

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

GERSON WERNER

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FRESADORA CNC PARA A
USINAGEM EM 5 EIXOS**

Lajeado, novembro de 2015

GERSON WERNER

DESENVOLVIMENTO DE UMA FRESADORA CNC PARA A USINAGEM EM 5 EIXOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas (CETEC), do Centro
Universitário UNIVATES, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Controle e
Automação.

Área de concentração: Automação,
Eletrônica e Mecânica

Orientador: Prof. M. Sc. Robson Dagmar
Schaeffer.

Lajeado, novembro de 2015

GERSON WERNER

DESENVOLVIMENTO DE UMA FRESADORA CNC PARA A USINAGEM EM 5 EIXOS

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação do CETEC e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. M.Sc. Robson Dagmar Schaeffer, UNIVATES
Mestre pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Rafael Crespo Izquierdo, UNIVATES
Mestre pelo PROMEC/UFRGS – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Guilherme Cortelini da Rosa, UNIVATES
Mestre pelo PROMEC/UFRGS – Porto Alegre, Brasil.

Coordenador do Curso de Engenharia de Controle e Automação:

Prof. Rodrigo Wolff Porto

Lajeado, novembro de 2015

Dedico este trabalho a minha esposa
Isabel, em especial pela dedicação e apoio
em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador pela oportunidade de realização de um trabalho focado em nossa área de pesquisa e pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais e demais familiares que de todas as maneiras me auxiliaram nesta trajetória.

Aos amigos e colegas de trabalho que auxiliaram em dúvidas e compartilharam este momento comigo.

RESUMO

Com o objetivo de reduzir paradas para reposicionamento de peças com geometrias complexas, reduzir o número de ferramentas envolvidas no processo de usinagem e consequentemente o tempo e o custo do produto final, máquinas-ferramenta com cinco ou mais eixos ganham cada vez mais espaço na indústria. Este trabalho tem como objetivo o projeto e a implementação de uma fresadora CNC com cinco eixos, para usinagem de peças de pequenas dimensões. Esta fresadora consiste em um conjunto mecânico, módulos de hardware e um software de interface gráfica. A estrutura mecânica da máquina permite a movimentação linear dos eixos X, Y e Z, operando juntamente com a rotação da mesa de trabalho nos eixos B e C, totalizando cinco eixos. A movimentação dos eixos é realizada através de uma sequência de comandos gerados com o auxílio de softwares CAM, que são carregados no software desenvolvido, onde são processados e posteriormente enviados, por transmissão serial, para uma plataforma microcontrolada que exerce o controle dos motores da máquina. O protótipo desenvolvido se diferencia de outras máquinas existentes pelas dimensões reduzidas e pelo baixo custo, proporcionando o acesso a este tipo de tecnologia a pequenas empresas e instituições de ensino.

Palavras-chave: Usinagem CNC, Fresamento com cinco eixos, Manufatura assistida por computador.

ABSTRACT

In order to reduce stops for repositioning parts with complex geometries, reducing the number of tools involved in the machining process and therefore the time and cost of the final product, machine tools with five or more axes are gaining more space in the industry. This work aims the design and implementation of a five axes CNC milling machine for small parts machining. This milling machine consists of a mechanical assembly, hardware modules and a graphic software interface. The mechanical structure of the machine allows linear motion in axes X, Y and Z, together with the rotation of the work table on axes B and C, totaling five axes. The axes movement is performed through a command sequence generated with the help of CAM software, which are loaded in the developed software, where they are processed and then sent through serial transmission, to a microcontrolled platform that controls machine's motors. The prototype differs from other existing machines by its small size and low cost, providing access to this type of technology to small businesses and educational institutions.

Keywords: CNC machining, Five Axis Milling, Computer Aided Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de uma fresadora de três e cinco eixos.	14
Figura 2 – Fresadora universal e alguns formatos de ferramentas.	18
Figura 3– Fresadora universal.....	19
Figura 4– Divisor Universal	19
Figura 5 – Ambiente de simulação do software Inventor HSM.....	24
Figura 6 – Sistemas de movimentação no fresamento em cinco eixos.	26
Figura 7– Estrutura da máquina FCV-620.....	27
Figura 8 - Estrutura da máquina FMV-99	29
Figura 9 – Parafuso de acionamento.	30
Figura 10 – Componentes de um redutor cicloidal.	31
Figura 11 – Engrenagem e correia dentada.....	33
Figura 12 – Exemplo de um motor de passo e seu interior.	34
Figura 13 – Comparativo entre sequência de acionamento de um motor unipolar e um motor bipolar.	35
Figura 14 – Gráfico do torque em função da velocidade em um motor de passo.	36
Figura 15 – Diagrama com exemplo de ligação.	37
Figura 16 – Plataforma Arduino Mega 2560.....	39
Figura 17– Visão geral o projeto	40
Figura 18– Representação dos conjuntos de movimentação e dos eixos.....	41
Figura 19– Representação dos limites para o eixo B	42
Figura 20– Montagem da estrutura da máquina.....	43
Figura 21 - Conjunto de movimentação dos eixos B e C.	44

Figura 22 - Montagem dos eixos B e C	45
Figura 23 – Par de guias e mancais dos eixos X e Y.	46
Figura 24 - Conjunto de movimentação linear	47
Figura 25 – Conjunto do Spindle.	48
Figura 26 – Driver BL-TB6560 V2.0	49
Figura 27 - Teclado de operações manuais	50
Figura 28 - Fluxograma com a lógica desenvolvida para o hardware.	52
Figura 29 - Fluxograma da lógica desenvolvida para o software	54
Figura 30 - Telas de operação	55
Figura 31 - Estrutura do programa CNC gerado.	57
Figura 32 - Comparação entre o projeto CAD e a montagem realizada.....	58
Figura 33 - Procedimento de inspeção de folga para o eixo X.	60
Figura 34 - Barra de referência.	61
Figura 35 - Peça de teste desenhada	61
Figura 36 - Bloco de fixação com o material para a usinagem.....	62
Figura 37 - Tela de configurações de ferramenta do Autodesk Inventor HSM.	63
Figura 38 - Simulação da usinagem.....	63
Figura 39 - Usinagem de contorno circular.....	64
Figura 40 - Usinagem após o reposicionamento angular	65
Figura 41 – Resultado final.....	65
Figura 42 - Cotas do modelo criado	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais funções preparatórias.	21
Tabela 2 – Comandos aceitos pelo sistema.....	51
Tabela 3 – Comparativo entre as dimensões definidas e as dimensões obtidas.	66

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD:	Computer Aided Design
CAM:	Computer Aided Manufacturing
CC:	Corrente Contínua
CI:	Circuito Integrado
CN:	Comando Numérico
CNC:	Comando Numérico Computadorizado
ISO:	International Organization for Standardization
MDF:	Medium Density Fiberboard
MOSFET:	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PWM:	Pulse Width Modulation
USB:	Universal Serial Bus

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	15
1.2 Organização	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Usinagem	17
2.1.1 Fresamento	17
2.2 Tecnologia CNC.....	20
2.2.1 Sistemas CAD/CAM.....	22
2.2.1.1 Softwares CAD	22
2.2.1.2 Softwares CAM	23
2.2.2 Integração entre sistemas CAM e CNC	25
2.3 Usinagem em cinco eixos.....	25
2.4 Componentes mecânicos	28
2.4.1 Estrutura	28
2.4.2 Parafusos de acionamento	29
2.4.3 Redutores.....	31
2.4.4 Sistema de transmissão por correia dentada	32
2.5 Eletrônica.....	33
2.5.1 Motores de passo	34
2.5.2 Driver de acionamento.....	36
2.5.3 Acionamento rotativo da ferramenta	37
2.6 Sistema eletrônico embarcado	38
2.6.1 Controlador.....	38
2.7 Software	39
3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	40
3.1 Visão geral	40
3.2 Sistema mecânico	41
3.2.1 Montagem da estrutura.....	42
3.2.2 Sistema de posicionamento da mesa.....	43
3.2.3 Conjunto de movimentação linear	45

3.2.4 Acionamento dos eixos lineares.....	46
3.2.5 Eixo-árvore (<i>spindle</i>).....	47
3.3 Sistema eletrônico	48
3.3.1 Acionamento e controle do <i>spindle</i>	49
3.3.2 Teclado de operações manuais	50
3.3.3 Hardware de controle.....	51
3.4 Software	53
3.5 Pós-Processador	56
4 RESULTADOS.....	58
4.1 Ajustes preliminares	59
4.1.1 Alinhamento dos eixos	59
4.1.2 Ajuste das folgas nos eixos	59
4.1.3 Ajuste da referência inicial	60
4.2 Teste de usinagem	61
4.2.1 Programação pelo software CAM	62
4.2.2 Execução.....	64
5 CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

A inovação dos processos industriais é um fator de extrema importância para empresas que almejam destaque no mercado (CALMANOVICI, 2011). Diante deste cenário, os processos de produção recebem contínuos aprimoramentos baseados em novas tecnologias que vem sendo desenvolvidas.

A usinagem é um dos processos essenciais na produção mecânica, podendo destacar como principais operações o torneamento, a furação e o fresamento. As máquinas que executam estas operações são denominadas máquinas-ferramentas (SOUZA e ULBRICH, 2009).

O projeto de diferentes tipos de máquinas-ferramentas desde a Revolução Industrial vem passando por constantes aprimoramentos. A automação do processo de usinagem teve início na década de 50 com o desenvolvimento de sistemas eletromecânicos, responsáveis pelo acionamento dos motores que realizavam movimentação dos eixos (STOETERAU, 2004). O controle do processo era feito por um sistema de leitura de fitas perfuradas.

Com a chegada dos sistemas computadorizados na indústria, no início da década de 80 (MACHADO, 2004), foi possível integrar essa tecnologia ao comando numérico, possibilitando assim um sistema de processamento com interface gráfica que permitiu o acesso a programas e suas modificações de maneira mais rápida (LYRA, 2010). Esse tipo de sistema é denominado como CNC (Comando Numérico Computadorizado) e atualmente é empregado na indústria para diversas operações, tais como, usinagem, corte, dobra, solda, entre outras.

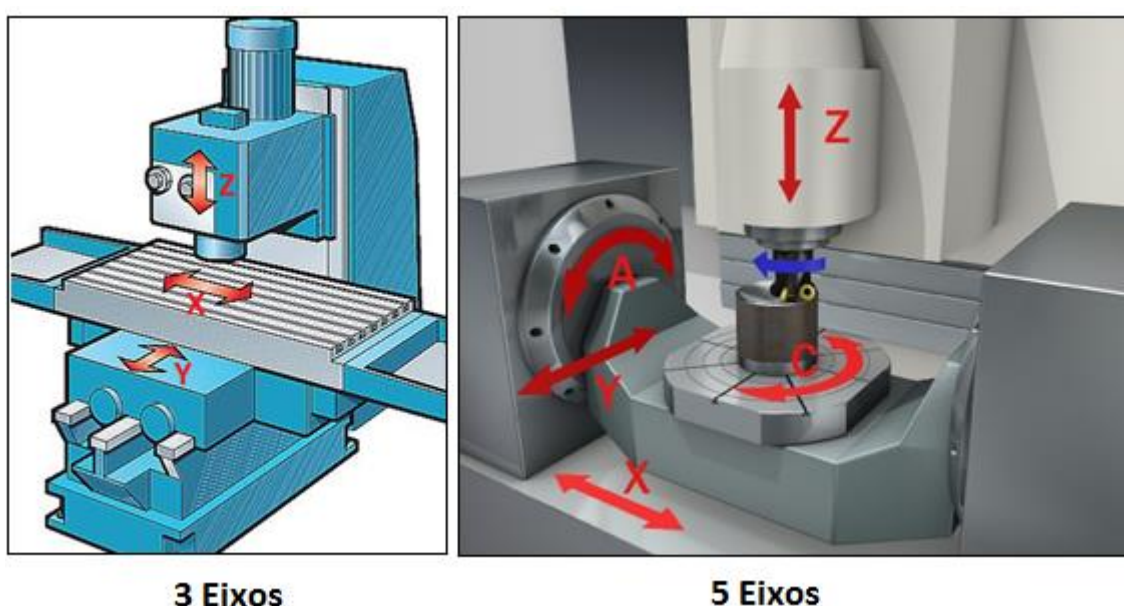
No Brasil, o mercado de máquinas CNC para usinagem demonstra um considerável crescimento. No ano de 2003, a quantidade de máquinas CNC comercializadas representava 33% do mercado de máquinas-ferramentas, no ano de 2013, o percentual ultrapassou 50% (SIMON, 2014).

De acordo com (STOETERAU, 2004), os projetos de máquinas-ferramentas podem ser divididos em três grupos, direcionados para o aumento da precisão, velocidade ou flexibilidade.

O número de eixos de movimentação de uma máquina CNC tem ligação direta com a flexibilidade do processo (MIRALLES, 2009). Atualmente para operações de fresamento, centros de usinagem na configuração de três eixos correspondem à maior parte das máquinas em operação (SIMON, 2014). Este tipo de máquina possibilita a usinagem de geometrias complexas com o uso de diferentes ferramentas de corte e sistemas de fixação especiais.

Com um maior nível tecnológico agregado, máquinas para fresamento com 5 eixos permitem a usinagem de geometrias de grande complexidade utilizando um número menor de ferramentas. Outra vantagem é a redução do tempo gasto com paradas para reposicionamento.

Figura 1 - Representação de uma fresadora de três e cinco eixos.



Fonte: Adaptado de (SANDVIK, 2015)

Pesquisas apontam uma previsão de crescimento do mercado de máquinas com cinco eixos. Segundo (BORGES, 2012) esta tendência pode ser visualizada na pesquisa realizada pela empresa Grob, fabricante de máquinas-ferramentas, que realizou um questionário em 470 empresas de cinco estados brasileiros. A pesquisa revela que mesmo que somente 10% das empresas tenham centros de usinagem de cinco eixos no processo de fabricação, a intenção de investir nesse tipo de tecnologia chega a 70% das empresas.

Apesar da previsão de crescimento do mercado deste tipo de máquinas, um problema relatado pela maior parte das empresas, é o alto custo desta tecnologia além da falta de mão-de-obra especializada nesta área. Segundo (BORGES, 2012) ainda existe a dificuldade de se encontrar instituições de ensino que fornecem treinamentos voltados para programação e operação de máquinas com cinco eixos.

1.1 Objetivos

Com base na pesquisa inicial realizada, é possível destacar os problemas atuais com relação ao custo elevado da tecnologia de usinagem em cinco eixos, além da falta de mão de obra qualificada, que é causada pela falta de centros de treinamento com este tipo de tecnologia. A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de uma fresadora para uso em pequenas empresas ou para fins didáticos, com pequenas dimensões e baixo custo, capaz de realizar movimentos em cinco eixos.

O projeto estrutural do protótipo foi fundamentado em conceitos simples de construção mecânica, sendo que para sua construção, foram utilizadas peças fabricadas em aço carbono e alumínio. Para dimensionamento dos componentes foi previamente estipulada uma área útil de usinagem de 120 x 120 x 100 mm, considerando que ponta da ferramenta de usinagem alcance qualquer ponto deste espaço. Foi definida a rotação da mesa de trabalho no eixo B em 180° além da possibilidade de giro completo (360°) do eixo C.

Os componentes de movimentação foram escolhidos priorizando o uso de tecnologias de baixo custo e fácil aquisição, como sistemas de guias lineares cilíndricas e fusos trapezoidais. Para a movimentação dos conjuntos mecânicos, foi optado pela utilização de motores de passo, caracterizados pela possibilidade de controle preciso na movimentação e aliado a um custo inferior, quando comparados ao uso de servo-motores.

O controle da movimentação dos motores engloba um conjunto composto por drivers de motor de passo que recebem sinal de pulso e direção provenientes de

uma plataforma microcontrolada. Esta plataforma tem a função de realizar uma interface entre os drivers e o computador, através de uma comunicação serial.

O software de controle foi desenvolvido para gerar uma interface gráfica personalizada, de maneira a expor somente os recursos essenciais para a configuração de trabalho. A codificação dos comandos aceitos para movimentação dos eixos obedece aos padrões básicos de códigos do tipo ISO 1056.

Para o desenvolvimento de códigos CNC compatíveis com o auxílio de software CAM (*Computer Aided Manufacturing*), foi criado um programa de pós-processamento, executável a partir do software CAM Inventor HSM.

