



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS VII – GOVERNADOR ANTÔNIO MARIZ  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS  
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**ROLAND MONTALVAN PIRES TORRES FILHO**

**PROPOSTA DE UMA ARQUITETURA DE MÁQUINA CNC  
COM BAIXO CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO E CONTROLE  
DE MANUFATURA SEM PERDA DE QUALIDADE DE  
PRODUÇÃO**

**PATOS – PB**

**2019**

**ROLAND MONTALVAN PIRES TORRES FILHO**

**PROPOSTA DE UMA ARQUITETURA DE MÁQUINA CNC  
COM BAIXO CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO E CONTROLE  
DE MANUFATURA SEM PERDA DE QUALIDADE DE  
PRODUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento à exigência para obtenção do grau de Bacharel em Computação.

Orientador: Prof. Mrc. Jucelio Soares dos Santos

**PATOS – PB**

**2019**

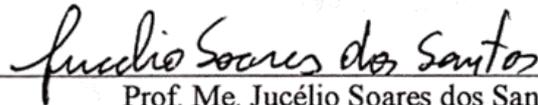
Roland Montalvan Pires Torres Filho

**Proposta de uma arquitetura de máquina CNC com baixo custo de implementação e controle de manufatura sem perda de qualidade de produção**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciências da Computação da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento à exigência para obtenção do grau de Bacharel em Ciências da Computação.

Aprovado em 09/04/2019

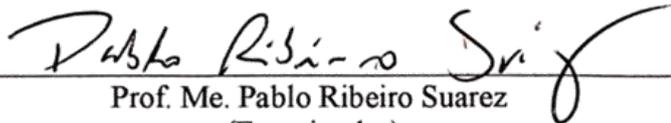
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Jucélio Soares dos Santos  
(Orientador)



Prof. Me. Pablo Roberto Fernandes de Oliveira  
(Examinador)



Prof. Me. Pablo Ribeiro Suarez  
(Examinador)

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

T693p Torres Filho, Roland Montalvan Pires.

Proposta de uma arquitetura de máquina cnc com baixo custo de implementação e controle de manufatura sem perda de qualidade de produção [manuscrito] / Roland Montalvan Pires Torres Filho. - 2019.

73 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Computação) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas , 2019.

"Orientação : Prof. Me. Jucelio Soares dos Santos ,  
Coordenação do Curso de Ciências Exatas - CCEA."

1. Controle Numérico Computacional. 2. Código aberto. 3. Fresadora. 4. Arquitetura. I. Título

21. ed. CDD 005.113

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço toda equipe docente e os amigos pelos conhecimentos, forças e carinhos comutados nos momentos passados. Sou grato, especialmente, aos meus pais, Edilúcia Limeira Ramos e Roland Montalvan Pires Torres, e minha companheira, Raquel Annes Fagundes Silva, que tanto dispensaram esforços pela minha educação, sendo guias no foco mantido durante o curso. Meu imenso obrigado ao meu irmão, Ronald Ramos Torres, pelas constantes boas ideias oferecidas na vida, além de um enorme incentivador nos conhecimentos tecnológicos.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi reduzir os custos de implementação e controle na manufatura em máquinas CNC, sem perder qualidade na produção, levando em conta o desenvolvimento de uma arquitetura que proporciona portabilidade e estenda suas possibilidades para trabalhar peças com amplo tamanho. Para tanto, foi: i) Investigado trabalhos relacionados e estudada a bibliografia correspondente a área de desenvolvimento de máquinas CNC com arquitetura diferenciada; ii) Concebido/desenvolvido uma máquina CNC com arquitetura diferenciada para solucionar o problema de portabilidade, porém com capacidade de trabalho em peças de amplo tamanho; iii) Analisado e traçado uma solução com método de sincronização com controle e geração dos códigos CNC, prezando por opções de código aberto e com custos reduzidos em comparação as máquinas CNC no mercado; Por fim, iv) analisada arquitetura da máquina CNC proposta neste trabalho em comparação com uma máquina convencional em relação aos seguintes atributos de qualidade: custo, fidelidade, tempo de produção na manufatura e portabilidade. Como resultados, temos o desenvolvimento de uma arquitetura física de máquina CNC singular, obtendo também redução significativa nos custos para sua implementação, quando comparado às opções similares disponíveis no mercado. Nos experimentos realizados para avaliação da fidelidade e do tempo foi analisado o nível de precisão nos deslocamentos entre os planos X, Y e Z, variando na margem de erro de 0,2% entre as peças fresadas e não havendo diferença no tempo de fresagem entre as peças. Em relação a sua portabilidade, a máquina CNC proposta neste trabalho apresenta ampliação nas possibilidades de trabalho, vista a possibilidade de impressão em matéria prima com dimensões maiores que as da própria máquina.

**Palavras-chave:** Controle Numérico Computacional; Código aberto; Fresadora; Arquitetura; Custo.

## ABSTRACT

The objective of this document was to reduce the costs of implementation and control in CNC machine manufacturing, without losing quality in production, taking into account the development of an architecture that provides portability and extends its possibilities to work with large size parts. To do this, it was: i) Investigated related works and studied the bibliography corresponding to the development area of CNC machines with differentiated architecture; ii) Designed / developed a CNC machine with differentiated architecture to solve the problem of portability, but with capacity to work on large parts; iii) Analyzed and traced a solution with synchronization method with control and generation of CNC codes, pricing for *open source* options and with reduced costs compared to CNC machines in the market; Finally, we analyzed the CNC machine architecture proposed in this work in comparison to a conventional machine in relation to the following quality attributes: cost, fidelity, production time in manufacture and portability. As a result, we have developed a unique CNC machine physical architecture, also achieving a significant cost reduction for its implementation when compared to similar options available in the market. In the experiments carried out for evaluation of fidelity and the time, the level of precision in the displacements between the X, Y and Z planes was analyzed, varying in margin of error of 0.2% between milled parts and no difference in milling time between pieces. Regarding its portability, the CNC machine proposed in this work presents an increase in the possibilities of work, considering the possibility of printing on raw material with dimensions larger than those of the machine itself.

**Keywords:** Computational Numerical Control; *Open source*; Milling machine; Architecture; Cost.

## LISTA DE FIGURAS

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Figura 1.</b>  | Mini CNC Fresadora   | 20 |
| <b>Figura 2.</b>  | Demonstração dos principais fusos no mercado                     | 22 |
| <b>Figura 3.</b>  | Exemplo de trilho linear   | 23 |
| <b>Figura 4.</b>  | Interior de motor de passo híbrido                               | 24 |
| <b>Figura 5.</b>  | Exemplo de motor de passo real                                   | 25 |
| <b>Figura 6.</b>  | Diagrama de integração da controladora ao sistema                | 27 |
| <b>Figura 7.</b>  | Diagrama de integração geral da ferramenta                       | 29 |
| <b>Figura 8.</b>  | Planejamento da arquitetura estrutural da ferramenta             | 31 |
| <b>Figura 9.</b>  | Peça suporte para eixo X   | 36 |
| <b>Figura 10.</b> | Peça suporte para eixo Y   | 37 |
| <b>Figura 11.</b> | Peça suporte para eixo Z   | 37 |
| <b>Figura 12.</b> | Apresentação de estrutura montada                                | 38 |
| <b>Figura 13.</b> | Ferramenta CAM endereçadora de código G                          | 41 |
| <b>Figura 14.</b> | Ferramenta de design gráfico                                     | 42 |
| <b>Figura 15.</b> | Ferramenta CAM visualizando arquivo SVG                          | 43 |
| <b>Figura 16.</b> | Ferramenta CAM após geração de código G                          | 44 |
| <b>Figura 17.</b> | Amostra de verificação   | 45 |
| <b>Figura 18.</b> | <i>Plug-in Image 2 Surface</i> integrado ao software Fusion.     | 46 |
| <b>Figura 19.</b> | Primeiro exemplo de peça produzida com código gerado pelo Fusion | 47 |
| <b>Figura 20.</b> | Imagem em escala de cinza  | 47 |
| <b>Figura 21.</b> | Segundo exemplo de peça produzida com código gerado pelo Fusion  | 48 |
| <b>Figura 22.</b> | Amostra do Teste 1   | 55 |
| <b>Figura 23.</b> | Amostra do Teste 2   | 56 |

## LISTA DE TABELAS

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Tabela 1.</b> | Características dos motores de passo                    | 34 |
| <b>Tabela 2.</b> | Itens selecionados para implementação da ferramenta CNC | 35 |
| <b>Tabela 3.</b> | Tempo dispensado na implementação da máquina            | 38 |
| <b>Tabela 4.</b> | Comparativo de curso quanto às máquinas de mercado      | 54 |
| <b>Tabela 5.</b> | Resultados do Teste 1                                   | 55 |
| <b>Tabela 6.</b> | Resultados do Teste 2                                   | 57 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                   |  |
|-------------------|--|
| A                 | Amperes                                  |
| ATMega328         | Modelo de Microcontrolador Arduino       |
| BK12/BF12         | Modelos de Mancais                       |
| CAD               | Computer Aided Design                    |
| CAM               | Computer Aided Manufacturing             |
| CNC               | Computer Numeric Control                 |
| CP                | Controle de Pulso                        |
| DC                | Descarga Contínua                        |
| DIR               | Direção                                  |
| DNC               | Controle Numérico Direto                 |
| EIA               | Electronic Industries Association        |
| G-code            | Código G                                 |
| g.cm <sup>2</sup> | Inércia (Gramas por Centímetro Quadrado) |
| JK57HS56-2804     | Modelo de Motor de Passo                 |
| MCU               | Microcontrolador                         |
| MDI               | Manual Data Input                        |
| MIT               | Massachusetts Institute of Technology    |
| mH                | Inductance (Megahenry)                   |
| mm                | Milímetros                               |
| NC                | Numerical Control                        |
| NEMA              | Motor Manufacture                        |
| Nm                | Torque (Newton-metro)                    |
| R\$               | Real Brasileiro                          |
| SBR12             | Modelo de Trilho Linear                  |
| SBR10             | Modelo de Trilho Linear                  |
| SFU1605           | Modelo de Fuso de Esferas                |
| TB6600            | Referência Driver para Motor de Passo    |
| V                 | Volt                                     |
| $\Omega$          | Resistência (Ohm)                        |

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>   | <b>12</b> |
| 1.1. Cenário Técnico Científico                              | 12        |
| 1.2. Problemática  | 13        |
| 1.3. Proposta de Solução                                     | 13        |
| 1.4. Justificativa   | 13        |
| 1.5. Objetivos   | 14        |
| 1.5.1. Objetivo Geral  | 14        |
| 1.5.2. Objetivos Específicos                                 | 14        |
| 1.6. Metodologia   | 15        |
| 1.7. Estrutura do Trabalho                                   | 16        |
| <b>2. TEMAS E TRABALHOS RELACIONADOS</b>                     | <b>17</b> |
| 2.1. Conceitos básicos da CNC                                | 17        |
| 2.2. Fresadora   | 18        |
| 2.3. Ferramenta CNC  | 19        |
| 2.4. Levantamento Estrutural                                 | 21        |
| 2.5. Controle e Comunicação                                  | 25        |
| <b>3. ARQUITETURA DA MÁQUINA CNC</b>                         | <b>30</b> |
| 3.1. Especificação dos Requisitos da Máquina CNC             | 30        |
| 3.2. Projeto Estrutural da Máquina CNC                       | 30        |
| 3.2.1 Estrutura  | 32        |
| 3.2.2 Guias Lineares   | 32        |
| 3.2.3 Fusos  | 33        |
| 3.2.4 Mancais  | 33        |
| 3.2.5 Conectores   | 33        |
| 3.2.6 Motores de Passo                                       | 34        |
| 3.2.7 Estimativa de Custos                                   | 34        |
| 3.3. Procedimento de Execução da Máquina CNC                 | 35        |
| <b>4. DESIGN DA PESQUISA</b>                                 | <b>49</b> |
| 4.1. Técnica e métrica                                       | 49        |
| 4.2. Identificação das variáveis dependentes e independentes | 49        |
| 4.3. Seleção dos itens                                       | 50        |
| 4.4. Preparação  | 50        |
| 4.4.1. Compras de ferramentas                                | 50        |
| 4.4.2. Equipamentos necessários                              | 51        |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.5. | Análise de dados   | 51 |
| 4.6. | Análise às ameaças   | 51 |
| 4.7. | Execução da pesquisa   | 51 |
| 4.8. | Divulgação   | 53 |
| 5.   | <b>ANÁLISE E RESULTADOS</b>                                    | 54 |
| 5.1. | Análise de Custo   | 54 |
| 5.2. | Análise de Fidelidade  | 54 |
| 5.3. | Análise de Tempo   | 57 |
| 5.4. | Análise de Portabilidade                                       | 58 |
| 6.   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> | 60 |
| 6.1. | Considerações Finais   | 60 |
| 6.2. | Contribuições da Pesquisa                                      | 60 |
| 6.3. | Limitações da Pesquisa   | 61 |
| 6.4. | Sugestões para Trabalhos Futuros                               | 61 |
|      | <b>REFERÊNCIAS</b>   | 63 |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Cenário Técnico Científico

Consumidores têm direcionado suas necessidades aos produtos feitos de forma singular, criados para resolver problemas específicos. Envolvidos com a rapidez das transformações na realidade e lacunas no tocante às instituições empresariais, Silva et al (2002) sugere que incidências desde legislações, dentre outros inúmeros fatores sociais, cada vez mais nos fazem sentir a imposição das novas situações, despertando a necessidade de mostrar alternativas diferentes a velhos problemas. Os processos para manufatura de bens de consumo tem se mostrado versáteis em solucionar essas necessidades, sem perder o caráter de concepção única, preservando os atributos de cada cliente.

No passado, os processos de fabricação eram considerados permissíveis apenas às grandes empresas. Recentemente, de acordo com Lins et al (2017), esses processos têm ganhado disponibilidade no mercado, em menor escala, para contemplação de pequenos produtores e demais entusiastas que precisam produzir peças extremamente específicas, apontando aberturas de acesso ao livre comércio, como início um novo cenário econômico, tendo como combustível a popularização de equipamentos para produção de materiais com acabamento industrial, a ponto de serem implementados pelo consumidor ou próximo dele.

Como embasamento desta movimentação, temos as ferramentas *Computer Numeric Control* (CNC) que utilizam informações passadas por computadores para realizar determinadas tarefas por meio de motores que guiam o deslocamento de uma cabeça de impressão (laser, bico extrusor, fresa e etc.), entre planos tridimensionais popularmente representados como X, Y e Z. A ideia nasce em meados dos anos 50, auxiliando grandes indústrias na automação de seus serviços para suprir a necessidade de mercado nesta época. Mais tarde o somatório dos aprimoramentos nos estudos da área mostra uma difusão de possibilidades imensas para implementação de projetos baseados nas tecnologias CNC (SHUNKUN et al, 2008).

## 1.2. Problemática

Presenciando uma lacuna sobre um modelo de CNC que disponha mais versatilidade as tecnologias CNC, ainda considerando o tema como escasso na região de vivência dos autores devido o alto custo para adquirir algum modelo de CNC, como descrito por Sarguroh (2018), foi dado início aos estudos considerando a possibilidade de construção autônoma da máquina a fim de conhecer a infinidade de possibilidades habilitada ao consolidar a implementação de uma tecnologia como esta.

## 1.3. Proposta de Solução

O foco desta pesquisa está em diminuir os custos no desenvolvimento, sincronização e controle de uma ferramenta baseada na tecnologia CNC, fundamentada em princípios de portabilidade com intenção de ampliar o universo de trabalho desta máquina.

Equipamentos com possibilidade de modularização parecem suprir a integrante observada pela dinâmica nos processos de produção, a capacidade de reorganização ágil e diminuição de dependências, em nível de hardware e software, são alguns dos fatores favorecidos pela escolha de equipamentos com alta capacidade modular (LIU, 2008).

