:

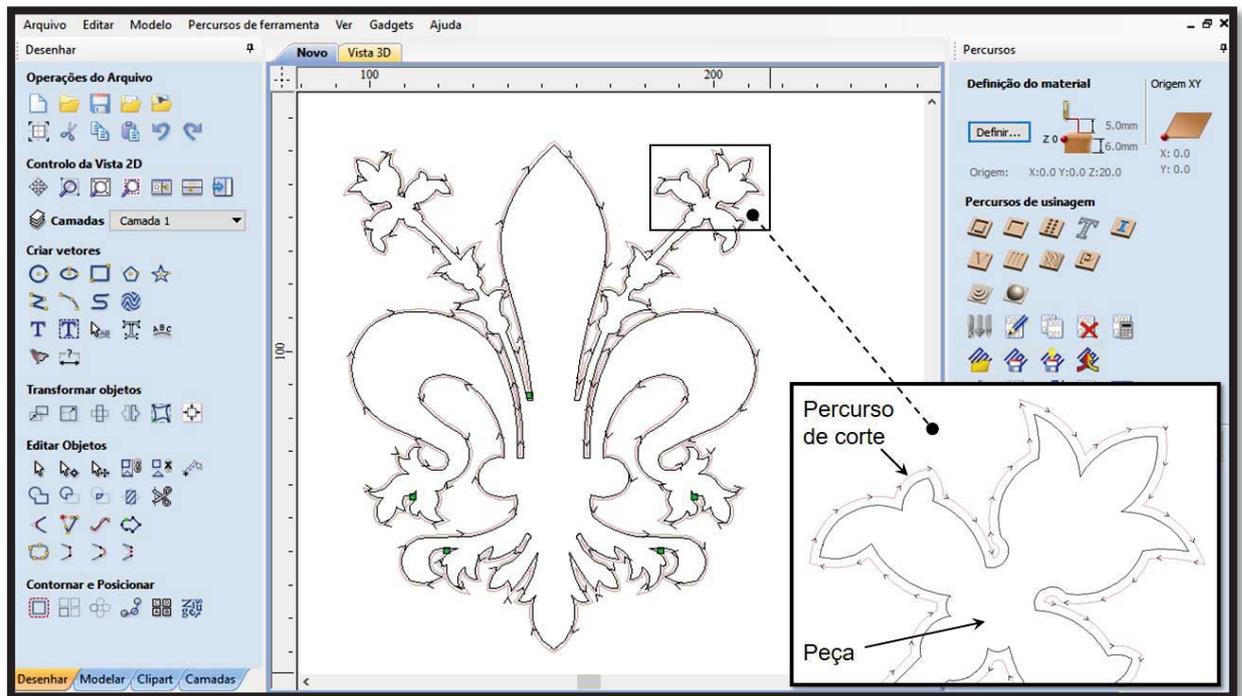
- Fácil comunicação com a placa controladora;
- Monitorar as interrupções definindo o limite dos eixos, parada de emergência;
- Executar as etapas definidas pelo software CAM;
- Controlar até três eixos de movimento;
- Pelo menos um eixo linear adicional como escravo;

3.4.1 Gerando o arquivo de instruções no software CAD/CAM

Primeiramente, deve ser informado ao software as definições de trabalho, sendo elas a espessura do material, a área útil da máquina e a localização do ponto zero, local onde irá iniciar a usinagem. Com estes parâmetros definidos, é realizado o desenho com o auxílio das ferramentas gráficas que o software dispõe, em seguida pode ser gerado o percurso de usinagem, esse percurso pode ser de corte, preenchimento, furação, gravação, entre outros.

A Figura 31 apresenta o ambiente gráfico do software Aspire 8.0 com o desenho da peça realizado e com o percurso de usinagem traçado, neste caso foi escolhido o percurso de corte externo.