1.2 Organização

Para facilitar o entendimento, este trabalho foi dividido, sendo que no Capítulo 2 são apresentados os conceitos teóricos utilizados para a implementação da proposta. O capítulo 3 apresenta a descrição do projeto, detalhando o dimensionamento dos componentes mecânicos e eletrônicos, bem como a montagem do protótipo e o desenvolvimento do software de controle. No capítulo 4 apresentam-se os resultados dos testes realizados para a validação da proposta. Por fim, no capítulo 5 estão as conclusões do trabalho e propostas de aplicações futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Usinagem

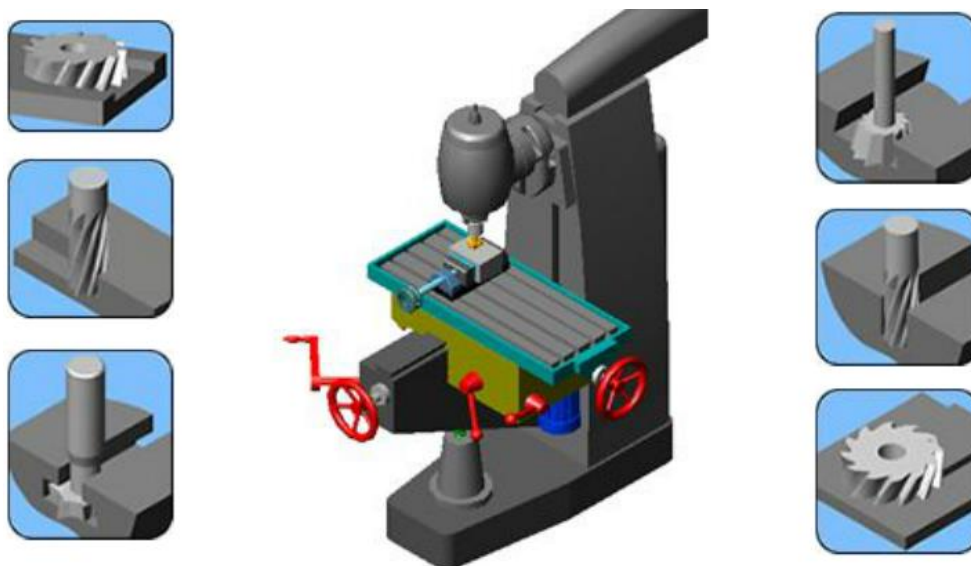
A usinagem corresponde a todo o processo de fabricação que resulta em remoção de material para se obter a forma desejada. Os principais processos de usinagem são a furação, torneamento e fresamento (SOUZA e ULBRICH, 2009).

A partir destes processos são fabricados diferentes formatos de peças. A aplicação varia de acordo com o modelo de produtivo utilizado, sendo que em alguns casos, a usinagem é o principal método de produção. As operações de usinagem também podem ser caracterizadas como um processo auxiliar, complementando processos de estampagem, fundição, extrusão, entre outros (SOUZA e ULBRICH, 2009).

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, presa à mesa, que executa os movimentos de avanço, sendo possível, na concepção formada por 3 eixos, os avanços longitudinal, transversal e vertical. Além disso, é possível incrementar esta operação utilizando máquinas com 4 ou mais eixos que proporcionam um movimento angular da ferramenta ou da peça que será usinada (ABRÃO, et al., 2011). Diferentes formatos de ferramentas são utilizados neste processo, permitindo gerar vários tipos de geometrias (CIMM, 1997). A Figura 2 mostra a representação de uma fresadora com alguns formatos de ferramentas.

Figura 2 – Fresadora universal e alguns formatos de ferramentas.



Fonte: (CIMM, 1997)

Existem vários tipos de máquinas para fresamento podendo ser destinadas para diversas aplicações e em diferentes tipos de materiais. Segundo (CHIAVERINI, 1986), para aplicações genéricas, que não se necessita uma produção em série, a fresadora universal é um modelo muito versátil e permite, com a combinação de ferramentas, gerar uma grande variedade de geometrias. O formato de construção mais comum compreende uma mesa móvel, responsável pelo deslocamento da peça em relação à ferramenta, nos eixos X, Y e Z (ABRÃO, et al., 2011). O deslocamento dos eixos é feito por meio da movimentação de manivelas, sendo que algumas máquinas disponibilizam sistemas de avanço automático, por meio de motores com controle de velocidade.

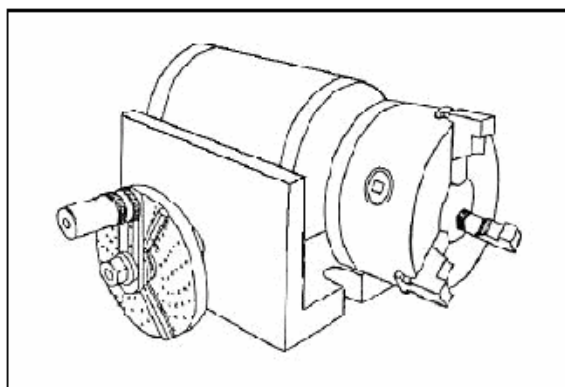
Figura 3– Fresadora universal.



Fonte: Adaptado de (CORREA E TOLEDO, 2015).

As ferramentas utilizadas são fixadas em um eixo de rotação chamado de eixo árvore. Alguns modelos de fresadoras destinadas para aplicações genéricas permitem que se movimente o eixo árvore, inclinando a ferramenta até dois eixos angulares. Esta movimentação é realizada inicialmente na regulagem, sendo que estes eixos precisam ser fixados para iniciar a operação de usinagem (CHIAVERINI, 1986).

Figura 4– Divisor Universal



Fonte: (AMORIM, 2003).

Com a utilização de acessórios como dispositivos para fixação de peças, as possibilidades de formatos que podem ser gerados são ampliadas. Um dos principais acessórios de uma fresadora universal é aparelho divisor (AMORIM,

2003). Este mecanismo permite a movimentação e posicionamento da peça em um formato angular, caracterizando o quarto eixo da fresadora. Seu funcionamento pode ser combinado com o avanço de um dos eixos da mesa, permitindo gerar formatos helicoidais.

2.2 Tecnologia CNC

As tecnologias CN e CNC foram desenvolvidas para permitir a automação flexível nos processos de usinagem, agregando novas tecnologias nas estruturas de máquinas já existentes. (PEREIRA, AZEVEDO e ABREU, 2003).

Na década de 1950, a automação na usinagem teve início, impulsionada por investimentos no setor aeronáutico durante a segunda guerra mundial. O CN foi criado, baseado em um sistema de leitura de uma fita perfurada contendo um conjunto de instruções, elaboradas a partir do modelo de peça que seria produzido. A partir da interpretação dos dados contidos na fita, ocorria o acionamento dos servomecanismos que atuavam na movimentação da máquina (PEREIRA, 2003).

Com a evolução das tecnologias na área da computação, o desenvolvimento do comando numérico é integrado a um núcleo de processamento e uma interface gráfica, possibilitando a criação de arquivos digitais contendo as instruções de usinagem. Esta nova tecnologia, chamada CNC permite uma maior acessibilidade aos dados, facilitando a criação e alteração dos programas de usinagem (LYRA, 2010).

É importante destacar que o controle CNC pode ser aplicado em outros processos, por ter um método flexível de programação baseado em coordenadas cartesianas. Apesar de ser mais popular em aplicações voltadas para operações de usinagem, existem diversos segmentos da indústria que utilizam esta tecnologia, podendo destacar, operações de corte a laser e plasma, corte de tecido, máquinas bordadoras, sistemas de medição, além de aplicações na área de impressão 3D (SOUZA e ULBRICH, 2009).

Os principais dados que compõem um programa CNC são os referentes à trajetória da ferramenta, descritos por valores numéricos baseado nos eixos e no

sistema de coordenadas (SOUZA e ULBRICH, 2009). Além destes dados, é possível determinar uma série de funções, no formato de instruções sequenciais que a máquina deverá executar, sendo que muitas delas podem ser personalizadas de acordo com a aplicação ou também adotar um padrão diferente para cada fabricante.

O padrão mais comum de instruções é o baseado na norma ISO 1056 que foi criada como uma forma flexível de linguagem de programação, adaptando-se a diferentes aplicações. Esta flexibilidade ocasionou o surgimento de diferentes formatos de implementações incompatíveis entre si, pois cada fabricante desenvolve funções específicas para auxiliar a programação (PEREIRA, 2003).

As coordenadas referentes à trajetória da ferramenta podem ser descritas em coordenadas absolutas ou coordenadas incrementais. A coordenada absoluta é descrita sempre considerando um ponto fixo no sistema, podendo ser definido como o ponto zero máquina ou ainda um ponto configurado como referência de trabalho. A coordenada incremental é definida como um valor a ser somado ao posicionamento atual (SOUZA e ULBRICH, 2009).

As funções preparatórias são compostas sempre pela letra G seguida de um código numérico correspondente à função. Elas caracterizam um conjunto de informações que determinam o modo de movimentação para chegar à coordenada, além de configurar outros recursos específicos para cada modelo de máquina.

Os códigos correspondentes às principais funções preparatórias estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais funções preparatórias.

Código	Descrição
G0	Deslocamento de aproximação (avanço rápido)
G1	Avanço controlado retilíneo (velocidade programada)

G2	Interpolação circular sentido horário (velocidade programada)
G3	Interpolação circular sentido anti-horário (velocidade programada)
G17	Configura o plano de trabalho em XY
G18	Configura o plano de trabalho em XZ
G19	Configura o plano de trabalho em YZ
G53	Coordenadas referentes ao zero máquina
G54 a G56	Coordenadas referentes ao zero peça (configurado para cada código)
G20	Coordenadas em polegadas
G21	Coordenadas em milímetros
G90	Coordenadas absolutas
G91	Coordenadas incrementais

Fonte: Adaptado de (SOUZA e ULBRICH, 2009)

Além das funções preparatórias, um programa ainda possui funções complementares, denominadas funções miscelâneas que são representadas pela letra M seguida do código numérico correspondente. Elas atuam em funções internas da máquina, tais como acionamento ou troca de ferramentas, contagem de peças, acionamento da bomba de refrigeração, entre outras.

2.2.1 Sistemas CAD/CAM

A integração dos sistemas CAD/CAM são ferramentas essenciais na produção mecânica. Suas funções proporcionam a redução de erros e o aumento da velocidade no desenvolvimento de novos produtos

2.2.1.1 Softwares CAD

O CAD (Computer Aided Design) corresponde a uma ferramenta computacional que auxilia o projeto, desenho, modelamento e design industrial de produtos (SOUZA e ULBRICH, 2009). Este tipo de software pode operar em formatos 2D e 3D para o modelamento geométrico, sendo utilizado para arquitetura, mecânica, elétrica, design, entre outras aplicações.

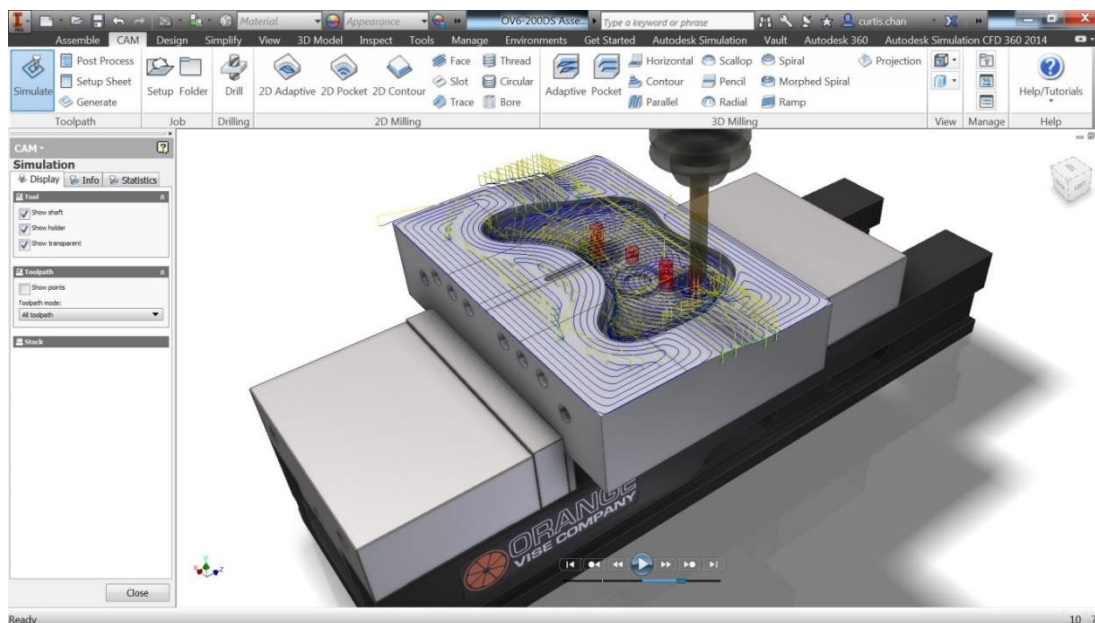
2.2.1.2 Softwares CAM

Caracterizado como uma ferramenta indispensável na programação de usinagens para geometrias complexas, os softwares CAM são capazes de gerar conjuntos de instruções para a movimentação dos eixos no processo de usinagem (SOUZA e ULBRICH, 2009).

Para a geração da trajetória que a ferramenta deverá executar é necessário fornecer a geometria, em formato CAD, da peça que será fabricada (PEREIRA, 2003). Antes de iniciar a programação da usinagem, é realizada uma análise geral dos trabalhos que serão executados, definindo tipos de ferramentas, fixação da peça, precisão e acabamento exigido para cada dimensão, entre outros. Estes parâmetros são configurados na interface do software CAM (MIRALLES, 2009).

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, ocasionadas por uma estratégia de usinagem inadequada. A Figura 5 mostra o ambiente de programação e simulação de um software CAM comercial, o Inventor HSM (AUTODESK, 2015).

Figura 5 – Ambiente de simulação do software Inventor HSM.



Fonte: (AUTODESK, 2015).

Existem vários tipos de softwares CAM que se diferenciam pelo número de eixos a que se destinam, podendo variar de 2 a 5 eixos e também pelo tipo de operação, podendo ser específicos para fresamento, torneamento, eletro-erosão, corte a laser, entre outros (SOUZA e ULBRICH, 2009).

Atualmente existem diversas empresas que desenvolvem softwares CAM, sendo que seu custo varia de acordo com os recursos que são disponibilizados. Softwares básicos, para a programação de usinagens em 3 eixos, podem ser obtidos em versões gratuitas, inclusive para empresas. Este é o caso do software Inventor HSM Express da Autodesk (AUTODESK, 2015).

A maioria dos softwares com opções de programação para até 5 eixos ainda possuem um valor consideravelmente alto, devido a complexidade envolvida nos cálculos de trajetória.

2.2.2 Integração entre sistemas CAM e CNC

Uma etapa essencial para integração dos sistemas CAM e CNC é a de pós-processamento. O pós-processador corresponde a uma lista de instruções que são interpretadas para converter o arquivo gerado pelo software CAM em uma linguagem compatível com o modelo de máquina desejado (SOUZA, 2005). Geralmente estas instruções são específicas e variam até mesmo entre diferentes versões de sistemas controladores CNC (PEREIRA, 2003).

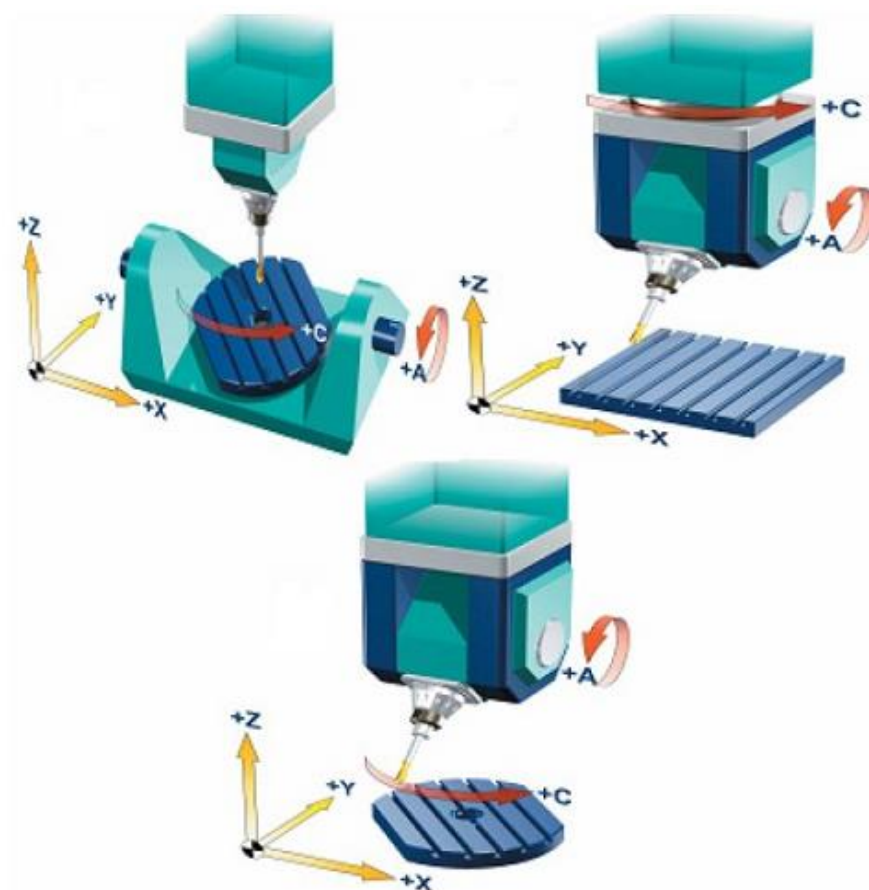
Para os modelos de máquinas ou controladores mais populares, geralmente o arquivo de pós-processamento é fornecido junto com o software CAM. Este arquivo pode ser personalizado, visando atender alguma funcionalidade específica do processo, ou até mesmo para aperfeiçoar o código CNC gerado (SOUZA e ULBRICH, 2009).