Assim, planeja-se o desenvolvimento de uma fresadora CNC para fins diversos, prezando por princípios de portabilidade que possam evoluir suas possibilidades de uso e áreas úteis sem perder qualidade no produto final. Por meio da análise de métodos tradicionais de comunicação e controle, em comparações às opções *open source* disponíveis, para integração entre microcontrolador (MCU) e microprocessador, com isso facilitando o acesso aos meios de sincronização para fins acadêmicos e *hobbistas* da área.

## 1.4. Justificativa

A tecnologia faz parte de nossas vidas de forma tão intensa que não conseguimos imaginar o mundo abdicar o poder dos eletrônicos, e tudo isso foi

possível graças à inserção dos micros controladores proporcionando portabilidade as mais diversas áreas tecnológicas, como por exemplo, os computadores pessoais, smartphones e tantas outras inovações apresentadas.

Simon (2001) refere às principais causas relacionadas às deficiências quanta a disponibilidade e a flexibilidade das ferramentas CNC, que estreitam tanto na preparação da máquina como a elaboração do programa CNC, a transferência do programa para a máquina e a pré-ajustagem das ferramentas.

Ao evidenciar um quadro, descrito por Polastrini (2018), onde sistemas computacionais baseados em microprocessadores podem manter total sincronização com microcontroladores de diversos tipos, percebe-se uma forma de programar a gestão por comando numérico computadorizado em uma ferramenta fresadora. Por meio de equipamentos de hardware encontrados a venda em sites de comércio eletrônico e softwares de baixo custo, com licença aberta ou *open source*, acreditamos ser possível estreitar custos na implementação desta tecnologia.

## **1.5. Objetivos**

Esta seção versa sobre a apresentação dos objetivos geral e específicos que compõem este trabalho.

### **1.5.1. Objetivo Geral**

Reduzir os custos de implementação e controle na manufatura em máquinas CNC, sem perder qualidade na produção, levando em conta o desenvolvimento de uma arquitetura que proporciona portabilidade e estenda suas possibilidades para trabalhar peças com amplo tamanho.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Investigar trabalhos relacionados e estudar a bibliografia correspondente à área de desenvolvimento de máquinas CNC com arquitetura diferenciada;

- Conceber/Desenvolver uma máquina CNC com arquitetura diferenciada para solucionar o problema de portabilidade, porém com capacidade de trabalho em peças de amplo tamanho;
- Analisar e traçar uma solução com método de sincronização com controle e geração dos códigos CNC, prezando por opções de código aberto e com custos reduzidos em comparação às máquinas CNC no mercado;
- Analisar a arquitetura da máquina CNC proposta neste trabalho em comparação com uma máquina convencional em relação aos seguintes atributos de qualidade: custo, fidelidade, tempo de produção na manufatura e portabilidade.

## 1.6. Metodologia

A metodologia deste trabalho obedecerá a uma abordagem mista. A seguir serão detalhadas as 3 (três) etapas para conclusão desta investigação.

- A etapa de **Revisão Bibliográfica** obedeceu a uma lógica quali-quantitativa (PRODANOV; FREITAS, 2013). A primeira consistiu em definir uma arquitetura para a ferramenta a partir das análises levantadas durante o processo de avaliação em relação às tendências disponíveis no mercado. Ao tempo em que é dado andamento no levantamento de referências bibliográficas, com o intuito de obter informações necessárias para a estruturação com diretrizes de portabilidade e expansão no tamanho das peças a serem trabalhadas, ainda prezando por redução de custos para todo o projeto;
- A etapa de **Concepção/Desenvolvimento da Arquitetura da Máquina CNC** obedeceu a uma lógica quali-quantitativa (PRODANOV; FREITAS, 2013). Depois de incorporado o conteúdo, passa-se ao planejamento através de modelos digitais com referências nos materiais disponíveis às diretrizes fixadas. Inicia-se etapa de implementação da ferramenta, após decisão do modelo que solucione os requisitos. Nesta etapa definimos métodos de controle para a ferramenta que atenda aos objetivos supracitados foi o primeiro passo dado. Definidos dispositivos eletromecânicos de gestão e comunicação entre microcontroladores e microprocessadores, adequados às necessidades anteriores;

- A etapa de **Análise da Arquitetura da Máquina CNC** obedeceu a uma lógica quali-quantitativa (PRODANOV; FREITAS, 2013). A partir da definição estrutural completada o projeto a ser desenvolvido e estudado foi conduzido um experimento a fim de analisar a arquitetura de uma máquina CNC proposto neste trabalho em comparação com uma máquina convencional em relação aos seguintes atributos de qualidade: custo, fidelidade, tempo de produção na manufatura e portabilidade.

## **1.7. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 1, é apresentada uma visão geral desta investigação com relação à contextualização do problema, objetivos, metodologia e justificativa do trabalho; no Capítulo 2, são apresentados os temas e trabalhos relacionados à pesquisa; E no Capítulo 3, é apresentada a arquitetura da máquina CNC; e no Capítulo 4, é apresentado o design da pesquisa; no Capítulo 5, são analisados e discutidos os resultados; no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros e ao final, as referências e apêndices utilizados no decorrer da pesquisa.

## 2. TEMAS E TRABALHOS RELACIONADOS

Neste Capítulo é apresentado o embasamento teórico a partir de várias áreas e trabalhos que se relacionam e que permitem caracterizar esta pesquisa. Sendo apresentados conceitos aplicados às máquinas CNC, bem como abordar as peças básicas encontradas a disposição no mercado, para embasamento de aspectos comparativos.

### 2.1. Conceitos básicos da CNC

A tecnologia CNC é descrita por Gonçalves (2007) como a capacidade de automatizar o posicionamento, velocidade e aceleração de máquinas que possibilitam a comunicação com computadores e necessitam dessa gestão para realização de atividades.

A ampla utilização da CNC está relacionada às características chave destas ferramentas, que fornecem automação, precisão, repetição e flexibilidade nos processos de manufatura (LINS et al, 2017). Alguns modelos desta tecnologia podem funcionar de forma completamente automatizada durante um ciclo de usinagem<sup>1</sup>, estendendo as possibilidades de atividades dos funcionários por meio de tempo livre para desempenhar outras tarefas.

Gonçalves (2007) destaca como principais vantagens para utilização da tecnologia CNC, a saber: i) redução do tempo de fabricação e maior controle na sequência das operações, fazendo com que os tempos padrões previstos sejam mais seguros, fornecendo uma maior precisão nos cálculos de custos, nos controles de carga da máquina e do homem. ii) maior controle no consumo de ferramentas. Por se tratar de uma usinagem com esforços, velocidades constantes, uniformes, e repetitivos, fazem com que os desgastes estejam sob controle. Isto facilita ao controle do estoque, ao permitir melhor desenvolvimento e teste de fornecedores, melhor controle por desgaste ao processo das ferramentas, evitando retrabalhos e refugos; iii) redução nos tempos de preparação (setups) tornando viável a produção

---

<sup>1</sup> Usinagem é uma operação que ao conferir à peça forma, as dimensões, o acabamento ou ainda a combinação de qualquer destes itens, na produção de cavacos - uma porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar uma forma geométrica irregular (COSTA, 2006).

de pequenos lotes; iv) redução de itens acabados no estoque, por se possibilitar produção de pequenos lotes; e v) redução nos tempos e na frequência, com que as inspeções de qualidade são efetuadas.

A tecnologia CNC pode ser aplicada em máquinas nos diversos processos de fabricação para usinagem de peças, entre as mais conhecidas e utilizadas encontram-se os tornos, fresadoras, plainas, furadeiras e retificadoras. Tais processos de fabricação ocorrem com remoção de cavacos de forma convencional e são capazes de usinar grande parte das peças desejadas atualmente com menor ou maior grau de complexidade geométrica (LYRA, 2010). Dentre os processos de fabricação pela extração de matéria destaca o fresamento, cujo objetivo é retirar material de peças mediante a rotação de uma ferramenta de corte chamada fresa.

## **2.2. Fresadora**

Fresadora consiste em uma máquina rotativa com uma ponta de corte, arranjada em torno de um eixo tridimensional específico. Sendo capaz de modificar um sólido em outra forma desejada, a partir da extração de matéria para modelagem da peça. Um motor de alta velocidade gera o movimento de corte na ponta da fresa, que vai sendo deslocada ao longo do material trabalhado (LYRA, 2010).

Por meio de manivelas conectadas a fusos, mantêm-se o controle manual no deslocamento tridimensional (X, Y, Z), em que é possível dispor a fresa de corte em um dos eixos e movimentar os outros conforme a necessidade do trabalho. A manipulação dessas máquinas, em processos manuais e em longo prazo, exige elevado nível de concentração e disposição física, podendo levar operadores a saturação por fadiga mental, para isso a intervenção do processamento e controle computacional surgiu no meio como auxílio direto na manutenção da continuidade dos sistemas de produção (GONÇALVES, 2007).

A fresagem por controle computadorizado representa um avanço tecnológico, pois permite maior controle e precisão do processo, além de minimizar esforços físicos do operador, solucionando problemas destacados anteriormente. As fresadoras CNC aparecem no mercado com inúmeras áreas de atuação, possibilitando soluções para os mais diversos tipos de problemas e ainda trabalhando em amplos leques de materiais (LINS et al, 2017).

Sem deixar a desejar na qualidade do trabalho realizado, em seus experimentos Lyra (2010), consegue dispor de um desvio padrão mínimo ao conferir a análise das peças produzidas por uma fresadora CNC, caseira, de baixo custo. Um ponto que fica bem evidente é a pouca incidência de portabilidade nos projetos de desenvolvimento de ferramentas CNC. Encontram-se ferramentas com tamanho reduzido, também temos reduzida sua capacidade de atuação para peças menores.

### **2.3. Ferramenta CNC**

A ferramenta CNC constitui o dispositivo mecânico possível de ser controlado computacionalmente para realização de atividades específicas. Na história das ferramentas CNC, o ano de 1949 marca um grande diferencial para evolução da área, pois é quando surge um interesse da Força Aérea Americana em padronizar e acelerar a produção de alguns equipamentos muito específicos. Unindo esforços científicos com seus fornecedores, conseguem desenvolver um sistema que possibilitou controlar ferramentas em fatores de posicionamento, velocidade e aceleração através de computadores (LINS et al, 2017).

Ao final da década de 50, já havia padrões em análise pela *Electronic Industries Association* (EIA) e *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), porém códigos de máquinas CNC tem sua definição específica pela "ISO 1056:1975", posteriormente atualizada para "ISO 6983-1:1982" (LYRA, 2010).

Tem-se em mente que as dimensões destas máquinas demandaram grandes áreas para execução de suas atividades, mas com a inserção dos circuitos integrados, temos a possibilidade de reduções nos tamanhos das máquinas de comando numérico. O Brasil teve a oportunidade de receber sua primeira CNC em 1967, acentuando a produção nacional como indústria de transformação (LYRA, 2010).

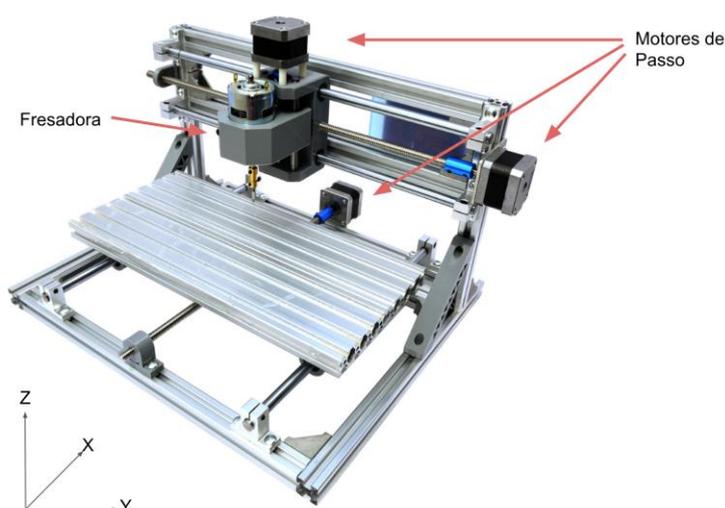
Os destaques de Simon (2001), nessa transição de gerências, são para o operador da máquina que não trabalha mais sozinho na produção das peças, agora temos programadores realizando o início do processo de manufatura. Dada à variedades de ferramentas CNC disponíveis, o programador estuda o desenho da peça para abstrair a forma mais econômica, operações e sequências necessárias para o trabalho da máquina, idealizando as etapas e movimentos executados para

usinar determinada peça. Iniciando assim a documentação da série lógica de eventos, descritos em uma linguagem de comandos específica.

Inicialmente os códigos para estas ferramentas eram denominados *Numerical Control* (NC), pois eram apenas comandos escritos para serem lidos a partir de centrais de comando embarcadas com sistemas para leituras dos códigos NC. Depois de compreendido pelo avanço dos microcomputadores, este sistema toma outra forma de trabalho sendo agora designado para CNC, traduzido como “Controle Numérico Computacional”. As centrais de comando passam agora a receber as informações passadas diretamente pelos computadores para serem executadas (SIMON, 2001).

Seguido um amplo processo evolutivo nas possibilidades e necessidades arquiteturais das peças estruturais para desenvolvimento destas máquinas, na Figura 1 temos um exemplo de estrutura base encontrada no mercado, destacando uma fresadora como instrumento de usinagem, também podemos observar os motores responsáveis pela movimentação dos eixos, que antes eram operados manualmente para fresagem das peças. Existem inúmeros modelos disponíveis no comércio eletrônico, variando de acordo com a necessidade de trabalho.

**Figura 1.** Mini CNC Fresadora.



**Fonte:** MACHIFIT Oficial Store (2018).

Em níveis de precisão, Lins et al (2017) destaca que algumas ferramentas CNC podem alcançar expressões a ordem precisão contendo sete dígitos decimais, fornecendo capacidade de especificação que chega a 0.0000001mm, valor obtido

por meio de uma função comparando peças produzidas repetidamente pela sua fidelidade aos valores de planejamento. Contudo, sua fundamentação está nos tornos mecânicos utilizados na usinagem de peças para inúmeros produtos no mercado, que serão explicados na seção a seguir.

## **2.4. Levantamento Estrutural**

Nesta seção serão explicadas as principais componentes e suas funções utilizadas na arquitetura de uma ferramenta CNC, conforme opções disponíveis em sites de comércio eletrônico, os quais realizam vendas em alcance mundial, para países participantes nos acordos de livre comércio, possibilitando transparente acesso aos equipamentos.

### **2.4.1. Fusos, Mancais e Acopladores**

Manter o controle de um equipamento capaz de realizar movimentos com alto grau de definição, chegando a milésimos de milímetros durante o deslocamento, é possível posterior ao entendimento do que está por trás dessa sinergia. Um conjunto mecânico, precisamente montado, proporciona a dinâmica no sentido necessário (SHUNKUN et al, 2008).

O fuso desempenha a essência do deslocamento neste sistema, ele é um eixo torneado em formato de rosca e ao ser girado desloca uma “castanha” que está presa a superfície que se movimenta, de acordo estudos aplicados por Shivakumar et al (2016). A castanha ou *nut* é vista como uma porca na abstração a um parafuso comum, mas com função alterada, pois o fuso não sai do lugar, apenas gira, enquanto a porca desloca-se no plano.

Dentre modelos disponíveis no comércio, podemos destacar na Figura 2, os representantes que desempenham a tarefa com níveis de precisão satisfatórios. O primeiro, a esquerda da imagem é bastante similar há um parafuso longo, chamado fuso trapezoidal, com uma porca (castanha), que se desloca conforme girado, apresentando resultados aceitáveis, porém com relatos de perda de passos ao se inverter o sentido do motor, por existir o chamado “jogo” entre o fuso e a castanha, seria como enxergar um pequeno espaço que promove a folga que causa uma precisão reduzida em comparação ao segundo modelo visualizado à direita da

imagem, os fusos rolamentados que realizam o mesmo trabalho do fuso anterior, porém com algumas diferenças significativas (PRATHIBHA e AMRITHA, 2017).