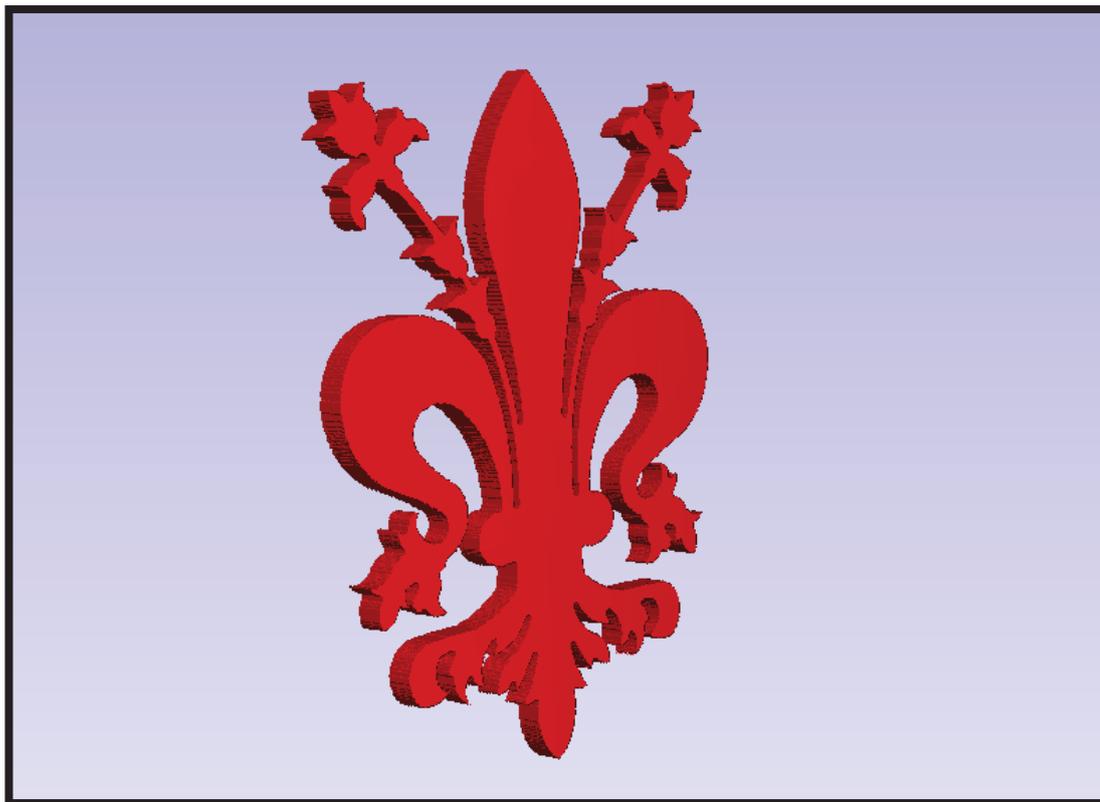
Figura 31 – Desenho da peça a ser usinada e percurso de corte.



Fonte: Próprio autor.

Após realizado o desenho da peça e traçado o percurso de corte, é possível realizar uma simulação da usinagem, para que seja evitado possíveis erros, durante esta simulação, é possível acompanhar o trajeto exato que a ferramenta de corte irá percorrer até concluir usinagem, onde será apresentada a peça em sua forma final. A Figura 32 mostra a peça da figura anterior em sua forma final após a simulação.

Figura 32 – Simulação da peça a ser usinada.



