

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA.**

**CAMPUS JOINVILLE
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM
MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

**CEZAR SCHMITZ
GUILHERME VIEIRA LOPES**

**IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DE IMPRESSÃO 3D EM UM
EQUIPAMENTO DE USINAGEM DE PLACAS PCB**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CEZAR SCHMITZ
GUILHERME VIEIRA LOPES**

**IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DE IMPRESSÃO 3D EM UM
EQUIPAMENTO DE USINAGEM DE PLACAS PCB**

JOINVILLE, 2018

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA.**

**CAMPUS JOINVILLE
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM
MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

**CEZAR SCHMITZ
GUILHERME VIEIRA LOPES**

**IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DE IMPRESSÃO 3D EM UM
EQUIPAMENTO DE USINAGEM DE PLACAS PCB**

**Submetido ao Instituto
Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos
requisitos de obtenção do
título de Tecnólogo em
Mecatrônica Industrial.**

**Orientador: Rodrigo Coral, Dr.
Eng.**

JOINVILLE, 2018

IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DE IMPRESSÃO 3D EM UM EQUIPAMENTO DE USINAGEM DE PLACAS PCB

**CEZAR SCHMITZ
GUILHERME VIEIRA LOPES**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Mecatrônica Industrial do Instituto Federal de Educação, ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Joinville, 11 de dezembro de 2018.

Banca Examinadora:

**Prof. Rodrigo Coral, Dr. Eng.
Orientador**

**Prof. Ary Victorino da Silva Filho, Msc. Eng.
Avaliador**

**Prof. Michael Klug, Dr. Eng.
Avaliador**

Schmitz, Cezar.

Implementação da Função de Impressão 3D em um Equipamento de Usinagem de Placas PCB / Cezar Schmitz, Guilherme Vieira Lopes – Joinville, 2018. 118 p.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Santa Catarina, Curso Superior em Tecnologia Mecatrônica Industrial, Joinville, 2018.

Orientador: Rodrigo Coral, Dr.

1. Equipamento. 2. Implementação. 3. Impressão 3D. 4. Placas PCB. 5. Prototipagem.

I. Implementação da Função de Impressão 3D em um Equipamento de Usinagem de Placas PCB. II. Instituto Federal de Santa Catarina.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus que nos capacitou e deu a força necessária para finalizarmos essa etapa.

Aos nossos familiares, especialmente os nossos pais que durante todo o curso estiveram ao nosso lado nos apoiando, tornando possível também essa conquista.

Ao professor Rodrigo Coral pelo apoio e orientação para a elaboração desse projeto e por todos ensinamentos durante o período de orientação de pesquisa.

Ao professor Michael Klug por nos confiar o equipamento de sua autoria para que pudéssemos realizar esse projeto.

Ao professor Ary Victorino da Silva Filho por aceitar o convite de fazer parte da banca desse projeto e pelos ensinamentos durante o curso.

Ao professor Paulo Roberto de Oliveira Bonifácio pelos períodos de orientação em iniciação científica e por seus ensinamentos ao longo dessa jornada.

Aos demais professores da instituição pela imensa colaboração intelectual e pelas oportunidades nos dadas ao longo da graduação.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina pelos recursos fornecidos para a elaboração desse projeto e pela disponibilização de toda a estrutura a confecção desse e de outros projetos.

Aos colegas por toda a colaboração e aprendizado conjunto ao longo do curso e pelas amizades feitas para a vida.

“Eu não disse que seria fácil,
mas que valeria a pena” **São
João Bosco.**

RESUMO

Este projeto tem como objetivo a implementação da função de impressão 3D em um equipamento de prototipagem de placas PCB através da elaboração de um método de troca de cabeçote otimizada. Uma das motivações deste projeto é a necessidade de equipamentos de impressão 3D e prototipagem de placas PCB pelos estudantes do IFSC nas disciplinas dos cursos e nos projetos de pesquisa. Para implementação da funcionalidade de impressão 3D foi desenvolvido um suporte de cabeçote para troca de função. Ainda visando esse processo foi construído um conjunto de extrusão de filamento plástico e realizadas as conexões eletroeletrônicas referentes as duas funções do mesmo. Para o controle dos dois processos possíveis foi necessário a busca de um software que fosse compatível com a placa de controle do equipamento e ao mesmo tempo com as funcionalidades deste. Foram realizados testes com a máquina tanto de impressão 3D quanto de usinagem de perfil e mediante as dificuldades encontradas foram efetuados os ajustes.

Palavras-Chave: Equipamento, Implementação, Impressão 3D, Placas PCB, Prototipagem.

ABSTRACT

This project aims to implement the 3D printing function in a PCB board prototype equipment by developing an optimized head exchange method. One of the motivations of this project is the need for 3D printing equipment and PCB board prototyping by IFSC students in the course disciplines and research projects. For the implementation of the 3D printing functionality, a head support was developed for function change. In order to implement this process, a plastic filament extrusion assembly was constructed and the electro-electronic connections were made for the two functions of the same. In order to control the two possible processes, it was necessary to search for a software compatible with the control board of the equipment and at the same time with the functionalities of this one. Tests were realized out with the machine both for 3D printing and for profile machining and through the difficulties encountered the adjustments were made.

Keywords: Equipment, Implementation, 3D Printing, PCB boards, Prototyping.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Fresadora vertical comandada por Controle Numérico (CN) | 22 |
| Figura 2 - Tipos de guias lineares. | 27 |
| Figura 3 - Mancal pillow block para rolamento linear LME 1200. | 28 |
| Figura 4 - Mancal tipo flange para rolamento radial 6000. | 29 |
| Figura 5 - Rolamento 6000 DDU. | 30 |
| Figura 6 - Rolamento linear de esferas. | 31 |
| Figura 7 - Sistema de funcionamento do fuso de esferas recirculantes. | 32 |
| Figura 8 - Software gratuito para o modelamento de objetos 3D. | 34 |
| Figura 9 - Divisões do padrão STL em geometria complexa. | 35 |
| Figura 10 - Representação básica de uma impressora 3D. | 37 |
| Figura 11 - Peça produzidas no processo FDM antes e depois do acabamento. | 39 |
| Figura 12 - Processo de Extrusão Industrial. | 43 |
| Figura 13 - Extrusão de filamento na impressora 3D. | 44 |
| Figura 14 - Processo FDM. | 45 |
| Figura 15 - Motor de Passo. | 49 |
| Figura 16 - Placa CNC USB Controller. | 51 |
| Figura 17 - Vista frontal da condição inicial do equipamento. | 59 |
| Figura 18 - Guia linear 12mm de diâmetro, acoplada ao suporte de alumínio extrudado. | 59 |
| Figura 19 - Fuso de esferas recirculantes 16 mm de diâmetro. | 60 |
| Figura 20 - A esquerda mancal para rolamento linear, a direita mancal para rolamento radial. | 61 |
| Figura 21 - A esquerda rolamento radial, a direita rolamento linear. | 61 |
| Figura 22 - Acoplamento Flexível. | 62 |
| Figura 23 - Driver Motor de Passo AKDMP16-7.2 A. | 63 |
| Figura 24 - Vista lateral da condição inicial do equipamento. | 66 |
| Figura 25 - Parte do equipamento em processo de desmontagem. | 67 |
| Figura 26 - Processo de pintura e remontagem. | 67 |
| Figura 27 - Modelamento da proteção do motor de passo. | 68 |
| Figura 28 - Faixas térmicas do sistema de extrusão. | 69 |
| Figura 29 - Tipos de extrusor utilizados no ramo. | 70 |

| | |
|--|-----|
| Figura 30 - Modelo de extrusor construído para o projeto..... | 70 |
| Figura 31 - Dissipador de calor desenvolvido..... | 72 |
| Figura 32 - Conjunto de extrusão..... | 72 |
| Figura 33 - Método de travamento cabeçote..... | 74 |
| Figura 34 - Processo de usinagem e instalação do suporte de ferramenta. | 76 |
| Figura 35 - Mesa aquecida..... | 77 |
| Figura 36 - Suportes mesa..... | 77 |
| Figura 37 - Mesa de usinagem..... | 78 |
| Figura 38 - Perfil cantoneira painel..... | 79 |
| Figura 39 - Painel do equipamento. | 80 |
| Figura 40 - Conexão mesa aquecida | 82 |
| Figura 41 - Fluxograma controle do equipamento (simplificado)..... | 83 |
| Figura 42 - Ramps 1.4 conexões. | 85 |
| Figura 43 - Arduino Mega 2560..... | 85 |
| Figura 44 -(1) Retirada varistor e curto circuito nos pólos (2) Retirada diodo D1..... | 87 |
| Figura 45 -Mini retífica e conector elétrico..... | 88 |
| Figura 46 - Visualização do software Marlin na IDE Arduino..... | 91 |
| Figura 47 -Cálculo do número de passos para movimentar 1 mm nos eixos X/Y/Z. . | 93 |
| Figura 48 - Dissipador de calor desenvolvido..... | 99 |
| Figura 49 - Passos para conversão G-Code no MakerCam..... | 101 |
| Figura 50 - Modelo de cubo padrão. | 102 |
| Figura 51 - Configuração de impressão no Slic3r. | 103 |
| Figura 52 - Configuração de filamento/temperatura. | 104 |
| Figura 53 - Cubo padrão prototipado no equipamento..... | 105 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 - Equipamentos que utilizam comando CNC..... | 24 |
| Quadro 2 - Vantagens das guias lineares | 26 |
| Quadro 3 - Vantagens mancais de rolamento | 30 |
| Quadro 4 - Necessidades processo FDM..... | 37 |
| Quadro 5 - Combinação de movimentos eixos..... | 38 |
| Quadro 6 - Vantagens e desvantagens materiais FDM..... | 42 |
| Quadro 7 - Organização do capítulo | 46 |
| Quadro 8 - Vantagens e desvantagens motores de passo | 50 |
| Quadro 9 - Placa CNC USB Controller..... | 52 |
| Quadro 10 - Características Raspaberry Pi..... | 53 |
| Quadro 11 - Características motor NEMA AK56h/3-1.8 | 62 |
| Quadro 12 - Características do Drive | 63 |
| Quadro 13 - Etapas de construção do suporte de ferramenta..... | 75 |
| Quadro 14 - Dimensões cantoneiras cortadas | 80 |
| Quadro 15 - Dimensões policarbonato..... | 81 |
| Quadro 16 - Características Eletrônicas A4988 | 87 |
| Quadro 17 - Distâncias máximas dos eixos com a instalação das fim-de-curso. | 98 |
| Quadro 18 - Dimensões cubo padrão | 105 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| SIGLA | DESCRIÇÃO |
|--------------|---|
| 3D | 3 Dimensões |
| A | Ampére |
| ABS | Acrylonitrile butadiene styrene - Acrilonitrila butadieno estireno |
| CA | Corrente Alternada |
| CAD | Computer-aided design - Desenho Auxiliado por Computador |
| CAM | Computer-aided manufacturing - Manufatura auxiliada por computador |
| CC | Corrente Contínua |
| CN | Comando Numérico |
| CNC | Comando Numérico Computadorizado |
| FDM | Fused deposition modeling - Modelagem por fusão e deposição |
| G-Code | Código G |
| HDMI | High-Definition Multimedia Interface - Interface Multimídia de Alta Definição |
| IHM | Interface Homem-Máquina |
| LCD | Liquid Crystal Display - Display de Cristal Líquido |
| NTC | Negative Temperature Coefficient - Coeficiente de Temperatura Negativo |
| PCB | Printed circuit board - Placa de Circuito Impresso |
| PLA | Polylactic Acid - Poliláctico |
| PTC | Positive Temperature Coefficient - Coeficiente de Temperatura Positivo |
| STL | STereoLithography - Esteriolitografia |
| USB | Universal Serial Bus - Porta Universal |
| Vca | Volts Corrente Alternada |
| Vcc | Volts Corrente Contínua |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA | 19 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL | 21 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 21 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 22 |
| 2.1 PROCESSO CNC | 22 |
| 2.2 ÁREA MECÂNICA | 24 |
| 2.2.1 Guias Lineares | 25 |
| 2.2.2 Mancais | 27 |
| 2.2.2.1 Mancais Fixos | 27 |
| 2.2.3 Fuso de Esferas Recirculantes | 32 |
| 2.2.4 Acoplamento | 33 |
| 2.2.5 Processo de Impressão 3D | 33 |
| 2.3 PARTE ELETROELETRÔNICA | 45 |
| 2.3.1 Fonte de Alimentação | 47 |
| 2.3.2 Resistores | 48 |
| 2.3.3 Motor de Passo | 49 |
| 2.3.4 Placa CNC USB Controller | 51 |
| 2.3.5 Driver de Acionamento Motores de Passo | 52 |
| 2.3.6 Raspberry Pi 3 | 53 |
| 2.3.7 Tela LCD | 54 |
| 2.3.8 Termistor NTC | 54 |
| 2.4 SOFTWARE | 54 |
| 2.4.1 Software CNC USB Controller | 55 |
| 2.4.2 Softwares de Impressão 3D | 55 |
| 3 ESTRUTURA ORIGINAL | 58 |
| 3.1 ESTRUTURA BASE | 58 |
| 3.2 MOVIMENTAÇÃO | 59 |
| 3.3 ELETRÔNICA | 62 |
| 4 DESENVOLVIMENTO | 65 |
| 4.1 ESTRUTURA MECÂNICA | 65 |
| 4.1.1 Revitalização da estrutura | 66 |
| 4.1.2 Construção do Sistema de Extrusão | 69 |
| 4.1.3 Suporte de Troca de Cabeçote | 73 |
| 4.1.4 Mesa de Impressão | 76 |
| 4.1.5 Mesa de Usinagem | 78 |
| 4.1.6 Construção do painel | 78 |