2.3 Usinagem em cinco eixos

Com a evolução das plataformas CAD/CAM, a possibilidade de gerar com maior facilidade programas de usinagem permitiu o início das pesquisas em sistemas CNC capazes de controlar um número maior de eixos (LACERDA, 2013). A configuração de máquinas com cinco eixos consiste em três variáveis para a movimentação no sistema cartesiano XYZ, além de duas variáveis que correspondem à rotação em até dois eixos do sistema (MIRALLES, 2009).

A disposição dos eixos de inclinação da ferramenta ou da mesa de trabalho pode obedecer a diferentes arquiteturas. Como padrão de nomenclatura adotado, o eixo A corresponde ao eixo de rotação paralelo ao eixo X, o B ao eixo Y e o C ao eixo Z. Variações dos possíveis modelos de construção podem ser vistas na Figura 6 (MIRALLES, 2009).

Figura 6 – Sistemas de movimentação no fresamento em cinco eixos.



Fonte: (MIRALLES, 2009).

Mesmo com diferentes formatos de construção é importante destacar que as coordenadas de posicionamento da ferramenta durante a usinagem sempre se referem ao centro da extremidade de corte. No momento da inclinação de um dos eixos angulares, é realizada uma compensação nos demais para que a posição da ferramenta se mantenha (LACERDA, 2013).

Atualmente no mercado existem máquinas em diferentes formatos de construção, sendo que se diferenciam principalmente pelo posicionamento dos eixos. Muitos fabricantes adotam como modelo de construção a estrutura onde a movimentação angular é feita na mesa de trabalho e o conjunto da ferramenta executa os movimentos lineares, correspondentes aos eixos XYZ. Um exemplo deste modelo de construção é o centro de usinagem FCV-620 fabricado pela empresa Yama Seiki que está representada na Figura 7.

Figura 7– Estrutura da máquina FCV-620



Fonte: (YAMA SEIKI, 2015).

Entre as vantagens proporcionadas pelo emprego de máquinas cinco eixos, destaca-se a acessibilidade elevada, que permite o desenvolvimento de todas as operações de usinagem sem que sejam feitas paradas para o reposicionamento. Na parte referente aos tipos de geometrias geradas, ampliam-se as possibilidades de usinagem (SOUZA, 2011).

Outra vantagem é a redução do custo de usinagem pelo fato de se reduzir o tempo de fabricação de cada peça, como também o número de ferramentas no processo (LACERDA, 2013).

Mesmo com as vantagens citadas, este conceito de usinagem ainda possui restrições que dificultam o seu crescimento no mercado, como a necessidade de softwares CAM para gerar a trajetória de usinagem e a complexidade da operação deste tipo de máquina, sendo que no mercado ainda existe pouca mão-de-obra especializada nesta área (SOUZA, 2011).

2.4 Componentes mecânicos

Segundo (STOETERAU, 2004) um projeto mecânico de uma máquina-ferramenta 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.

2.4.1 Estrutura

Segundo (STOETERAU, 2004) a estrutura de uma máquina-ferramenta corresponde a uma base onde são fixados todos os elementos que a compõem. Em seu projeto é necessário que atenda os requisitos de rigidez, estabilidade térmica, facilidade de manipulação, acessibilidade aos componentes internos da máquina e custo.

Os formatos de estruturas de fresadoras diferenciam-se principalmente pela forma que os componentes se deslocam nos eixos de trabalho. Um formato estrutural muito empregado quando se torna necessário atingir uma grande área de trabalho em relação à área ocupada pela máquina, é a estrutura tipo portal (SOUZA e ULBRICH, 2009).

Este formato de construção atribui a movimentação dos eixos X e Z ao eixo-árvore que é fixo por uma estrutura suspensa. A movimentação do eixo Y é realizada pela mesa de trabalho (SOUZA e ULBRICH, 2009). Em uma variação deste tipo de estrutura, o movimento do eixo Y pode ser atribuído à base do conjunto que movimenta a ferramenta, eliminando a movimentação da mesa de trabalho.

A utilização deste tipo de estrutura para uma composição de máquina com 5 eixos pode assumir formatos que se diferenciam pelo conjunto que executa a movimentação dos dois eixos angulares. 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). Neste caso a movimentação dos eixos angulares é realizada pelo eixo-árvore.

O tipo de estrutura que tem a movimentação da mesa de trabalho em dois eixos angulares proporciona uma maior rigidez estrutural. A Figura 8 representa uma estrutura tipo portal com movimentação angular na mesa de trabalho.

Figura 8 - Estrutura da máquina FMV-99

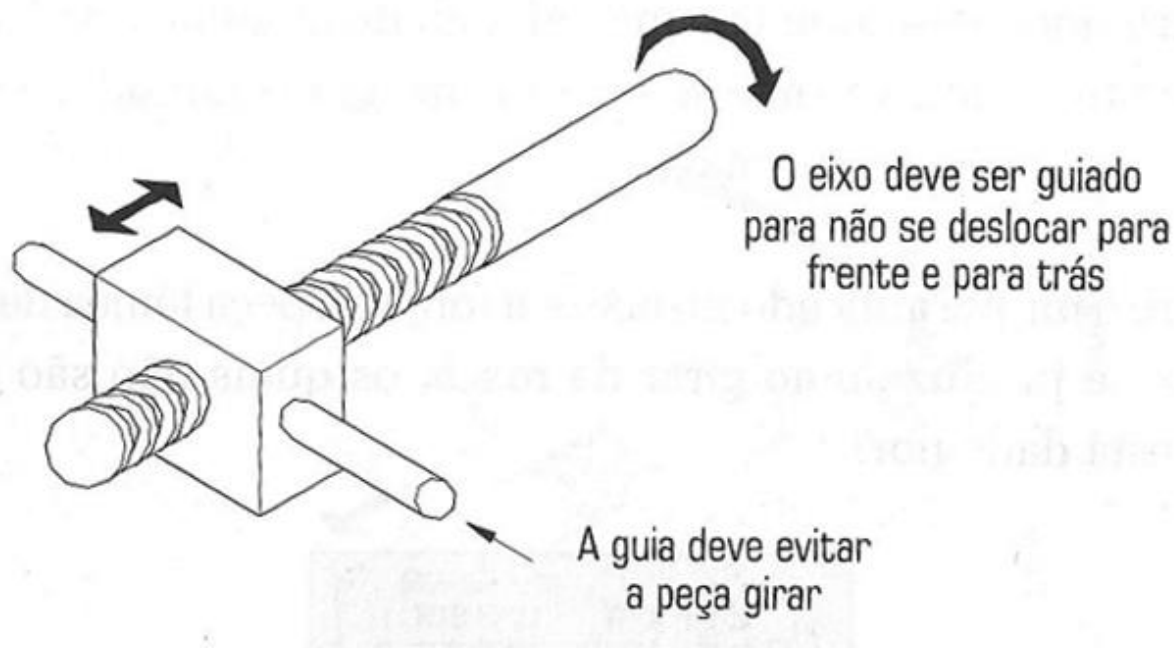


Fonte: (YAMA SEIKI, 2015).

2.4.2 Parafusos de acionamento

Para a movimentação linear dos eixos com o uso de motores, em máquinas-ferramenta, os parafusos de acionamento são muito utilizados, pois possibilitam a transformação de um movimento rotativo em movimento linear (PAZOS, 2002). Para esta transformação, o parafuso deve estar fixado de maneira a permitir apenas o movimento de rotação, além de estar associado a uma porca, com liberdade de movimento somente no sentido linear. Quando o parafuso é girado, a porca se desloca para frente ou para trás, dependendo do sentido de rotação.

Figura 9 – Parafuso de acionamento.



Fonte: (PAZOS, 2002).

É possível relacionar o ângulo de rotação da rosca com o deslocamento realizado pela porca, desde que se conheça o passo da rosca (PAZOS, 2002). A Equação 1 mostra esta relação.

$$\frac{\theta}{x} = \frac{2\pi}{p} \quad (1)$$

Onde:

θ = Ângulo de rotação do parafuso;

x = Deslocamento da porca;

p = Passo da rosca;

Existem diferentes formatos de construção, sendo que variam de acordo com a aplicação. Para aplicações onde são solicitadas precisão e resistência, o perfil de rosca trapezoidal é amplamente utilizado (KASSOUF, 2003). Além destas características, parafusos com rosca trapezoidal proporcionam um passo maior para o mesmo diâmetro, quando comparado aos perfis de rosca mais comuns.

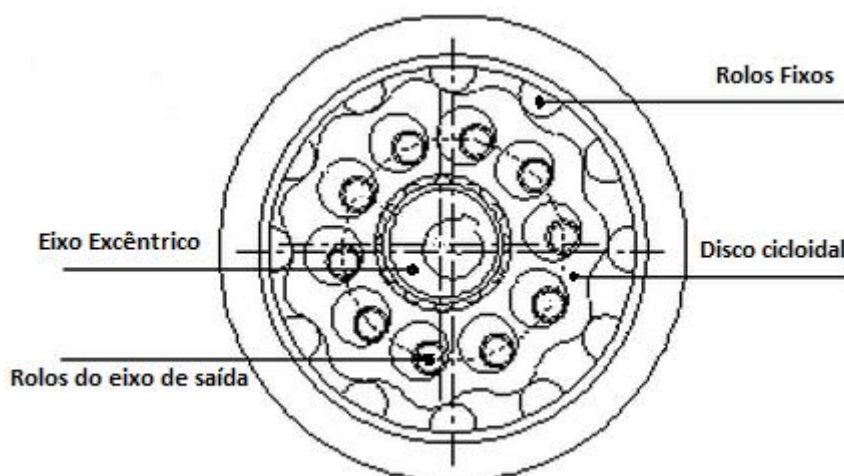
2.4.3 Redutores

Em muitos projetos mecânicos torna-se necessário reduzir a rotação gerada por um atuador ou também amplificar o torque de saída do seu eixo. Com a redução sobre um sistema de acionamento angular, é possível obter um aumento na resolução. Atualmente diferentes tipos de redutores podem ser encontrados com diversas relações de redução (PAZOS, 2002).

Um sistema muito empregado é o conjunto composto por pares de polias com diferentes diâmetros ligadas por correias. Este método é muito utilizado devido à simplicidade da fabricação dos componentes para sua montagem, porém é recomendado seu uso para reduções que não ultrapassem 30%, a fim de evitar perdas excessivas por escorregamento (PAZOS, 2002).

Um novo tipo de mecanismo que atende a demanda de grandes taxas de redução é o redutor cicloidal (BRANCO, 2013). Este tipo de redutor tem como principal característica a alta eficiência de transmissão, podendo ser superior a 90%, além de possuir uma arquitetura compacta, quando comparado a outros mecanismos de redução (DARALI, 2012). A Figura 10 mostra os principais componentes de um redutor cicloidal.

Figura 10 – Componentes de um redutor cicloidal.



Fonte: (DARALI, 2012).

O funcionamento do redutor cicloidal é baseado no movimento excêntrico do eixo central de entrada que gera um movimento planetário no disco cicloidal. Este em contato com os rolos fixos proporcionando um giro que é transmitido para o eixo de saída. É fundamental que o disco cicloidal tenha um número menor de dentes que o perfil externo formado pelos rolos. Para determinar a relação de redução entre a entrada e saída é considerada a Equação 2 (DARALI, 2012).

$$R = \frac{(P - L)}{L} \quad (2)$$

Onde:

R = relação de transmissão;

P = Número de rolos fixos

L = Número de dentes do disco cicloidal;

2.4.4 Sistema de transmissão por correia dentada

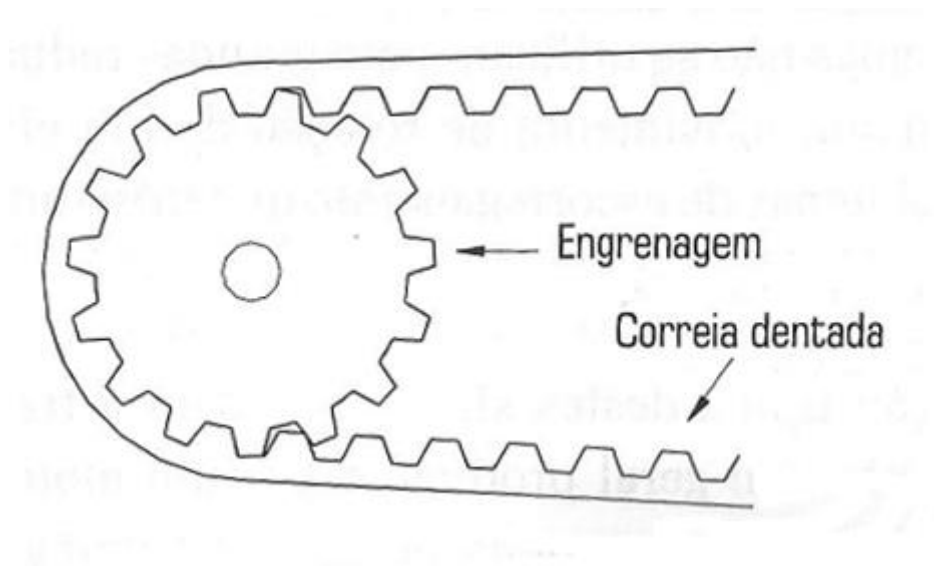
Quando existe a necessidade em um projeto mecânico de se transmitir um movimento de rotação entre dois eixos paralelos, a transmissão por correia dentada é um método eficiente e que envolve componentes simples. A correia dentada é feita de um tecido emborrachado e revestido, sendo que em muitos modelos usa-se em seu interior fios de aço para permitir uma maior resistência. A face de contato com a polia possui sulcos espaçados uniformemente (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005).

Como característica proporcionada pelo perfil dentado que compõe sua face interna, este tipo de correia elimina possibilidades de escorregamento, garantindo assim a precisão na transmissão (PAZOS, 2002).

As polias ou engrenagens que compõem o conjunto de transmissão devem ter o perfil compatível com os dentes da correia. Em um par aplicado a um sistema de transmissão, é possível estabelecer um acréscimo ou uma redução de

velocidade, montando uma combinação com diferentes números de dentes, que resulta em diâmetros diferentes para cada polia (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005).

Figura 11 – Engrenagem e correia dentada



Fonte: (PAZOS, 2002).

2.5 Eletrônica

Os conceitos voltados ao controle da movimentação dos eixos de uma fresadora CNC variam de acordo com o nível de tecnologia utilizado. Para permitir uma maior precisão sobre os movimentos realizados, máquinas mais sofisticadas utilizam um sistema de malha fechada de controle, com a utilização de servomotores (SOUZA e ULBRICH, 2009). Este sistema é muito utilizado para aplicações industriais, porém exigem um investimento maior.

Uma fresadora 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).

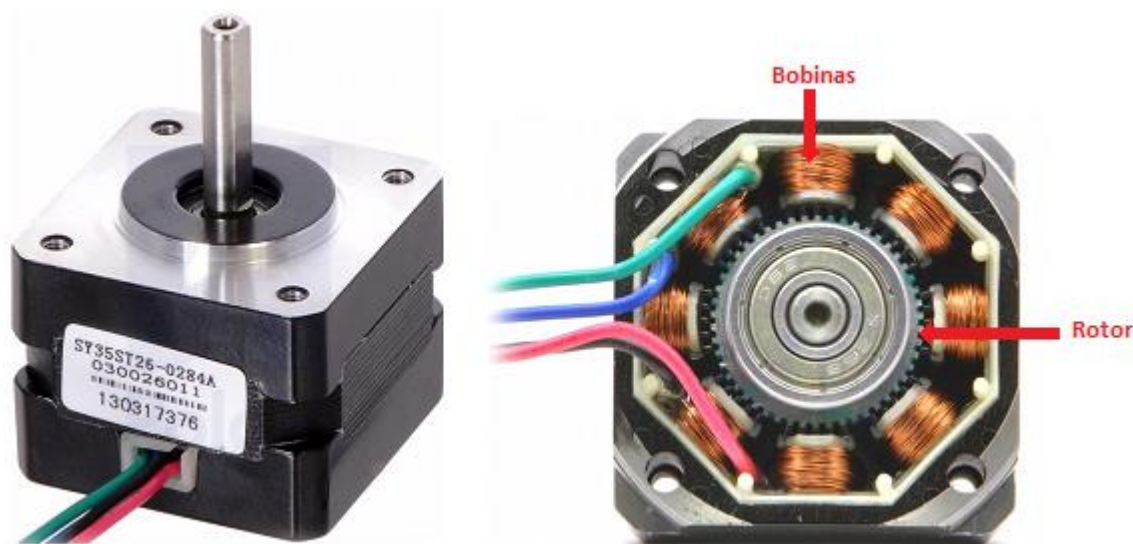
2.5.1 Motores de passo

Motor de passo corresponde a um tipo de motor elétrico síncrono que permite determinar seu posicionamento angular a partir de pulsos elétricos controlados (BRITES; SANTOS, 2008). Como importante característica deste tipo de motor, se destaca a compatibilidade com sistemas eletrônicos digitais, que favorece a aplicação em equipamentos na área de informática, tais como impressoras, tocadores de CDs e também em máquinas ferramentas controladas por CNC (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2006).