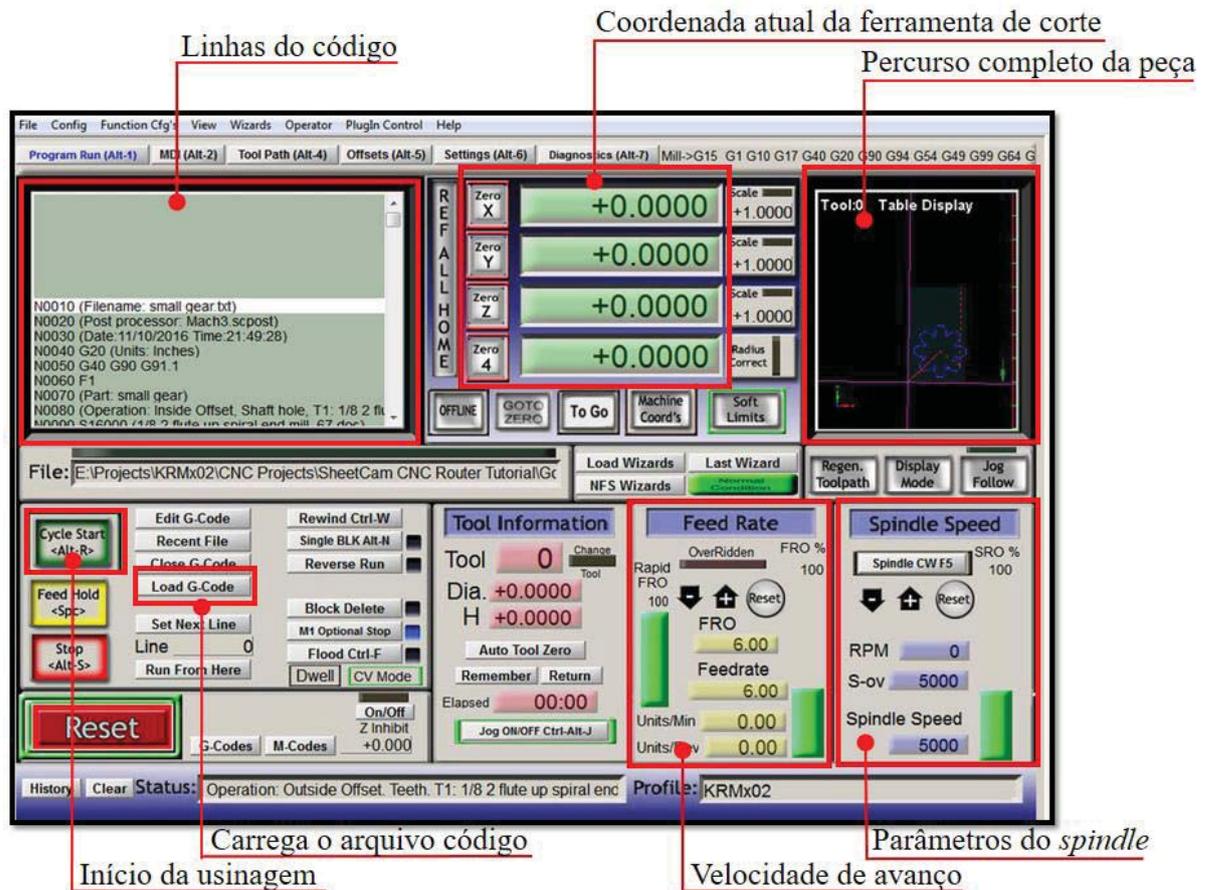
Fonte: Próprio autor.

Com a simulação realizada, pode-se salvar o arquivo em um formato compatível com o software CNC, esse arquivo é repleto de instruções e responsável pelo total controle da máquina, nele consta todos os parâmetros de usinagem. O software CNC interpreta estas instruções convertendo-as em ações mecânicas na máquina transformando o projeto em peça física.

3.4.2 Leitura e interpretação do código de instruções

A Figura 33 apresenta a arquitetura do software CNC Mach 3, e o mapeamento de suas principais funções. Note que a pesar de sua arquitetura confusa, as funções necessárias se encontram disponíveis na tela principal.

Figura 33 – Arquitetura Mach 3 e suas principais funções.



Fonte: Próprio autor.

O software Mach 3 oferece três *displays* para monitoramento em tempo real das atividades da máquina, onde é possível acompanhar a linha do código que está sendo executada, a posição atual da ferramenta de corte com base nas coordenadas cartesianas, e o percurso completo da peça.

Após carregado o arquivo e dado início a usinagem, a máquina move-se para o ponto de referência (ponto zero) e então começa a usinagem no ponto mais próximo, mas sempre utilizando o ponto zero como referência de trabalho. A velocidade de avanço pode ser alterada a qualquer momento, assim como a rotação do *spindle* facilitando a usinagem de materiais com diferentes características.

Para facilitar o posicionamento da máquina em seu ponto zero foi realizado o sincronismo de um *joystick* com o software CNC, para isso foi realizado o mapeamento de seus botões com as funções do Mach 3, com isso, não é necessário utilizar o teclado do computador, agilizando o processo de fabricação.

4 RESULTADOS

O software CAD/CAM utilizado para a geração dos arquivos de instruções para o software CNC, facilitou a interpretação dos dados, já que o mesmo criou as linhas de código de forma automática, transformando a linguagem CNC em algo fácil de ser compreendido.