| | |
|--|-----|
| 4.2 ELETRÔNICA..... | 81 |
| 4.2.1 Aquecimento do bico..... | 81 |
| 4.2.2 Aquecimento da mesa..... | 81 |
| 4.2.3 Cabos e Conexões..... | 82 |
| 4.2.4 Placas de Controle..... | 83 |
| 4.2.5 Arduino e RAMPS 1.4..... | 84 |
| 4.2.6 Driver A4988..... | 87 |
| 4.2.7 Dispositivo de Usinagem de Placas PCB..... | 88 |
| 4.3 SOFTWARE DE CONTROLE..... | 89 |
| 4.3.1 Raspbian..... | 89 |
| 4.3.2 CNC USB Controller..... | 89 |
| 4.3.3 GRBL - Firmware Marlin..... | 90 |
| 4.3.4 Pronterface..... | 95 |
| 5 TESTES E AJUSTES..... | 97 |
| 5.1 MECÂNICA..... | 98 |
| 5.1.1 Movimentação..... | 98 |
| 5.2.2 Sistema de Extrusão..... | 99 |
| 5.2 SOFTWARE..... | 99 |
| 5.2.1 Homing..... | 100 |
| 5.3.2 Cálculo de Passos..... | 100 |
| 5.3.3 Usinagem..... | 100 |
| 5.3.4 Impressão Cubo Padrão..... | 101 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 106 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 108 |
| ANEXO 1..... | 117 |
| ANEXO 2..... | 118 |
| ANEXO 3..... | 119 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A criação de novos equipamentos e máquinas origina-se de um movimento comum na história da indústria, com isso podem ser desenvolvidos novos processos produtivos. Da mesma forma, a adaptação dos mesmos torna-se uma alternativa interessante em muitos casos. Conforme afirma Tironi [1] quanto às alterações feitas em um produto as mesmas podem ser classificadas considerando o grau da modificação, se mínimo ou próximo disso se considera inovação incremental, do contrário se considera uma inovação radical. Exemplificando, pode-se pensar num modelo de celular, o qual no período de um ano é atualizado para um novo modelo com uma câmera melhor, nesse caso tem-se uma inovação incremental.

A indústria moderna apresenta uma grande necessidade em relação a velocidade dos processos, sempre buscando atender as exigências dos clientes. Conforme estudos de Mietti [2], a inovação e a competitividade estão intimamente ligadas, uma vez que o ciclo de vida dos produtos vem diminuindo cada vez mais. As empresas necessitam de um processo de desenvolvimento de produto mais rápido e barato. Assim a prototipagem rápida pode ser vista como um grande benefício para indústria no que diz respeito a projeto de desenvolvimento, pois através dela pode-se obter um modelo do produto de forma rápida e de baixo custo.

A tecnologia de manufatura aditiva pode parecer algo recente, porém, estudando o que diz Cunico [3], o conhecimento do processo de fabricação por camadas é algo mais antigo, com início a partir dos anos 80. No entanto, nessa época a finalidade dos equipamentos era construir de maneira acelerada protótipos que não necessitassem da utilização de moldes ou ainda da manufatura subtrativa, como fresas e tornos para remover o material. Viana [4] afirma que, apesar da criação dos conceitos possuir algumas décadas, a popularização dos equipamentos de manufatura aditiva é algo contemporâneo, bem como sua utilização doméstica que teve seus primeiros passos a partir dos anos 2000. Para promover a acessibilidade dessa tecnologia surgiram comunidades de desenvolvedores, os quais disponibilizam seus projetos para que outras pessoas ao redor do mundo possam construir os equipamentos, os mesmos são denominados "*makers*". Uma das mais populares

comunidades de construtores de *impressoras 3D* é o site (<http://reprap.org/>), onde os criadores disponibilizam seus projetos em áreas como mecânica, eletroeletrônica e software.

A impressão 3D pode ser feita de diversas formas, através de diferentes processos. Neste projeto será estudado o processo de Fusão e Deposição de Material (FDM). Conforme Cunico [3] essa tecnologia teve início em 1989 através dos estudos e trabalhos de Crump, fundador da Stratasys. Ainda segundo o autor, esse processo tornou-se popular entre as impressoras de baixo custo, com a queda da patente da Stratasys, em função da comunidade *maker RepRap*.

O processo da adaptação de equipamentos e máquinas é algo comum na indústria e na área acadêmica, dessa forma algumas características podem ser destacadas com base em alguns projetos no mesmo viés deste trabalho. Nos resultados obtidos por Arruda [5], observa-se que um dos grandes benefícios da adaptação de um equipamento para atender uma outra necessidade, torna os custos da construção do projeto reduzidos. A partir do ponto de vista de Franco [6], constata-se que os dispositivos de usinagem CNC possuem estruturas mais robustas que o necessário para o processo de impressão 3D, dessa forma o mesmo considera isso uma vantagem, uma vez que são possíveis maiores velocidades de posicionamento.

Atualmente algumas empresas já possuem produtos híbridos, essas utilizam da versatilidade do equipamento como diferencial. Conforme a fabricante 3be¹ [7], sobre o dispositivo multifuncional Zmorph, a mesma afirma que esse traz benefícios especialmente na área de desenvolvimento de produto, prototipagem e produção de pequenos lotes.

Neste trabalho encontra-se o processo de adaptação de um equipamento de usinagem de placas PCB, do inglês *Printed Circuit Board* ou placa de circuito impresso, para uma formação híbrida onde é possível, além de sua função original, trabalhar como impressora 3D. Para tal foi utilizada uma máquina desenvolvida e doada por um professor² do IFSC para o curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, para que posteriormente a mesma seja utilizada nos projetos acadêmicos de pesquisa e extensão. Tratando-se de projetos nas áreas técnicas especialmente

¹ Empresa do mercado da impressão 3D, possui um modelo híbrido chamado Zmorph, mais informações podem ser encontradas em <<http://3be.com.br/>> Acesso em 05 de junho de 2018.

² Professor Michael Klug, Dr. Eng.

ligadas a mecatrônica, a utilização de um equipamento de impressão 3D é frequente. O projeto consiste em alterações estéticas e funcionais do equipamento, com *retrofitting* da máquina e implementação de novos recursos.

Durante o curso superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial os estudantes precisam muitas vezes dos recursos que a prototipagem rápida dispõe para novos projetos. Essa necessidade também é sentida pelos bolsistas de iniciação científica da instituição. No entanto, as máquinas de impressão 3D disponíveis ainda são poucas em função da demanda. Além da necessidade da criação de peças através da manufatura aditiva, os estudantes também precisam ao longo das disciplinas relacionadas com a eletrônica construir placas de circuito impresso, por isso uma fresadora para usinagem de placas PCB também é um equipamento essencial para os mesmos. Ainda visando novas utilizações, um produto híbrido pode ser adaptado para outras utilizações e demandas que possivelmente podem surgir de acordo com as necessidades.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse projeto é a implementação da função de impressão 3D em um equipamento de usinagem de placas PCB, utilizando um sistema de troca otimizada de cabeçote.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste projeto serão descritos nos seguintes tópicos:

- Realizar um *retrofitting* no equipamento existente;
- Desenvolver um dispositivo de fixação otimizado para troca de função do equipamento;
- Construir um bico extrusor de filamento de material polimérico;
- Adaptação da mesa para que atenda as duas funções do equipamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais componentes e conceitos para o funcionamento de um CNC (Comando Numérico Computadorizado), que em geral é base de uma impressora 3D, bem como uma breve explicação sobre os mesmos, auxiliando na leitura do texto e compreensão da proposta do trabalho. Os subcapítulos seguintes exibem uma breve abordagem sobre as áreas envolvidas, que são: mecânica, eletroeletrônica e software.

2.1 PROCESSO CNC

Os primeiros passos na automação de processos de manufatura subtrativa, como a usinagem, aconteceram durante a década de 60, onde houve a criação do controle numérico (CN). Segundo Marcicano [8], os primeiros testes foram feitos em uma fresadora vertical, usando como código uma fita de papel perfurada, visto na Figura 1. A partir do experimento, na indústria iniciou-se a produção desses equipamentos. Como consequência, por volta de 1970, o surgimento dos microprocessadores e avanço da eletrônica permitiu o desenvolvimento da tecnologia CNC.



Figura 1 - Fresadora vertical comandada por Controle Numérico (CN)
Fonte: Protoptimus [11].

Comparando os primeiros centros de usinagem CNC com os da atualidade, vê-se uma grande evolução devido ao desenvolvimento da eletrônica. Explorando o que diz Machado [9], na década de 70 usava-se um minicomputador para o funcionamento das CNC's e logo após com a implementação de microprocessadores, reduziu-se custo de fabricação. Com este avanço aumentou-se a capacidade do equipamento e reduziu-se o tamanho do mesmo. Atualmente, a agilidade do processo de usinagem é mais evidente, isso é afirmado por Ferrari [10], onde as máquinas operam de modo simultâneo o controle dos eixos presentes. Ainda se tem a possibilidade de usinagem de geometrias complexas, operando com curtos ciclos. Em um mesmo centro de usinagem é possível fazer o controle de avanço e posição do fuso principal, assim como rosqueamento em ângulo, transverso, fora de centro e fresamentos variados.

As aplicações do CNC são diversas, considerando que o princípio básico de funcionamento é o posicionamento cartesiano, têm-se múltiplas funcionalidades. Conforme artigo da empresa Protoptimus [11], alguns exemplos de equipamentos que podem ser comandados com CNC são citados no Quadro 1, estes definidos por categoria, função, tipo de processo e número de eixos. O mesmo menciona a impressora 3D, que, ao invés de remover material como as outras máquinas citadas, faz adição de matéria prima camada por camada.

Quadro 1 - Equipamentos que utilizam comando CNC

| Categoria | Função | Tipo de Processo | Nº de eixos |
|----------------------|--|-------------------------|--------------------|
| Fresadora CNC | Usinagem de peças através da movimentação da mesa de fixação e rotação da ferramenta de corte. | Subtração de Material | 3 ou mais |
| Torno CNC | Usinagem em geral de peças cilíndricas e simétricas, onde a peça é rotacionada e a ferramenta permanece fixa. | Subtração de Material | 2 ou mais |
| Router | Muito semelhantes as fresadoras CNC, as Routers tem como diferencial a utilização de pórtico móvel, sendo assim o que se movimenta é a ferramenta e a peça usinada permanece fixa. | Subtração de Material | 3 ou mais |
| Impressora 3D | Utilizam de princípio de construção camada por camada com o posicionamento do bico direcionado. | Adição de Material | 3 ou mais |

Fonte: Protoprimus [11].

2.2 ÁREA MECÂNICA

Segundo Mendes [12], a mecânica é um campo da física que estuda os movimentos é ramificada em cinemática, dinâmica e estática. Neste trabalho, os três ramos são contemplados da seguinte forma: cinemática, nas movimentações dos eixos; dinâmica, analisando as forças que geram esses movimentos; estática, na

estrutura, garantindo que a mesma se mantenha em equilíbrio diante das forças atuantes.

A primeira área a ser observada é a mecânica, visando que esta define o formato da máquina. Nessa área, o projeto tem duas principais divisões, os componentes essenciais para movimentação, encontrados nos itens 2.1.1 a 2.1.5, e a estrutura do CNC. Ainda, de acordo com os propósitos deste trabalho, ressalta-se os elementos específicos para o funcionamento da extrusão do filamento de prototipagem, que podem ser vistos no item 2.1.6.

2.2.1 Guias Lineares

As guias lineares são elementos da estrutura de uma máquina, cuja função é permitir o movimento linear dos membros e absorver os carregamentos nos mesmos. Para que tais movimentos aconteçam é necessário todo um conjunto, e os elementos que fazem parte dele são: fuso de esferas recirculantes e os rolamentos lineares, este também conhecido como bucha de esferas recirculantes.

Stoeterau [13] define o que é fundamental na construção de uma guia:

Assim como todas as demais partes de máquina-ferramenta, estas devem ser construídas suficientemente rígida, para que as variações de forma que se originam da ação de forças estáticas e dinâmicas, assim como dos movimentos, não venham a exceder a limites estabelecidos, prejudicando tanto a exatidão geométrica quanto dimensional. (STOETERAU, 1992, p.21)

A eficiência das guias lineares cilíndricas se dá em curtas distâncias, se apoiadas somente pelas extremidades em percursos longos a mesma pode fletir, logo é necessário um apoio por toda a extensão da guia. Esse fato é explicado por Thyer [14] que menciona a solução para esse problema, no caso de equipamentos de maior dimensão, é construir uma base longitudinal sobre a guia. O autor também afirma que este elemento deve ter um bom acabamento, para o suave deslizamento das esferas dos rolamentos lineares na superfície da guia.