**Figura 2.** Demonstração dos principais fusos no mercado.



**Fonte:** MACHIFIT Official Store (2018).

Lyra (2010) destaca a importância dos fusos rolamentados para as conquistas industriais de máquinas CNC, pois estas peças trouxeram à indústria vantagens sobre os antigos fusos trapezoidais, comparando a redução de atrito nos movimentos e deslocamento nas máquinas. Além de possuírem duração de vida mais longa, a redução do atrito leva à menor potência para acionamento, maior velocidade de translação e menor aquecimento.

Prathibha e Amritha (2017) afirma que por se tratar de um sistema que se movimenta em cima de rolamentos perde-se a folga citada no fuso anterior proporcionando posicionamento mais preciso e ainda há uma gama de opções modulares para montagem destes fusos várias superfícies levando há uma simplificação construtiva dos equipamentos.

#### **2.4.2. Guias e Lineares**

Trabalhando em conjunto com o fuso rolamentado, afirma Shivakumar et al (2016), as guias lineares também conhecidas por trilhas lineares são estruturados com deslocamento realizado em cima de esferas, o que obtém um deslocamento com total alinhamento ao plano dimensional que se quer seguir, conforme demonstrado na Figura 3.

**Figura 3.** Exemplo de trilho linear.



**Fonte:** MACHIFIT Official Store (2018).

Incorporado às indústrias no final dos anos 80, inserida a necessidade de mais precisão na manufatura da época, estas peças são amplamente aceitas nos modelos de alta produção. Comparados ao modelo que desempenhava sua função anteriormente, ela conseguiu manter muito mais estabilidade e rigidez ao corpo da ferramenta (SIMON, 2001).

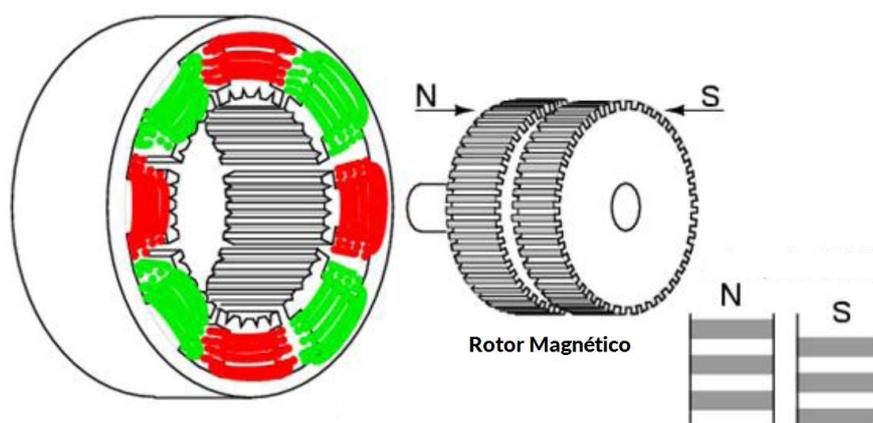
Analisado o plano de deslocamento (X, Y ou Z) em função das cargas de força atuante em cada um deles, podemos aperfeiçoar a vida útil do elemento de máquina. Os fusos devem receber apenas cargas axiais, não radiais, já as guias lineares permitem a ação de forças e momentos de direções diferentes, no entanto, todas as cargas precisam ser consideradas na hora da seleção do componente.

### **2.4.3. Motores de passo**

Com suas características fundamentadas em precisão, o motor de passo se difere de um motor comum, como os encontrados em uns eletrodomésticos e ferramentas elétricas. É uma vertente de transdutor, ele realiza uma conversão, neste caso de energia elétrica em movimento, com a diferença de ser controlado em graus, medidos por passos (ROCHA JUNIOR e TOSTES, 2013).

Motores comuns para aplicações domésticas, onde não precisamos contar graus de um giro realizado, são conhecidos como motores de Descarga Contínua (DC), já os motores de passo dispõem da capacidade de movimentos com precisão ao nível de controlarmos poucos graus de uma volta exercida pelo mesmo. Isto acontece por usar um híbrido de tecnologias desta área, no lugar de termos uma bobina magnética, como nos motores mais simples, passamos a realizar alternância entre duas bobinas, onde uma passa para outra o movimento, de acordo com a direção se deseja exercer. Lyra (2010) exemplifica a mecânica de forma didática, como é visto na Figura 4, onde podemos observar o rotor magnético ligado ao eixo central do motor, e ao redor do extrator, temos as bobinas representadas pelos filamentos verdes e vermelhos, que ao serem polarizadas deslocam o rotor por indução magnética. Com este sistema conseguimos deslocar o eixo central ponto a ponto dentre um giro completo.

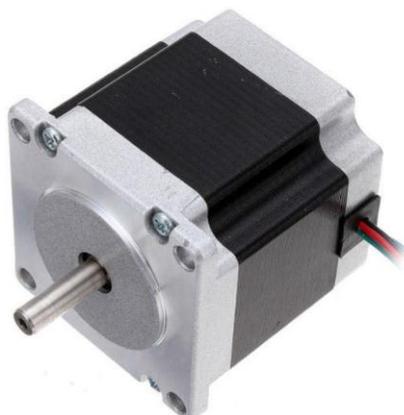
**Figura 4.** Interior de motor de passo híbrido.



**Fonte:** LYRA (2010).

Rocha Júnior e Tostes (2013) explicam sua ampla aceitação na área fazendo com que a demanda de produção fosse acentuada, havendo uma redução no preço deste equipamento, tornando a aquisição para projetos pessoais facilitados. Uma grande possibilidade de aplicações foi atribuída há estes motores devido sua capacidade de especificação em posicionamento como: posicionadores de antenas, braços articulados, microscópios, impressoras e posicionadores XYZ, provando sua versatilidade e fidelidade nos cumprimentos dos requisitos atribuídos. Na Figura 5 podemos conferir um modelo exemplo da peça citada anteriormente.

**Figura 5.** Exemplo de motor de passo real.



**Fonte:** JKM Official Store (2018).

## **2.5. Controle e Comunicação**

Para se obter uma produção eficiente com ferramentas CNC, a programação, comunicação e controle devem atender às exigências de redução de custo, diminuição no tempo de fabricação e elevada qualidade do produto. Para isso é intrínseco que os meios de apoio a essa tarefa sejam eficientes e confiáveis, sendo destacada por Simon (2001), a variedade de procedimentos possíveis para controlar estas ferramentas, são elas: a programação manual, a programação assistida por computador, à programação Manual Data Input (MDI), a programação CNC via CAD/CAM e a programação automatizada por computador.

Na programação manual, prepara-se o programa sem a utilização de recursos computacionais, em que todas as instruções (pontos de inserção, trajetória, velocidade e etc.) são informadas em um documento chamado “manuscrito do programa”. Indica-se a programação manual para peças de fresagem geométrica simples, ao contrário da programação assistida por computador, em que maior parte do trabalho anteriormente manual, passa a ser automatizado. Cálculos anteriormente realizados por programadores passam a ser computado, fator esse que torna esta área atual em evoluções de estudo.

A programação MDI consiste na inserção direta do programa de controle CNC na ferramenta, por meio de um painel de controle que possibilita manusear opções

de sistema da máquina direto em um sistema embarcado, sem auxílio de um microcomputador externo passando os comandos. Este tipo de controle é utilizado em empresas que possuem pouca variedade de peças a ser produzidas, tornando prática a produção das mesmas.

A programação CNC via CAD/CAM é a mais flexível de todos os modelos de controle e também a mais avançada, neste método o programador trabalha em umas estações CAD/CAM, descrito como um microcomputador doméstico, por exemplo, sendo monitoradas as ações tomadas pelos comandos, e monitoradas no display do computador. Esta forma de controle concede ao programador uma abstração de cálculos complexos e conceitos aprofundados de usinagem, além de solucionar falhas da programação manual.

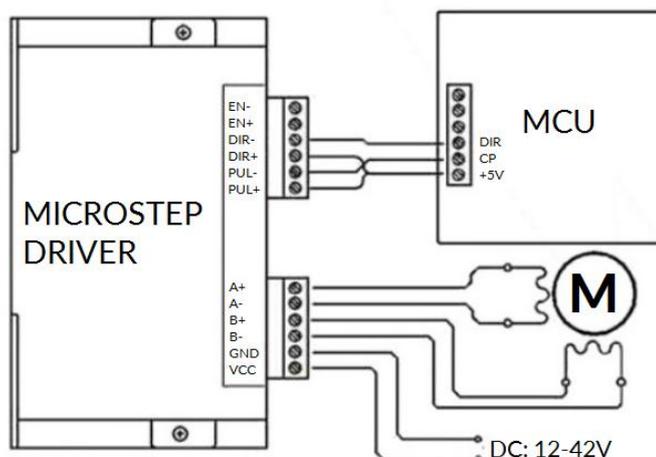
Por fim, temos a programação automatizada por computador, em que a atividade de programação é automatizada por completa por meio de softwares, usando, em sua programação, sistemas CAD/CAM sob muitos aspectos de forma automatizada.

### **2.5.1. Controladores**

À medida que se sofisticou a forma de movimentação exercida pelos motores, também surgiu a necessidade de aprimorar a passagem de energia para obter um total e preciso controle dos motores de passo. Ao dispositivo que realiza esta distribuição elétrica é dado o nome de controladora, também conhecida no mercado como controladora de micro passos, ou *microstep driver*, responsável por interligar a máquina CNC às instruções das estratégias da fresagem passadas pela central de controle ou microcomputador. Geralmente encontradas como circuitos eletrônicos com grau de complexidade variante nas características de cada equipamento a ser controlado (SHIVAKUMAR et al, 2016).

Rocha Júnior e Tostes (2013) nos apresenta um exemplo de *driver* da referência *TB6600*, visto no diagrama da Figura 6, nele observamos que a bobina de cada fase do motor tem uma sua localização descrita na controladora, assim como as demais fases de ligação para comunicação da MCU responsável por enviar os pulsos, referentes aos comandos que serão executados no driver.

**Figura 6.** Diagrama de integração da controladora ao sistema.



**Fonte:** ROCHA JÚNIOR e TOSTES (2013).

No exemplo dado, estamos utilizando um *driver* que consegue trabalhar tensões entre 12V e 42V ao fornecer energia para os motores de passo. O sinal que este tipo de controladora recebe, trabalha na tensão de 5V enviada pela MCU para manter controle de direção do motor e pulsos elétricos, representados respectivamente no sistema por DIR e CP. Por meio destas conexões ela consegue realizar os movimentos dispostos pelo motor.

### 2.5.2. Comunicação

Como meio de comunicação para envio dos programas desenvolvidos pelos programadores das ferramentas CNC, podemos encontrar oito formas conceituadas por Simon (2001), as quais são: i) sistemas de leitoras e perfuradora de fitas; ii) sistema de leitura e gravação de fitas cassetes; iii) transferência de dados via MID; iv) sistema portátil de transferência de dados; v) sistema portátil de *drivers* para disquetes; vi) computadores portáteis; vii) computadores de mesa viii) sistema *IDirect/Distributed Numerical Control (DNC)*.

O sistema de leitura e gravação em fita cassete é um aprimoramento do sistema de leitora e perfuradora de fitas, que tiveram umas séries de desvantagens acumuladas em seu caminho, forçando-as ao desuso, sentidas as vantagens dos sistemas mais atuais como sistemas de computadores portáteis ou de computadores de mesa.

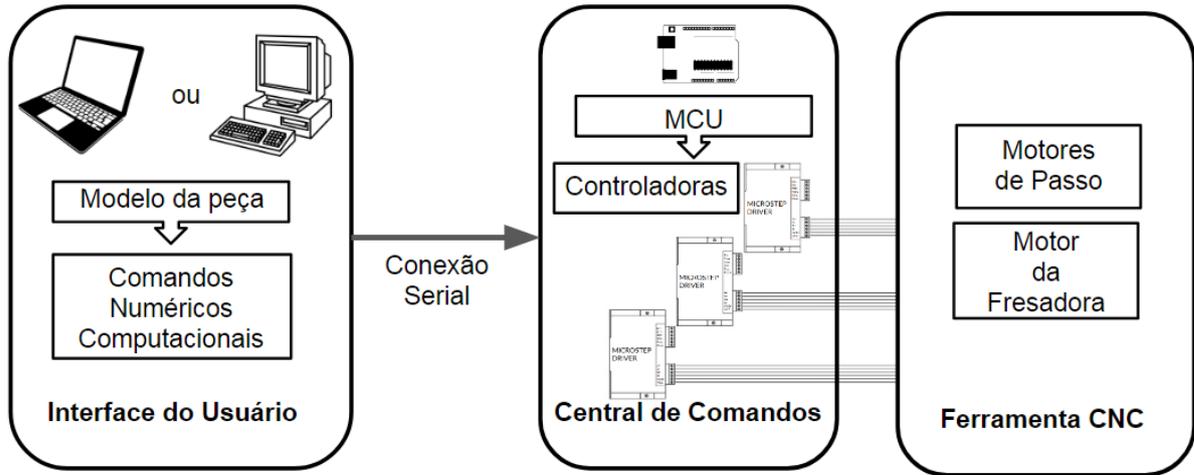
No caso da comunicação MDI, o programa é inserido diretamente no comando da ferramenta, sendo executado à medida que é elaborado. Dada alta incidência do uso de sistemas CAD, utilizando softwares compatíveis para as tarefas, temos uma menor dependência de uso deste modelo de transferência de comandos. Já o sistema portátil de transferência de dados, pode ser visto com um conjunto de *software* e *hardware* integrados, para oferecer comunicação de dados em um ambiente industrial de forma confiável. O sistema portátil de drivers para disquete também foi um meio muito significativo para o armazenamento e transferência de programas, precisando de um pequeno espaço para sua inclusão nos projetos, mas também caem em desuso evidenciadas as vias de portabilidade alcançadas pelos microcomputadores portáteis.

Os sistemas de comunicação através de computadores portáteis garantem imensa portabilidade e flexibilidade aos programadores da área. Com um poder computacional atingido pelos computadores portáteis atuais, executar programas com alta complexidade não é um problema durante o desenvolvimento do programa CNC, apenas é ressaltada a fragilidade deste sistema, que coloca todo processo de planejamento, criação e execução em único dispositivo. O mesmo acontece com os computadores de mesa realizando esta comunicação de controle, com a diferença de redução na portabilidade, sendo mais funcional para um elevado número de máquinas controladas.

Podemos entender o sistema de comunicação DNC, traduzido para Controle Numérico Direto ou Distribuído, como um sistema de dados/informação conectado há uma variedade de máquinas e ferramentas CNC, onde um computador central opera todas as máquinas e ferramentas envolvidas neste processo.

A Figura 7 abstrai por meio de um diagrama de integração sobre as conexões realizadas em um sistema CNC, neste modelo o conceito de comunicação parte de um computador portátil ou de mesa.

**Figura 7.** Diagrama de integração geral da ferramenta.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Este microcomputador com auxílio de ferramentas CAD/CAM consegue manter sincronia com o MCU, que possui um sistema embarcado com definições específicas para esta participação. Ao receber os comandos via porta serial, o MCU realiza a interpretação de qual comando deve ir para determinada controladora, tendo em vista que estamos trabalhando com três no diagrama. Este modelo é descrito em vários dos documentos analisados, possibilitando resultados positivos nos trabalhos encontrados. Ali et al (2016) utiliza este padrão de integração para realizar a manufatura de placas de circuitos eletrônico, através de uma fresadora, com sucesso em suas pesquisas.

Shivakumar et al (2016) refere a praticidade e confiabilidade no uso deste molde de conexão, descrito na Figura 7, para implementação de uma CNC *Plotter* baseada em recursos *open source* com programação dos modelos feita na linguagem Python.

### 3. ARQUITETURA DA MÁQUINA CNC

Neste Capítulo são apresentados os passos dados na construção da máquina CNC. Trata-se de uma máquina com uma arquitetura paralela as encontradas no mercado, porém utilizando ferramentas *open source*, com diretrizes que ampliem suas possibilidades de uso compactando suas dimensões.