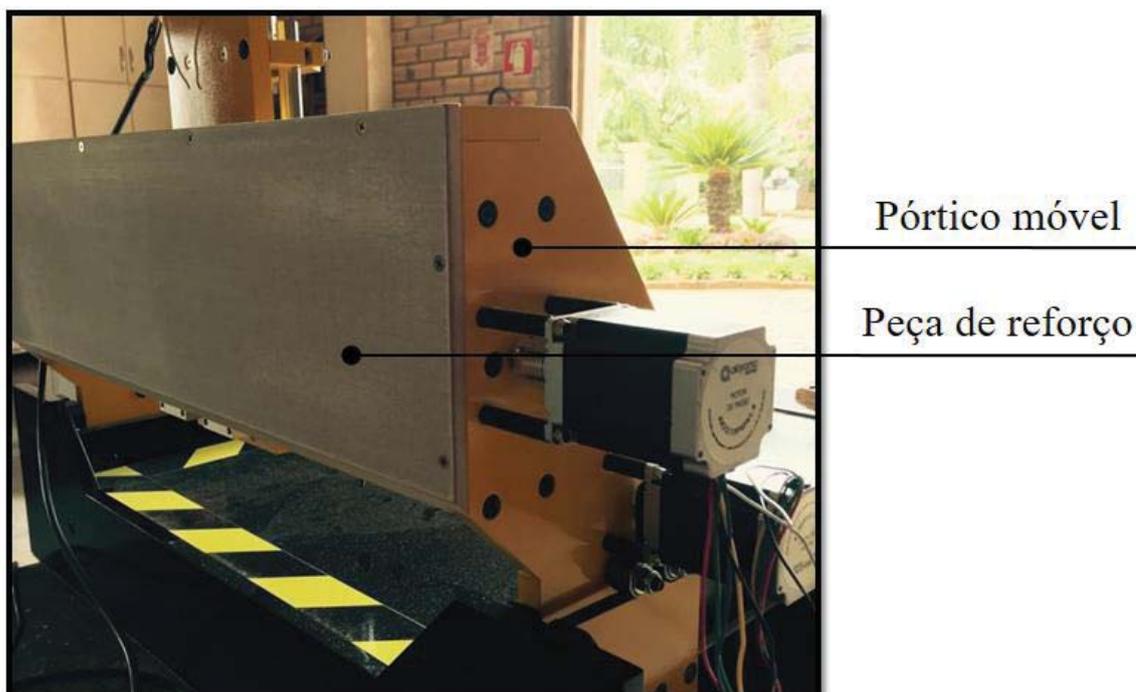
A placa controladora supriu com todas as necessidades do projeto, monitoramento das interrupções, acionamento dos *drivers* dos motores de passo, controle dos três eixos simultâneos, controle do *spindle* e fácil comunicação com o software CNC.

O software CNC requereu bastante estudo, por ser uma interface não conhecida antes deste projeto, seu ambiente gráfico pouco convencional dificultou a interação do operador com a máquina, porém após ser bem compreendido atendeu perfeitamente todas as especificações requeridas e necessárias para o correto funcionamento da máquina.

A corrente do motor de passo atingiu o valor máximo de 1,8 A, assim os *drivers* que suportam até 5 A trabalham com 36% da capacidade e não apresentam sinal de sobre aquecimento.

Após os primeiros testes de movimentação dos eixos, notou-se uma grande necessidade em reforçar a estrutura do pórtico móvel, então foi fabricada uma peça em MDF para fazer esse reforço. A Figura 34 mostra o novo pórtico com a peça já instalada.

Figura 34 – Reforço do pórtico móvel para eliminar as folgas.



Fonte: Próprio autor.

Foi elaborado um teste para descobrir a precisão individual nos eixos X e Y analisando a repetibilidade, um paquímetro digital foi responsável por fazer a medição de 5 cortes idênticos de 50mm em cada uma das 4 velocidades de avanço, ao todo foram 40 cortes avaliados. Os cortes foram feitos com a ferramenta de 4mm a uma espessura de 6mm em uma única passada.

O Quadro 3 demonstra os resultados obtidos, com sua análise é notável que o erro em relação ao corte desejado e o obtido não passa de 1mm para todas as velocidades. Também podemos observar que quanto maior a velocidade, maior é o erro, principalmente no eixo Y onde é utilizado correia dentada.