Tem-se algumas vantagens na implementação deste componente aos projetos de máquinas, os quais podem ser vistos no Quadro 2.

Quadro 2 - Vantagens das guias lineares

| | |
|------------------------------|---|
| Instalação | Torna-se fácil, recomenda-se utilizar o torque adequado para uma movimentação precisa. |
| Lubrificação | O bloco do rolamento linear conta com ponto de lubrificação através de uma graxeira, com isso aumenta-se a vida útil das guias. |
| Suavidade na movimentação | A construção da guia é de acordo com o acoplamento dos rolamentos lineares tornando o movimento da máquina suave. |
| Intercambiável (Fácil troca) | Em caso de dano ou desgaste gerado pela vida útil a mesma pode ser trocada facilmente. |

Fonte: Os autores.

Vários são os formatos das guias lineares, visto que a mesma pode ser de uma determinada forma geométrica ou conjunto delas. São utilizadas para as mais diversas aplicações, que fornecem as mesmas vantagens tornando o projeto eficiente em relação à precisão, as características mencionadas podem ser visualizadas na Figura 2.

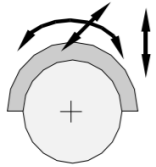
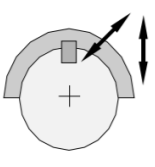
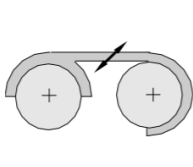
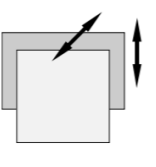
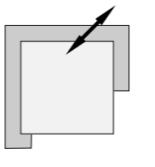
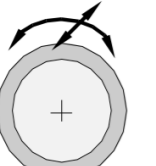
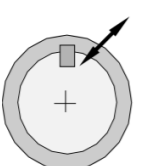
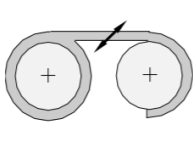
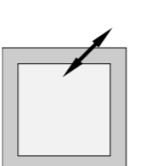
| FORMA | CILÍNDRICAS | | | PRISMÁTICAS | |
|-----------|---|---|--|---|---|
| TIPO | ABERTAS | | | | |
| RESTRIÇÃO | SEM | INTERNA | EXTERNA | SEM | COM |
| |  |  |  |  |  |
| TIPO | FECHADAS | | | | |
| RESTRIÇÃO | SEM | INTERNA | EXTERNA | SEM | COM |
| |  |  |  | ----- |  |

Figura 2 - Tipos de guias lineares.
Fonte: Stoeterau [15].

2.2.2 Mancais

Os mancais podem ser definidos de várias formas, porém todas elas chegam a uma conclusão, que é afirmada por Stoeterau [15], os mesmos são elementos de um equipamento que geralmente proporcionam apenas um grau de liberdade. Esses componentes de máquinas possibilitam somente deslocamento rotacional, que compreendem a absorção ou transferência de forças.

Analisando o que diz Duarte Jr. [16], outro aspecto pode ser ressaltado, um mancal é um componente de um equipamento frequentemente utilizado junto de duas peças sólidas. A principal função é distanciar estas peças, interrompendo o atrito entre as mesmas. Esses elementos normalmente dispõem de componente lubrificante, que é introduzido entre as peças.

Ainda conforme Norton [17], esses são considerados mancais quando duas partes possuem movimento relativo entre si não levando em conta quesitos como configuração ou forma.

2.2.2.1 Mancais Fixos

Os mancais são de suma importância para o funcionamento de qualquer equipamento que necessite deslocamento em guias lineares. Com o intuito de registrar tais características, destaca-se o que diz Encopel [18], os mancais são

componentes de máquinas que tem por finalidade sustentar elementos com deslocamento rotativo. Habitualmente, estes elementos são formados por materiais como o ferro fundido, por exemplo, em duas partes. Em relação ao que foi dito verifica-se também a existência de mancais que não são formados por duas partes e ainda compostos por outros materiais, como o alumínio fundido, este exemplo pode ser visualizado na Figura 3.



Figura 3 - Mancal pillow block para rolamento linear LME 1200.
Fonte: Os autores.

Como a grande maioria dos equipamentos industriais possuem mancais fixos para seu desempenho, os mesmos podem ter diferentes formatos atendendo perfeitamente as características das máquinas. Um outro exemplo de mancal utilizado na indústria é o tipo flange, conforme Visão Rolamentos [19], esse é adequado para o equipamento cujo o eixo transpassa a estrutura com um ângulo de 90°, comumente fixado por quatro parafusos em locais de fácil acesso, um exemplo do mesmo pode ser visto na Figura 4.

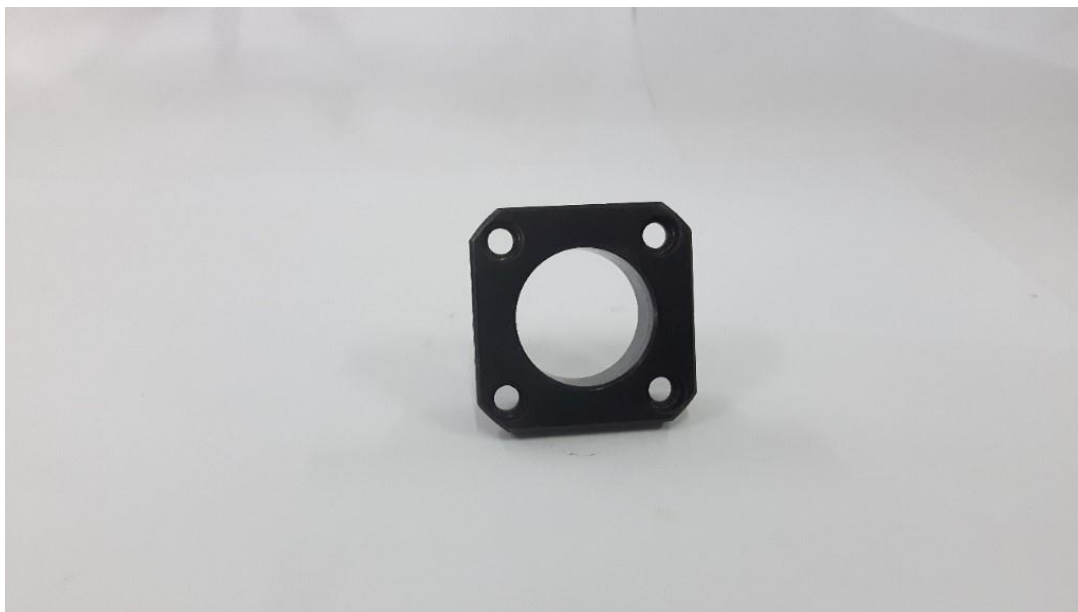


Figura 4 - Mancal tipo flange para rolamento radial 6000.
Fonte: Os autores.

2.2.2.2 Mancais de Rolamento

Desde a invenção da roda o homem busca a redução do atrito entre partes girantes, primeiramente com os mancais, esses foram muito válidos por um longo período de tempo. No entanto, com a evolução dos processos, foram criados rolamentos cada vez mais sofisticados gerando agilidade nas mais diversas aplicações.

A necessidade do uso de um rolamento se dá quando o mancal comum não consegue fornecer a rotação necessária, conforme constatado por Telecurso 2000 [20]:

Quando um eixo gira dentro de um furo produz-se, entre a superfície do eixo e a superfície do furo, um fenômeno chamado atrito de escorregamento. Quando é necessário reduzir ainda mais o atrito de escorregamento, utilizamos um outro elemento de máquina, chamado rolamento. (TELECURSO 2000, 1997, p. 3)

Os mancais de rolamento são os mais comuns na grande maioria das aplicações, na Figura 5 pode ser visto um exemplo de rolamento. Visto que na indústria predomina a necessidade de movimentos circulares em função dos motores elétricos, quando é feita a transmissão a outros eixos é comum utilizar um rolamento acoplado ao novo eixo. Esses rolamentos têm algumas vantagens em relação aos mancais de deslizamento, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Vantagens mancais de rolamento

| Requisitos | Características |
|---------------------------|---|
| Torque | Pequena diferença entre torque de partida e torque de funcionamento |
| Substituição e Manutenção | Em função da padronização a troca dos rolamentos torna-se simples, também sua configuração no eixo facilita a manutenção e revisão. |
| Cargas Suportadas | Possuem capacidade de sustentar ao mesmo tempo cargas radiais e axiais. |
| Temperatura de Trabalho | Tem capacidade de trabalhar em temperaturas baixas ou altas dependendo da especificação. |
| Folga | Possibilita a aplicação com pré-carga ou seja folga negativa. |

Fonte: NSK [21].



Figura 5 - Rolamento 6000 DDU.
Fonte: Os autores.

2.2.2.3 Rolamento Linear

A reflexão sobre rolamentos, de modo geral se refere a um elemento que forneça um movimento circular, no entanto, o rolamento linear possui uma configuração um pouco diferente. No que diz respeito à composição, os rolamentos lineares e circulares são basicamente iguais, porém a arquitetura do mesmo possui diferenças. Tendo em vista o que diz SKF do Brasil [22] o rolamento linear de esferas tem como partes uma gaiola de polímero e também pistas produzidas em aço temperado que fazem o papel de guiar as esferas. Neste tipo de rolamento as esferas entram em contato direto com a guia linear, possibilitando assim um movimento retilíneo. A Figura 6 traz um exemplo de rolamento linear.



Figura 6 - Rolamento linear de esferas.
Fonte: Os autores.

Ainda conforme Thyer [14], o movimento retilíneo acontece através do contato da guia linear com as esferas, reduzindo o coeficiente de atrito e fornecendo movimentos eficientes, mesmo com velocidade reduzida ou a curta distância de deslocamento. Em cada guia são utilizados pelo menos dois blocos com rolamentos lineares, estes colocados o mais distante possível um do outro.

2.2.3 Fuso de Esferas Recirculantes

Segundo Arieiro [23], este tipo de fuso utiliza o conjunto de recirculação de esferas que possibilita um movimento constante, reenviando as esferas na pista do fuso promovendo um deslocamento suave. O sistema de funcionamento pode ser entendido através da Figura 7, e associando o nome ao elemento estudado.



Figura 7 - Sistema de funcionamento do fuso de esferas recirculantes.

Fonte: Disponível em

<http://www.mectrol.com.br/upload/projeto/produtos/imagens_fusos/fuso_q1/fusos-de-esferas-de-baixo-ruído.jpg> Acesso em 29 de Agosto de 2018.

O fuso de esferas recirculantes é o responsável pela conversão do movimento circular dos motores em movimento linear para os eixos X, Y e Z. Outra opção para essa conversão de movimento seriam as correias dentadas, no entanto estas são menos robustas que os fusos. Kalatec Automação [24] define fusos de esfera como:

Fuso de esferas é um atuador linear mecânico que traduz o movimento de rotação em movimento linear com pouquíssimo atrito. A haste do fuso de esferas, é um eixo com rosca que proporciona uma pista helicoidal para as esferas deslizarem e atuarem como um parafuso de esferas de precisão, e também capaz de aplicar ou suportar altas cargas axiais. Um dos principais benefícios do fuso de esferas é promover esse movimento linear para altas cargas com o menor atrito possível e precisão. (Disponível em <<http://www.kalatec.com.br/produtos/fusos-de-esferas/>> Acesso 31 de Julho de 2017)

2.2.4 Acoplamento

Em relação aos acoplamentos tem-se como ponto de partida o que diz Antares Acoplamentos [25], onde os mesmos, inicialmente, eram usados como juntas universais, produzidas principalmente por rolamentos, cruzeta e terminais. Com o decorrer dos anos, este grupo de elementos deu origem aos cardans usados na atualidade. Os acoplamentos foram aprimorados através da engenharia mecânica, com o desenvolvimento de novos modelos, pois esse conjunto consistia em um elemento rígido até meados de 1900. Esta evolução ocorre meio às diversas formas de transmissão das máquinas industriais, que necessitam de meios flexíveis e duráveis na transferência de movimento.

O acoplamento é utilizado na transmissão de movimento de um eixo para outro. Frequentemente o mesmo conecta duas partes, não necessariamente de mesmo diâmetro. Conforme evidenciado por Eletrobrás [26] a escolha do modelo correto de acoplamento depende de alguns fatores, como por exemplo: velocidade, torque, potência, contaminação do ambiente entre outros. Quando bem selecionado o acoplamento contribui para o maior rendimento da transmissão.

2.2.5 Processo de Impressão 3D

Em primeiro lugar deve-se observar todas as etapas do processo de impressão 3D ou manufatura aditiva, as quais verificam-se neste item.