#### 3.1. Especificação dos Requisitos da Máquina CNC

Nesta seção são definidas as especificações da ferramenta e sistemas mecânicos para compor sua estrutura. Para isso, expõem-se os requisitos que fundamentam este projeto, a saber:

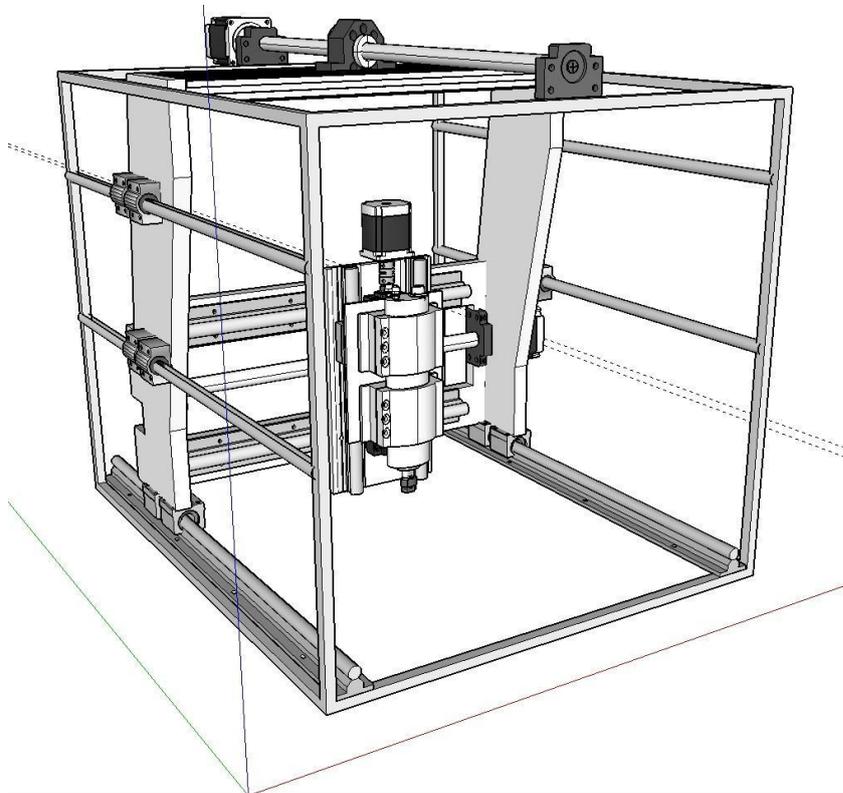
- **Baixo custo:** o desenvolvimento da ferramenta deve levar em conta uma análise da forma de reduzir os custos na implementação de uma ferramenta CNC;
- **Melhoramento:** as diretrizes do projeto devem alcançar ampliação nas possibilidades de uso da ferramenta;
- **Ergonomia:** seu modelo estrutural deve carregar princípios de portabilidade que possibilitem manuseio e deslocamento da ferramenta;
- **Confiabilidade:** a ferramenta deve manter níveis de resistência verificados e divulgados em seus testes, mostrando-se satisfatória para realização de suas atividades;
- **Praticidade:** operação e controle da ferramenta devem apresentar usabilidade satisfatória às tarefas.

#### 3.2. Projeto Estrutural da Máquina CNC

Berbesi et al (2017) e Lyra (2010) ressaltam a importância da arquitetura estrutural que proporciona as bases de deslocamento nos planos dimensionais, não podendo haver desníveis no desenvolvimento da estrutura, sob possibilidade de inviabilizar o projeto por danos físicos as peças ao deslocar alguns planos desnivelado. Sendo assim, para o suporte principal da estrutura, definimos um cubo

de metal, conforme observado na Figura 8, possuindo em seus interiores planos que se movimentam em direções tratadas como eixos X, Y e Z.

**Figura 8.** Planejamento da arquitetura estrutural da ferramenta.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Com o auxílio de três motores de passo para dispor a movimentação dos fusos (um motor para cada fuso), será possível realizar o deslocamento dos planos para fresagem. Os sentidos X e Y podem ser abstraídos como direita e esquerda frente e trás, respectivamente. O terceiro eixo é capaz de se movimentar verticalmente a fim de fazer a função de eixo Z. Este terceiro eixo conta com um micro retífica acoplada em sua base, para realizar a fresagem das peças.

No que se refere aos procedimentos computacionais, consideramos embarcar um *firmware* há um microcontrolador ATmega328, modelo popularizado pelas placas Arduino UNO, para executar a função de controlar a fresadora CNC, para tal será necessário integrar alguns softwares que farão desde a transformação dos desenhos em G-code até a programação do controlador propriamente dita. Na pesquisa de Shivakumar et al (2016) é utilizado um *firmware* interpretador de códigos CNC *open source* embarcado no Arduino para reduzir custos e um software

de código aberto para Fabricação Assistida por Computador (CAM) que é específico da máquina.

### **3.2.1 Estrutura**

Objetivando ampliar a capacidade de trabalho para peças maiores, mesmo com a área de atuação permanecendo dentro dos tamanhos convencionais planejamos a estrutura realçada na Figura 8. Lyra (2010) ressalta cinco características das quais algumas se aplicam diretamente a este projeto, são elas: alta resistência mecânica, fácil usinagem, fácil montagem, ser leve e possuir baixo custo. Tomadas as decisões de escolha por guias lineares com resistência a altas cargas, não se faz necessário levar em consideração uma estrutura com peso leve.

O material escolhido foi avaliado quanto à resistência a tração, facilidade de trabalhar, montagem e preço, optando por uma fundação em perfis aço, também conhecidos popularmente no comércio como cantoneiras.

### **3.2.2 Guias Lineares**

As guias lineares são peças de alto desenvolvimento tecnológico, produzidas para suportar alta capacidade de carga, alta rigidez, capacidade de auto alinhamento, baixo atrito, suavidade na movimentação e alta velocidade. Prathibha (2017) destaca sua grande versatilidade de aplicações para diversos segmentos devido às características, design, facilidade de instalação e excelente custo benefício, ideal para aplicações mais usuais de fresadoras CNC, também atuando no corte por plasma, laser, injetoras de plástico, mesas de coordenadas entre outras.

Prezando por níveis de precisão aumentados, fizemos a opção dos guias lineares modelo SBR, com estrutura contendo eixo temperado, retificado, de alta dureza superficial. Se mostrando ideal para uso em fresadoras por sua alta resistência a cargas de peso e redução de atritos, o que possibilita optar por aço no desenvolvimento na estrutura geral. Possuem base em alumínio anodizado e trabalham em conjunto com rolamentos abertos acoplados aos *pillow blocks*. O diâmetro dos eixos varia, pois na base foi utilizado SBR12, referente a um eixo linear

com 12mm de espessura, nos demais eixos optou-se aos SBR10, possuindo eixos de 10mm de diâmetro.

### **3.2.3 Fusos**

Afirmada por Simon (2001) a relevância de sua simplificação construtiva, o fuso rolamentado é encontrado hoje no mercado disposto em centenas de módulos prontos para diversos tipos de máquinas e aplicações, facilitando projetos, simplificando montagens e garantindo um menor custo. Dando preferência por uma opção portadora de precisão e fácil assimilação, optou-se por implementar os três eixos com fusos rolamentados do modelo SFU1605, de comprimentos 500mm, 450mm e 250mm, possuindo todos a mesma espessura de 16mm de diâmetro com passo de 5mm por giro completo do fuso.

### **3.2.4 Mancais**

Optaram-se como escolha os mancais específicos para os fusos previamente citados, descritos como Mancal de Fuso de Esferas Código BK12/BF12. Construídos em alumínio, estas peças dispõem de alta praticidade de acoplamento, bastando estar fixo em superfície previamente balanceada. O BK12 é referência para o mancal de contato axial enquanto o BF12 represente o mancal com rolamento radial.

### **3.2.5 Conectores**

A opção do acoplamento flexível foi decidida pois, este tipo de conector possibilita os melhores resultados dentro de uma análise custo benefício. Foram adquiridos modelos com junções de diâmetros específicos para os fusos supracitados e motores escolhidos para o projeto, mantendo bom padrão de confiabilidade.

### 3.2.6 Motores de Passo

A ampla utilização dos motores de passo para aplicações eletrônicas é explicada por Rocha (2013), devido ao seu altíssimo grau de precisão em função do controle com baixo consumo de energia, incluindo seu uso desde minúsculos hardwares, como leitores de CD's até aplicações mais robustas como braços robóticos. Idealizados para modularização com as controladoras de micro passos, estes motores possuem suas características que fazem intersecção com este protótipo, por isso optou-se por motores de passo híbrido de duas fases da fabricante JKM, de acordo com a norma NEMA, modelo JK57HS56-2804, cujas características são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Características dos motores de passo.

| Pulso / Grau | Tensão / Fase | Corrente / Fase | Resistência / Fase | Indutância / Fase | Torque Estático | Inércia Rotor         |
|--------------|---------------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| 1,8°         | <48 V         | 2,8 A           | 0,9 Ω              | 2,5 mH            | 1,26 Nm         | 280 g.cm <sup>2</sup> |

**Fonte:** JKM Official Store (2018).

Com um torque estático acima do necessário para a movimentação das superfícies, este motor escolhido mantém total controle do sistema sendo a opção para os 3 (três) eixos da CNC.

### 3.2.7 Estimativa de Custos

Na Tabela 2 estão descritas as opções definidas para montagem do protótipo de uma ferramenta CNC, destacados devidos valores monetários e quantidade necessária para implementação. Para complementar temos a soma do orçamento parcial do projeto.

**Tabela 2.** Itens selecionados para implementação da ferramenta CNC.

| Item  | Preço Unitário (R\$) | Quantidade | Preço Conjunto (R\$) |
|---|----------------------|------------|----------------------|
| Motor de Passo Nema23                         | 72,00                | 4          | 288,00               |
| Driver TB6600                                 | 35,00                | 4          | 140,00               |
| Kit Spindle 500W                              | 348,00               | 1          | 348,00               |
| Fonte 24v 350w 15A                            | 80,00                | 1          | 80,00                |
| Conexão Flexível 6.35mm x 10mm                | 7,50                 | 4          | 30,00                |
| SBR10 200mm trilho linear                     | 68,00                | 1          | 68,00                |
| SBR10 400mm trilho linear 2pcs / SBR10UU 4pcs | 138,00               | 1          | 138,00               |
| SBR12 475mm trilho linear 2pcs / SBR12UU 4pcs | 140,00               | 1          | 140,00               |
| BK12 BF12 suporte para SFU1605                | 75,00                | 3          | 225,00               |
| 500mm Ball Screw SFU1605 End Machined         | 77,00                | 1          | 77,00                |
| 400mm Ball Screw SFU1605 End Machined         | 88,00                | 1          | 88,00                |
| 250mm Ball Screw SFU1605 End Machined         | 68,00                | 1          | 68,00                |
| Ball Screw Nut                                | 13,00                | 3          | 39,00                |
| Machifit SBR10UU                              | 14,00                | 4          | 56,00                |
| Perfis de aço de 1"x1/8"                      | 37,00                | 2          | 74,00                |
| Parafusos diversos                            | 40,00                | 1          | 40,00                |
| Arduino UNO                                   | 50,00                | 1          | 50,00                |
| Fresas kit 10 pcs                             | 62,00                | 3          | 186,00               |
| <b>Total</b>                                  | -                    | -          | 2.135,00             |

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

### 3.3. Procedimento de Execução da Máquina CNC

Seguindo o planejamento anteriormente citado, foi adquirido material necessário para estruturação física da máquina, baseando-se na Figura 8. É possível visualizar nas Figuras 9, 10 e 11, as partes da estrutura soltas prontas para montagem dos trilhos, mancais, fusos e motores.

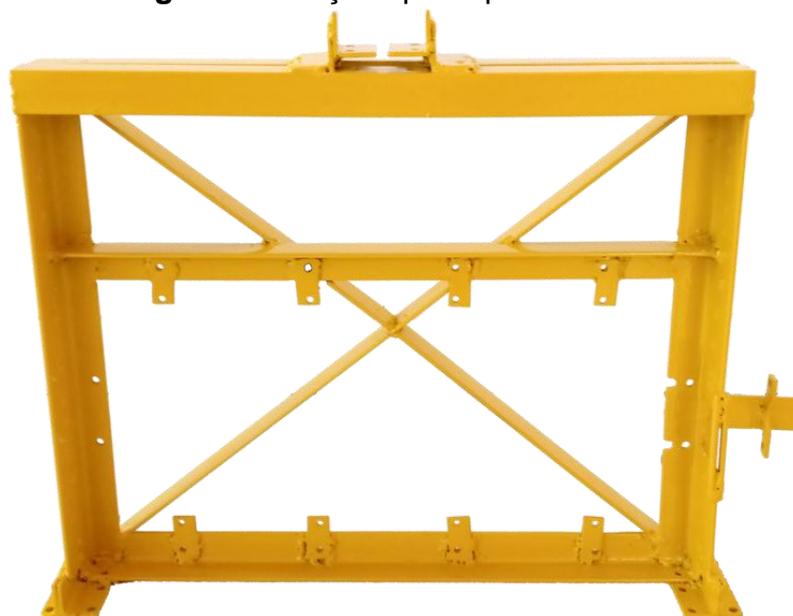
**Figura 9.** Peça suporte para eixo X.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Na construção do suporte do eixo X, apresentado na Figura 9, foi tomado o devido cuidado para manter o paralelismo e perpendicularíssimo entre as peças, garantindo total esquadro em suas fixações, assegurando o deslocamento contínuo através dos fusos e guias do eixo X que serão recebidos por esta peça. Sendo o maior diferencial do projeto, neste modelo de CNC o fuso que desencadeia o movimento, foi posicionada na parte superior da estrutura cuboide, localização que possibilita a ampliação da área de cobertura apresentada por um fresadora, uma vez que podemos fazer uso do quadrado aberto na parte de baixo para fresar tanto peças menores, como também sobrepôr a máquina em peças maiores, o que possibilita realizar seu trabalho em um maior espectro de possibilidades.

**Figura 10.** Peça suporte para eixo Y.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Para suporte das peças do plano Y, demosntramos na Figura 10 uma maneira de mantê-las perpendiculares ao eixo Z e ainda carregar em seu deslocamento. Na peça apresentada pela Figura 11, temos o eixo de deslocamento do plano Z, que carrega diretamente o *spindle*, responsável por trabalhar a peça.

**Figura 11.** Peça suporte para eixo Z.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Finalizada a composição de todas as estruturas que mantém a dinâmica neste sistema, observamos na Figura 12 a montagem completa do planejamento. Também aparece incluso o *spindle*, motor localizado ao centro da máquina, responsável pelo trabalho de fresagem diretamente na peça.

**Figura 12.** Apresentação de estrutura montada.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Registrado o tempo para realizar as atividades na construção da estrutura física, apresentamos na Tabela 3 a quantidade de tempo necessária durante montagem, calibração e início de movimentação.

**Tabela 3 -** Tempo Dispensado na Implementação da Máquina.

| <b>Etapa</b>                        | <b>Tempo (horas)</b> |
|-------------------------------------|----------------------|
| Implementação da arquitetura física | 30                   |
| Composição eletrônica e calibragem  | 5                    |
| Testes                              | 1,5                  |
| <b>Total</b>                        | <b>36,5</b>          |

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

## Módulos CAD/CAM

Considerando uma estrutura aberta, Hu (2010) refere diretrizes importantes para desenvolvimento de projetos como o elaborado neste experimento, alertando para a necessidade de preferir opções modulares na integração hardware/software garantindo a realização completa do ciclo CAD/CAM, assim como atender os requisitos descritos anteriormente. Para isso, optou-se por softwares de licença aberta possíveis de proporcionar a modularidade necessária ao processo de preparação, envio e execução do código pela máquina.

A abstração deste projeto é explicada a seguir, como forma de viabilizar a compreensão quanto montante de artefatos incluídos no consolidar da ferramenta. Descreve-se um conjunto de ferramentas possíveis de conceber o módulo CAM, no próximo momento é abordada a coleção módulo CAD e posteriormente integração através do estabelecimento de conexão entre ambos, perfazendo ponta a ponta o processo CAD/CAM.