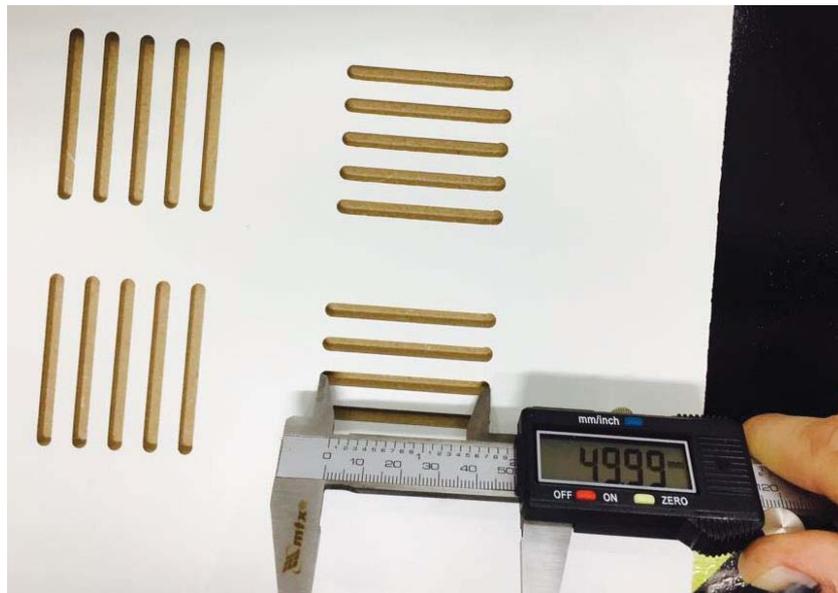
Quadro 3 – Teste de repetibilidade individual de eixos.

| Velocidade | Eixo | Corte realizado (mm) | | | | | Média | Erro |
|--------------|------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 200(mm/min) | X | 50,04 | 49,97 | 49,98 | 49,99 | 49,95 | 49,99 | 0,03% |
| | Y | 49,91 | 49,93 | 49,93 | 49,92 | 49,95 | 49,93 | 0,14% |
| 400(mm/min) | X | 49,94 | 49,98 | 50 | 49,95 | 49,94 | 49,96 | 0,08% |
| | Y | 49,92 | 49,93 | 49,99 | 49,92 | 49,9 | 49,93 | 0,14% |
| 800(mm/min) | X | 49,92 | 49,9 | 49,82 | 49,8 | 49,76 | 49,84 | 0,32% |
| | Y | 49,83 | 49,77 | 49,77 | 49,78 | 49,75 | 49,78 | 0,44% |
| 1200(mm/min) | X | 49,65 | 49,7 | 49,71 | 49,68 | 49,73 | 49,69 | 0,61% |
| | Y | 49,03 | 49,07 | 49,01 | 49,04 | 49,02 | 49,03 | 1,93% |

Fonte: Próprio autor.

A Figura 35 demonstra como foi realizado o teste de precisão com o paquímetro digital.

Figura 35 – Teste de precisão com paquímetro digital.



Fonte: Próprio autor.

Devido a estrutura mecânica ter sido fabricada em MDF e os cortes e furações de todas as peças de forma manual, o protótipo apresentou algumas folgas e excentricidade nos eixos, fazendo com que em alguns casos, durante a usinagem seja notável uma certa vibração entre a ferramenta de corte e a peça, principalmente em velocidades elevadas. Assim, para melhora deste problema, o aperfeiçoamento da estrutura mecânica é indispensável, já que a rigidez mecânica e a precisão estão diretamente ligadas a ela.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste trabalho foi realizada uma fundamentação teórica, trazendo tópicos relevantes ao desenvolvimento do projeto. Dificuldades nos indispensáveis temas concernentes a mecânica do protótipo, usinagem e movimentação dos eixos foram encontradas, principalmente por pertencer a outras áreas de estudo.

O sistema eletrônico apresentou-se muito eficiente, sem sinal de sobre aquecimento e ruídos, a placa controladora atendeu todos os requisitos e manteve uma ótima comunicação com o software CNC. Foram encontradas algumas dificuldades em utilizar o inversor de frequência devido ao autor nunca ter trabalhado com este equipamento antes, dificuldades principalmente em parametrizar o equipamento para ter variação de frequência na saída de acordo com a variação de tensão na entrada.