Outra característica importante é o grande número de passos por revolução, sendo que a maior parte dos modelos comerciais utiliza o padrão de $1,8^\circ$ por pulso, o que representa 200 pulsos por volta (CONSTANDINO, 2003). Em muitas aplicações, para a determinação do posicionamento, pode ser utilizada a contagem dos pulsos enviados ao motor, isto possibilita a eliminação de sistemas realimentados (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2006).

Seu princípio de funcionamento ocorre pela alternância da energização dos pares de bobinas, posicionadas no conjunto correspondente ao estator, que fazem com que o rotor se movimente até a posição de alinhamento dos campos magnéticos. A Figura 12 mostra o interior de um motor de passo.

Figura 12 – Exemplo de um motor de passo e seu interior.



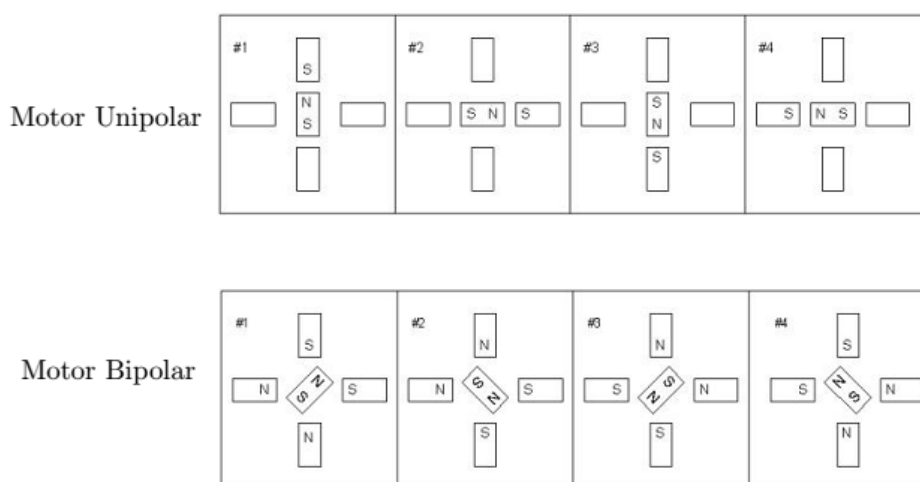
Fonte: Adaptado de Pololu Corporation (2015).

Atualmente o tipo de motor híbrido é o mais comum, sendo que sua construção é baseada em um rotor composto por um ímã permanente dentado e o estator composto por enrolamentos. Os dentes auxiliam no direcionamento do fluxo, melhorando o desempenho em relação a velocidade, resolução de passo e torque. Quando ocorre a energização das bobinas, o rotor se movimenta atraído pelo campo magnético até o ponto de menor relutância, executando o movimento correspondente a um passo (BRITES; SANTOS, 2008).

Diferentemente de um motor CC (corrente contínua), onde a alternância da direção do campo magnético é realizada pelo comutador, no motor de passo este sequenciamento precisa ser realizado externamente com o uso de um driver de acionamento (CONSTANDINOU, 2003). Para energizar as bobinas, é possível utilizar 2 tipos de ligações, sendo elas unipolar e bipolar

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 um dos polos do rotor (BRITES; SANTOS, 2008). Já na ligação bipolar, o acionamento das bobinas sempre é feito em conjunto, atraindo os dois polos das extremidades opostas do rotor. A representação do acionamento nos modos unipolar e bipolar pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13 – Comparativo entre o acionamento de um motor unipolar e bipolar.

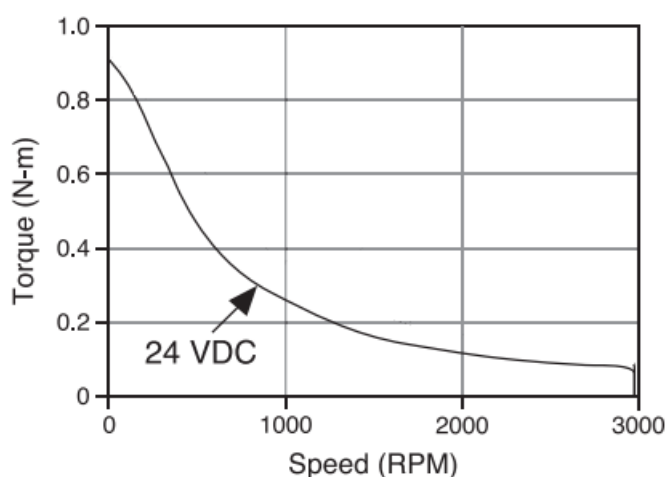


Fonte: (BRITES; SANTOS, 2008).

A ligação bipolar possibilita um aumento de torque no posicionamento justificado pelo aumento do fluxo magnético gerado pelo estator, entretanto, o circuito de acionamento das bobinas para este tipo de ligação torna-se mais complexo que no modelo unipolar (BRITES; SANTOS, 2008).

Apesar das vantagens descritas na utilização de motores de passo para aplicações onde se requer o controle preciso de movimentação, este tipo de motor ainda possui limitações, principalmente quando se exige altas velocidades de rotação (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2006). O torque que o motor estabelece sobre o eixo sofre influência da redução do tempo entre os passos, sendo que uma frequência de alternância elevada pode ocasionar na perda de passos (PAZOS, 2002). A relação de torque em função da velocidade está representada na Figura 14.

Figura 14 – Gráfico do torque em função da velocidade em um motor de passo.



Fonte: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

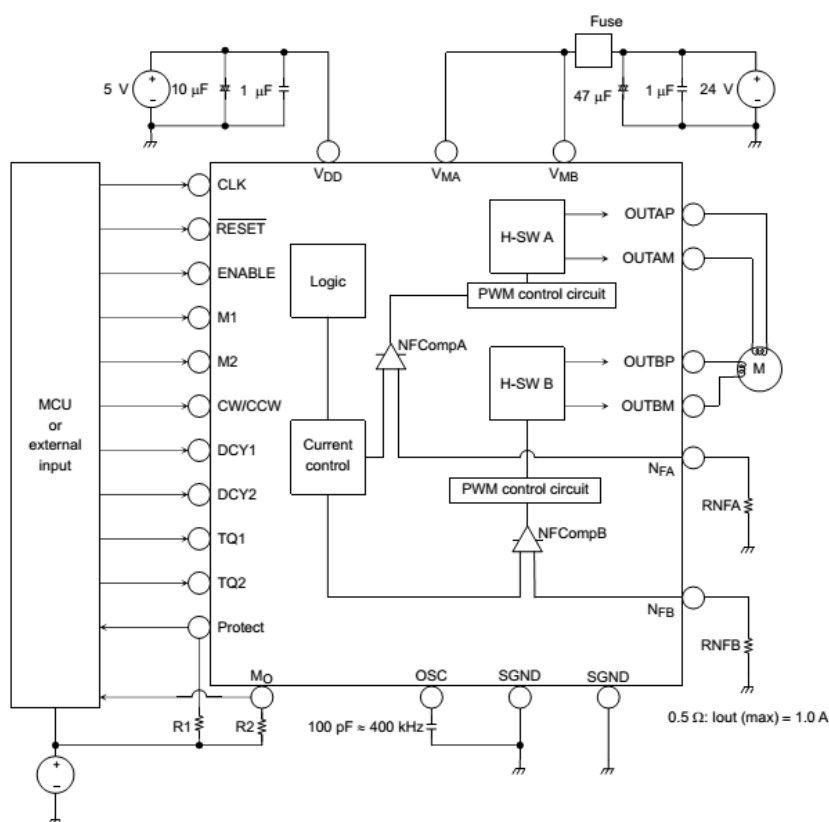
2.5.2 *Driver* de acionamento

Um *driver* é um circuito eletrônico responsável por amplificar sinais digitais de baixa potência para o 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).

Diversos fabricantes de semicondutores possuem CIs (circuitos integrados) específicos para o acionamento de motores de passo. A utilização deste tipo de componente resulta na simplificação do sistema de acionamento e facilita a integração com o sistema de controle.

O CI TB6560AHQ fabricado pela Toshiba funciona 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 a sua resolução. A voltagem máxima de chaveamento é de 40 V e a corrente máxima de saída é de 3.5 A (TOSHIBA, 2009). A Figura 15 mostra o diagrama de aplicação do circuito.

Figura 15 – Diagrama com exemplo de ligação.



Fonte: (TOSHIBA, 2009).

2.5.3 Acionamento rotativo da ferramenta

O eixo-árvore ou *spindle* de uma fresadora é o conjunto responsável pelo movimento circular da ferramenta de corte. Em seu acionamento deve existir a

possibilidade do controle da rotação, pois este parâmetro varia de acordo com a ferramenta, operação ou material usinado (STOETERAU, 2004). Os motores de corrente contínua são muito utilizados para esta aplicação, pois permitem um sistema de controle de rotação mais simples (SOUZA e ULBRICH, 2009).

A principal característica que diferencia os tipos de *spindle* está relacionada com a potência e a faixa de rotação máxima que ele atinge (SOUZA e ULBRICH, 2009). No mercado é possível encontrar máquinas com faixas de rotação máxima variando de 5000 até 42000 RPM (ROMI, 2015) e (DMG MORI, 2015).

2.6 Sistema eletrônico embarcado

Um sistema embarcado é composto por uma integração de software e hardware aplicado a um objetivo pré-definido (DELAI, 2013). Pode ser descrito como um sistema computacional, porém, diferentemente de computadores e notebooks, este é projetado para uma aplicação específica, dimensionando os recursos conforme a necessidade do projeto.

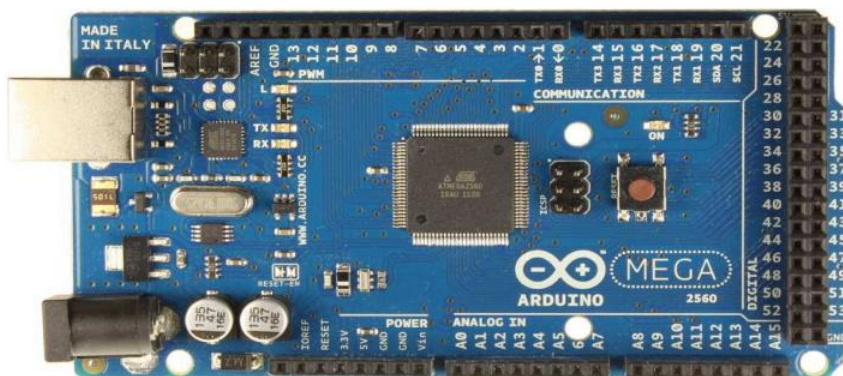
2.6.1 Controlador

A plataforma Arduino é uma placa de desenvolvimento que junta ferramentas de *software* e *hardware* como solução para aplicações práticas em sistemas embarcados. Foi criada para permitir flexibilidade no projeto, sendo destinada para aplicações educacionais, além de possuir o conjunto de hardware e software aberto. (FONSECA; VEGA, 2011)

Esta plataforma permite o controle de dispositivos físicos e a aquisição e registro de dados. A programação via computador se dá por uma IDE (*Integrated Development Environment*), não sendo necessário nenhum *hardware* externo para a gravação de programas, já que ele possui um sistema *bootloader* que faz o controle de comunicação.

Os modelos de plataformas encontrados variam pelo modelo de processador utilizado, número de entradas e saídas, além de outros recursos especiais. A plataforma Arduino Mega2560 utiliza o microprocessador Atmega2560, e disponibiliza 54 portas digitais, sendo que 15 delas podem ser usadas como PWM, 16 portas analógicas, e conexão USB. (ARDUINO, 2015).

Figura 16 – Plataforma Arduino Mega 2560



Fonte: Arduino(2015)

2.7 Software

Existem vários tipos de softwares de controle para máquinas CNC. Estes são responsáveis pela interpretação dos códigos e conversão para pulsos digitais para acionamento dos motores, com o auxílio de drivers (LYRA, 2010).

A maioria destes softwares executa a comunicação com a placa controladora pela porta paralela do computador (PEREIRA, AZEVEDO e ABREU, 2013), recurso que está se tornando obsoleto, sendo que com a padronização das portas de comunicação está sendo substituída pelas portas USB.

Uma alternativa para o controle de máquinas CNC utilizando a comunicação pela porta USB é o desenvolvimento de um software personalizado para a aplicação. A integração entre softwares desenvolvidos em linguagem Java e uma plataforma Arduino pode ser realizada por meio de comunicação serial, pela porta USB (GOBBI, 2014).

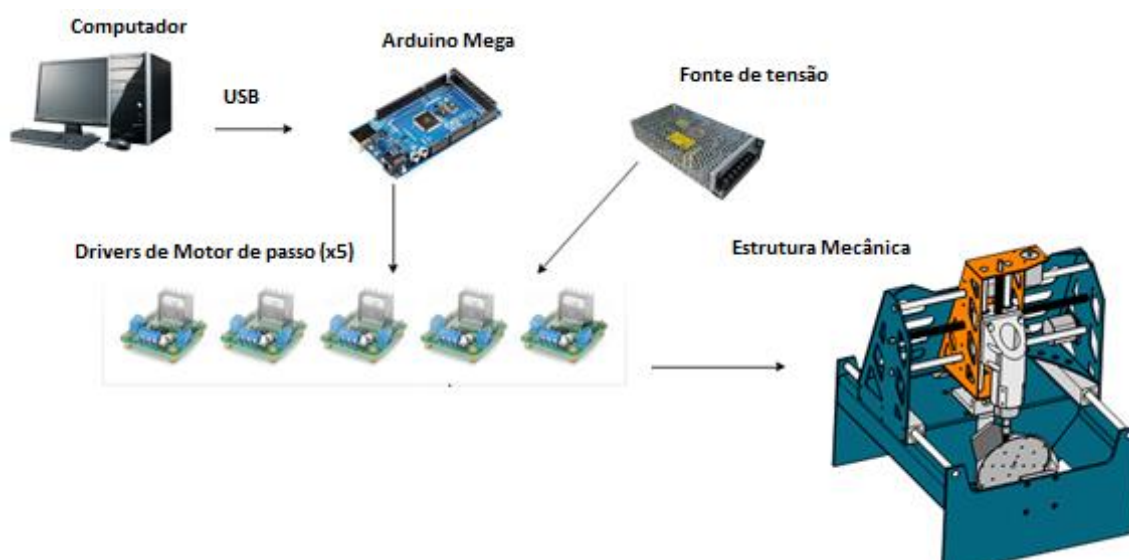
3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

3.1 Visão geral

O projeto consiste na construção de um protótipo de uma fresadora com 5 eixos destinada para o uso em pequenas empresas ou em instituições de ensino. O seu desenvolvimento engloba conceitos mecânicos, de hardware e software.

Como o objetivo do projeto é desenvolver uma máquina de baixo custo, foi priorizada a utilização de materiais de fácil aquisição para sua construção. O controle dos motores de passo, responsáveis pela movimentação dos eixos, funciona por meio do conjunto composto por *drivers* comandados por uma plataforma Arduino. Para a interface com o usuário, foi criado um software que permite a comunicação com a máquina via USB.