Adiante é abordada a escolha do firmware gravado na MCU, seguido pela definição da linguagem utilizada na execução dos caminhos realizados pela máquina e o software que a executa. Será descrito como estabelecer a comunicação entre o microcomputador e micro controlador, finalizando o módulo CAM. Por seguinte são apresentados os softwares do módulo CAD, a fim de obter modelagem de design gráfico, conversão e geração do código na linguagem definida, finalizando este módulo. A união destes módulos permite a transcrição dos comandos da MCU, alcançando a execução do controle dinâmico nos caminhos desejados.

## GRBL

O MCU precisa de uma preparação para possibilitar seu acoplamento aos moldes do projeto, ao gravar um *firmware* que possibilite a comunicação ao mesmo tempo interpretação do código contendo comandos de caminho seguido pela máquina.

Para definição sobre *firmware* controlador de movimento para a ferramenta, foram classificadas três opções disponíveis com licença aberta, em nosso apanhado acadêmico Sarguroh (2018), Lyra (2010), Polastrini (2016) como opções mais difundidas para esta função, são eles: GRBL, TinyG e o g2core. O firmware TinyG

apresenta possibilidade de controlar até 6 eixos de uma mesma máquina, enquanto o g2core possibilita o controle de até 9 eixos simultâneos. Essas duas opções atenderam muito bem aos requisitos do projeto, sendo mais que suficiente, passando a requisitar processamento acentuado quando comparados ao GRBL, que permite controle de até 4 (quatro) eixos, apresentando necessidade de desempenho do hardware eletrônico reduzida.

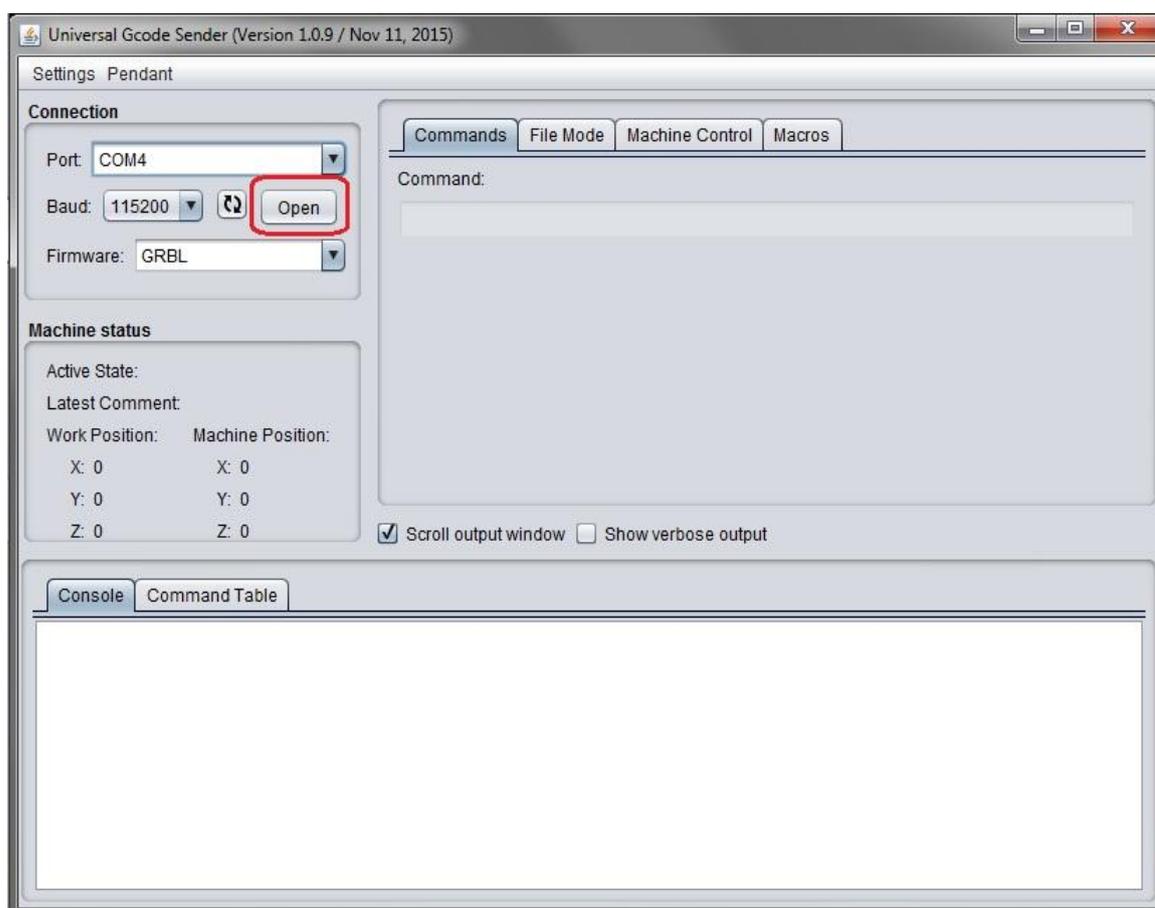
Considerando o baixo processamento, temos a escolha do GRBL como *firmware* de operação na máquina, alertando para a proposta de baixo custo e alto desempenho. Na sequência o *firmware* será compilado por um microcomputador, para então efetivar sua gravação na memória do MCU. Iniciado o funcionamento do MCU com GRBL embarcado, é habilitada a possibilidade de utilizar a interface USB, contida na Placa do Atmega 328, para enviar os comandos contendo diretrizes de controle da máquina CNC.

Destaca-se ainda, a importância dos estudos sobre os métodos de configuração dos parâmetros (APÊNDICE A) em acordo com os hardwares em uso no projeto e com isto realizar a calibragem da máquina, necessária antes de dar início às movimentações da máquina. Depois de configurada esta calibragem persiste na memória do MCU, sendo possível refazer o procedimento e formatar sua memória sempre que achar necessário.

O método de configuração em máquinas-ferramentas CNC é apresentado na documentação fornecida pelos desenvolvedores do GRBL, a configuração adequada para máquina do projeto está disponível no Anexo I, a fim de solucionar demais dúvidas sobre o procedimento.

### **Universal Gcode Sender**

*Universal G-Code Sender* (USG) é um software endereçador de G-Code, baseado em Java e compatível com GRBL, conforme apresentada na Figura 13. Seu uso é feito na conexão e execução direta do controle de uma máquina CNC, preparada com GRBL.

**Figura 13.** Ferramenta CAM endereçadora de código G.

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Apresentando compatibilidade de aplicação nos sistemas operacionais Windows, Linux, OSX e até mesmo microprocessadores de placa única, como Raspberry Pi ou Orange Pi. Polastrini (2016) cita o software como preferência ampla entre os usuários desta tecnologia, possuindo significativa comunidade, favorecendo suporte para dúvidas que possam surgir no decorrer do processo, ainda se destacando por baixa curva de aprendizado. A soma destes fatores previamente citados integrou o USG ao projeto.

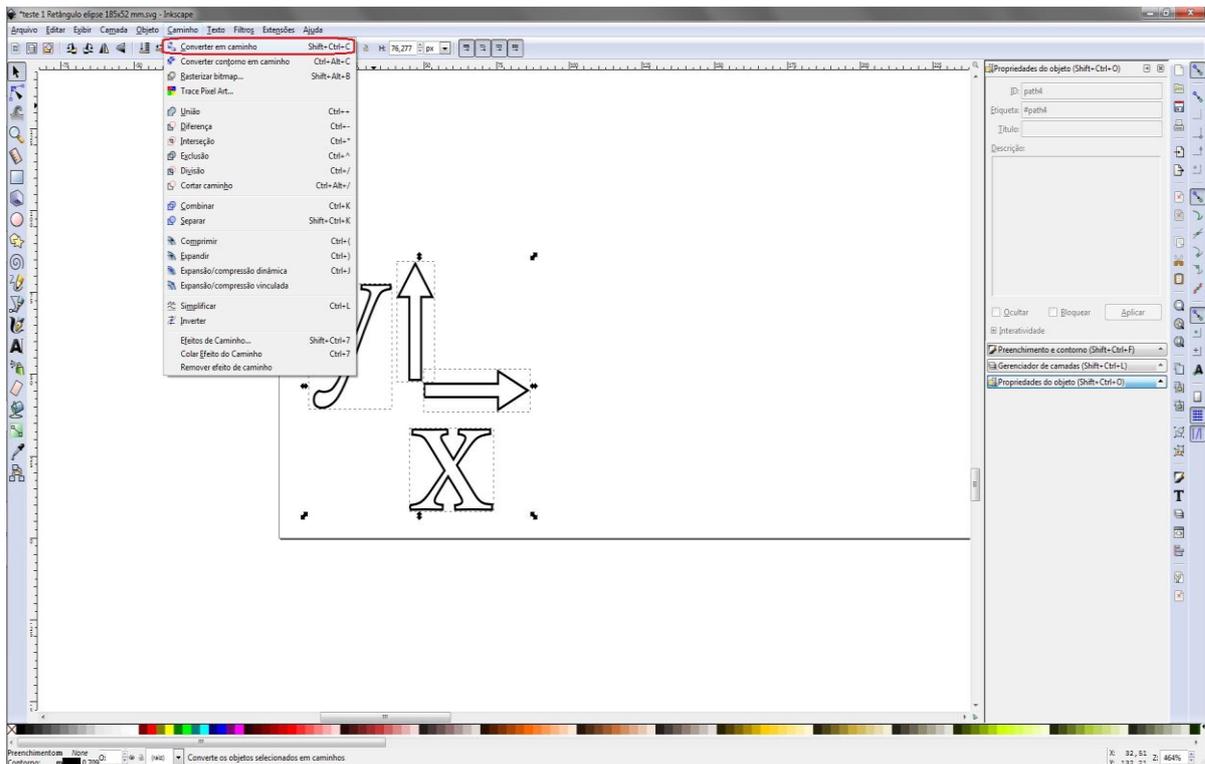
## **Inkscape**

Registrado com licença aberta o *Inkscape* apresenta ferramentas flexíveis de desenho, com ampla compatibilidade dos formatos de arquivos, incluindo os vetores gráficos escaláveis (SVG), seguindo o padrão W3C ao incluir Curvas de Bézier e espirais, em razão disso possibilita manipular imagens de base com excelente

qualidade para posterior geração do código executado pela máquina. O software ainda nos habilita converter fontes de texto e bitmaps para caminhos percorridos pela máquina. Spinellis (2009) comprova sua versatilidade manipulando vetores gráficos na geração de imagens com alta definição em estudos sobre *plotters* de vinil, o software se destaca pela praticidade apresentada na interface gráfica.

Observa-se em destaque na Figura 14 o menu de conversão em caminhos gráficos, com especificação na primeira opção, denominada “converter em caminho” que realiza a conversão dos caminhos de ligação do vetor para caminhos percorridos pela fresadora CNC em serviço, bastando apenas esse comando e salvar a imagem para a mesma estar pronta pra conversão em código G.

**Figura 14.** Ferramenta de design gráfico.



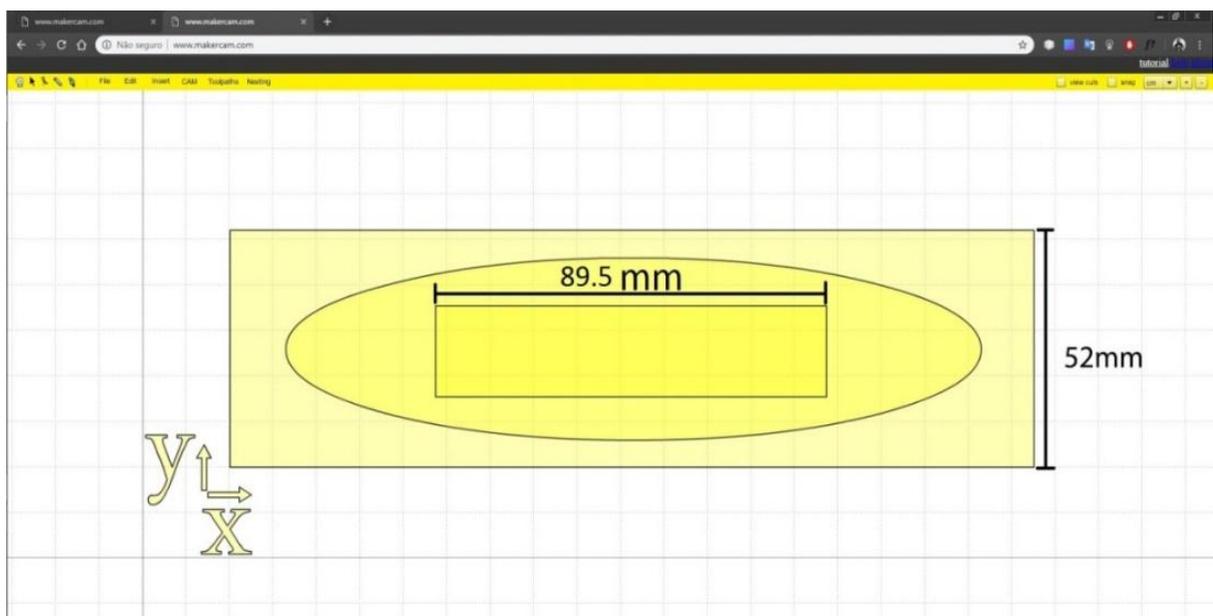
**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Considerando as características anteriormente citadas foi este o software para manipulação do *design* gráfico das peças que foi utilizado.

## Makercam

O Makercam é uma aplicação CAM 2.5d, *online* e aberta, baseada em *flash* que realiza tarefa de produzir o código G, a partir dos caminhos de ligação entre os pontos registrados no arquivo SVG, seguindo padrão para uso em dispositivos de fabricação CNC. Com ele temos a possibilidade de trabalhar cortes de perfis, bolsos e operações de perfuração. O código gerado por esta ferramenta carrega medidas fiéis às definidas de acordo com a peça planejada, além de dispor da detecção automática de ilhas. Esta aplicação importa, exporta e exibe arquivos digitais SVG. Na Figura 15 é exemplificada a visualização do design de uma peça prévia a conversão para gerar o código de caminho.