Partindo do que diz Cunico [3], observa-se o início do processo com a modelagem 3D, a partir de um software de desenho auxiliado por computador (CAD - do inglês *Computer Aided Design*). Após a modelagem, o arquivo deve ser convertido para o formato Stereolithography, comumente conhecido pela sigla STL. Posteriormente o modelo pode ser produzido na impressora 3D, a mesma utiliza um software que gera o código da peça automaticamente. Em seguida, quando processo de impressão terminar, faz-se um acabamento no modelo final se necessário, para que o mesmo esteja pronto para o uso.

2.2.5.1 Modelagem

Para empresa Siemens [27] desenvolvedora do software Solid Edge, utilizado na produção de objetos 3D, os protótipos podem ser desenvolvidos pela modelagem de sólidos ou superfícies. A primeira tem como foco a funcionalidade do produto deixando a estética em segundo plano. Entretanto, os modelos elaborados pelo método de superfícies têm como objetivo valorizar a ergonomia e estilo do produto final, considerando sua função uma característica secundária.

Segundo 3D HUBS [28], qualquer impressão 3D inicia com um modelo digital tridimensional, para um produto físico, ou ainda pode originar-se de um produto físico para um tridimensional através de um scanner 3D.

É válido salientar o que diz Speck [29], com a modelagem tridimensional de protótipos ou peças, consegue-se de forma simples gerar ambientes completos na forma virtual, no qual é viável analisar a relação dos modelos entre si e também a interação do ambiente em relação ao homem. No primeiro momento verifica-se se a peça está de acordo com as expectativas e faz-se os ajustes necessários. Esse modelamento se dá através de um software de CAD, com licença gratuita ou paga, como o exemplo na Figura 8 apresenta-se o ambiente do TINKERCAD da empresa Autodesk que pode ser acessado gratuitamente.

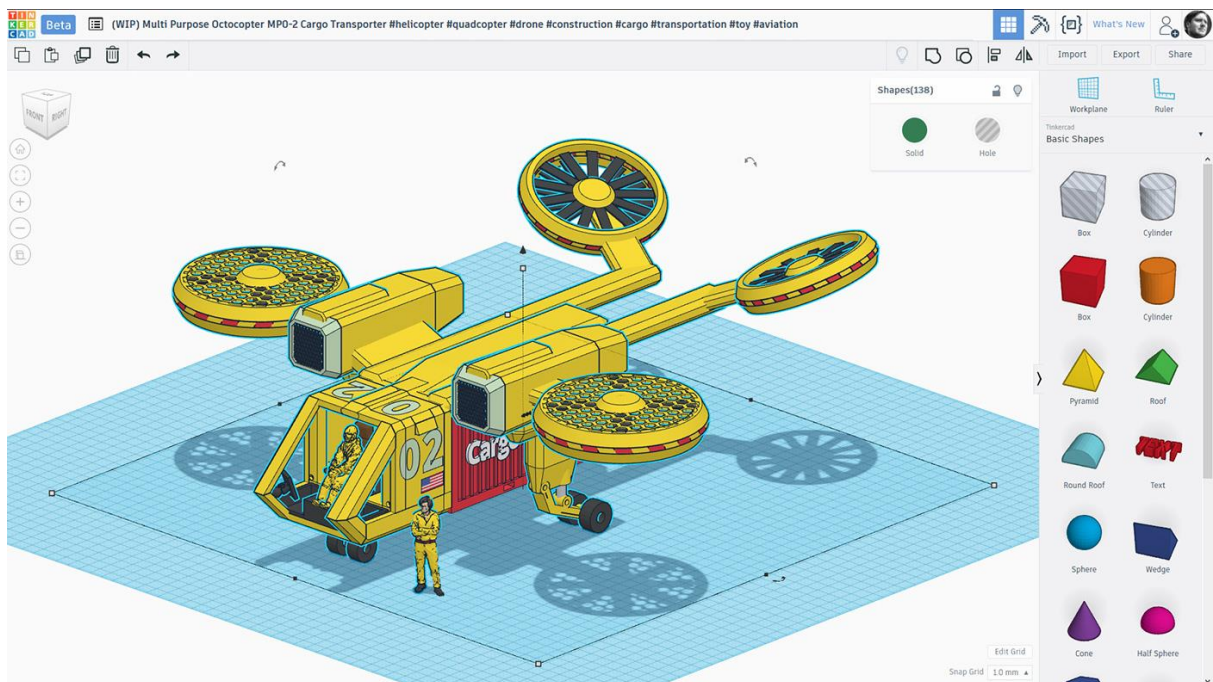


Figura 8 - Software gratuito para o modelamento de objetos 3D.

Fonte: Disponível em <<https://www.behance.net/gallery/49970547/Multi-Purpose-Octocopter-MPO-2-Cargo-Transporter>> Acesso em 20 de Junho de 2018.

2.2.5.2 Preparação do Arquivo da Impressão

O arquivo STL segundo 3D Systems [30], no campo de prototipagem rápida, tornou-se o formato padrão para a transmitir as informações dos modelos tridimensionais. Atualmente em softwares de modelagem a conversão para esse formato acontece de forma fácil, basta escolher a opção quando salvar o arquivo. Ainda conforme o autor, esse padrão consiste em associar as superfícies do modelo final com triângulos. Sendo assim quanto mais complexa geometria do modelo maior a quantidade de triângulos, como pode ser visto na Figura 9.

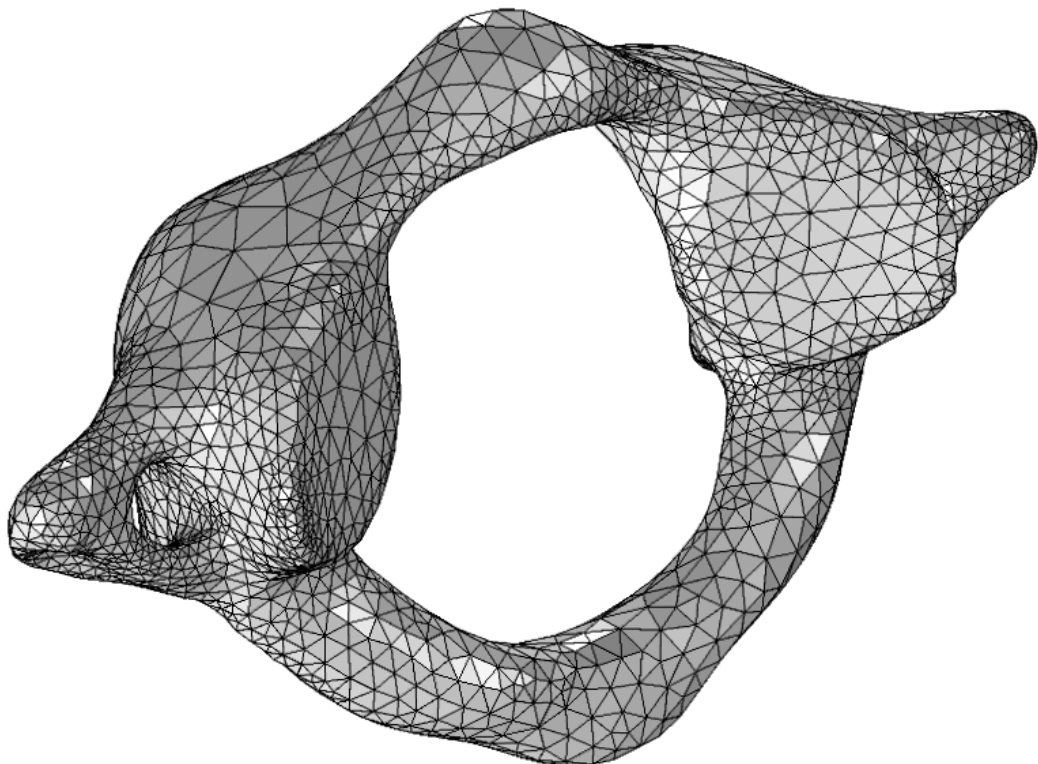


Figura 9 - Divisões do padrão STL em geometria complexa.

Fonte: Disponível em <<https://br.comsol.com/release/5.1/mesh-and-geometry>> Acesso em 22 de Agosto de 2018.

Outro ponto de vista pode ser observado através de Fabbers [31] onde este afirma que o formato STL faz com que a superfície do modelo fique dividida como se fosse um mosaico, tudo isso de maneira lógica, em uma sequência de triângulos.

Cada face do triângulo é caracterizado por uma orientação vertical e três pontos demonstram a aresta do mesmo.

As informações contidas nos modelos STL são utilizadas por um algoritmo que corta os objetos na seção transversal para a construção tridimensional por camadas. O software utilizado para tal tarefa é chamado de “fatiador”, de acordo com Goprint 3D [32], sendo essencial para que a impressora 3D construa o objeto modelado através de um código genérico conhecido como G-Code.

Os dispositivos de impressão 3D comercializados contam com o apoio de um software de fatiamento incluso na compra do equipamento, sendo assim tais softwares são diversos. Contudo as impressoras desenvolvidas por comunidades *makers* incluem em seus projetos fatiadores que são encontrados de forma fácil na internet, que podem ser gratuitos ou com licença paga. Boutique 3D [33] traz uma lista referente a programas que auxiliam nesta tarefa como: Astroprint, Cura, Slic3r, entre outros.

2.2.5.3 Impressão

Essa é etapa da materialização do modelo desenvolvido pelo usuário. Após os passos de modelamento e preparação do arquivo, o que dá continuidade ao processo é a impressão. Para que a peça possa ser construída, simultaneamente no equipamento são realizadas algumas operações que são descritas por Cunico [3], como sendo:

Carregamento de material; liquidificação do material, aplicação de pressão para impulsionar o material através do bico; extrusão; plotagem de acordo com trajetória predefinida pelos comandos numéricos; adesão entre material de construção; inclusão de estrutura de suporte para permitir a construção de geometrias negativas e complexas. (CUNICO, 2015, p. 16)

Observando o processo ilustrado na Figura 10 pode-se destacar a importância dos itens apresentados no Quadro 4, que tornam possível a execução da impressão 3D, e que serão aprofundados no Capítulo 2.2:

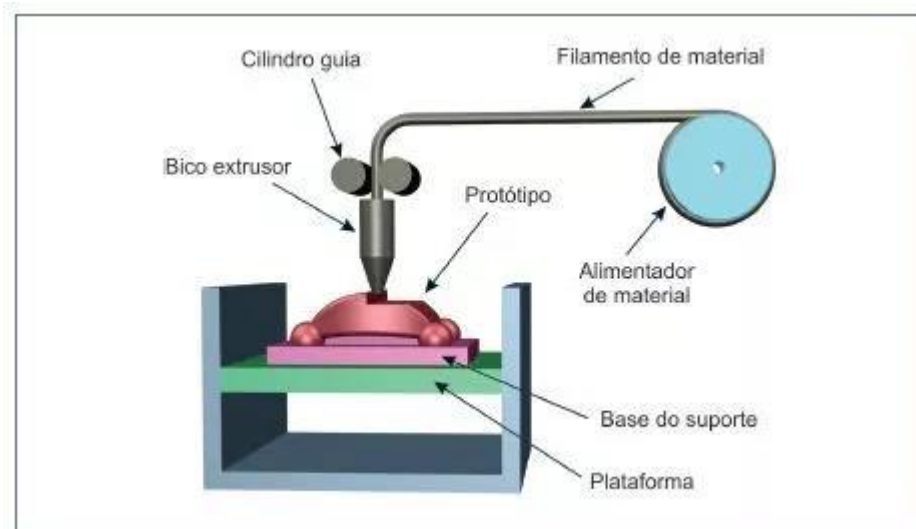


Figura 10 - Representação básica de uma impressora 3D.

Fonte: Disponível em <<https://www.negociosdisruptivos.com/como-funciona-uma-impressora-3d/>> Acesso em 26 de Agosto de 2018.

Quadro 4 - Necessidades processo FDM

| | |
|-------------------------|--|
| Estrutura | Comporta todos os componentes mecânicos e elétricos, é o “esqueleto” do equipamento. |
| Motores | Movimentação em coordenadas X, Y e Z. Auxilia na extrusão de material. |
| Bico de extrusão | Derrete o filamento para a deposição do material determinada pelo microprocessador. |
| Microcontrolador | Recebe o G-Code e transforma em coordenadas para a movimentação e deposição do material. Faz toda a parte de processamento e controle. |

Fonte: Beepinted [34].

O processo de impressão pode variar de acordo com a configuração escolhida para o equipamento, tendo em vista que existem diversos modelos e formas de construção do mesmo. Conforme afirmado por Dantas [35] além das configurações de

mecanismo de movimentação também é importante saber quais partes do equipamento irão se deslocar em cada eixo, em geral tem-se duas opções: Ou se desloca a mesa, ou o bico. No entanto, conforme Quadro 5, há uma possibilidade de oito configurações.