Figura 17– Visão geral o projeto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o correto dimensionamento dos componentes mecânicos foi utilizado o software CAD Autodesk Inventor. Esta ferramenta computacional permite, além do desenho tridimensional dos componentes, a simulação da montagem e da

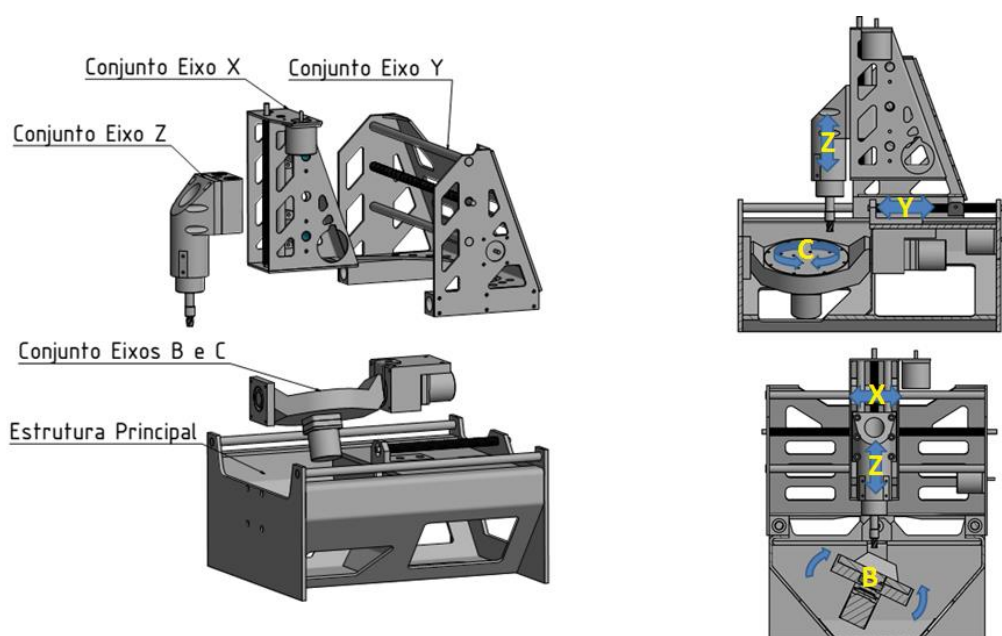
movimentação dos conjuntos. Esta etapa é fundamental para minimizar erros durante a montagem do protótipo.

3.2 Sistema mecânico

O conjunto mecânico foi projetado utilizando o conceito de estrutura tipo portal para a movimentação dos eixos X, Y e Z. A movimentação dos dois eixos angulares foi direcionada à mesa de trabalho para permitir uma estrutura mais rígida na fixação do eixo-árvore.

Foi definida a arquitetura composta pelos eixos B e C para a rotação da mesa de trabalho, sendo o eixo B em paralelo ao eixo Y e o eixo C em paralelo ao eixo Z. Foi determinada a rotação da mesa de trabalho no eixo C sem limites de curso, possibilitando múltiplas voltas. O eixo B foi dimensionado para possibilitar o curso de 180°, permitindo o posicionamento em até 90° para ambos os sentidos. Este modelo foi criado analisando a arquitetura de modelos de máquinas existentes no mercado, como os modelos DCM 620-5X (ROMI, 2015) e FCV-620 (YAMA SEIKI, 2015). Para melhor entendimento do projeto elaborado a Figura 18 mostra a vista explodida dos conjuntos de movimentação e a direção dos eixos.

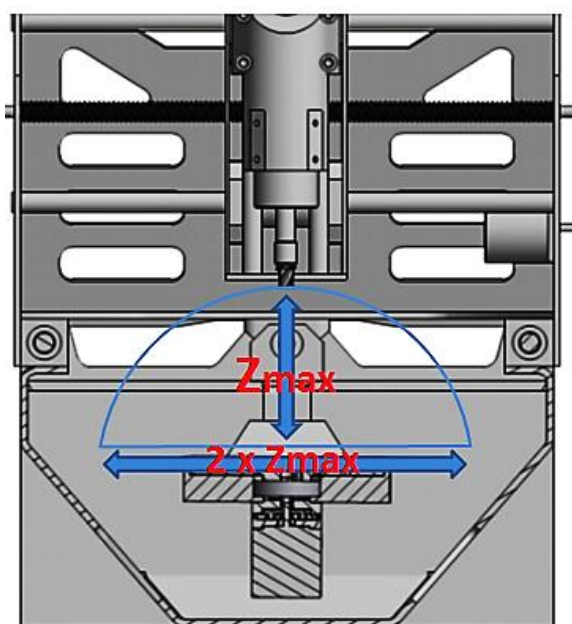
Figura 18– Representação dos conjuntos de movimentação e dos eixos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O dimensionamento dos eixos lineares foi realizado para possibilitar o curso máximo de 340 x 200 x 170 mm, respectivamente em X, Y e Z. Estes limites foram projetados para permitir o alcance do topo da ferramenta em qualquer ponto de um bloco, fixado no centro da mesa, com dimensões máximas de 120x120x100 mm. Devido à rotação em 180° (+90° e -90°) do eixo B, o curso do eixo X deve equivalente a 2 vezes o eixo Z, para possibilitar o alcance no limite do posicionamento angular como está representado na Figura 19. O curso dos eixos Y e Z foram projetados para permitir o afastamento da ferramenta em uma distância de segurança, mantendo uma área livre durante as operações de setup da máquina.

Figura 19– Representação dos limites para o eixo B



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Montagem da estrutura

O projeto da estrutura foi desenvolvido prevendo o uso de chapas de aço cortadas por plasma e dobradas, sendo que a espessura das chapas varia entre 5 e 8 mm.

Para a montagem dos componentes foi realizada a solda utilizando o processo de eletrodo revestido. Foi verificado primeiramente o correto alinhamento de cada parte da estrutura. Depois de unir os componentes, foi realizada a furação nos pontos de fixação dos outros elementos que compõem a máquina.

Figura 20– Montagem da estrutura da máquina

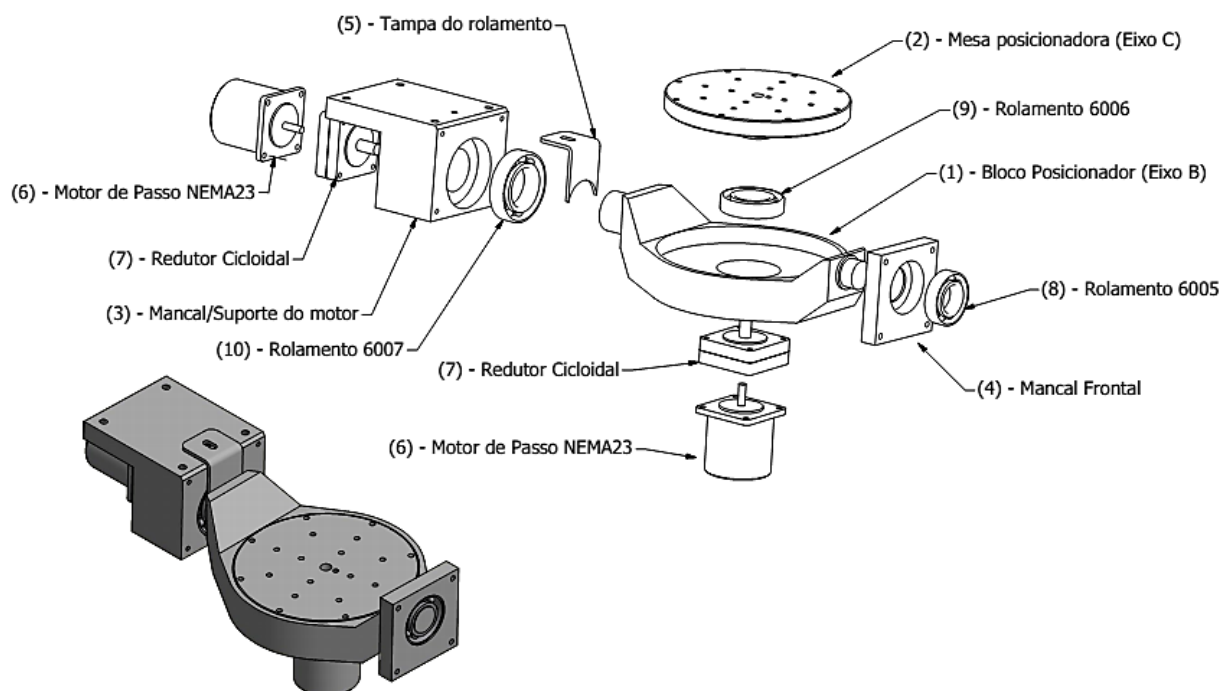


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Sistema de posicionamento da mesa

Para o conjunto de posicionamento da mesa nos eixos B e C foi projetado um mecanismo composto por dois motores de passo acoplados cada um a um redutor cicloidal na relação 1/18. Esta relação foi estipulada com base na divisão angular que ocorre no motor de passo, sendo esta $1,8^\circ$ por pulso. Com o uso do redutor a resolução obtida no eixo de saída passa a ser de $0,1^\circ$ por pulso, na configuração de passo completo. Para obter um aumento na resolução destes eixos, foi projetada a configuração de 1/8 passo, que divide a resolução inicial passando para o valor de 0.0125° por passo.

Figura 21 - Conjunto de movimentação dos eixos B e C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a movimentação do conjunto correspondente ao eixo B, foi projetado um bloco posicionador (1) fixado sobre dois mancais de rolamentos (3 e 4) para reduzir a possibilidade de ocorrerem vibrações durante a usinagem. Neste bloco é encaixado um rolamento que mantém o alinhamento da mesa posicionadora (2), correspondente ao eixo C. Esta foi dimensionada com o diâmetro de 160 mm, prevendo a possibilidade de fixação de um bloco quadrado com a base de 100 mm x 100 mm e restando ainda um espaço para a acomodação de grampos de fixação.

Os componentes 1, 2, 3 e 4 foram fabricados em alumínio fundido e posteriormente usinados. Após a fabricação das peças, foi realizada a montagem do conjunto sobre a estrutura da máquina, como pode ser visualizada na Figura 22.

Figura 22 - Montagem dos eixos B e C



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Conjunto de movimentação linear

O conjunto de movimentação da ferramenta no sistema cartesiano XYZ funciona por meio do deslizamento de mancais com rolamentos lineares, sobre guias retificadas, possibilitando um deslocamento com pouco atrito e reduzindo as folgas do mecanismo. Para fornecer uma maior estabilidade e restringir possíveis movimentos de torção nas estruturas móveis, cada conjunto responsável pela movimentação de um eixo está apoiado sobre 4 mancais rolamentados sobre um par de guias. As guias lineares foram fixadas com mancais individuais parafusados nos conjuntos estruturais, permitindo o alinhamento das mesmas.

Figura 23 – Par de guias e mancais dos eixos X e Y.



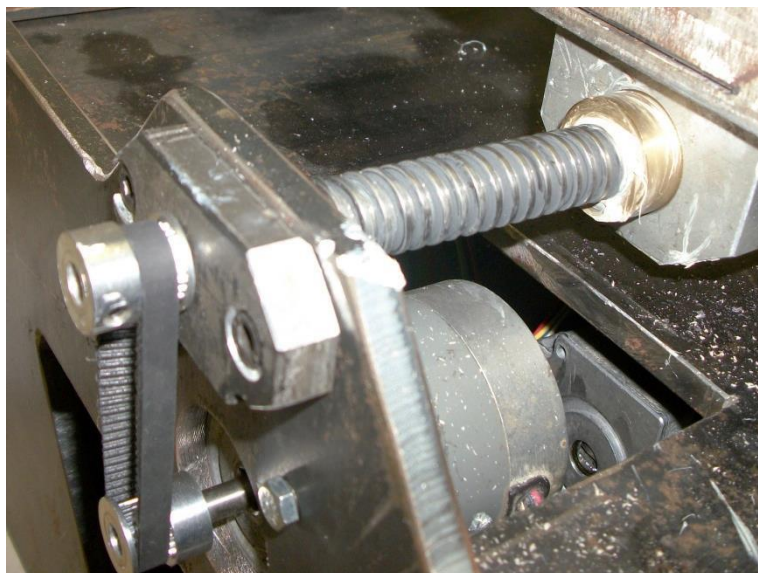
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4 Acionamento dos eixos lineares

Para a movimentação linear dos eixos X, Y e Z, foram utilizados três pares compostos por parafusos de acionamento e porcas com perfil de rosca trapezoidal M16 x 4 mm. Para reduzir o atrito, as porcas foram fabricadas em bronze e os parafusos são fixados na estrutura por meio de mancais com rolamentos.

Para o movimento de rotação dos parafusos, foram utilizados motores de passo do padrão NEMA 23 modelo 23KM-C051-07V com torque de 9,9 kgf cm, corrente de 2 A por fase e resolução de 1,8° por passo (NMB CORPORATION, 1998). A transmissão do movimento entre o motor e os parafusos é realizada por meio de um conjunto composto por duas polias e uma correia dentada modelo GT2. As duas polias do conjunto possuem o mesmo número de dentes, não interferindo na relação de transmissão.

Figura 24 - Conjunto de movimentação linear



Fonte: Elaborado pelo autor.

A resolução do movimento linear está relacionada com a resolução do motor e o passo do parafuso. Para obter o valor final do conjunto utiliza a Equação 2.

$$R = \frac{P}{N} \quad (3)$$

Onde:

R = Resolução;

P = Passo do parafuso;

N = Número de passos por volta;

No dimensionamento realizado, foi estipulado atingir uma resolução de 0.01 mm. A configuração encontrada para atingir este valor corresponde a P igual a 4 mm (padrão do parafuso) e N de 400 passos por volta (configuração de ½ passo).

3.2.5 Eixo-árvore (*spindle*)

O movimento de rotação aplicado à ferramenta de trabalho é feito por um motor CC de alta rotação, específico para *spindle*, modelo A514A. Este motor

possui potência de 300 W, velocidade de rotação de 12.000 RPM (Rotações Por Minuto) a 48 V e torque de 230 N·m (INVENTABLES, 2015). A fixação da ferramenta no eixo do motor é realizada por um sistema de pinça no padrão ER11.

Para a fixação do motor no carro correspondente ao eixo Z foi projetado um bloco envolvente, construído em alumínio, permitindo uma fixação rígida e reduzindo as vibrações decorrentes da usinagem, formando o conjunto do *spindle*.

Figura 25 – Conjunto do *Spindle*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Sistema eletrônico

Para o acionamento das bobinas dos motores de passo de forma sequencial, foi projetado um sistema de acionamento composto por 5 *drivers*. O modelo utilizado foi o BL-TB6560 V2.0 que corresponde a um acionamento de motor de passo baseado no C.I. TB6560, suportando uma tensão máxima de 24 V e permitindo o controle de corrente em até 3 A (ELECTRODRAGON, 2015). Este

driver ainda disponibiliza a seleção de diferentes modos de chaveamento, sendo possível fracionar o passo em 2, 8 ou até 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 chaves seletoras para configuração dos modos de trabalho, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Driver BL-TB6560 V2.0



Fonte: (ELECTRODRAGON, 2015).

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

3.3.1 Acionamento e controle do *spindle*

Para o acionamento do spindle na realização dos testes, foi prevista a utilização de uma fonte ajustável de tensão que permite a variação entre 0 e 32 v. Este recurso é necessário no controle da velocidade de rotação do spindle pois com a mudança de tipos de materiais usinados ou ferramentas utilizadas é preciso uma adequação da velocidade para um melhor acabamento.

Prevendo a possibilidade de uma expansão no sistema eletrônico, foram destinadas duas saídas na plataforma Arduino que permitem o acionamento de uma placa controladora PWM para modular a alimentação do motor, eliminando a necessidade de uma fonte específica para o seu controle.

3.3.2 Teclado de operações manuais

Para permitir um controle de posicionamento mais simplificado durante as operações de *setup*, foi desenvolvido um teclado com as funções básicas de movimentação e operação. Para o deslocamento dos eixos foram disponibilizados os comandos de direcionamento, permitindo direção positiva e negativa para cada eixo. Foram criadas duas teclas para seleção entre dois modos de velocidade de avanço na movimentação manual (F+ e F-) e ainda duas teclas para ativar e desativar o *spindle*. Além das funções voltadas para operações manuais, existem os comandos de início e parada do ciclo automático. A função *reset* permite sair do modo manual ou abortar a execução de um ciclo.

Figura 27 - Teclado de operações manuais



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Hardware de controle

O controle desenvolvido para todo sistema eletrônico é realizado por uma plataforma Arduino Mega que é responsável pelo acionamento dos *drivers* do motor de passo e do *spindle*, pela interpretação do acionamento das teclas de controle manual e pela comunicação com o software.

A lógica implementada na plataforma é baseada na comunicação serial com o software de controle, pela porta USB. Foi determinado um padrão de dados para a comunicação entre o software e hardware, bem como os códigos aceitos na programação CNC. Os comandos CNC compatíveis com o sistema criado e as funções que cada um executa estão representadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Comandos aceitos pelo sistema.