**Figura 15.** Ferramenta CAM visualizando arquivo SVG.

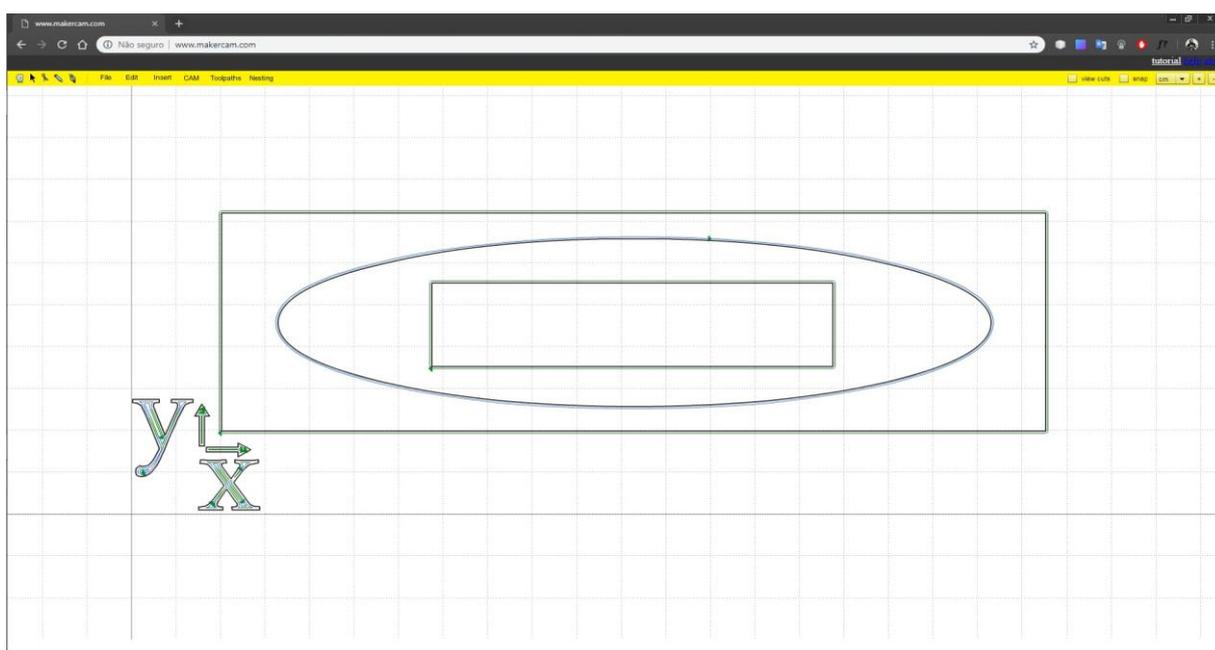


**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Após conhecer os softwares utilizados, foi necessário seguir os seguintes passos para execução de um trabalho na máquina: i) Design da peça em software CAD (Inkscape), gerando um arquivo SVG e contendo caminhos a serem seguidos para geração deste determinado desenho; ii) A imagem gráfica no formato SVG é acessível ao software CAM (Makercam), sendo importado para processamento CAM, neste momento é possível conferir, editar e salvar o arquivo SVG. Conferidas as dimensões seguimos para configurar a geração do código G, esta configuração

inclui o tipo de corte a ser realizado, o diâmetro da fresa que será utilizada, a localização do ponto zero da peça, a profundidade do corte final, a profundidade do corte de passo e a velocidade de deslocamento durante o trabalho. Depois de configuradas especificações de corte podemos confirmar a geração o código G, transformando as formas destacadas em amarelo na Figura 15, nas linhas de caminho representadas na Figura 16, em seguida pode exportar o código gerado para local definido pelo usuário; iii) Para efetivar a sincronia entre os eletrônicos é necessário concretizar a conexão entre ferramenta pré-configurada e computador; apresentar ambiente de softwares arranjado, bastando conectá-los via USB; iniciar a aplicação Universal Gcode Sender no microcomputador e confirmar a abertura de conexão, de acordo com o exemplo da Figura 13. Depois de conectados é possível movimentar a ferramenta no modo manual, por meio dos cursores direcionais no teclado do computador, assim procede-se a marcação da fresadora ao ponto zero da peça, que neste momento deve estar fixada na máquina, dando início o envio seriado dos comandos contendo caminhos a serem interpretados pela unidade controladora e distribuí-los aos drivers, desencadeando movimentação precisa dos motores necessários da máquina CNC. Desta forma, é concretizada a movimentação desejada pela ferramenta de corte.

**Figura 16.** Ferramenta CAM após geração de código G.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Ultrapassadas as execuções anteriores, inicia o período de verificação quanto o comportamento da máquina nos trabalhos, desconsiderando estes para fins métricos verificou sua realização completa de um ciclo de trabalho. Demonstrado na Figura 17, em que é apresenta uma das primeiras peças produzidas, seguindo todo o processo descrito em sua execução.

**Figura 17.** Amostra de verificação.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

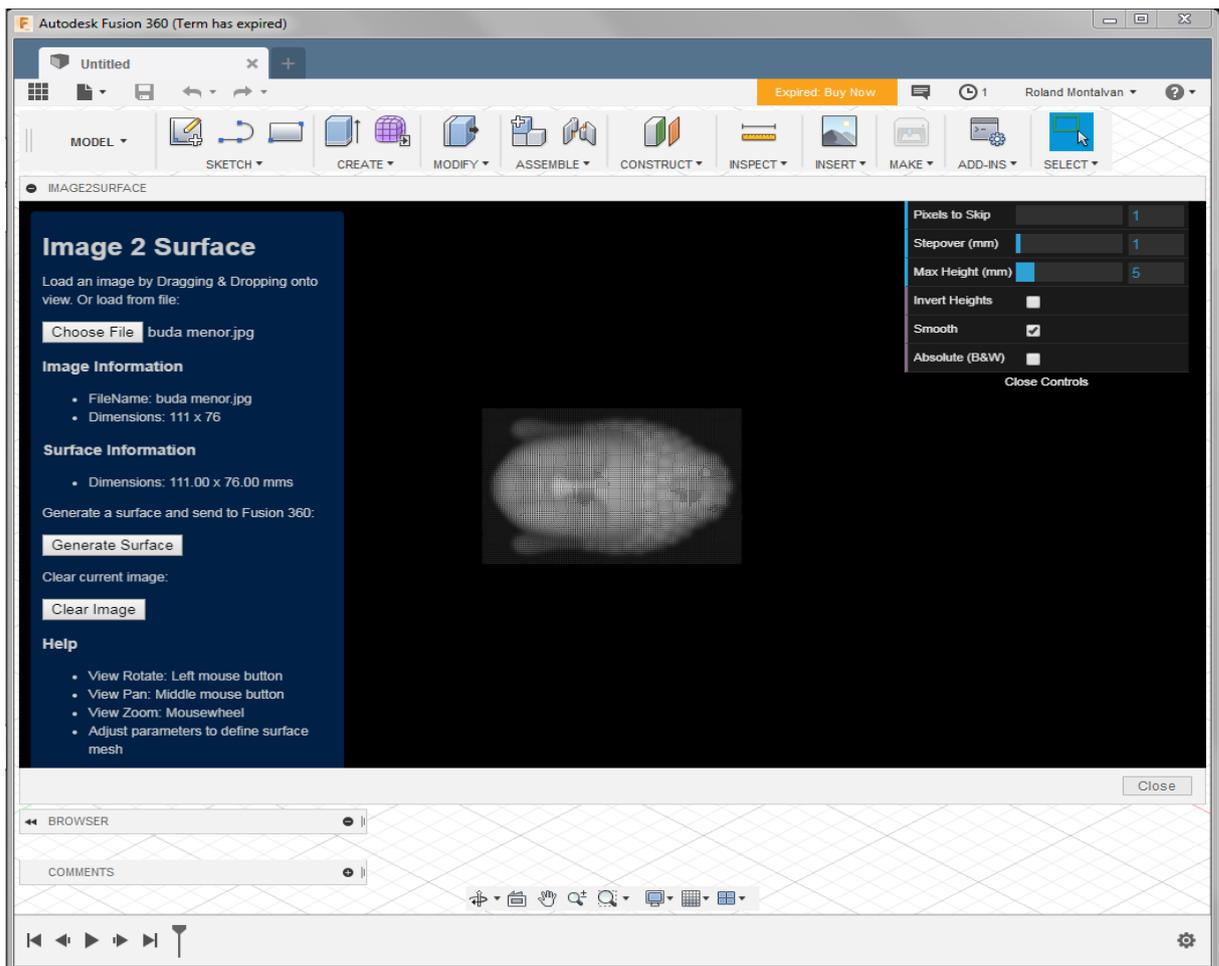
Ao fim das verificações, foi consagrado o funcionamento pleno de todo o sistema. Em busca de formas alternativas para controle desta CNC, foi explorado o potencial do equipamento, ainda com fins de comparação e somar lucidez quanto às possibilidades de uso desta arquitetura, foi demonstrado um software CAD/CAM de licença paga, porém aberta aos acadêmicos em curso, o que levou a considerar sua apresentação. A possibilidade deste método permite a manipulação para design e geração do código G, porém com outra abordagem que será detalhado a seguir.

## **Fusion**

Por meio do software Fusion, desenvolvido pela Autodesk, foi realizado o trabalho anteriormente atribuído a aplicação Makercam. Neste ambiente, é possível realizar a manipulação de design gráfico, mostrando versátil tanto nos processos CAD quanto CAM, apresentando interface interativa, porém com curva de aprendizado considerável.

O Fusion possibilita importar *plugins* para trabalho em conjunto com o software. Dentre a infinidade de *plugins* disponibilizados na rede, destaca-se os repositórios do *GitHub* de seu criador Hans Kellner, denominado *Image 2 Surface* conforme exemplificado na Figura 18.

**Figura 18.** *Plug-in Image 2 Surface* integrado ao software Fusion.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Trata-se de uma opção diretamente criada pra trabalhos com CNC fresadores, este *plug-in* realiza conversão de arquivos gráficos do tipo *.jpeg* ou *.png* em superfície, considerando o bit da escala cinza, presentes neste tipo de arquivo digital, fornecendo uma base racional não uniforme posicionando as variações de altura na superfície de acordo com o valor de cada bit na escala de cinza em cada pixel. A conversão anteriormente citada gera uma superfície dinâmica com três dimensões, passível a reconversão em código G.

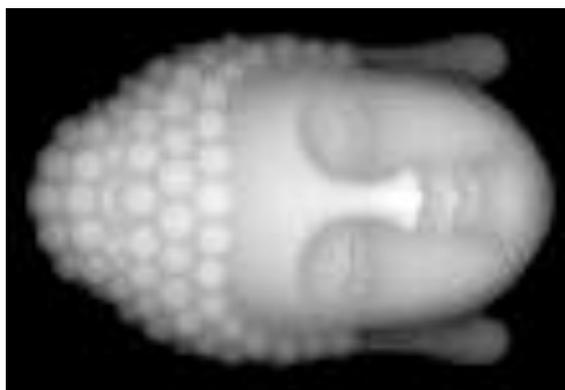
O artefato detalhado na Figura 18, exemplifica o planejamento que tornou possível a produção das amostras explanada na Figura 19, com imagem de base para geração de código G vista na Figura 20.

**Figura 19.** Primeiro exemplo de peça produzida com código gerado pelo Fusion.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

**Figura 20.** Imagem em escala de cinza.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Estes resultados obtidos com Fusion somaram pontos à pesquisa ao impulsionar nossa vontade de conhecer mais métodos para trabalho da máquina. Ainda é possível observar a peça feita pela máquina por meio deste método na Figura 21.

**Figura 21.** Segundo exemplo de peça produzida com código gerado pelo Fusion.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Os dois exemplos produzidos em madeiras de densidade elevada, quando comparadas ao MDF que é um exemplo das madeiras mais comuns no uso de fresadoras, este fato integra a fase de verificações atestando seu uso em materiais com densidades distintas.

## 4. DESIGN DA PESQUISA

Neste Capítulo é apresentado o planejamento da pesquisa que foi realizado no ano letivo de 2019. O intuito foi analisar os custos de implementação e o controle na manufatura em máquinas CNC, sem perder qualidade na produção, levando em conta o desenvolvimento de uma arquitetura que proporciona portabilidade e estenda suas possibilidades para trabalhar peças com amplo tamanho.

Este trabalho busca responder à seguinte questão de pesquisa: A qualidade da arquitetura proposta para uma máquina CNC utilizando ferramentas *open source* é melhor quando comparado à máquina convencional?

### 4.1. Técnica e métrica

Este trabalho utilizou os seguintes atributos de qualidade, a saber: custo, fidelidade, tempo e portabilidade.

Na dimensão custo, o objetivo foi verificar o custo utilizados na implementação da arquitetura proposta para uma máquina CNC utilizando ferramentas *open source* é menor quando comparado a uma máquina convencional?

Na dimensão fidelidade, o objetivo foi verificar a fidelidade de controle na manufatura entre as peças fresadas pela máquina CNC utilizando ferramentas *open source* é igual?

Na dimensão tempo, o objetivo é verificar o tempo de produção na manufatura entre as peças fresadas pela máquina CNC utilizando ferramentas *open source*?

Na dimensão portabilidade, o objetivo foi verificar a portabilidade de produção na manufatura de peças fresadas feitas pela máquina CNC utilizando ferramentas *open source* é igual, ou melhor, quando comparado a uma máquina convencional?

### 4.2. Identificação das variáveis dependentes e independentes

Para a realização desse estudo, um conjunto de variáveis foi identificado. Essas variáveis são apresentadas a seguir.

- **Variáveis independentes** - compreendem os atributos de qualidade considerados no estudo empírico:
  - Custo;
  - Fidelidade;
  - Tempo;
  - Portabilidade.
- **Variáveis dependentes** - compreendem os resultados da qualidade dos atributos considerados no estudo empírico:
  - Nível de qualidade do atributo Custo;
  - Nível de qualidade do atributo Fidelidade;
  - Nível de qualidade do atributo Tempo;
  - Nível de qualidade do atributo Portabilidade;

### **4.3. Seleção dos itens**

Na avaliação da máquina CNC foram fresadas peças em variados níveis de complexidade geométrica. Optou-se por material do tipo madeira em densidades distintas, neste material de trabalho primitivo foi delimitada uma área com as dimensões adequadas às necessidades de cada modelo definido para teste de fresagem.

### **4.4. Preparação**

Esta seção contém informações referente a organização/estruturação de elementos que foram considerados no processo de experimentação proposto neste estudo.

#### **4.4.1. Compras de ferramentas**

Prezando pelos princípios de baixo custo, as únicas ferramentas necessárias de compra foram as físicas, sendo dada opção a softwares e sistemas *open source* para realizar os testes da ferramenta.

#### **4.4.2. Equipamentos necessários**

Foram necessários para esse experimento, os seguintes equipamentos:

- Equipamentos de medição geométrica com alta definição, sugerido o paquímetro;
- Câmera com definição mínima de 10mpx, para registro e possíveis comparações em mecanismos digitais;
- Blocos de madeira de densidades e tamanhos diversos, para frenagem dos modelos de teste.

#### **4.5. Análise de dados**

Os dados coletados nesta análise são numéricos, decimais, de natureza quantitativa classificados em escala de qualidade dimensional e geométrica. Os dados desta pesquisa foram separados pelo desempenho de cada uma das arquiteturas investigadas e comparadas entre si.

#### **4.6. Análise às ameaças**

Acredita que alguns fatores podem influenciar essa replicação em outros estudos, tais como:

- Erro na elaboração da sentença de programação: usinagem deslocada para fora do designo, podendo ocasionar há prejuízos estruturais;
- Falha elétrica no sistema de alimentação: perda de referência nas marcações de início do trabalho;
- Ausência/Insuficiência no sistema de refrigeração de componentes eletrônicos: desencadear aquecimento, ocasionando quebra da ferramenta;
- Disposição irregular da ferramenta: escape durante usinagem podendo ocasionar danos à peça trabalhada e a máquina.

#### **4.7. Execução da pesquisa**

Abaixo é descrito um grupo de passos que foram realizados durante o processo experimental:

- a) Foi verificado se o custo da máquina CNC proposta neste trabalho é menor quando comparada ao modelo de mercado, esta comparação foi feita por meio de uma análise mercadológica e valores monetários encontrados na revisão bibliográfica, para comparação de preços;
- b) Na primeira avaliação estrutural, foi verificado o deslocamento preciso e fluente dos planos de trabalho da ferramenta. Neste momento procurou-se encontrar variações estruturais que impossibilitaram o deslocamento suave dos planos sobre os trilhos lineares. Sem haver qualquer empecilho foi realizado a configuração das medidas de movimento, sincronizadas dimensões do mundo real as perspectivas possíveis à ferramenta, para então dar início aos trabalhos da mesma;
- c) Para verificar as métricas fidelidade, tempo e portabilidade foi necessário fresar peças de madeira, em densidades e tamanhos variados, optando por trabalhar mais de uma peça do mesmo modelo para fins comparativos. Estas comparações forneceram dados em quesitos de fidelidade dimensional quanto repetição de um mesmo modelo, assim como a sua precisão quanto as medidas computacionais predefinidas antes do início do trabalho. Outra característica necessária de avaliação é o tempo de execução dos trabalhos, sendo visto todo o processo de produção da peça, desde concepção até finalização, e execução direta da peça em comparação ao tempo de outras máquinas. Por fim, a portabilidade foi avaliada ao tempo que a ferramenta consegue realizar trabalhos em peças de madeira de amplas dimensões, sendo apenas colocada sobre estas peças para realizar seu trabalho na mesma;
- d) Foram analisados os níveis de variância entre dimensões de modelos computacionais e peças implementadas e, coletados os dados para verificação do grau de fidelidade das impressões aos modelos computacionais, os mesmos dados que contribuem para verificação das distinções entre peças repetidas do mesmo modelo.