Quadro 5 - Combinação de movimentos eixos

| Configuração | Eixo X | Eixo Y | Eixo Z |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| A | Mesa de impressão | Mesa de impressão | Mesa de impressão |
| B | Mesa de impressão | Mesa de impressão | Cabeçote de extrusão |
| C | Mesa de impressão | Cabeçote de extrusão | Mesa de impressão |
| D | Cabeçote de extrusão | Mesa de impressão | Mesa de impressão |
| E | Mesa de impressão | Cabeçote de extrusão | Cabeçote de extrusão |
| F | Cabeçote de extrusão | Mesa de impressão | Cabeçote de extrusão |
| G | Cabeçote de extrusão | Cabeçote de extrusão | Mesa de impressão |
| H | Cabeçote de extrusão | Cabeçote de extrusão | Cabeçote de extrusão |

Fonte: Dantas [35].

2.2.5.4 Acabamento

Essa é a parte final do processo de impressão 3D que depende da geometria da peça e processo utilizado, pois quanto mais complexo o formato maior a quantidade de suportes gerados e dependendo do processo pode-se ter marcas na superfície.

Conforme Beeprinted [34], os suportes podem ser removidos por quebra, uma vez que são construídos com menor quantidade de filamento, ou ainda dissolvidos em água e detergente.

Segundo Cunico [3], quando utilizado o processo FDM, a necessidade de um acabamento superficial se torna mais evidente, por tratar-se de um processo de extrusão onde o material é depositado camada por camada gerando certa rugosidade na peça. O acabamento nesses casos pode ser feito de forma manual utilizando lixas, material corrosivo ou ferramentas específicas. Na figura 11 pode ser visto uma peça produzida no processo FDM antes e depois do acabamento, este feito com a utilização de resina epóxi.



Figura 11 - Peça produzidas no processo FDM antes e depois do acabamento.
Fonte: Disponível em <<https://pinshape.com/blog/post-processing-your-pla-and-abs-prints/>> Acesso em 27 de Agosto de 2018.

Algumas das técnicas mais utilizadas na hora de dar acabamento nos protótipos são realizadas com vapor de acetona e aplicação de resina epóxi, a primeira para filamentos em ABS e a outra para o PLA. Essas são técnicas de tratamento químico, que conforme 3Dprinting [36], possuem vantagens em relação ao tratamento mecânico no que diz respeito a rapidez do trabalho, porém, fica em desvantagem no custo e toxicidade do mesmo, em contraste com o acabamento mecânico que possui

menor custo relativo, todavia é mais demorado e com riscos de perda de detalhes da peça e ofuscamento da superfície.

2.2.5.5 Polímeros (Filamento)

Na impressão 3D existem diversos métodos e materiais para a criação das peças. Essas são divididas em quatro tecnologias que segundo Cunico [3], são baseadas em: FDM, SLA (do inglês *Stereolithography*, Esteriolitografia), LOM (do inglês *Laminated Object Manufacturing*, Fabricação de Objetos Laminados) e SLS (do inglês *Selective Laser Sintering*, Sinterização Seletiva a Laser). A tecnologia mais popular é a FDM e para entendê-la é necessário conhecer alguns conceitos sobre o comportamento dos polímeros gerais e os específicos utilizados na impressão 3D, assim como o processo de extrusão do plástico, e por fim sobre a tecnologia a base de fusão de polímeros líquidos.

O tipo de material predominantemente utilizado em prototipagem rápida é o polímero, em especial o plástico que significa fácil de ser moldado, e polímero que vem do grego, que quer dizer muitas partes. Sua grande utilização se deve à versatilidade e a facilidade com que eles podem ser trabalhados, outro motivo que afirmado por Callister [37], é o fato de que os polímeros em algumas aplicações podem substituir as peças metálicas, pois suas características técnicas são aceitáveis e seu custo é menor.

Os polímeros possuem três classificações sendo os elastômeros, termoplásticos e termorrígidos. Os materiais mais usados na prototipagem rápida (impressão 3D) no processo de FDM são:

- **ABS (*Acrylonitrile butadiene styrene* - Acrilonitrilo-butadieno-estireno):** Esse polímero possui grande resistência mecânica e térmica para baixas temperaturas. Essas propriedades são definidas pelos "meros" deste polímero cada um deles define uma propriedade específica do material como define Resinex [38] "o monômero de Estireno confere ao **ABS** boa processabilidade, o Acrilonitrilo rigidez, resistência térmica e química enquanto o Butadieno torna o produto mais resiliente a baixas temperaturas."

- **PLA (*Polylactic acid* - **Ácido Poliláctico**):** Segundo Impressão 3D Fácil [39] o polímero PLA é um material ecologicamente correto, por sua composição derivada de amido de milho, raízes de mandioca e cana. Este termoplástico apresenta características de maior rigidez e resistência, no entanto, lhe torna menos suscetível a deformações e mais frágil ao impacto. O material também se mostra muito conveniente a extrusão por sua alta fluidez e "baixa temperatura" de fusão, em torno de 70° C. Além disso, o PLA possui uma baixa contração, tornando-o um sólido com dimensões mais fiéis ao modelo desenhado.
- **PETG (**Politereftalato de etileno glicol**):** O material PETG conforme afirma Cliever [40] possui a característica de combinar as propriedades dos dois materiais acima, possuindo resistência e durabilidade semelhantes ao ABS e tão confiável quanto o PLA. Além disso alguns outros benefícios são destacáveis como a boa adesão entre camadas, potencial de deformações e encolhimento das peças reduzido e pode ser reciclado, portanto impressões incorretas podem voltar a ser filamento.

Facilitando a seleção do material, as vantagens e desvantagens dos mesmos podem ser observada no Quadro 6, onde pode-se escolher o material de acordo com os propósitos do projeto em questão.

Quadro 6 - Vantagens e desvantagens materiais FDM

| Desempenho/Propriedade | Menor | Médio | Maior |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Ecológico | ABS | PETG | PLA |
| Brilho | ABS | PLA | PETG |
| Transparência | ABS | PLA | PETG |
| Rigidez/Dureza | PETG | ABS | PLA |
| Resistência Impactos | PLA | ABS | PETG |
| Flexibilidade | PLA | ABS | PETG |
| Contração/Empenamento | PLA | PETG | ABS |
| Precisão em detalhes e cantos | ABS | PETG | PLA |
| Qualidade de superfície de peça | ABS | PETG | PLA |
| Resistência a atritos | PLA | ABS | PETG |
| Resistência química | ABS | PLA | PETG |
| Resistência altas temperaturas | PLA | PETG | ABS |
| Facilidade de pós processamento | PLA | PETG | ABS |
| Usinabilidade | PLA | PETG | ABS |
| Densidade | ABS | PLA | PETG |
| Preço por cm/grama/hora | PLA | ABS | PETG |

Fonte: Impressão 3D Fácil [39].

2.2.5.6 Funcionamento do Processo de Extrusão

A essência do processo de extrusão consiste em "empurrar" o material aquecido através de um orifício, no entanto, existem diferenças entre o processo industrial de larga escala e o de prototipagem rápida. Nessa técnica de produção os parâmetros envolvidos são a temperatura e pressão. Segundo Abiplast [41] o processo de extrusão convencional pode ser definido como:

O processo de extrusão de plásticos consiste basicamente em forçar a passagem (controlada) do material granulado por dentro de um cilindro aquecido, por meio de uma ou duas roscas "sem fim", que transportam, misturam, compactam e permitem a retirada de gases liberados no processo. [41]

Na Figura 12 pode-se observar o processo de extrusão industrial, muito comum na construção de perfis contínuos como por exemplo: Tubos de PVC, forro e o próprio filamento utilizado na impressão 3D. Já na Figura 13 é mostrado a extrusão de material na prototipagem rápida.

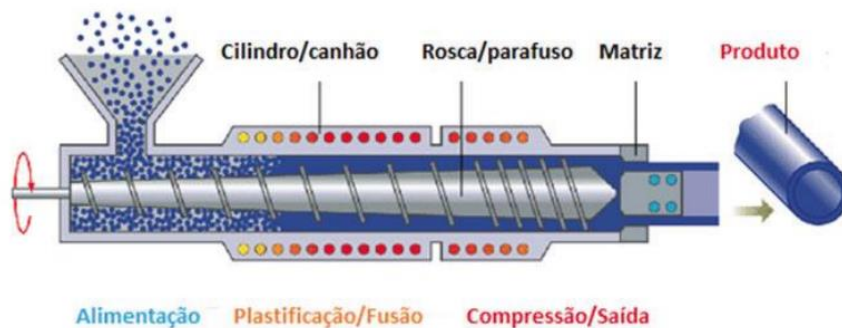


Figura 12 - Processo de Extrusão Industrial.
Fonte [41].

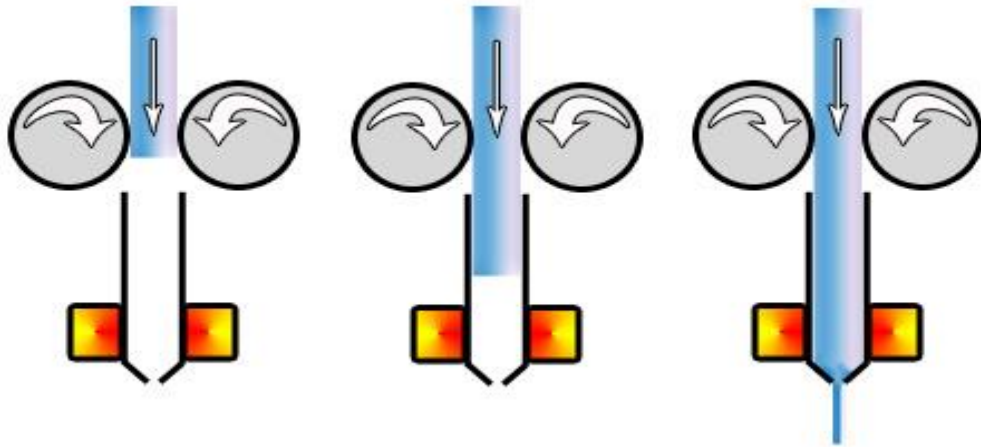


Figura 13 - Extrusão de filamento na impressora 3D.

Fonte: Disponível em: <<http://3dprinter.zemris.fer.hr/extruder.html>> Acesso em 04 Outubro de 2017

2.2.5.7 Tecnologia a Base de Fusão e Deposição

Segundo Cunico [3] o processo FDM foi patenteado por Scott Crump em 1989 é uma das tecnologias mais utilizadas nos dias de hoje. Baseia-se, assim como os outros métodos de manufatura aditiva, em uma deposição de material camada por camada, extrudando o material fundido através de um bico e o depositando de duas formas que são contorno e preenchimento (varredura). Cunico [3] descreve o processo afirmando:

Onde um filamento de material termoplástico é movimentado para dentro da câmara de liquidificação por ação de rolos de alimentação (normalmente acionados por motores de passo). Ao redor desta câmara, são posicionadas resistências térmicas com a finalidade de elevar a temperatura do material até valores superiores à temperatura de amolecimento do plástico (ponto de transição vítrea). (CUNICO, 2015, p. 14)

De acordo com o que diz Volpato [42] nesse processo o bico deposita o material de uma camada no plano x-y e em seguida sobe ligeiramente o eixo z, construindo assim uma nova camada sobre a anterior. Esse processo é melhor ilustrado pela Figura 14.

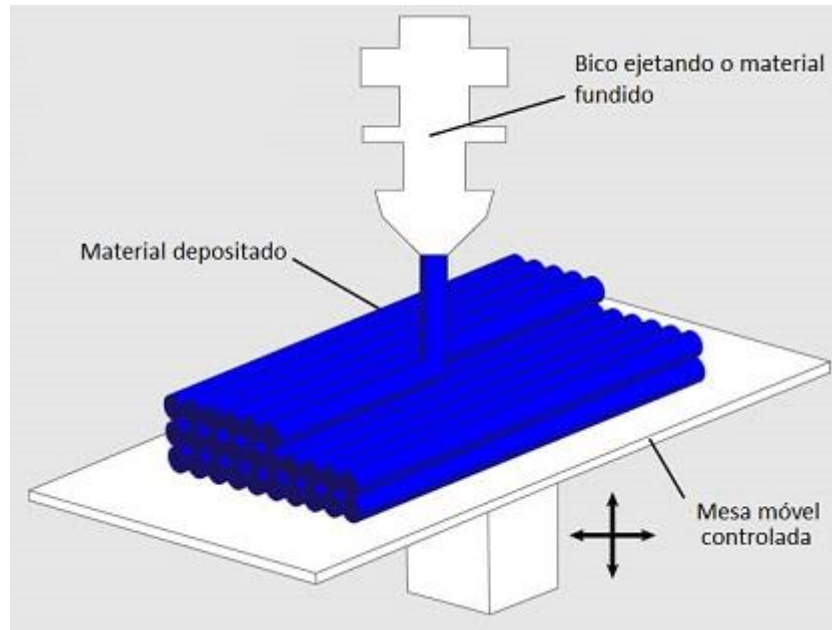


Figura 14 - Processo FDM.