Código	Descrição	Exemplo de comando
G0	Deslocamento retilíneo (velocidade máxima)	G0 X10.5 Y5 B10
G1	Avanço controlado retilíneo (velocidade programada)	G1 X10.5 Y5 B10 F200
G50	Atualização de coordenada inicial (referência)	G50 X10 Y0 B0
F	Programa velocidade de avanço	F200
M3	Aciona spindle (sentido horário)	M3
M4	Aciona spindle (sentido anti-horário)	M4
M5	Desliga spindle	M5
M30	Fim do programa	M30

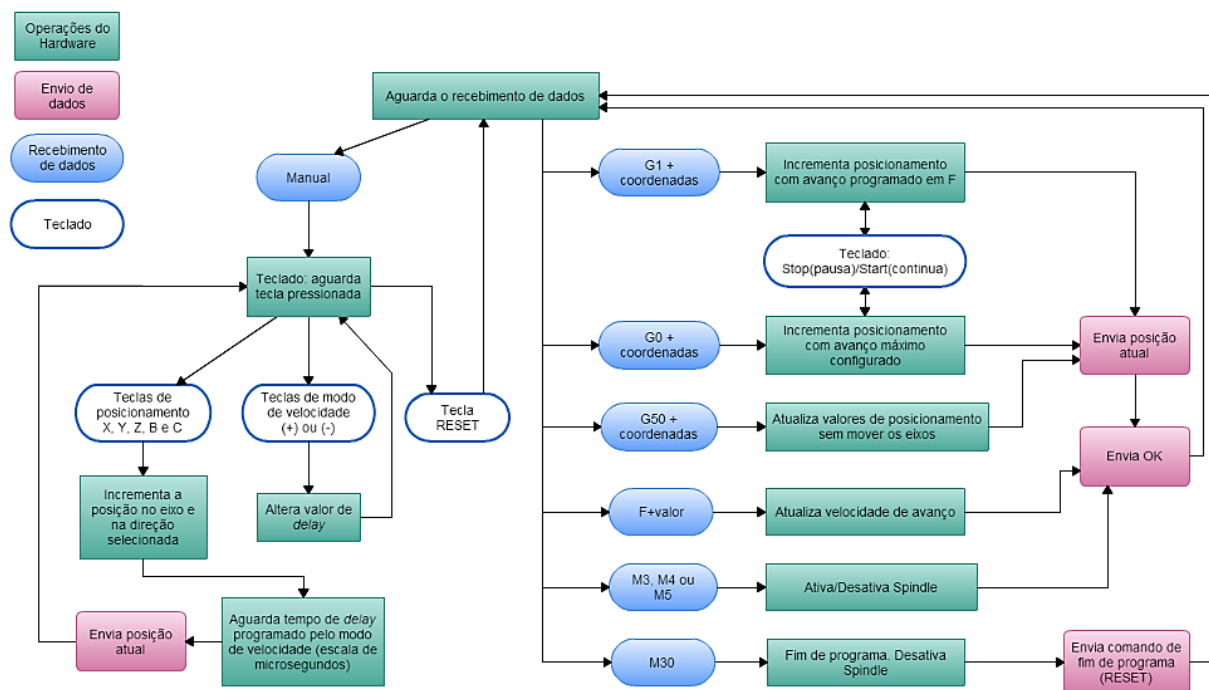
Fonte: Elaborado pelo autor

Para a movimentação, as funções de deslocamento G0 e G1 ativam o modo de avanço e devem ser seguidas de códigos correspondentes às coordenadas de deslocamento. A função G50 não envolve deslocamentos dos eixos, servindo apenas para configurar os valores referentes a cada eixo como posição atual. Esta deve conter na mesma linha de comando os valores para os eixos que serão configurados.

A velocidade de avanço é definida com o código F seguido do valor, representando a velocidade em milímetros por minuto. A faixa de valores aceitos deve obedecer ao limite entre 30 e 700 mm/min. Estes limites foram determinados a partir de testes realizados com a utilização de um gerador de frequência para simular diferentes velocidades com a estrutura, motores e *drives* montados.

A lógica programada foi criada conforme representação do fluxograma apresentado na Figura 28. A programação foi criada em linguagem C compatível com a IDE da plataforma Arduino.

Figura 28 - Fluxograma com a lógica desenvolvida para o hardware.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram definidos dois modos de operação, sendo que no modo manual, a manipulação dos eixos ocorre pelos comandos do teclado e após iniciada, interrompe a leitura da porta serial. O modo manual é desabilitado pressionando a tecla Reset.

O modo de execução, que é habilitado ao iniciar o *hardware*, mantém-se ativo sempre que o modo manual não estiver habilitado. Em seu funcionamento são realizadas constantes leituras da porta serial até que algum comando compatível seja recebido. A partir de cada linha de comando recebida são executadas as operações correspondentes e posteriormente ocorre o envio das coordenadas de posicionamento atual, seguidas da mensagem de confirmação para liberar o envio de um novo comando.

A lógica de acionamento dos pinos para controle do *driver* é iniciada com o cálculo da distância de deslocamento dos eixos. A partir deste dado, com base na resolução (incremento por passo), é calculado o número de passos em cada eixo, conforme expresso na Equação 4.

$$n = \frac{P_i - P_f}{R} \quad (4)$$

Onde:

n = número de passos;

Pi = Posição inicial;

Pf = Posição final;

R = Resolução do eixo;

Para cada eixo, antes de executar a movimentação é avaliada a existência de mudança de direção, comparando com a movimentação anterior. Para realizar esta mudança, o valor do pino correspondente à direção é invertido e posteriormente é incrementado um número de passos, configurado para cada eixo, que corresponde a um movimento de compensação de folgas, presentes no conjunto mecânico.

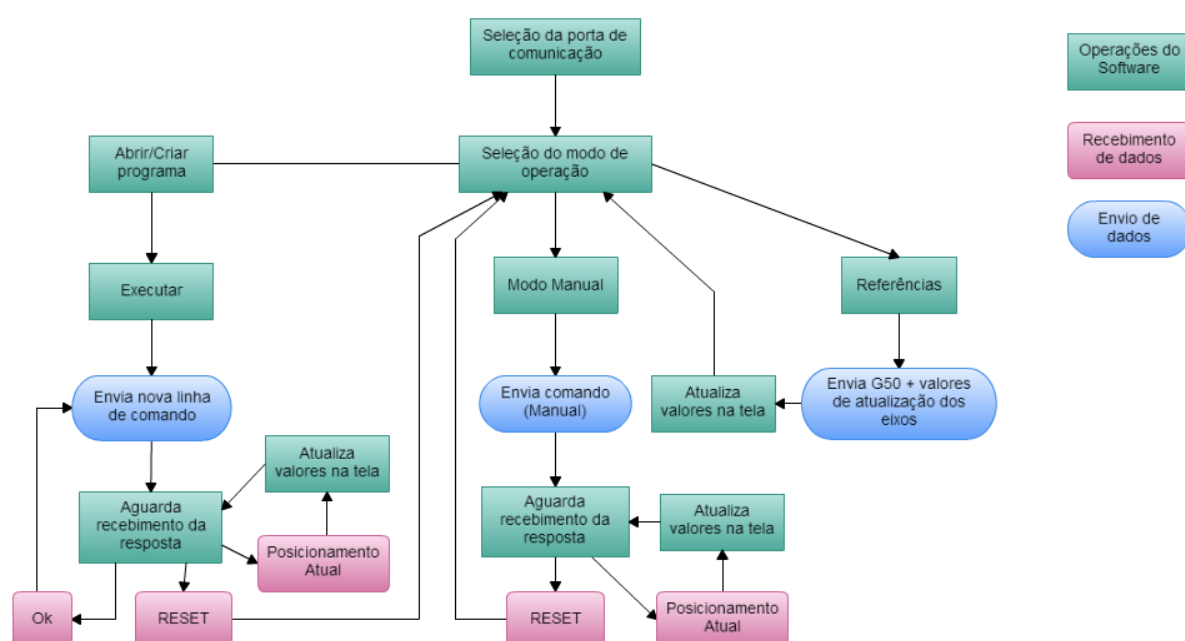
A movimentação ocorre pela alternância do acionamento na saída correspondente ao passo de cada eixo. Para executar um movimento linear, é realizada uma comparação inicial que determina o eixo que terá o maior número de passos executados. Posteriormente é realizado o acionamento na forma de ciclos, com o número total de repetições igual ao maior número de passos encontrado, acionando proporcionalmente as saídas para que todos os eixos atinjam o último passo em conjunto.

3.4 Software

O software de interface gráfica foi desenvolvido com o NetBeans IDE em linguagem de programação Java, para sistema operacional Windows e compatível com arquiteturas com 32 ou 64 bits.

A finalidade do software é proporcionar ao usuário uma tela de operações que permita visualizar a posição numérica atual de cada eixo da máquina e carregar arquivos com linguagem CNC para a execução. No algoritmo implementado, foram criadas rotinas de comunicação compatíveis com o hardware desenvolvido. O fluxograma lógico está representado na Figura 29.

Figura 29 - Fluxograma da lógica desenvolvida para o software



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desta lógica foi criada uma tela de operação contendo botões para a seleção da porta de comunicação, modo manual, e execução, localização de arquivo além do acesso à tela de configuração de referências. A tela criada ainda permite a visualização do posicionamento atual de cada eixo.

Figura 30 - Telas de operação

Tela Principal

PORTA: COM3

POSIÇÃO ATUAL

X - 000.00 B - 000.00
Y - 000.00 C - 000.00
Z - 000.00

G00 Z90.
(2D CONTOUR1)
S5000 M03
G00 B0. C0.
M08
G00 X32.5 Y37.5
Z70.
G00 Z60.
G01 Z58. F400.
Z53. F300.
X27.5 F400.
Y-37.5
X27.492 Y-37.696
X27.469 Y-37.891
X27.431 Y-38.084
X27.378 Y-38.273
X27.31 Y-38.457
X27.228 Y-38.635
X27.132 Y-38.806
X27.023 Y-38.969
X26.901 Y-39.124
X26.768 Y-39.268
X26.624 Y-39.401
X26.469 Y-39.523
X26.306 Y-39.632
X26.135 Y-39.728

ABRIR
MANUAL
REFERÊNCIAS
EXECUTAR

SELECIONE O MODO DE OPERAÇÃO!

Tela de Referências

PONTO INICIAL

POSIÇÃO ATUAL

X B
Y C
Z

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o modo manual ativo, todos os comandos do software são desabilitados até que o mesmo receba a confirmação de saída do modo (tecla *Reset* do teclado). Durante a execução, o software envia uma linha do programa carregado e aguarda a confirmação do fim da operação, por parte do hardware, para o envio da próxima linha de comando.

A tela de referências permite ao usuário definir os valores de posicionamento atual para cada eixo. Com o comando aplicar, uma linha de código G50 é enviada contendo os valores referentes a todos os eixos.

Na parte inferior da tela principal são exibidas mensagens que auxiliam a operação do software, ou também mensagens informando sobre algum erro do sistema.

3.5 Pós-Processador

Para a criação dos códigos CNC compatíveis com o sistema criado, foi utilizado o software Autodesk Inventor HSM. Esta ferramenta implementa as funções de CAD e CAM integradas em um mesmo ambiente.

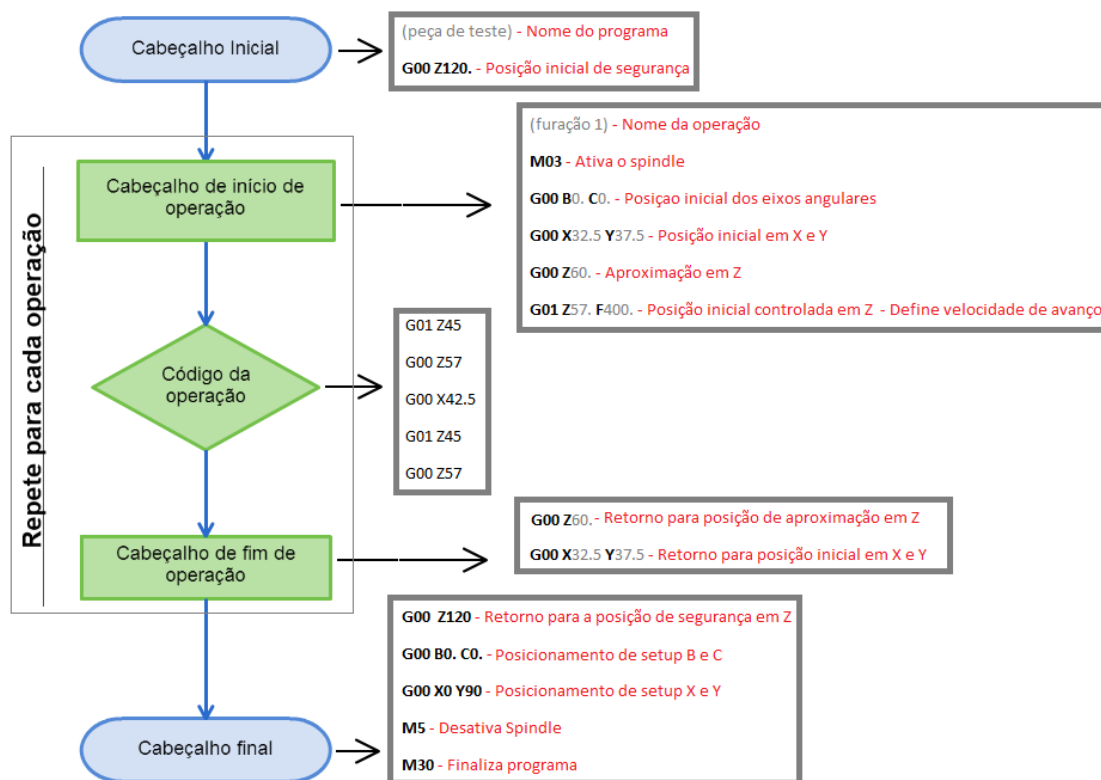
Em seu ambiente de trabalho, primeiramente é necessário o modelamento tridimensional da peça desejada, ou importar arquivos CAD de formatos compatíveis. Com o modelo 3D finalizado as funções do software CAM podem ser aplicadas.

O software utilizado permite que sejam criadas diferentes operações, tais como faceamento, contornos, usinagem helicoidal de perfil ou furo, furação, entre outras. Para a transição entre diferentes operações que compõem um mesmo programa de usinagem, configurações de segurança devem ser adotadas a fim de evitar colisões entre a ferramenta e algum elemento de fixação, ou até mesmo alguma região da peça usinada. Estas configurações são implementadas na etapa de pós-processamento.

Os pós-processadores podem ser construídos em diferentes tipos de linguagem, variando de acordo com o desenvolvedor do software CAM. Para o Inventor HSM, a linguagem utilizada é a JavaScript, que é construída em um formato de texto. A configuração do pós-processador para o protótipo criado foi feita a partir de um modelo já existente, que é disponibilizado junto com o software para aplicações genéricas.

O programa CNC que é gerado pelo pós-processador deve obedecer a uma estrutura padronizada, composta por cabeçalhos antes de cada operação que executam a inicialização de variáveis, tais como, velocidade de avanço e acionamento e sentido de rotação do *spindle*. Os cabeçalhos ainda possuem comandos para o posicionamento inicial de segurança em cada operação, além de comentários referentes ao tipo de usinagem executada, tipo de ferramenta, entre outros que podem ser definidos no software e auxiliam em uma possível edição manual do programa. A Figura 31 mostra um fluxograma com a estrutura e um exemplo de programa gerado.