#### **4.8. Divulgação**

Os resultados obtidos na pesquisa assim como dados coletados, planilhas e dados secundários relacionados foram concedidos em um diretório aberto para que outros pesquisadores na área em estudo possam visualizar.

## 5. ANÁLISE E RESULTADOS

Neste Capítulo expõem-se os resultados alcançados, dispondo comparativo de custo e as aferições encontradas nos testes.

### 5.1. Análise de Custo

Com base em uma análise de mercado, são apresentados três modelos oferecidos no comércio eletrônico para aquisição do público em geral, que oferecem uma área útil de trabalho próxima às dimensões oferecidas no projeto. Por meio de uma análise quanti-qualitativa sobre os dados presentes na Tabela 4, foi possível verificar que o custo do projeto oferece margens de gasto abaixo da encontrada no mercado.

**Tabela 4** - Comparativo de custo quanto às máquinas de mercado.

| Modelo                                      | Área Útil (X,Y,Z) | Valor (R\$) |
|---|-------------------|-------------|
| Cnc Router G1 Mini Completa 220v            | 250x200x45        | 3.800,00    |
| Mini Cnc Fresadora Router Diy Kit 3018 Grbl | 250x180x45        | 2.450,00    |
| Fresadora Cnc Router Mini                   | 259x237x45        | 3.260,00    |
| <b>Modelo Implementado</b>                  | 270x250x120       | 2.135,00    |

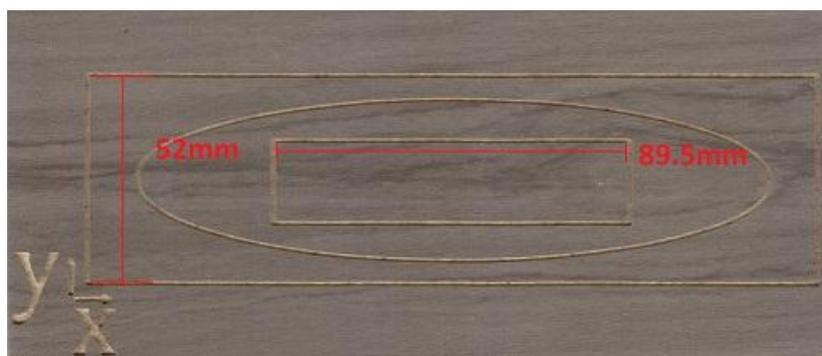
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

### 5.2. Análise de Fidelidade

Como medida para fortalecer a análise dos resultados apresentados pela ferramenta, foi decidido realizar dois testes para medir desempenho de cada eixo representante dos planos cartesianos. O teste 1 visa aferir margens de erro na produção dos movimentos realizados pelos eixos X e Y, no teste 2 foi verificada a fidelidade de reprodução no eixo Z e aspecto circunferencial produzido.

Na avaliação para quesito fidelidade dos eixos X e Y, realizamos a aferição métrica de oito peças fresadas pela máquina, em comparação as medidas de planejamento, no exemplo da Figura 22 observa uma amostra do teste 1 (APÊNDICE B), destacando as medidas consideradas na validação.

**Figura 22.** Amostra do teste 1.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018)

O estágio de design do teste 1 teve demonstração com as Figuras 15 e 16. Dispondo na Tabela 5 os dados aferidos nas peças reais, diferença apresentada entre outros dados.

**Tabela 5 - Resultados do teste 1.**

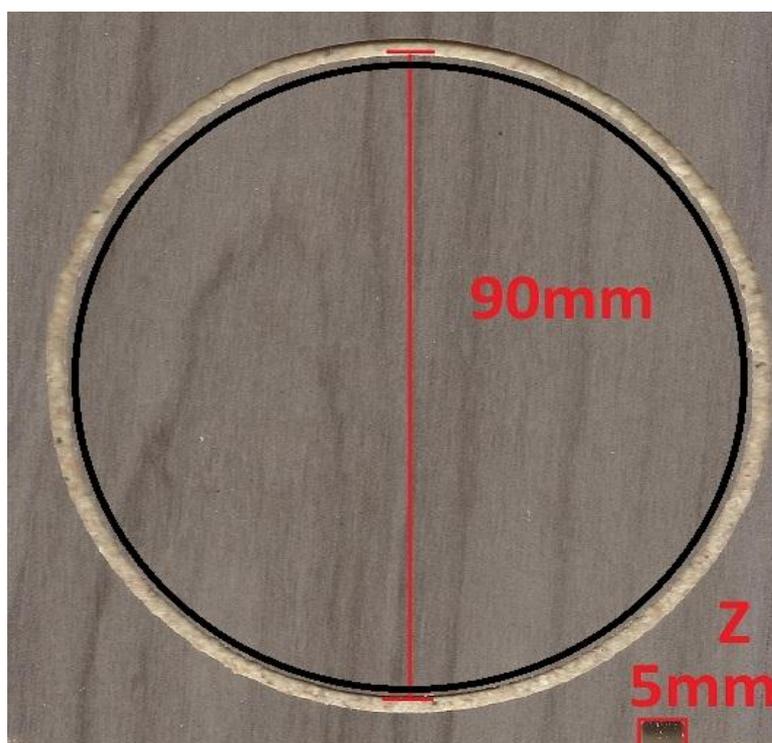
| <b>Amostra</b> | <b>Medida Real X(mm)</b> | <b>Erro X(mm)</b> | <b>Medida Real Y(mm)</b> | <b>Erro Y(mm)</b> | <b>Róis enviados (linhas)</b> | <b>Tempo de Trabalho (mm:ss)</b> |
|----------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| T1.1           | 89,50                    | 0,00              | 52,00                    | 0,00              | 711                           | 08:06                            |
| T1.2           | 88,30                    | 0,20              | 52,00                    | 0,00              | 711                           | 08:06                            |
| T1.3           | 89,40                    | 0,10              | 52,00                    | 0,00              | 711                           | 08:06                            |
| T1.4           | 89,40                    | 0,10              | 52,00                    | 0,00              | 711                           | 08:06                            |
| T1.5           | 89,40                    | 0,10              | 52,00                    | 0,00              | 711                           | 08:06                            |
| T1.6           | 89,40                    | 0,10              | 52,00                    | 0,00              | 711                           | 08:06                            |
| T1.7           | 89,50                    | 0,00              | 52,00                    | 0,00              | 711                           | 08:06                            |
| T1.8           | 89,40                    | 0,10              | 52,00                    | 0,00              | 711                           | 08:06                            |
| <b>Média</b>   | 89,41                    | 0,08              | 52,00                    | 0,00              | 711                           | 08:06                            |
| <b>DP</b>      | 0,08                     | -                 | 0,00                     | -                 | -                             | 00:00                            |

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

As aferições se deram com um paquímetro apresentando definição máxima de 0,1mm. As medidas base para análise dos eixos X e Y, foram respectivamente 89,5mm e 52,0mm conforme expresso na Figura 22. Investigados os dados contidos na Tabela 5, foram conferidas diferenças entre as dimensões fresadas no eixo X contra as dimensões de planeamento, contendo um erro médio na ordem de 0,2235% do valor real entre as dimensões deste eixo. Passando as aferições nas medidas reais do corte pelo eixo Y, evidenciou-se zero de variação em acordo com o planeamento, sendo esses valores conferidos a partir do nível de definição alcançado pelos instrumentos.

Como provas do eixo Z, fresou-se um quadrado com profundidade de cinco milímetros, ao passo de meio milímetro, demarcado na Figura 23 no canto inferior esquerdo. Também foi fresado um círculo com diâmetro planejado para 90 mm conforme observado na amostra da Figura 23 (APÊNDICE C), este serviu para avaliação qualitativa comparando ao aspecto de uma circunferência, um pouco menor, gerada em software. Realizou-se desta forma, pois aferir medidas nas peças circulares, por aparelhos como paquímetro, não apresentou precisão eficaz podendo encontrar métricas que divergem da realidade.

**Figura 23.** Amostra do Teste 2.



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

Expressos pela Tabela 6, é possível observar os dados coletados para conferir o erro apresentado pelo eixo Z, responsável pela profundidade contida nos cortes da máquina. Por meio da comparação entre as medidas reais e os planos, o erro médio presente neste eixo está na ordem de 0,2%.

**Tabela 6 - Resultados do Teste 2.**

| <b>Amostra</b> | <b>Medida Real X(mm)</b> | <b>Desvio X(mm)</b> | <b>Róis Enviados (linhas)</b> | <b>Tempo de Trabalho (mm:ss)</b> |
|----------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| T2.1           | 5,00                     | 0,00                | 162                           | 03:00                            |
| T2.2           | 5,00                     | 0,00                | 162                           | 03:00                            |
| T2.3           | 5,00                     | 0,00                | 162                           | 03:00                            |
| T2.4           | 5,00                     | 0,00                | 162                           | 03:00                            |
| T2.5           | 5,00                     | 0,00                | 162                           | 03:00                            |
| T2.6           | 5,00                     | 0,00                | 162                           | 03:00                            |
| T2.7           | 4,90                     | 0,10                | 162                           | 03:00                            |
| T2.8           | 5,00                     | 0,00                | 162                           | 03:00                            |
| <b>Média</b>   | 4,98                     | 0,01                | 162                           | 03:00                            |
| <b>DP</b>      | 0.01                     | -                   | -                             | 00:00                            |

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018).

### **5.3. Análise de Tempo**

Considerar os fatores de tempo para o trabalho deste tipo de máquina precisa da observação de uma ampla gama de fatores. Na Tabela 5, observando os róis enviados, tem dados referentes ao código trabalhado no primeiro teste, contendo 711 linhas de comando, sendo este um fator considerado inicial sobre esta análise, pois existe um tempo de resposta aguardado para envio sequenciado dos comandos, conferindo seguridade na sequência de dados enviada a CNC. Outro

fator variante é o comprimento dos caminhos seguido para conclusão de uma peça, assim como a profundidade de corte desejada. Para peça com dimensões maiores, é possível observar um intervalo mais amplo no envio e execução dos comandos e o inverso para dimensões menores.

A questão da profundidade do corte realizado também pode influenciar no tempo de impressão da peça, fator esse em que a máquina irá refazer uma mesma sequência de caminhos uma vez concluída a sequência de cortes no eixo X e Y, mas não em uma profundidade desejada, necessitando aprofundar o corte e iniciar novamente todo o ciclo de caminhos. Ainda existe a possibilidade de interromper o procedimento durante a execução, por exemplo, para ajustes, o que também é incluso no tempo de execução das peças.

Para a primeira bateria de testes, temos peças planejadas para ter 1mm de profundidade, sendo realizado o trabalho com passo de 0.5mm, isso resulta em duas repetições de todo caminho percorrido pela fresa. Na intenção da segunda bateria de testes, foi definido um quadrado para aferição da precisão do plano Z, aprofundado aos 5mm, sendo necessário a fresa refazer o quadrado por dez vezes, considerando o passo de 0.5mm para adquirir a altura desejada.

Ainda considerando o segundo teste, estima-se outro fator relevante para sua validação, é o processo da marcação no ponto zero da peça. Este é feito no momento pós-fixação da peça na máquina, prévio ao envio e leitura do código G e de forma manual, dada a baixa complexidade do projeto. Para isso a ponta de incisão da fresa deve ser posicionada precisamente na altura zero, em relação à superfície da peça trabalhada. Considerando a margem de desvio encontrada nas amostras do segundo teste, foi verificado não ser um procedimento com dificuldade de ser alcançado, precisando de perícia na operação dos controles manuais da máquina, por meio das teclas direcionais do teclado conectado a CNC.

#### **5.4. Análise de Portabilidade**

Concebido o projeto, foi verificado suas características de portabilidade uma vez que existe a possibilidade de trazer as peças a serem trabalhadas para onde a ferramenta se encontra, realizando atividades tradicionais de uma CNC desta magnitude. Assim como a possibilidade de dispor a tecnologia sobre superfícies com dimensões maiores que a própria máquina, realizando o trabalho desejado com

sucesso. O fator citado anteriormente validou nossa expectativa quanto uma arquitetura física singular capaz de proporcionar amplitude as possibilidades do modelo desenvolvido neste experimento.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O presente Capítulo apresenta as considerações finais deste trabalho, seguido das contribuições e limitações desta pesquisa, bem como sugestões de trabalhos futuros.

### **6.1. Considerações Finais**

Foram investigados trabalhos relacionados e estudado a bibliografia correspondente à área de desenvolvimento de máquinas CNC com arquitetura diferenciada. Em seguida, concebido/desenvolvido uma máquina CNC com arquitetura diferenciada para solucionar o problema de portabilidade, porém com capacidade de trabalho em peças de amplo tamanho. Posteriormente ao seu desenvolvimento, foi analisado e traçado uma solução com método de sincronização com controle e geração dos códigos CNC, prezando por opções de código aberto e com custos reduzidos em comparação as máquinas CNC no mercado. Por fim, foi analisada a arquitetura da máquina CNC proposta neste trabalho em comparação com uma máquina convencional em relação aos seguintes atributos de qualidade: custo, fidelidade, tempo de produção na manufatura e portabilidade.

Como resultados, temos o desenvolvimento de uma arquitetura física de máquina CNC singular, obtendo também redução significativa nos custos para sua implementação, quando comparado às opções similares disponíveis no mercado. Nos experimentos realizados para avaliação da fidelidade e do tempo foi analisado o nível de precisão nos deslocamentos entre os planos X, Y e Z, variando na margem de erro de 0,2% entre as peças fresadas e não havendo diferença no tempo de fresagem entre as peças. Em relação a sua portabilidade, a máquina CNC proposta neste trabalho apresenta ampliação nas possibilidades de trabalho, vista a possibilidade de impressão em matéria prima com dimensões maiores que as da própria máquina.

### **6.2. Contribuições da Pesquisa**

O intuito de soma desta pesquisa tem direcionamento ao interesse de instituições acadêmicas, expresso no custeio do projeto em compensação atributos de intelecto, e estímulo ao aprendizado continuado para acadêmicos de mais variadas áreas. Provamos a possibilidade de efetivamente conhecer uma tecnologia tão arrojada, passando um caminho de aprendizado assíduo, valendo uma margem de custo considerável a nível Institucional.

### **6.3. Limitações da Pesquisa**

Esta pesquisa apresentou as seguintes limitações:

- Uma maior amostra das peças fresadas, bem como uma maior variação nos designs dos testes, para verificar o desvio padrão do erro contido entre as peças.
- Entre as limitações na arquitetura da máquina CNC, é possível destacar: i) Durante o funcionamento dos motores sobre execução de uma sequência de código G, seus drivers enviam um pulso PWM, preciso a movimentação do rotor, por determinado período, possibilitando ao eixo obter o deslocamento esperado. Seguido a esse movimento temos um sinal revertido à obtenção do deslocamento determinado pelo pulso, habilitando assim a passagem do próximo comando. Qualquer interrupção de forma direta na conexão entre o computador e a máquina, levará a suspensão do trabalho realizado até então, sendo necessário reiniciar as atividades para obter a impressão da peça. Como consequência, será somado custo de tempo no uso da máquina e o desprezo da peça trabalhada antes da conexão perdida; ii) A qualidade dos caminhos obtidos com a geração de do código G através do Makercam pode influenciar no tempo ocioso de uso da máquina durante a fresagem de uma peça;
- Em trabalhos com fresagem, a sonoridade provocada pela máquina pode gerar incômodo em seu tempo de uso;

### **6.4. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Entre as diversas possibilidades de pesquisa e aprimoramento da arquitetura da máquina CNC, destaque-se:

- Restruturação em algumas limitações da arquitetura da máquina CNC proposta neste trabalho, a saber: i) resolução da parte crítica por meio da implementação de *Fieldbus* reconfiguráveis, esta tecnologia já vem sendo utilizada pelas indústrias para estabelecimento de controle sobre máquinas em larga escala, porém com extrema limitação na dinâmica das modificações possíveis as partes do sistema CNC, deixando como resultado a necessidade de sistemas CNC com arquitetura aberta e resiliente, assim como apresentado neste projeto; ii) geração de algoritmos para reduzir o tempo ocioso de funcionamento da máquina;
- Flexibilizar a modulação da máquina CNC para que seja passível de modificações como adaptação da fresadora por um módulo de gravação/corte laser, ou ainda usar módulos extrusores de polímeros, possibilitando trabalhos em dimensões 3D.
- Flexibilizar os tipos de produtos finais da máquina CNC que possibilita, por exemplo, a produção de placas de circuitos elétricos por fresadora CNC.
- Conceber/desenvolver uma aplicação similar ao disposto no final do Capítulo 3, em que é apresentado um método alternativo para produção de códigos G, tendo em vista que o software de base para o *plug-in*, durante a realização deste uso, serve quase que unicamente para seu funcionamento. Os resultados obtidos neste método custeado serviram unicamente para comparação, porém ainda assim, superaram muitas expectativas.