Fonte: Disponível em <<http://www.tudosobreplasticos.com/processo/impresao3D.asp>> Acesso em 28/08/2018

2.3 PARTE ELETROELETRÔNICA

Atualmente, com os avanços tecnológicos, a eletroeletrônica está presente no controle das funções de muitos equipamentos. Isso pode ser observado nas automações residenciais, como por exemplo: na iluminação controlada por sensores, em portões automáticos, sistemas de vigilância, entre outros. Shamieh [43] evidencia algumas características dos circuitos eletroeletrônicos:

Os sistemas elétricos, como os circuitos da sua casa, usam corrente elétrica pura e não adulterada para alimentar coisas como lâmpadas. Os sistemas eletrônicos levam isso um passo mais adiante: eles controlam a corrente, modificando suas flutuações, direção e tempo, de várias formas, para realizar uma série de funções, desde diminuir o brilho da lâmpada até comunicar-se com satélites (e muitas outras coisas). [43]

Neste capítulo são apresentados os principais componentes eletroeletrônicos do equipamento divididos em três grupos, conforme no Quadro 7.

Quadro 7 - Organização do capítulo

| Classificação | Descrição | Função | Subcapítulo |
|---------------------------------|---|---|--------------------|
| Dispositivo de potência | São os componentes que trabalham geralmente com maiores correntes elétricas. | Transformar os impulsos de elétricos CA para CC e gerar movimentação dos motores de passo. | 2.2.1 a 2.2.3 |
| Dispositivos de controle | São aqueles que processam os sinais recebidos dos sensores e geram os sinais de comando para os dispositivos de potência. | Controlar: velocidade dos motores de passo, temperatura do cabeçote de impressão e mesa aquecida. | 2.2.4 a 2.2.6 |
| Sensores | Componentes que recebem estímulos externos e enviam os mesmos como sinais elétricos ao microprocessador | Monitoramento do processo de impressão. | 2.2.7 a 2.2.8 |

Fonte: Os autores.

Em relação aos dispositivos de potência Arrabaça [44] faz uma comparação com os transformadores CA/CA (Corrente Alternada), onde os mesmos podem ser analisados de forma semelhante aos transformadores CC (Corrente Contínua), nestes a relação de espiras muda constantemente com o tempo, possibilitando o aumento ou redução da tensão CC aplicada à carga. Ainda conforme o autor, esses dispositivos podem ser de baixa potência aplicados a fontes de alimentação de celulares e

notebooks, por exemplo, ou em situações onde tem-se média e alta potência como: motores CC e carro elétricos.

Os dispositivos de controle são aqueles que comandam o funcionamento de um determinado sistema. Recebem sinais dos sensores e em seguida enviam o sinal processado para os atuadores. É bem evidenciado por Ogata [45] que um sistema tem como objetivo gerenciar a saída, que nesse caso é uma variável, de forma automática, sendo que o mesmo pode ser denominado sistema de controle de processos. A definição válida para sistema também atende o campo dos dispositivos de controle, que podem ter objetivos específicos, como por exemplo: controladores de temperatura, ou ainda podem ter maior flexibilidade de controle como: CLP e microcontroladores.

Nos processos produtivos, em máquinas e linhas de produção onde tem-se a necessidade de definir as condições de um sistema, comumente os sensores estão presentes, na finalidade de monitorar as variáveis do ambiente em cada segmento. Segundo Thomazini [46], os sensores são dispositivos sensíveis às variáveis de energia de um determinado ambiente, estas na forma térmica, luminosa, cinética ou outras, e comparam informações a respeito de uma grandeza que tem necessidade de ser mensurada, como: velocidade, posição, temperatura, etc. Em relação ao parágrafo anterior, o autor afirma que muitas vezes um sensor não tem as propriedades elétricas fundamentais para ser empregado a um sistema de controle, para tal previamente faz-se a manipulação do sinal e em consequência o sistema de controle faz a leitura.

2.3.1 Fonte de Alimentação

Todo equipamento eletrônico que necessita ser ligado na rede de energia elétrica precisa ter uma fonte de alimentação, esse equipamento pode ser definido como um “[...] circuito que a partir da tensão elétrica disponível (alternada ou contínua) fornece a tensão contínua (ou mesmo alternada) na forma como o circuito alimentado necessita.” (Braga, 2013, p.9) [47]. As fontes podem possuir diversas diferenças de construção ou ainda de funcionamento, mas o que se destaca é a diferença de tipo de fonte, elas podem ser: lineares, analógicas ou ainda chaveadas.

Fontes lineares fornecem uma tensão elétrica pré-definida fixa ou variável na saída, segundo Silva Jr. [48], as partes que definem uma fonte linear regulada são: transformador, retificador, filtro e regulador. Na saída do regulador tem-se - dentro das condições ideais de funcionamento - a tensão desejada de saída. As vantagens destes tipos de fonte estão na simplicidade do projeto e montagem, por possuir uma tecnologia conhecida, enquanto as desvantagens são as perdas no regulador de tensão ocasionando uma baixa eficiência bem como o grande peso e volume.

As fontes chaveadas, ao contrário do modelo anterior, possuem um número de componentes maior e conseqüentemente uma tecnologia de fabricação mais sofisticada e elaborada. Seu princípio de funcionamento é definido por Arrabaça [44], na qual o ajuste é feito através da utilização de dispositivos de chaveamento, sendo esses transistores, em geral do tipo IGBT ou MOSFET. As principais vantagens da fonte chaveada são a alta eficiência, possibilidade de diminuir ou aumentar a tensão e o tamanho compacto, enquanto suas desvantagens são a maior complexidade de projeto e manutenção, ruídos e interferência eletromagnética.

2.3.2 Resistores

Os resistores são componentes comumente usados em equipamentos eletroeletrônicos e podem ser aplicados em diversas funções, tanto como atuadores utilizando a propriedade de aquecimento do mesmo, como na função de controle de fluxo de corrente nos circuitos. Shamieh [43] define a resistência elétrica como uma medida de oposição ao fluxo de elétrons (corrente elétrica), e caracteriza a mesma com funções de gerar calor e/ou luz, também para controlar a corrente elétrica ou ainda para fornecer a tensão correta para um determinado componente.

Existem vários modelos de resistores, com diferentes formatos, feitos de múltiplos materiais e cada qual com uma ou mais aplicações. Segundo Anzo [49] os mesmos podem ser divididos essencialmente em dois grupos: os fixos, que não podem ter seu valor alterado e variáveis que tem seu valor alterado dentro de uma determinada faixa através de um cursor móvel, promovendo uma variação linear.

Um modelo comumente utilizado em equipamentos de prototipagem rápida é a resistência de cartucho. A fabricante de resistências Resisten [50] afirma que este tipo de elemento é preferencialmente utilizado em processos onde se faz necessário

um aquecimento controlado, localizado e uniforme. Ainda é válido ressaltar as características da resistência de cartucho mencionadas no site Webartigos [51] que podem ser de baixa carga, alta carga e com terminais de ligação particularizado.

2.3.3 Motor de Passo

O motor de passo é um tipo de motor elétrico muito utilizado em aplicações industriais onde há a necessidade de controlar o posicionamento de maneira precisa. Conforme afirmado por Eletrobrás [52] os motores de passo, como o nome sugere, tem seu funcionamento através de “passos”, os quais são gerados por um circuito eletrônico conectado ao sistema eletromecânico do motor, estes trabalhando em conjunto geram um movimento rotacional discreto, como o de um ponteiro de um relógio. Um exemplo de motor de passo pode ser visto na Figura 15.

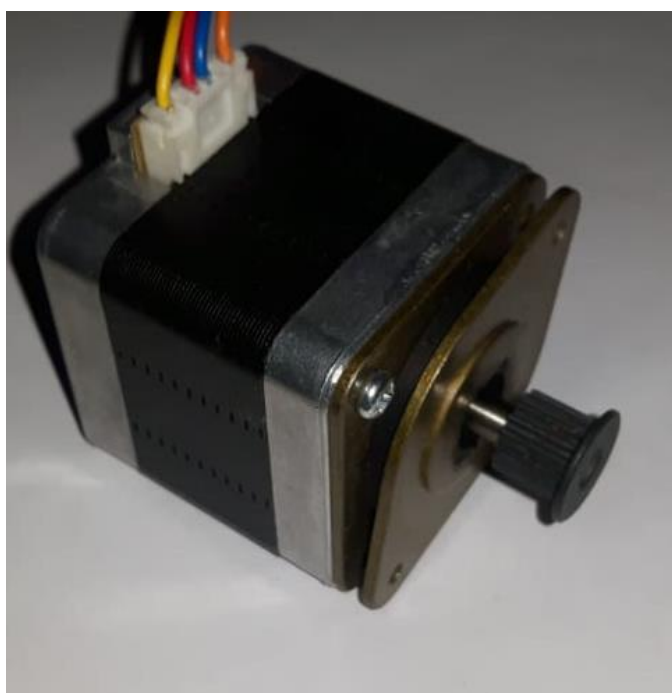


Figura 15 - Motor de Passo.
Fonte: Os autores

Segundo Kalatec Automação [53] existem três tipos de motores de passo, sendo eles: ímã permanente, relutância variável e híbrido, que une as características dos dois primeiros. Os motores de passo possuem ainda três formas diferentes de ligação dependendo da configuração da bobina que podem ser: unipolar, bipolar série ou ligação universal, esta para motores que possuem oito fios. Combinando essas características têm-se diversos modelos de motores de passo, possibilitando uma

variedade de aplicações como: impressoras, máquinas CNC, robótica, informática, entre outros. O Quadro 8 apresenta algumas das vantagens e desvantagens da implementação de motores de passo em um equipamento.

Quadro 8 - Vantagens e desvantagens motores de passo

| Vantagens | Desvantagens |
|---|---|
| Precisão | Necessita de um sistema de alimentação eletrônico dedicado (drive) |
| Ausência de realimentação | |
| Robustez | Limita-se a pequenas potências |
| Longa vida útil | A disponibilidade de modelos no mercado é restrita |
| Ausência de manutenção | Tem limitações quanto à velocidade e ao momento de inércia da carga acionada o que, acima de determinados limites, ocasiona erros de passo. |
| Mais economia, quando comparado aos servos-motores de corrente contínua | |

Fonte: Eetrobrás [52].

2.3.4 Placa CNC USB Controller

A placa CNC USB Controller desempenha a função de “traduzir” o sinal gerado pela placa de comando ou computador e enviar para os drivers dos motores de passo. A comunicação com este equipamento é feita através de uma porta serial USB (Universal Serial Bus), que segundo a fabricante PlanetCNC [54] é uma das vantagens desse produto, pois esta forma de comunicação é encontrada facilmente em laptops e computadores modernos. Na Figura 16 é apresentada a placa CNC USB Controller, em seguida no quadro 9 são descritos suas entradas e saídas.

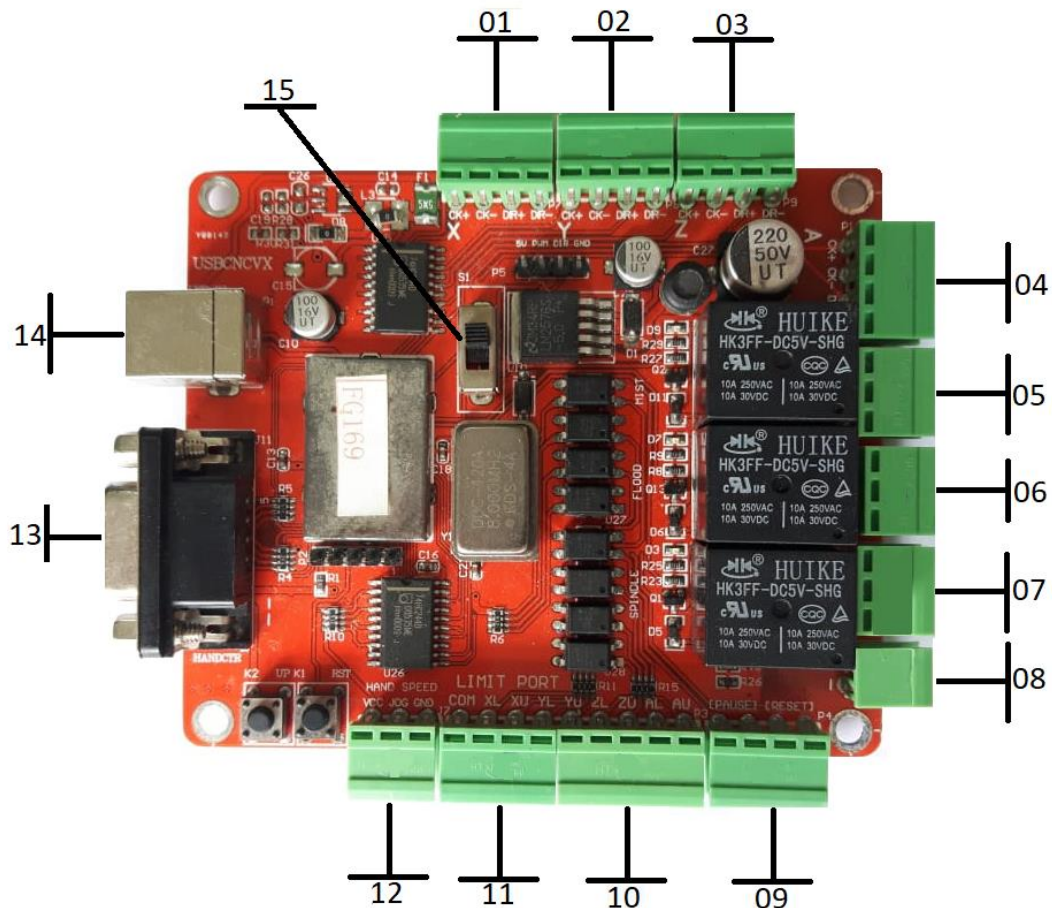


Figura 16 - Placa CNC USB Controller.
Fonte: Os autores

Quadro 9 - Placa CNC USB Controller

| Item | Especificação |
|------|---|
| 1 | Sinal de saída do eixo X |
| 2 | Sinal de saída do eixo Y |
| 3 | Sinal de saída do eixo Z |
| 4 | Sinal de saída do eixo A |
| 5 | Porta do relé MIST |
| 6 | Porta do relé FLOOD |
| 7 | Porta do relé SPINDLE |
| 8 | Entrada de alimentação |
| 9 | Porta de entrada para comando pause e reset |
| 10 | Porta de entrada para limite dos eixos Y, Z e A |
| 11 | Porta de entrada para limite dos eixos X e Y |
| 12 | Entrada manual de velocidade |
| 13 | Porta serial DB9 |
| 14 | Porta serial USB |
| 15 | Interruptor de sinal de velocidade SPINDLE |

Fonte: Os autores.