Figura 31 - Estrutura do programa CNC gerado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

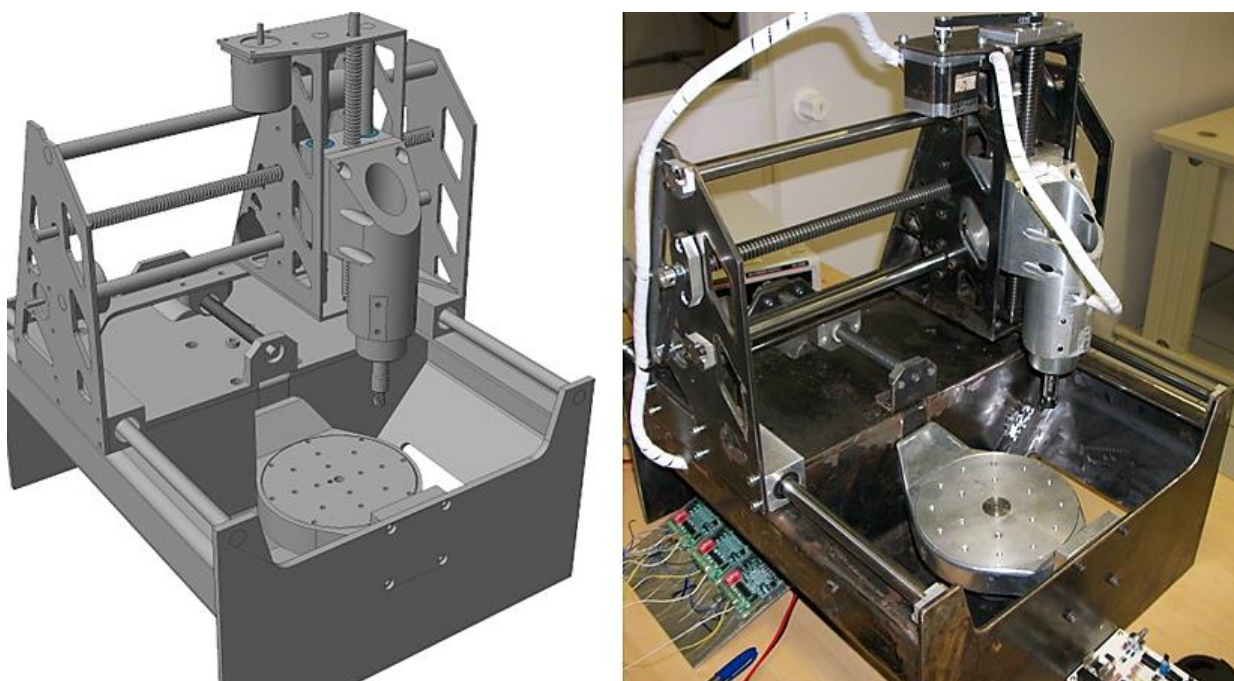
Os comandos correspondentes aos movimentos de cada operação podem ser adaptados para cada tipo de máquina. Deste modo, foram habilitados somente os códigos de movimentação linear G0 e G1 para se adequar ao algoritmo de interpretação implementado no hardware.

4 RESULTADOS

Com a conclusão da construção e montagem dos componentes mecânicos e eletrônicos, procedeu-se a integração dos mesmos com o software desenvolvido.

A Figura 32 mostra a comparação entre a montagem desenvolvida em CAD e o protótipo construído.

Figura 32 - Comparação entre o projeto CAD e a montagem realizada



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir de então foram realizados testes para a validação da proposta quanto aos requisitos de volume útil de trabalho, mobilidade dos eixos, rigidez durante a usinagem e níveis de confiabilidade com relação precisão na usinagem.

4.1 Ajustes preliminares

4.1.1 Alinhamento dos eixos

Na etapa inicial de alinhamento, foi verificado o paralelismo das guias dos eixos X, Y e Z. Este procedimento foi realizado movimentando o conjunto de rolamentos lineares de cada eixo para encontrar o ponto de fixação que favorece menor resistência ao deslocamento.

No alinhamento do conjunto X, Y e Z com o conjunto B e C, foi utilizado um relógio comparador que foi deslocado sobre a superfície da mesa. Pela diferença apresentada na medição das extremidades, foi possível realizar a regulagem do alinhamento deslocando um dos pontos de fixação do eixo B na estrutura.

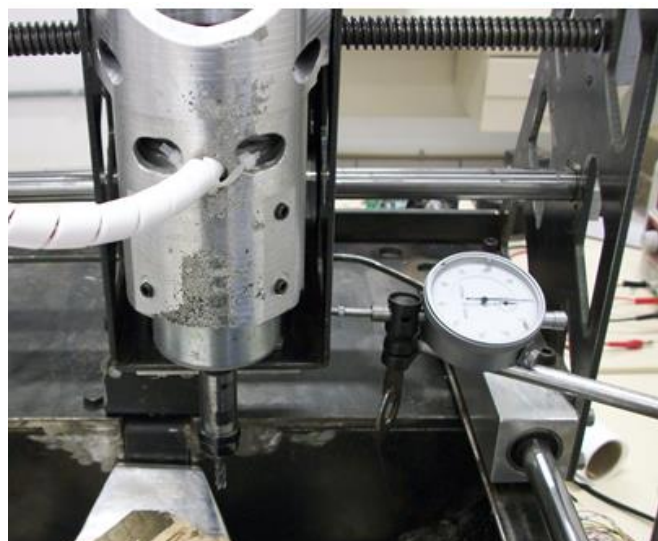
4.1.2 Ajuste das folgas nos eixos

A compensação das folgas apresentadas na mudança de direção de cada um dos eixos é possível pela configuração de um conjunto de variáveis criadas no algoritmo, executado na plataforma Arduino. Para isso torna-se necessário conhecer primeiramente o valor da folga para cada eixo.

Com o uso de um relógio comparador, fixado na base da máquina, e com a ponta de medição encostada em algum componente que se movimenta com o eixo, é possível verificar o deslocamento do mesmo. Com a movimentação em uma distância conhecida, em ambos os sentidos, por meio de comandos executados pelo software, foi verificada a diferença entre a distância de movimentação solicitada e o valor medido. Essa diferença corresponde à folga do eixo que deverá ser compensada.

A Figura 33 mostra como foi realizado o posicionamento do relógio comparador na medição da folga do eixo X.

Figura 33 - Procedimento de inspeção de folga para o eixo X.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Ajuste da referência inicial

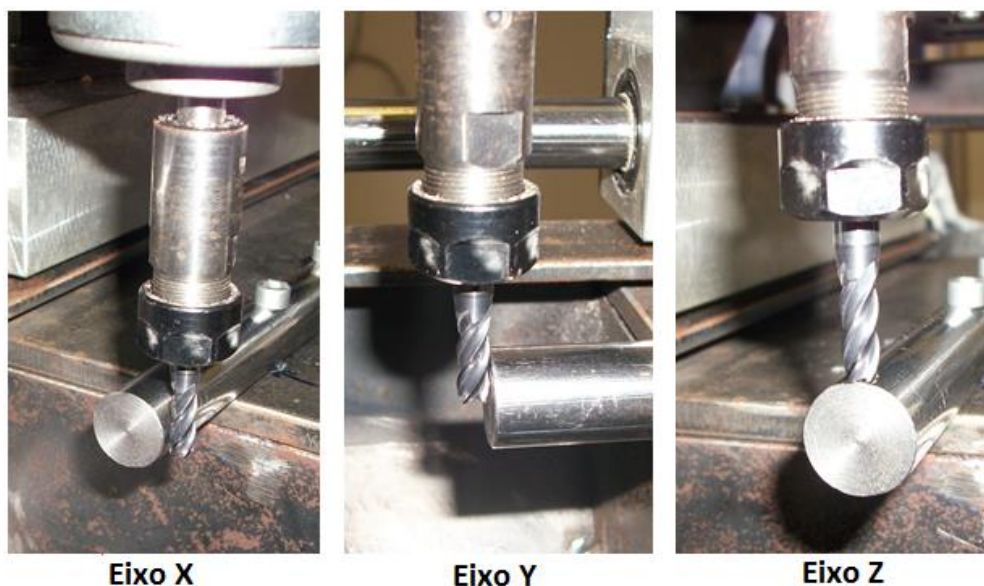
Para simplificar o processo de referenciamento, foi definido como posição de origem para usinagem o ponto de intersecção dos eixos B e C, para que a referência sempre se mantenha no centro dos eixos que executam movimentos de rotação. Para encontrar este ponto foi deslocada a extremidade central da ferramenta até o ponto central da superfície da mesa de trabalho. Este ponto pelas medidas do projeto dos componentes deve ser igual às coordenadas (X0, Y0, Z-5, B0), considerando que o eixo B esteja alinhado ao eixo X.

Para o eixo C, o valor de referência deve ser configurado após cada troca de peça, pois o alinhamento pode ser comprometido durante a fixação.

Para possibilitar a definição do ponto de referência sem remover a peça que poderá estar fixada no ponto central da mesa, foi criado um ponto com as coordenadas estabelecidas a partir do referenciamento realizado anteriormente. Para isso, foi fixada uma barra de aço retificada na base da máquina, em um ponto possível de ser atingido pela extremidade da ferramenta, porém sem interferir nas operações de usinagem, estando fora do campo de trabalho. Este ponto foi medido e definido com as coordenadas em X, Y e Z, a partir do ponto zero criado

anteriormente. Neste procedimento deve-se considerar o raio da ferramenta, compensando este valor. A Figura 34 mostra a barra de referência.

Figura 34 - Barra de referência.

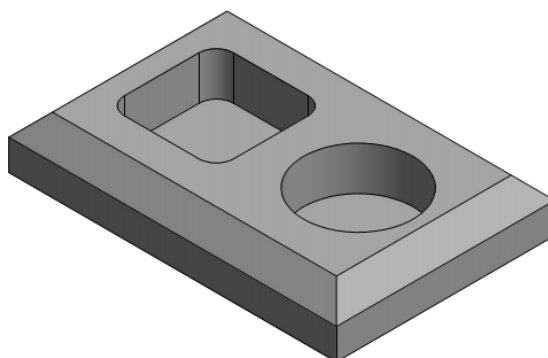


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Teste de usinagem

Para a realização dos primeiros testes, foi elaborada uma peça em CAD com o software Autodesk Inventor HSM. A intenção do modelo criado foi explorar o uso dos 5 eixos da máquina e consequentemente validar o posicionamento, visualizando possíveis desalinhamentos. A Figura 35 mostra a peça modelada.

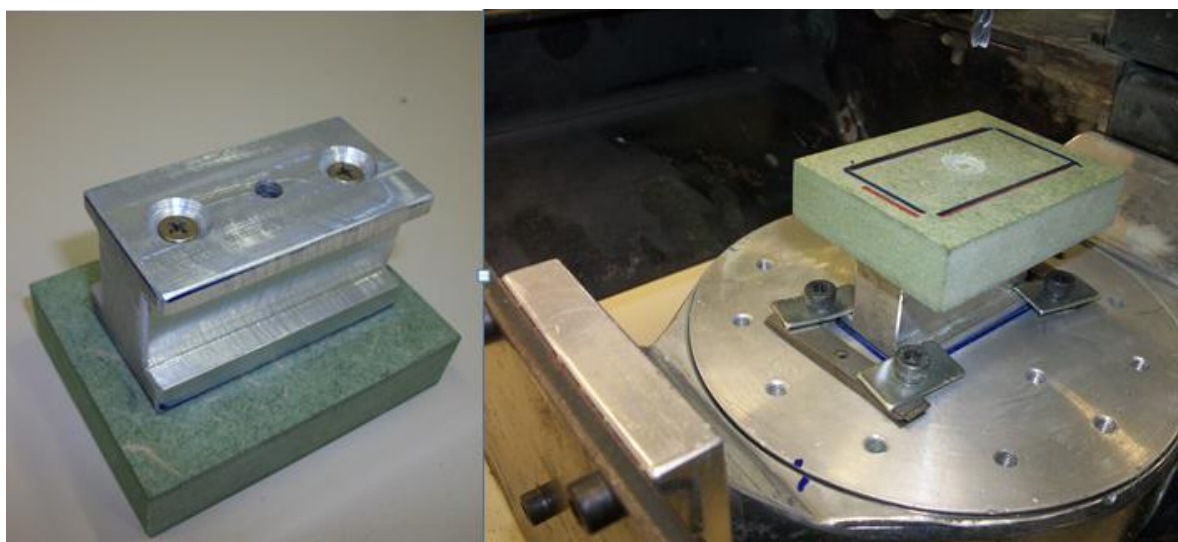
Figura 35 - Peça de teste desenhada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a fixação da peça sobre a mesa, foi fabricado primeiramente um bloco que permite prender o material a ser usinado, por meio de parafusos inseridos na face inferior, deixando livres as demais e assim não interferindo na trajetória da ferramenta durante a usinagem. Este bloco posteriormente foi preso à mesa com um sistema de parafusos e grampos, observando o alinhamento com o centro da mesa. A Figura 36 mostra o bloco de fixação, bem como o material bruto preso ao bloco e colocado sobre a mesa.

Figura 36 - Bloco de fixação com o material para a usinagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

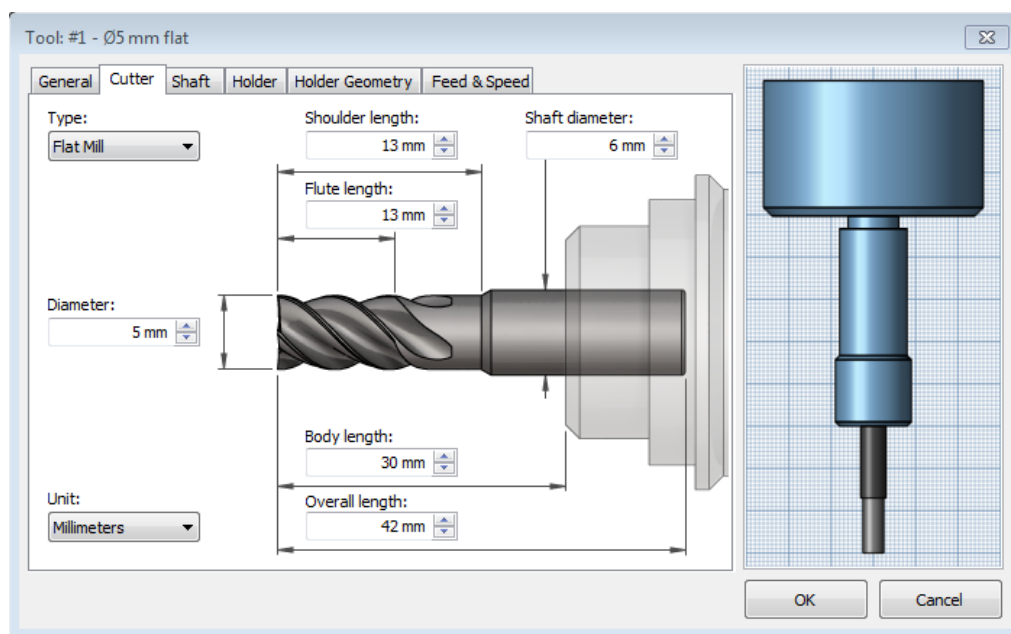
O material utilizado para a usinagem foi um bloco de MDF (*Medium Density Fiberboard*), com as dimensões aproximadas de 18 x 60 x 80 mm. Este material foi escolhido por ser de fácil usinagem e permitir um bom acabamento nas operações de fresamento.

4.2.1 Programação pelo software CAM

Para gerar as trajetórias, com base no modelo tridimensional criado, foram programadas as operações pelo software CAM. Inicialmente definiram-se as

dimensões do material bruto como também a geometria da ferramenta. A ferramenta programada foi uma fresa topo (*Flat Mill*) com diâmetro de 5 mm, 4 arestas de corte e comprimento máximo de usinagem de 13 mm. As configurações da geometria da ferramenta estão representadas na Figura 37.

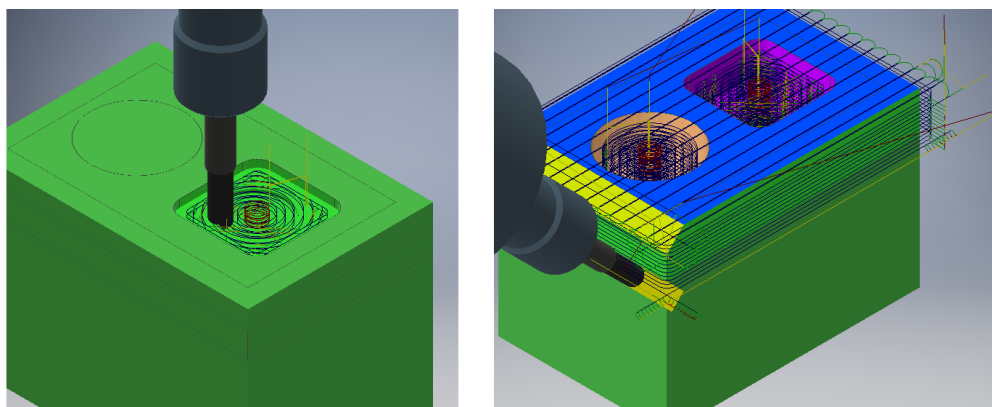
Figura 37 - Tela de configurações de ferramenta do Autodesk Inventor HSM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com as configurações iniciais definidas, foram criadas as trajetórias de usinagem com base nos recursos disponibilizados no software, respeitando as limitações da máquina com relação aos ângulos e cursos admissíveis. A Figura 38 mostra a simulação gerada pelo software.

Figura 38 - Simulação da usinagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após verificar a trajetória percorrida pela ferramenta na simulação, foi gerado o arquivo CNC para a usinagem, utilizando as configurações de pós-processamento criadas.

4.2.2 Execução

Para a execução da usinagem, foi primeiramente alinhado o posicionamento no eixo C, com o auxílio de um esquadro e com a peça fixada no centro da mesa. Também foi realizada a atualização dos valores de referência para a ferramenta utilizada.

Durante a usinagem percebeu-se uma boa rigidez no conjunto de movimentação XYZ, bem como um bom desempenho do *spindle*, possibilitando um bom acabamento superficial. A Figura 39 mostra a etapa inicial da usinagem.