## REFERÊNCIAS

ALI, M. A. A.; ELSHAIKH, A. M. A.; BABIKER, S. F. Controlling the CNC machine using microcontroller to manufacture PCB. *Anais...Basic Sciences and Engineering Studies*, 2016.

BERBESI, J. M.; SAUMETH, K.; PINILLA, F. Parallel control firmware for CNC milling machine based in Arduino. *Anais...Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference*, 2017.

COSTA, E. S. *Disciplina: processo de usinagem*. Divinópolis, MG. 2006.

GONÇALVES, M. A. F. *Um estudo sobre implementação de ciclos de usinagem através de programação parametrizada em máquinas de comando numérico computadorizado*. Dissertação, Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

HU, Y.; YU, D.; DU S.; ZHANG, X., TAO Y., Wang Z. Design and implementation of reconfigurable CNC system based on Fieldbus. In: International Conference on Information and Automation. IEEE 2018, p. 794-799.

JKM Official Store. Site da JKM official store. 2018. Disponível em: <<https://www.banggood.com/cs/brands-JKM-b-121.html>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

LINS, R. G.; GUERREIRO, B.; SCHMITT, R.; SUN, J.; CORAZZIM, M.; SILVA, F. R. A novel methodology for retrofitting CNC machines based on the context of industry 4.0. *Anais...Systems Engineering Symposium*, 2017.

LYRA, P. V. A. *Desenvolvimento de uma máquina fresadora CNC didática*. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

MACHIFIT Official Store. Site da Machifit official store. 2018. Disponível em: <<https://www.banggood.com/pt/brands-MACHIFIT-b-702.html>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

POLASTRINI, F. H., Desenvolvimento de uma Máquina CNC de baixo custo com hardware e software abertos. Monografia, Graduação em Bacharel em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Minas Gerais, Formiga, 2016.

PRATHIBHA, S.; AMRITHA, S. Control of ball-screw drive systems. *Anais...Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies*, 2017.

PRODANOV, C.C; FREITAS, E.C. Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. 2ª ed. Universidade Feevale – Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: Acessado em: 02/010/2018.

ROCHA JUNIOR, P. A. S.; TOSTES, M. E. L. Stepper motor drive for computer numerical control machines. *Anais... Power Electronics Conference*, 2013.

SARGUROH, S. S.; RANE A.B. Using GRBL-Arduino-based controller to run a two-axis computerized numerical control machine. In: International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET), 2018, p. 1 - 6.

SHIVAKUMAR, T.; SRAVAN, M. S.; SELVAJYOTHI, K. Python based 3-Axis CNC plotter. *Anais... Power and Energy*, 2016.

SHUKUN, C.; HENG, Z.; XIANGBO, Z.; QIUJUAN, Y.; CHANGSHENG, A. Software and hardware platform design for Open-CNC system. *Anais... Knowledge Acquisition and Modeling Workshop*, 2008.

SILVA, D. B.; SILVA, R. M.; GOMES, M. L. B. O reflexo da terceira revolução industrial na sociedade. *Anais...Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 22, Curitiba, 2002.

SIMON, A. T. *Condições de utilização da tecnologia CNC: Um estudo para máquinas-ferramentas de usinagem na indústria brasileira*. Dissertação, Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

SPINELLIS, D. Drawing Tools. *IEEE Software*, v. 26, n.3, p. 12-13, 2009.

**APÊNDICE A - PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DA MÁQUINA CNC**

\$0=10

\$1=25

\$2=0

\$3=6

\$4=0

\$5=0

\$6=0

\$10=3

\$11=0.020

\$12=0.002

\$13=0

\$20=0

\$21=0

\$22=0

\$23=1

\$24=50.000

\$25=635.000

\$26=250

\$27=1.000

\$100=80

\$101=80

\$102=320

\$110=8000.000

\$111=8000.000

\$112=500.000

\$120=50.000

\$121=50.000

\$122=50.000

\$130=500.000

\$131=500.000

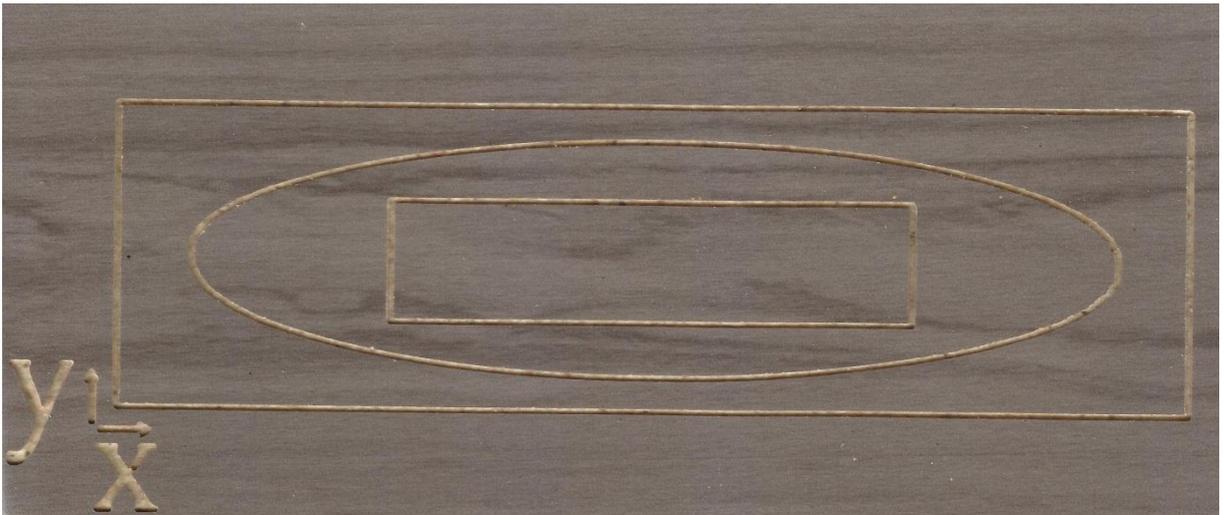
\$132=100.000

## APÊNDICE B – DIGITALIZAÇÃO DE PEÇAS FRESADAS PELA MÁQUINA CNC DURANTE TESTE 1

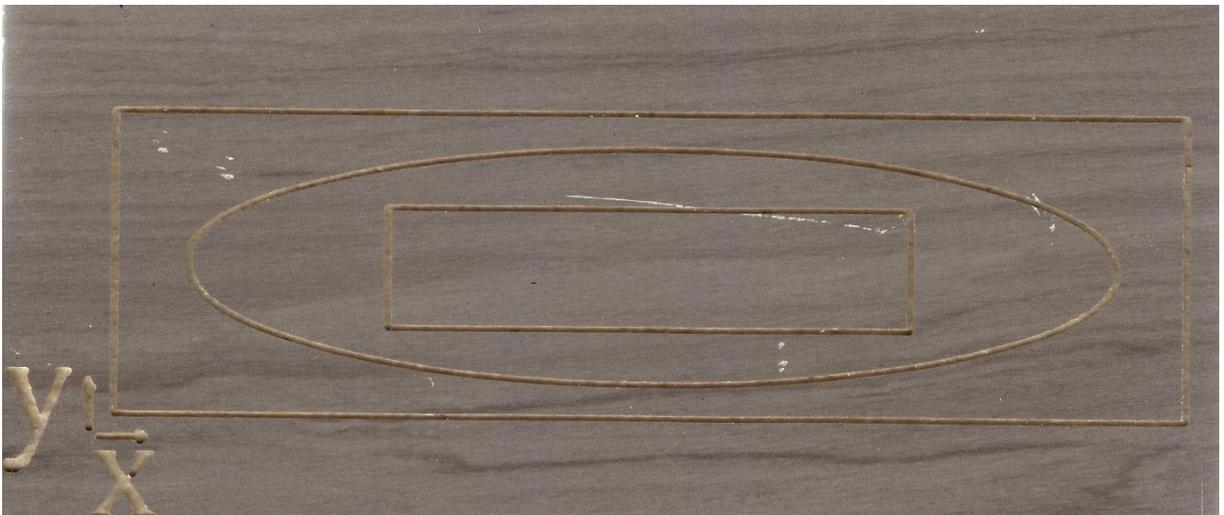
- Teste 1 – 1° amostra.



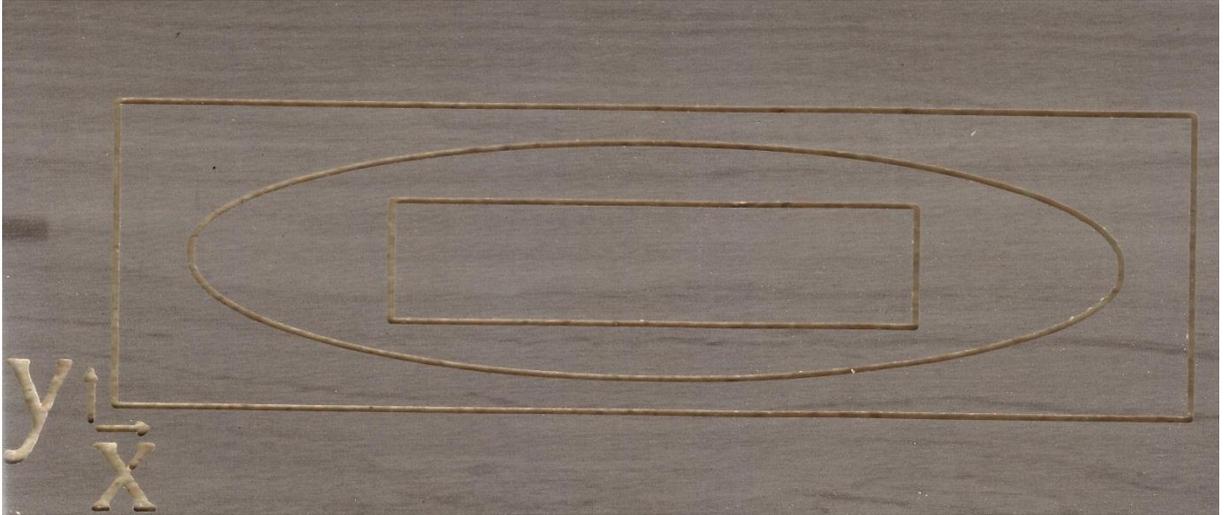
- Teste 1 – 2° amostra.



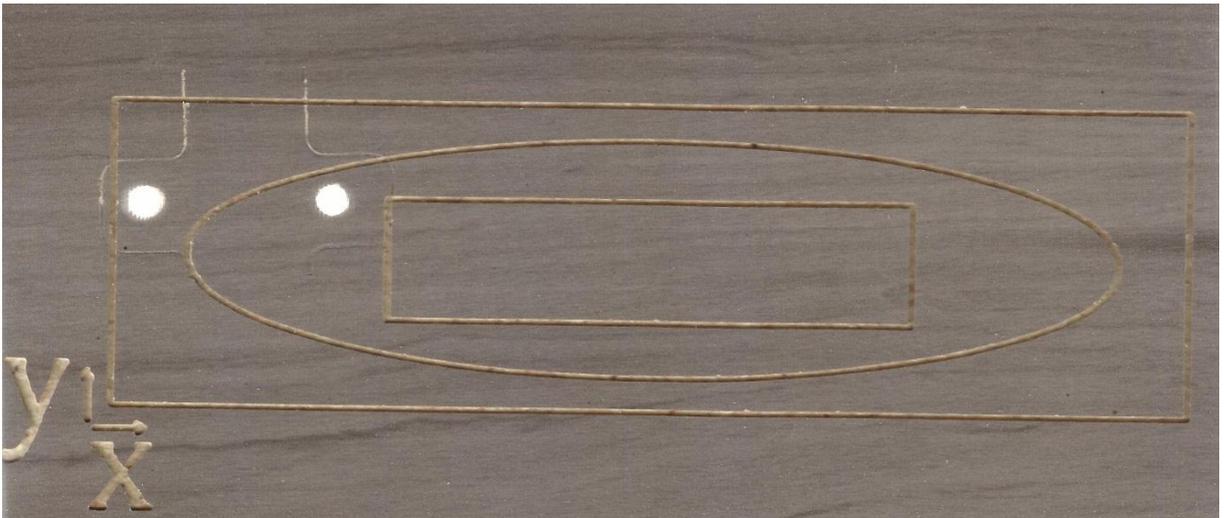
- Teste 1 – 3° amostra.



- Teste 1 – 4° amostra.



- Teste 1 – 5° amostra.



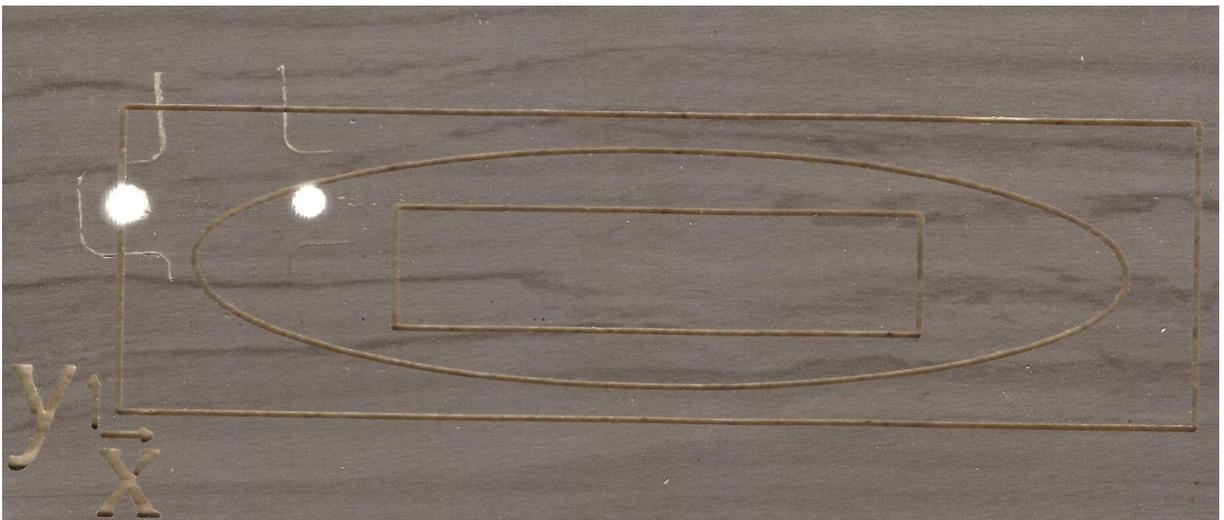
- Teste 1 – 6° amostra.



- Teste 1 – 7° amostra.



- Teste 1 – 8° amostra.



## APÊNDICE C – DIGITALIZAÇÃO DE PEÇAS FRESADAS PELA MÁQUINA CNC DURANTE TESTE 2

- Teste 2 – 1º amostra.



- Teste 2 – 2º amostra.



- Teste 2 – 3º amostra.



- Teste 2 – 4° amostra.



- Teste 2 – 5° amostra.



- Teste 2 – 6° amostra.



- Teste 2 – 7° amostra.



- Teste 2 – 8° amostra.