2.3.5 Driver de Acionamento Motores de Passo

Como dito anteriormente, os motores de passo operam através de sinais discretos que movimentam o eixo do motor. Para tal funcionamento é necessário um circuito eletrônico anterior que converte os sinais de controle (com baixa tensão e/ou corrente) para sinais de potência que movimentam o motor. Portescap [55] diz que

existem diversas formas de controlar motores de passo, em geral é necessário como entrada um sinal de pulso e outro de direção para o controle dos motores, a cada pulso o drive gera corrente para o movimento do(s) motor(es). Sempre ao utilizar um motor de passo é necessária a aplicação de um driver, uma vez que a corrente na bobina do motor supera a corrente de saída da maioria dos dispositivos de controle.

2.3.6 Raspberry Pi 3

Segundo Edwards [56] Raspberry Pi é uma placa de circuito impresso que desempenha a função de um computador. Inicialmente a mesma foi desenvolvida para uso pedagógico, visto que seu código é aberto (open source) para modificações, o que possibilita uma liberdade de configuração de acordo com as necessidades do usuário.

De acordo com Upton [57] para iniciar o uso da Raspberry Pi é necessária a utilização de um monitor que pode ser conectado a uma das saídas de vídeo do equipamento que são: vídeo composto, vídeo HDMI ou vídeo DSI, também são necessários conectar mouse e teclado uma vez que a placa desempenha a função de CPU e necessita dos componentes periféricos. Algumas das características da placa podem ser visualizadas no Quadro 10.

Quadro 10 - Características Raspaberry Pi

| | |
|---------------|--|
| Processador | Broadcom BCM2837 de 1.2GHz 64 bits Quad Core |
| Memória RAM | 1 GB RAM 400 MHz |
| Conectividade | Wifi 802.1n, Bluetooth 4.1 integrados e USB |
| GPIO | 40 Pinos |
| Adaptador | Micro SD |
| GPU | Videocore IV |

Fonte: Datasheet Raspberry Pi 3.

2.3.7 Tela LCD

De acordo com Berselli [58] telas LCD, do inglês *Liquid Crystal Display* (Display de Cristal Líquido), são painéis pouco espessos que tem como função exibir informações eletronicamente. São utilizados em diversos equipamentos como smartphones, aparelhos multimídia veiculares, câmeras fotográficas entre outros.

Algumas telas LCD possuem também um recurso conhecido como *touch screen* que significa “tela sensível ao toque”. Isso possibilita não só exibir informações ao usuário mas também interagir com o mesmo, tornando-a uma IHM (Interface Homem Máquina). Segundo Moraes [59] IHMs são sistemas de monitoramento que chegaram a partir da necessidade de uma comunicação afável, conveniente e ergonômica entre o operador do equipamento e os sistemas complexos de automação. O foco desta interface é auxiliar o operador no processo produtivo.

2.3.8 Termistor NTC

Termistores são componentes eletrônicos que modificam suas características elétricas conforme a variação de temperatura. Tendo em vista o que diz o fabricante ADDTHERM [60] “Os sensores NTC e PTC também conhecidos como termistores, são tipos de sensores em que a relação entre resistência elétrica e a temperatura são conhecidas, mensuráveis e que possuem uma boa tolerância e precisão. ” Desta forma se tornam ótimas opções para a utilização com impressão 3D uma vez que possuem uma resposta rápida a dinâmica de aquecimento nas partes do equipamento.

Existem dois tipos de termistores, os NTC e os PTC, como se vê em Shamieh [43], o tipo NTC é aquele o qual a resistência diminui conforme a temperatura aumenta, enquanto que no tipo PTC o que acontece é justamente o contrário.

2.4 SOFTWARE

O software é um conjunto de informações que torna um equipamento operante. Este por sua vez é muito mais do que um simples programa de computador. De acordo com Cruz [61]:

A noção de software é um pouco mais ampla do que a do simples programa de computador. O software abrange não somente o programa de computador, indo muito além disso e atingindo a sua apresentação verbal ou esquemática, e também os materiais descritivos e instruções para os usuários. [61]

Para este trabalho, os softwares utilizados têm de ser compatíveis com o OS (*Operating System* - Sistema Operacional) Raspbian utilizado pela placa Raspberry Pi 3. De acordo com o que diz o desenvolvedor [62] “Raspbian é um sistema operacional livre baseado no Debian otimizado para o hardware Raspberry Pi”, ainda segundo o mesmo, esse OS além do conjunto básico de programas possui outros 35.000 pacotes de software pré-compilados de forma a proporcionar uma fácil instalação dos mesmos.

2.4.1 Software CNC USB Controller

A placa CNC USB controller, vista anteriormente, possui um software específico para que os recursos do hardware sejam explorados totalmente. Segundo o desenvolvedor do software [54] o mesmo foi projetado para abranger todos os recursos do hardware inclusive os avançados sem perder a simplicidade de entendimento por usuários leigos. O autor complementa citando alguns benefícios nos recursos do mesmo, como por exemplo: possibilidade de uso de trocadores de ferramentas automático, função de sensor de ferramenta, simulação automática, também transformação e manipulação do código G e exportação e importação de arquivos .DXF, código G ou .CSV.

2.4.2 Softwares de Impressão 3D

Atualmente existem diversos softwares para impressão 3D, a grande maioria trabalha utilizando o mesmo princípio de funcionamento, transformando os arquivos triangularizados em código G (linguagem interpretada por dispositivos CNC). Serão apresentados quatro softwares de impressão 3D, os quais mediante necessidade do usuário podem ser escolhidos observando suas características.

O primeiro a ser analisado é o software Repetier Server que foi desenvolvido a partir de 2011, pela empresa Hot-World GmbH & Co. KG. Conforme a

desenvolvedora [63], este surgiu com a necessidade de controle de uma impressora RepRap Mendel, pois na época não encontrava-se softwares úteis. Sendo assim, a mesma começou-se a programar em Repetier-Host e Repetier-Firmware com o objetivo de alcançar os melhores resultados possíveis de uma impressão 3D. Quando adicionado o Repetier Server obteve-se mais flexibilidade e otimização dos resultados. Atualmente o software oferece como principais características: controle remoto, compatibilidade com todos os navegadores, interface multilíngue e compatibilidade com Raspberry Pi.

Um segundo software a ser explorado tem ganhado espaço na comunidade de utilizadores de impressoras 3D é chamado de Octoprint. Este possui como principal característica o controle remoto do processo. Conforme afirma o fabricante [64] o software funciona online, o que permite que o usuário esteja monitorando a impressão e se necessário tomando alguma atitude, caso o processo não esteja saindo como o planejado. O fabricante ainda ressalta as características de compatibilidade e extensibilidade do software. O mesmo assegura que a maioria dos modelos conhecidos de impressoras 3D é compatível com o software. Ainda a partir deste tem-se a possibilidade de integrá-lo com outros diversos aplicativos que podem ser úteis ao utilizador. Octoprint também possui código livre e pode ser adquirido de forma gratuita.

Um terceiro software estudado é o Slic3r. Esse surgiu dentro de comunidades RepRap em 2011 com o intuito de fornecer uma série de ferramentas com código aberto e flexível de acordo com a evolução das impressoras 3D. Segundo os desenvolvedores [65], esse é um projeto comunitário sem fins lucrativos que foi iniciado do “zero”, código e algoritmo, não tendo vínculos com outros softwares. Este, inicialmente, ofereceu aos usuários da plataforma a experiência de recursos totalmente novos e originais como: fatiamento através de linha de comando, alturas de camadas variáveis, configuração de múltiplas extrusoras, entre outros recursos.

Por fim, o quarto software pesquisado é o Cura 3D, segundo o fabricante [66] as principais características do produto são:

- Facilidade de compreensão, possibilitando que iniciantes possam imprimir seus projetos facilmente e que peritos possam configurar cerca de 200 parâmetros para personalizar suas impressões;
- Capacidade de configurar diferentes objetos em uma mesma impressão;

- Suporta os arquivos STL, 3MF e OBJ;
- Open Source.

3 ESTRUTURA ORIGINAL

O objetivo deste capítulo é apresentar os componentes contidos na estrutura original do equipamento, tendo em vista que o projeto iniciou-se a partir de uma máquina com uma única função, a de usinagem de placas PCB.

Serão apresentados de forma sucinta a composição do equipamento que compreende: estrutura base, elementos de movimentação, eletrônica de potência e controle. É indispensável o conhecimento do equipamento original, pois é a partir deste que são medidos os indicadores dos resultados.

3.1 ESTRUTURA BASE

A estrutura inicial é a base da máquina, esta serve de apoio a todos os outros componentes. Pode ser feita uma analogia com o corpo humano, onde os ossos representam a estrutura e os demais partes do corpo são os periféricos conectados a estes.

As chapas que compõem a estrutura do equipamento são de alumínio. Nos pontos que são exigidos maiores esforços, estas têm a espessura de 8mm. Na base do eixo X um perfil 40x40mm, sustenta as guias lineares. Para a proteção no deslocamento do eixo Y estão presentes chapas de 3mm de espessura.

Os fixadores presentes na estrutura eram de aço carbono, de tamanhos variados, rosca métrica e de acordo com a aplicação possuíam cabeça cilíndrica ou escareada.

A Figura 17 apresenta o equipamento em sua configuração inicial.



Figura 17 - Vista frontal da condição inicial do equipamento.
Fonte: Os autores

3.2 MOVIMENTAÇÃO

Os elementos de movimentação que fazem parte do equipamento são: guias lineares, fuso de esferas, mancais, rolamentos e acoplamentos. Os mesmos têm como objetivo promover uma movimentação suave, porém, robusta e confiável.

As guias lineares que compõem o projeto são do tipo cilíndrica de seção angular aberta, são utilizadas duas delas por eixo, totalizando seis guias no equipamento, na Figura 18 têm-se o exemplo de uma delas.



Figura 18 -Guia linear 12mm de diâmetro, acoplada ao suporte de alumínio extrudado.
Fonte: Os autores.

Os fusos de esferas, acoplados aos motores tem a finalidade de promover o deslocamento retilíneo de forma precisa através de uma fonte de movimento circular, o projeto conta com 3 deles, um para cada eixo. Na Figura 19 verifica-se um exemplo de fuso de esferas recirculantes no equipamento.



Figura 19 - Fuso de esferas recirculantes 16 mm de diâmetro.
Fonte: Os autores.

Neste projeto são encontrados mancais fixos e mancais de rolamento. Os mesmos são utilizados nos rolamentos das guias lineares e nos fusos dos eixos X, Y, e Z para seu adequado funcionamento. Compunham o projeto original doze mancais de pillow block e seis mancais tipo flange. Na Figura 20 os dois modelos de mancais do equipamento são ilustrados.

Os rolamentos integrados no projeto são de dois tipos: radiais e lineares. O objetivo dos mesmos é permitir a movimentação, seja ela circular ou linear, minimizando o atrito. Ao todo são seis rolamentos radiais e doze lineares. Observa-se na Figura 21 um exemplo de cada.

O acoplamento visa transmitir o movimento do motor ao eixo do fuso. O projeto é composto por três acoplamentos tipo espiral, um exemplo deste pode ser visto na Figura 22.