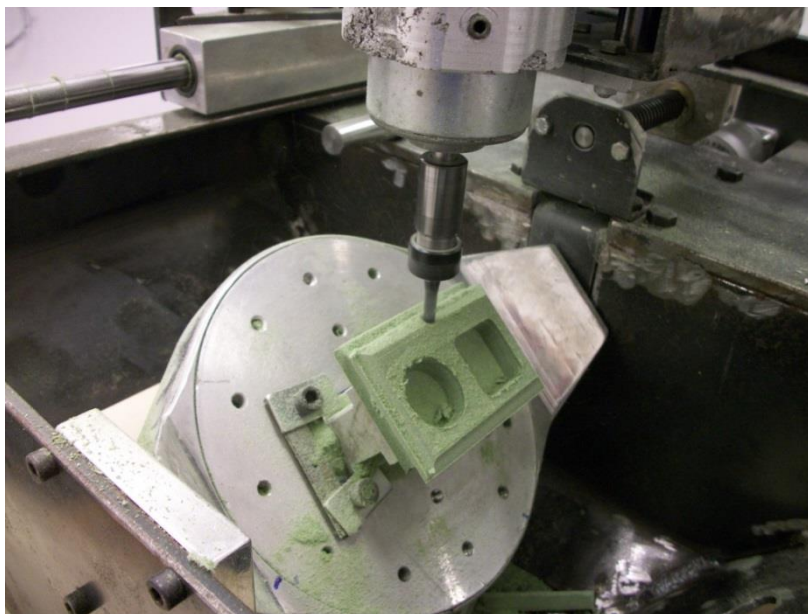
Figura 39 - Usinagem de contorno circular



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os eixos B e C, foram verificadas folgas excessivas e uma defasagem no posicionamento no momento que a ferramenta produziu um maior esforço de corte. A Figura 40 mostra a usinagem após o reposicionamento dos eixos B e C.

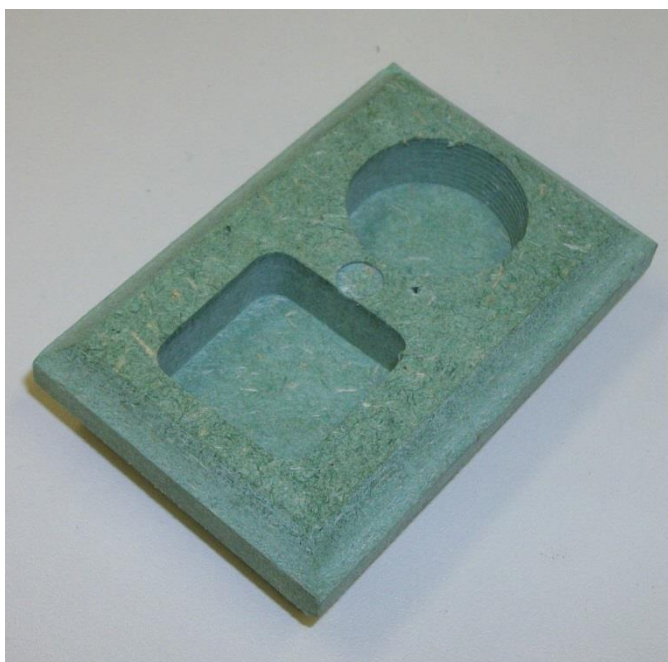
Figura 40 - Usinagem após o reposicionamento angular



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo com a variação no posicionamento pelas folgas nos eixos B e C, foi possível realizar a usinagem completa da peça. A Figura 41 mostra o resultado final da usinagem.

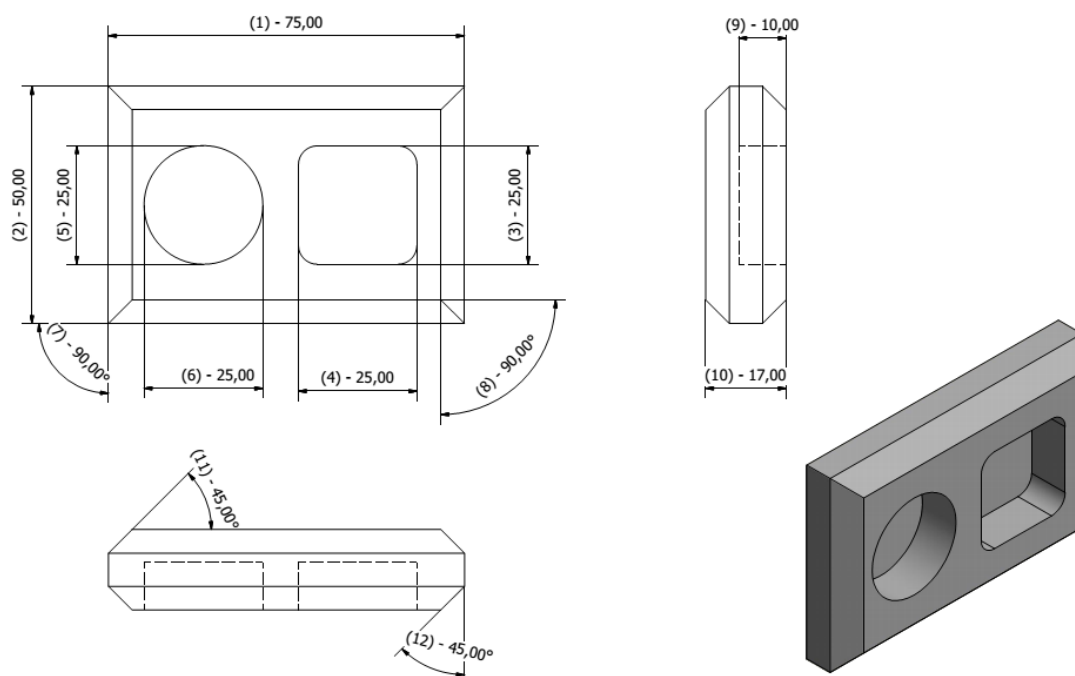
Figura 41 – Resultado final



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após completar a usinagem foram feitas medições comparando o modelo criado em CAD com a peça usinada. A Figura 42 faz a representação das principais cotas do modelo. A Tabela 3 mostra um comparativo entre as dimensões definidas e as dimensões medidas.

Figura 42 - Cotas do modelo criado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Comparativo entre as dimensões definidas e as dimensões obtidas.

Nº	Definida	Obtida	Variação	Eixo principal na usinagem
1	75,00	74,95	-0,05	Eixo Y
2	50,00	49,97	-0,03	Eixo X
3	25,00	24,73	-0,27	Eixo X
4	25,00	24,93	-0,07	Eixo Y
5	25,00	24,75	-0,05	Eixo X
6	25,00	25,98	-0,02	Eixo Y
7	90,00	90	0	Eixo X e Y
8	90,00	91	1	Eixo C
9	10,00	9,95	-0,05	Eixo Z
10	17,00	17,1	0,1	Eixo Z
11	45,00	42	-3	Eixo B
12	45,00	41	-4	Eixo B

Fonte: Elaborado pelo autor

Pelos resultados obtidos, percebe-se que as dimensões relacionadas ao eixo B tiveram o maior desvio, fato explicado pela constatação de grandes folgas neste eixo que não permitem um posicionamento rígido. No eixo X percebe-se um desvio superior a 0,2 na operação de usinagem dos perfis internos, podendo ser explicado pelo maior esforço de corte nesta operação e pela disposição dos eixos permitirem a movimentação angular no eixo B.

5 CONCLUSÕES

O trabalho realizado atingiu os objetivos propostos, da construção do protótipo de uma fresadora CNC de 5 eixos. Foi validado também o propósito inicial de integração de um software CAD/CAM com o conjunto de software e hardware de controle CNC desenvolvido.

A contribuição deste trabalho está na validação do desenvolvimento do sistema de controle CNC de cinco eixos de baixo custo, sendo que esta tecnologia demonstra um grande potencial de crescimento.

Para desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se o aprimoramento dos recursos disponíveis no software de controle, inserindo funções que auxiliam a operação. Também seria válida a criação de novos códigos, permitindo o acionamento no caso da instalação de acessórios, tais como, bomba para refrigeração, sistema de limpeza por ar comprimido, entre outros.

Na movimentação dos eixos, o estudo da aplicação de servo-motores compondo um sistema de malha fechada de controle, proporcionaria maior confiabilidade no posicionamento. Para os eixos angulares, a utilização de redutores de maior precisão, bem como a instalação de um mecanismo de trava durante a usinagem eliminaria os problemas relacionados baixa precisão angular.

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, A. M. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.
- AMORIM, H. **Processos de fabricação por usinagem – Fresamento**, Material didático do curso de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre. 2003.
- ARDUINO. **Arduino Mega 2560**. 2015. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>>. Acesso em 1 de junho de 2015.
- ATLASMAQ; **Fresadora Universal Atlasmaq FHA-40**. 2015. Disponível em <http://www.atlasmaq.com.br/MaquinaNova/Fresadora-Universal-Atlasmaq-FHA-40-cod-162-49>, Acesso em 30 de maio de 2015.
- AUTODESK. **Take control with next generation integrated CAM**. Disponível em <<http://cam.autodesk.com/>> Acesso em 1 de junho de 2015.
- AZEVEDO, A. L. **Os Primórdios do controle numérico**. 2008. Portal Mundo CNC, Disponível em: < <http://www.mundocnc.com.br/historico.php>>. Acesso em 2 de agosto de 2015.
- BORGES, A. A aposta da indústria nos cinco eixos. **Usinagem-Tech**, São Paulo, n. 9, p. 8-14, Julho/Agosto 2012.
- BORGES, A. Robôs que usinam. **Usinagem-Tech**, São Paulo, n. 3, p. 6-12, Março/Abril 2011.
- BRANCO, R. **Mecanismo de Acionamento Importante - Redutor de Velocidade Cicloidal**. 2013. Manutenção e Suprimentos, Disponível em: < <http://www.manutencaoessuprimentos.com.br/conteudo/7550-mecanismo-de-acionamento-importante-redutor-de-velocidade-cicloidal/>>. Acesso em 20 de agosto de 2015.
- BRITES, Felipe G.; SANTOS, Vinicius P. de A. **Motor de Passo**. Universidade Federal Fluminense, Grupo PET-Tele, Niterói, 2008.
- CALMANOVICI, C. E. A inovação, a competitividade e a projeção mundial das empresas brasileiras. **Revista USP**, São Paulo, n. 89, maio 2011. Disponível em <http://rusp.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-99892011000200013&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 23 maio 2015.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2ed, McGraw-Hill, São Paulo, 1986.
- CONSTANDINO, T.G. Stepper Motors Uncovered (2), **Elektor Electronics**, London, n12, p54, 2013 ISSN: 0268-4519
- COPPINI, N. L.; DINIZ, A. E.; MARCONDES, C. F. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8ª. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

CORREA E TOLEDO. **Fresadora Universal KFU-3**. Disponível em: <http://www.correaetoledo.com.br/site/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=401&virtuemart_category_id=26>. Acesso em 8 de outubro de 2015.

DARALI. **Cycloidal Speed Reducers**. 2012. Disponível em: <<http://www.darali.com/>>. Acesso em 21 de agosto de 2015.

DELAI, A. L. **Sistemas embarcados: A computação invisível**. 2013. Guia do Hardware, Disponível em: <<http://www.hardware.com.br/artigos/sistemas-embarcados-computacao-invisivel>> Acesso em 12 de junho de 2015.

DMG MORI. **Centro de precisão de 5 eixos com tecnologia linear**. Disponível em: <<http://br.dmgmori.com/produtos/tecnologia-de-fresamento/centros-de-precis%C3%A3o-para-corte-em-alta-velocidade/hsc/hsc-20-linear#Intro>>. Acesso em 15 de outubro de 2015.

ELECTRODRAGON. **TB6560 3A Stepper Motor Driver Board Single-Axis**. 2015. Disponível em: <http://www.electrodragon.com/w/TB6560_3A_Stepper_Motor_Driver_Board_Single-Axis>. Acesso em 02 outubro de 2015.

FERNANDES, J. P. F. **Análise cinemática e dinâmica de mecanismos com recursos a meios computacionais**. Monografia, DEM - Universidade do Minho, Guimarães, 2000.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FONSECA, E.G.P.; VEGA, A.S. **Tutorial sobre introdução a projetos utilizando o kit de desenvolvimento Arduino**. Anais: XXXIX – Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Blumenau: FURB, 2011.

GOBBI, M. A. **Desenvolvimento de um sistema automatizado para prototipagem de placas de circuito impresso**. UNIVATES. Lajeado, 2014.

INVENTABLES. **Quiet Cut Spindle: Add a strong and very quiet spindle to your CNC router**. 2015. Disponível em: <<https://www.inventables.com/technologies/quiet-cut-spindle>>. Acesso em: 25 de outubro de 2015.

JUNIOR, A. S.; JUNIOR, O. C.; NETO, A. I. **Processo de prototipagem rápida por deposição ou remoção de material na concepção de novos produtos - Uma abordagem comparativa**. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu, PR, 9 a 11 Outubro 2007.

KASSOUF, S. Sistemas de Atuadores Lineares. **Mecatrônica Atual**, São Paulo, n. 11, Setembro-2003. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1099-sistemas-de-atuadores-lineares?start=1>> Acesso em 20 de agosto de 2015.

LACERDA, F. B. **Análise da viabilidade da inserção de centro de usinagem cinco eixos no processo de fresamento de moldes**. Dissertação de Mestrado, PPGE-UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, 2013.

LYRA, P. V. A. **Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática**. Trabalho de Graduação, Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2010.

MACHADO, A. Comando numérico aplicado às máquinas-ferramenta. **Mecatrônica Atual**, São Paulo, n. 16, p. 22-26, Julho-2004.

MADISON, J. **CNC Machining Handbook**. New York: Industrial Press Inc., 1996.

MIRALLES, C. E. **Análise de Estratégias de Corte no Fresamento com 5 eixos**. Dissertação de Mestrado, PPGE-UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, 2009.

NATIONAL INSTRUMENTS; **Stepper Motors and Encoders**. 2009. Disponível em <http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_steppersandencoders.pdf> Acesso em 2 de junho de 2015.

NMB CORPORATION. **Precision Step Motors**. California, 1998. Disponível em: <http://cnc25.free.fr/documentation/moteurs%20pap/pap_nmb.pdf>. Acesso em 04 outubro de 2015.

PAZOS, F. **Automação de sistemas e robótica**. Axcel Books, Rio de Janeiro, 2002.

PEREIRA, A. G. **Desenvolvimento e avaliação de um editor para a programação CN em centros de usinagem**. Dissertação de Mestrado CPGEM – UFP, Curitiba, 2003.

PEREIRA, C. T.; AZEVEDO, G. S. de; ABREU, T. F. **Retrofitting do controle e implementação do quarto e quinto eixo em uma fresadora CNC de pequeno porte**. 2013. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Mecatrônica Industrial) - (DAELN/DAMEC), UTFP. Curitiba, 2014.

ROMI. **Centro de Usinagem Vertical 5 Eixos ROMI DCM 620-5X e ROMI DCM 620-5F**. Disponível em: <http://www.romi.com.br/index.php?id=mf_romi_dcm62&L=2%20and%20char%28124%29%20user%20char%28124%29%3D0>. Acesso em 4 de outubro de 2015.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**; tradução J. B. AGUIAR, J. M. AGUIAR. Artmed, Porto Alegre, 2005.

SIMON, A. T. XII Inventário MM: as máquinas-ferramenta de usinagem instaladas no parque industrial brasileiro. **Máquinas e Metais**, 10 Janeiro 2014. Disponível em: <http://www.arandanet.com.br/midiaonline/maquinas_metalis> Acesso em: 23 Março 2015.

SOUZA, A. F. Integração entre sistemas CAD/CAM e geração de programas para máquinas CNC. **Mecatrônica Fácil**, São Paulo, n. 25, Novembro/Dezembro-2005.

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia Integrada por Computador e sistemas CAD/CAM/CNC**. São Paulo: Artliber, 2009.

SOUZA, G. O. **Avaliação da aplicação do fresamento em 5 eixos a conjuntos de superfícies complexas**. 2011. 218f. Tese em engenharia Aeronáutica e Mecânica – ITA, São José dos Campos, 2011.

STOETERAU, R.L.; **Projeto de máquinas-ferramentas**. CTDEM – UFSC. Florianópolis, 2004.

TOSHIBA. **TB6560AHQ Usage Considerations**. 2009. Disponível em: <http://toshiba.semicon-storage.com/info/lookup.jsp?pid=TB6560AHQ&lang=pt_br®ion=nscsa&sug=1> Acesso em 12 de agosto de 2015.

YAMA SEIKI. **5-AXIS MILLING**. Disponível em: <http://www.yamaseiki.com/yama_en/milling/5-axes/index.htm>. Acesso em 4 de outubro de 2015.