Ao unir os protótipos eletrônico e mecânico, foi possível verificar o funcionamento pleno do projeto, que atendeu os objetivos propostos nesse trabalho. O acionamento dos eixos com fuso de esferas, funcionaram respondendo de forma precisa as instruções recebidas do software CNC. Já os movimentos no eixo Y, com correia dentada, tem uma pequena redução de resolução, apresentando dificuldades para retornar ao exato ponto de partida após um longo período de usinagem, porém, o mesmo realizou os movimentos de forma bem sucedida, e a pequena redução de resolução fica imperceptível ao realizar as usinagens pela qual foi projetada.

Através do teste de precisão, optou-se em trabalhar com uma velocidade de avanço em torno de 400mm/min, podendo variar este valor de acordo com a dureza do material, ferramenta de corte e a espessura do corte

Por fim, para obter-se desempenho máximo do projeto, sugere-se para trabalhos futuros o uso de fuso de esferas no eixo Y, substituindo pelas correias dentadas, pois, além de possuírem um movimento mais preciso, poderiam ser fixados na estrutura mecânica em um local mais apropriado, evitando assim, o contato com o resíduo gerado durante a usinagem do material. Também é necessário uma melhora na estrutura, substituir o MDF por um material de maior dureza, por exemplo o alumínio que é leve, resistente e possui um custo razoavelmente acessível. Outro fator importante que pode ser implementado em projetos futuros é um sistema de aspiração, instalado junto ao *spindle*, responsável pelo recolhimento do resíduo gerado durante a usinagem.

Os custos do projeto são apresentados no Quadro 4, e referem-se aos custos materiais, não levando em consideração o tempo de fabricação das peças e montagem do protótipo em

modo geral. É possível observar que cerca de 80% do valor gasto no projeto refere-se ao desenvolvimento do sistema eletrônico. O restante do valor refere-se aos gastos com a estrutura e sistemas de movimentação, como optou-se pela construção da estrutura em MDF reduziu-se consideravelmente o valor final do projeto.

Quadro 4 – Custos do projeto.

| Descrição | Quantidade | Valor |
|-------------------------------|------------|---------------------|
| Motor de passo | 4 | R\$ 155,00 |
| <i>Driver</i> de acionamento | 4 | R\$ 63,00 |
| <i>Spindle</i> | 1 | R\$ 1.980,00 |
| Inversor de frequência | 1 | R\$ 824,00 |
| Estrutura | 1 | R\$ 100,00 |
| Placa controladora | 1 | R\$ 215,00 |
| Fonte chaveada | 1 | R\$ 50,00 |
| Contatora | 1 | R\$ 35,00 |
| Disjuntor | 2 | R\$ 20,00 |
| Fuso de esferas 16 mm | 1 | R\$ 250,00 |
| Fuso de esferas 8mm | 1 | R\$ 50,00 |
| Guias retificadas 16mm | 6 | R\$ 30,00 |
| Rolamentos lineares | 12 | R\$ 15,00 |
| Correia dentada | 2 | R\$ 9,00 |
| Polia 20 dentes | 2 | R\$ 10,00 |
| Mancal com rolamento | 4 | R\$ 11,00 |
| Mancal de fixação 16mm | 6 | R\$ 13,00 |
| Cabos, terminais, conectores | 1 | R\$ 200,00 |
| Custo total do projeto | | R\$ 5.136,00 |

Fonte: Próprio autor.

REFERÊNCIAS

- AKIAMA MOTORS. **Datasheet motor de passo nema 23 15kgfcm**. 2018. Disponível em: <<https://www.baudaeletronica.com.br/Documentos/motor-de-passo-nema23-15kgfcm.pdf>> Acesso em 19 out. 2017
- ARTACHO, Bruno Miranda. **Automação em Raspadora de Pneus Utilizando Controle Numérico Computadorizado com Controlador Lógico Programável Integrado**. 2015. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- AUTODESK. **What is CAD / CAM?**. Disponível em: <<https://www.autodesk.com>>. Acesso em: 30 set.2017.
- BRITES, Felipe Gonçalves; SANTOS, Vinícius Puga de Almeida. **Motor de Passo**. 2008. Disponível em: <<https://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor>>. Acesso em: 27 set. 2017.
- COLUSSI, Alex. **Plotter para Placas de Circuito Impresso**. 2015. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.
- COSTA, Dalberto Dias da; PEREIRA, Athos Gleber. **Desenvolvimento e avaliação de uma tecnologia de baixo custo para programação CNC em pequenas empresas**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, v. 16, n. 1, p. 48-63, Jan/Abr. 2006.
- EICH, Fábio. **Dimensionamento dos Componentes de Transmissão para uma Router CNC**. 2014. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Horizontina, Horizontina, 2014.
- GOBBI, Marco Antônio. **Desenvolvimento de um sistema automatizado para prototipagem de placas de circuito impresso**. 2014. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2014.
- JARAGUÁ CNC. **O que é Router CNC?**, 2017. Disponível em: <<http://www.jaraguacnc.com.br/o-que-e-router-cnc.html>>. Acesso em: 30 set. 2017.
- JAYACHANDRAIAH, B et al. **Fabrication of Low Cost 3-Axis CNC Router**. International Journal of Engineering Science Invention. v. 3, n. 6, p. 1-10, jun. 2014.
- JÚNIOR, José Hamilton Chaves Gorgulho; SOUZA, Marcos Aurélio de. **Tecnologia de Fabricação IV: Operações de Fresamento**. 2013. Disponível em: <http://www.iem.unifei.edu.br/gorgulho/eme005/EME005_2015_Parte_1_Fresamento.pdf> Acesso em: 30 out. 2017.
- JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. **Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas**: 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LYRA, Paulo Vinícius Apolinário. **Desenvolvimento de uma máquina fresadora CNC didática**. 2010. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MIRALLES, Carlos Eduardo. **Análise de Estratégias de Corte no Fresamento com 5 eixos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Barbara d'Oeste, 2009.

NÉRI, Antônio Carlos. **Parâmetros de corte na usinagem de madeiras de reflorestamento**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

PAZOS, Fernando. **Automação de Sistemas e Robótica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2002.

PEREIRA, Athos Gleber. **Desenvolvimento e Avaliação de um Editor para Programação CN em Centros de Usinagem**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

POLICOMP. **Manual placa controladora CNC R1**. 2017. Disponível em: <<https://www.policompcomponentes.com.br/produtos/controladores-cnc/r1>>. Acesso em: 25 out. 2017.

POLONSKII, Mikhail. **Projeto Macatrônico: Motores de passo**. Apostila. Universidade de Passo Fundo. 2017.

POLULU CORPORATION. **Stepper Motor**. 2017. Disponível em: <<https://www.pololu.com/category/87/stepper-motors>>. Acesso em 17 out. 2017.

SEGUNDO, Alan Kardek Rêgo; RODRIGUES, Cristiano Lúcio Cardoso. **Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos**. 2015. Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto, 2015.

SHIGLEY, Joseph; MISHKE, Charles; BUDYNAS, Richard. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SMID, Peter. **CNC Programing Handbook**. 3. ed. New York: Industrial Press Inc., 2008. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/245371488/CNC-Programming-Handbook-Third-Edition>>. Acesso em 25 out 2017.

SOUZA, Adriano Fagali de; ULBRICH, Cristiane Brasil Lima. **Engenharia Integrada por Computador e sistemas CAD/CAM/CNC: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

SOUZA, Marco Antonio Alves. **Implementação de Sistema Controlado de Motor de Passo em Malha fechada Utilizando Tecnologia Baseada em Controle Digitais de Sinais**. 2007. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Projeto de Máquinas-Ferramentas Modernas**. 2014. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

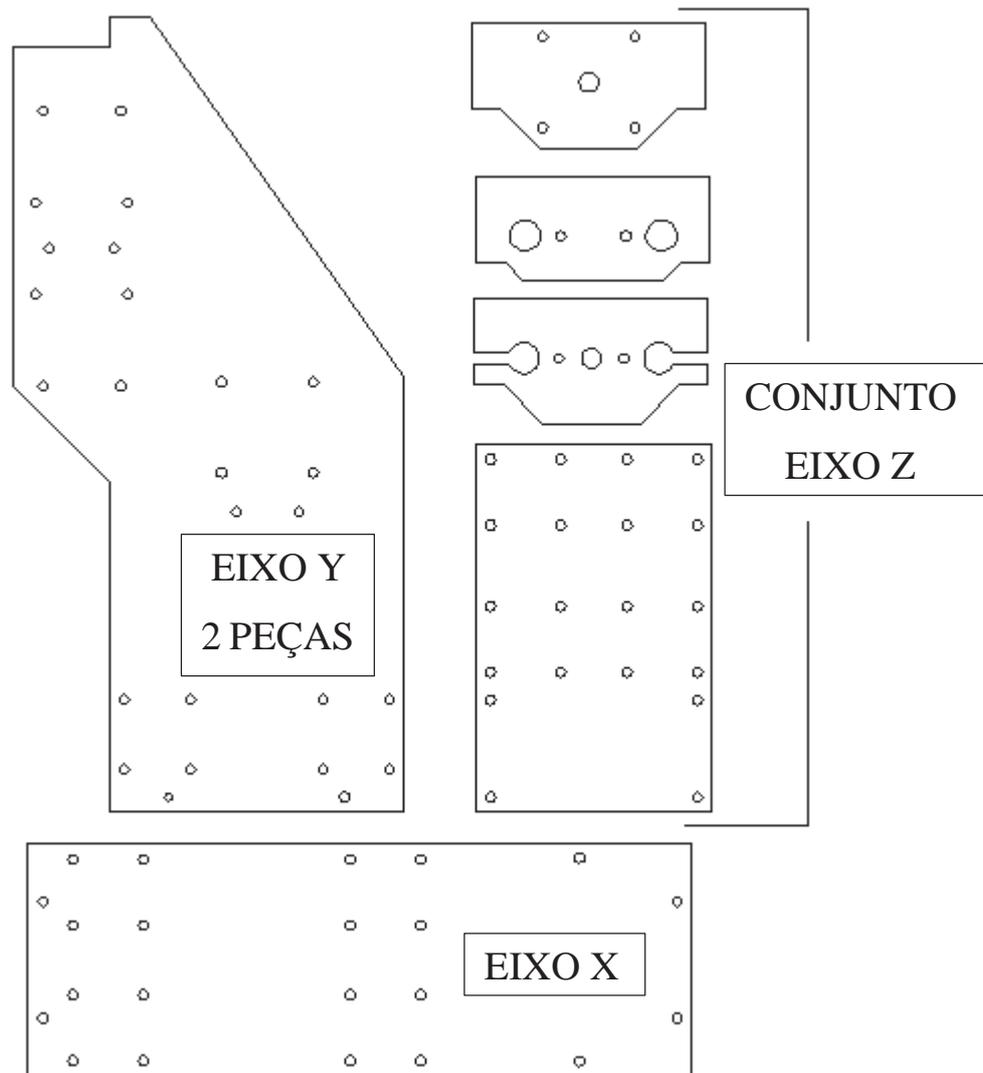
SUBRAMANIAN, Vignesh; KAYE, Matthew; CHOPRA, Parth. **H-Bridge Motor Control**. 2012. Disponível em: <[http://www.seas.upenn.edu/~ese206/labs/MOSFET/MOSFETH Bridge.pdf](http://www.seas.upenn.edu/~ese206/labs/MOSFET/MOSFETHBridge.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2017.

TECMAF, **Motores spindles com troca manual**. 2017. Disponível em: <<http://tecmaf.com.br/motores-spindles-troca-manual-de-0-20-hp>>. Acesso em: 21 out. 2017.

THK. **Exemplos de seleção de fuso de esferas**. 2017. Disponível em: <https://tech.thk.com/pt/products/pdf/br_b15_069.pdf>. Acesso em 25 out. 2017.

TOSHIBA. **TB6600HG Application Note**. 2016. Disponível em: <<http://toshiba.semicon-storage.com/la-t/product/linear/motordriver/detail.TB6600HG.html>>. Acesso em 24 out. 2017.

WOTIOM. **Datasheet driver WD-TB6600**. 2016. Disponível em: <<http://www.wotiom.com/produto/driver-para-motor-de-passo-5a-wd-tb6600/>>. Acesso em 21 maio 2018.

APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DAS PRINCIPAIS PEÇAS

ESCALA 1:4

APÊNDICE B – AJUSTES E CONFIGURAÇÕES DE CADA EIXO