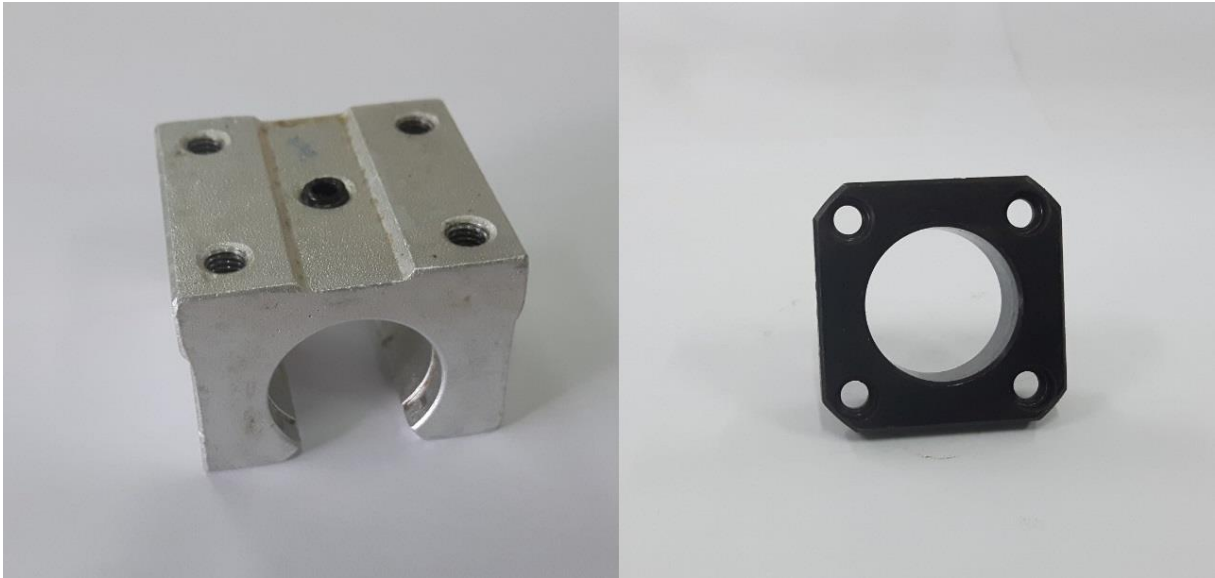


Figura 20 - A esquerda mancal para rolamento linear, a direita mancal para rolamento radial.
Fonte: Os autores



Figura 21 - A esquerda rolamento radial, a direita rolamento linear.
Fonte: Os autores



Figura 22 - Acoplamento Flexível.
Fonte: Os autores.

3.3 ELETRÔNICA

A eletrônica existente no equipamento tinha como principal função o controle da CNC através da comunicação USB com um computador externo. Os itens abarcados pela mesma eram: fonte de alimentação, motor de passo, drivers dos motores de passo e placa CNC USB Controller.

A fonte de alimentação que estava incorporada ao projeto da fabricante Murr Elektronik MCS-B POWER SUPPLY 1-PHASE, com tensão de entrada variável entre 100/240 Vca em corrente alternada, saída de 24 Vcc até 10 A.

No projeto foram utilizados motores de passo modelo NEMA AK56h/3-1.8 e suas características são apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 - Características motor NEMA AK56h/3-1.8

| Item | Especificação |
|---------------------|---------------|
| Número de passos | 200 |
| Ângulo por passo | 1,8° |
| Tipo de enrolamento | Unipolar |

| | |
|------------|-------------|
| Tensão | 4,32 V/fase |
| Corrente | 2,4 A/fase |
| Torque | 7,6 kgf.cm |
| Indutância | 2,4 mH/fase |

Fonte: Os autores.

O Driver utilizado no projeto, Figura 23, é o AKDMP16-7.2A, a Akiyama empresa que comercializa o produto, ressalta que o mesmo foi projetado para a obtenção de maior desempenho em altas velocidades. Outras características do mesmo podem ser vistas no Quadro 12.



Figura 23 - Driver Motor de Passo AKDMP16-7.2 A.
Fonte: Os autores.

Quadro 12 - Características do Drive

| Item | Especificação |
|------------------|--|
| Alimentação | 18~80 Vca e 24~112 Vcc |
| Corrente máxima | 7.2 A (Pico) |
| Tipo de sinal | PNP ou NPN |
| Tipo de controle | Opera com sinal de passo e direção ou pulso/pulso (CW e CCW) |

| | |
|--|---|
| Divisão de micropasso | Ajustável em 16 modos |
| Consumo | Redução automática de corrente para velocidade zero |
| Seleção de corrente | 16 níveis |
| Tipo de isolamento nas entradas digitais | Isolamento óptico |
| Sinal de corrente motor | Sinal senoidal |
| Tipo de filtro | Filtro antirruído |

Fonte: Datasheet Akiyama.

O elemento responsável por traduzir os sinais recebidos pelo computador era é a placa CNC USB Controller, que através do comando serial transmitia aos drivers dos motores de passo os pulsos para as movimentações em cada eixo.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será apresentada a metodologia de desenvolvimento do projeto de implementação da função de impressão 3D em um equipamento de usinagem de placas PCB, bem como os recursos e tecnologias utilizados, aduzindo a execução do projeto em estudo, as dificuldades encontradas e suas respectivas soluções. As informações aqui apresentadas além de ter o propósito de elucidar o processo buscam tornar viável a reprodução do projeto.

As ações realizadas no trabalho foram no intuito de adaptar o equipamento já existente, realizando melhorias no mesmo, como por exemplo: construção de suporte para fixação de ferramentas periféricas para a adaptação e inclusão da nova função, revitalização do mesmo, reconstrução do painel elétrico e novos meios de conexão, definição, instalação e configuração de softwares para atender as duas demandas.

Buscando facilitar a compreensão do processo e a padronização do texto a estrutura na qual se apresenta o desenvolvimento do projeto é a mesma seguida nos capítulos anteriores, divididos em mecânica, eletroeletrônica e software.

4.1 ESTRUTURA MECÂNICA

O trabalho realizado na estrutura mecânica do equipamento pode ser dividido em dois aspectos: revitalização da estrutura e construção dos elementos de adaptação para impressão 3D.

O equipamento na sua versão original funciona como CNC de usinagem de placas PCB ou ainda materiais maleáveis. Na Figura 24 pode ser visto a condição do mesmo quando esse trabalho foi iniciado.

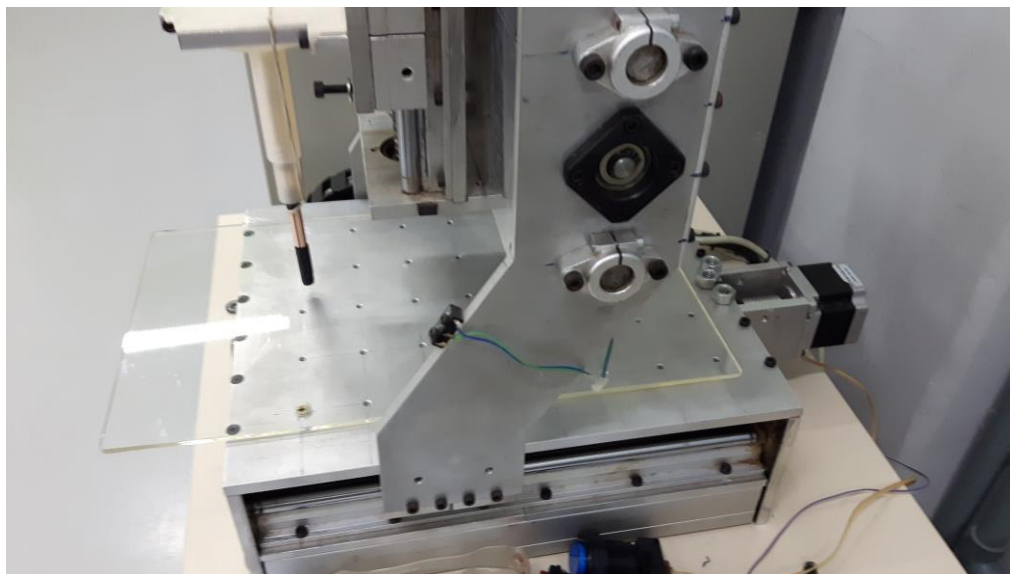


Figura 24 - Vista lateral da condição inicial do equipamento.
Fonte: Os autores

4.1.1 Revitalização da estrutura

A estrutura do equipamento no início do projeto necessitava de alguns reparos estéticos e físicos em função da depreciação. Para isso algumas ações foram tomadas para revitalizar o equipamento, essas de forma estética e também para preservar o estado de conservação. Inicialmente o equipamento foi completamente desmontado e realizou-se a pintura das principais partes da estrutura.

4.1.1.1 Pintura da Estrutura

Pensando na apresentação, qualidade e conservação do equipamento viu-se a necessidade de realizar a pintura das partes do mesmo. Utilizou-se as seguintes tintas: fundo fosforescente vinílico (para melhor adesão na peça que recebeu o tratamento), spray automotivo preto e verniz em spray, pintando quase todas as partes em alumínio do equipamento e algumas carenagens plásticas.

Para a pintura e troca dos parafusos exigiu-se a desmontagem das partes de todo o equipamento. O processo supracitado pode ser melhor observado nas Figuras 25 e 26.

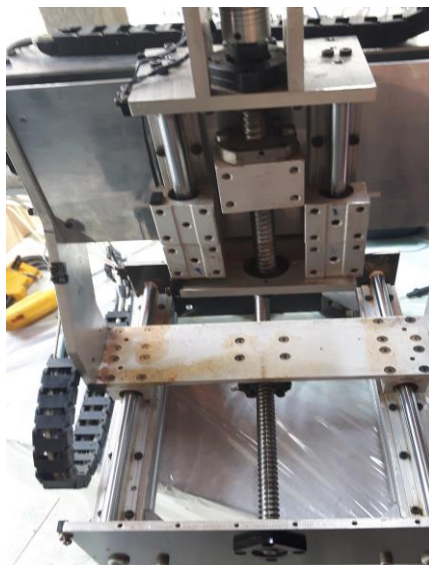


Figura 25 - Parte do equipamento em processo de desmontagem.
Fonte: Os autores

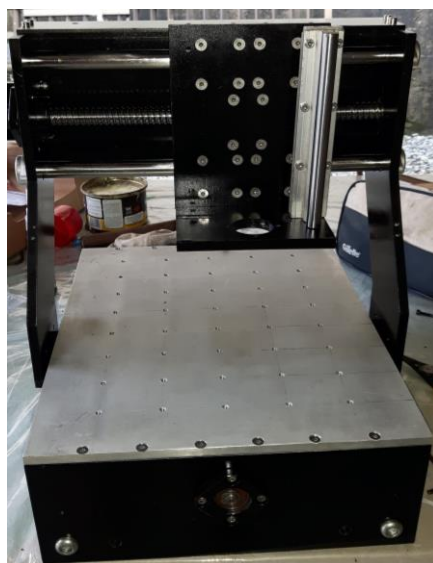


Figura 26 - Processo de pintura e remontagem.
Fonte: Os autores

Dispondo do equipamento desmontado, por conveniência foi efetuada também a troca dos parafusos.

4.1.1.2 Troca dos Parafusos

Os parafusos da estrutura, que inicialmente eram de liga aço carbono, material que oxida facilmente, foram todos substituídos por parafusos de aço inoxidável, os

quais como o nome sugere não oxidam. A substituição dos mesmos foi motivada a partir da desmontagem de partes do equipamento, quando para tal era encontrada muita dificuldade ao retirar alguns destes parafusos, visto que com a oxidação combinada dos materiais do fixador e das placas de alumínio surgia uma nova componente de atrito

Outra medida visando a preservação e estética do equipamento foi a construção de proteções para os motores de passo.

4.1.1.3 Enclausuramento dos Motores de Passo

Dos incrementos e mudanças realizadas na mecânica do equipamento, algumas delas destacam a estética do mesmo, o enclausuramento dos motores é um exemplo disto. Adicionalmente obtém-se a proteção na transmissão de movimento entre o acoplamento do motor e o fuso de esferas, proporcionando segurança neste ponto da máquina.

Nesta tarefa pode-se ressaltar a importância dos conhecimentos obtidos ao longo do curso, uma vez que foi necessário um modelamento em software CAD da peça, e o conhecimento no processo de manufatura aditiva através do CAM (Manufatura Auxiliada por Computador, do inglês Computer Aided Manufacturing). A peça modelada pode ser visualizada na Figura 27.



Figura 27 - Modelamento da proteção do motor de passo.
Fonte: Os autores.

Concluídas a revitalização e melhorias feitas no equipamento deu-se início na construção do sistema de extrusão, este essencial para o funcionamento do processo de manufatura aditiva.

4.1.2 Construção do Sistema de Extrusão

Na construção, um dos principais componentes do projeto é a unidade de extrusão de filamento que consiste em: bico extrusor, bloco de aquecimento, resistência tipo cartucho, termistor, dissipador de calor e motor para impulsionar o filamento. Deve ser levado em conta que no projeto do sistema de extrusão há uma divisão de temperaturas denominadas *Cold End* e *Hot End*, a primeira representa a parte fria, onde o filamento é introduzido no tubo que conduz ao bico extrusor, e a segunda faz referência a parte onde o material começa o processo de fusão e em seguida é extrudado através da ponteira ou bico, essas duas partes são ilustradas na Figura 28.

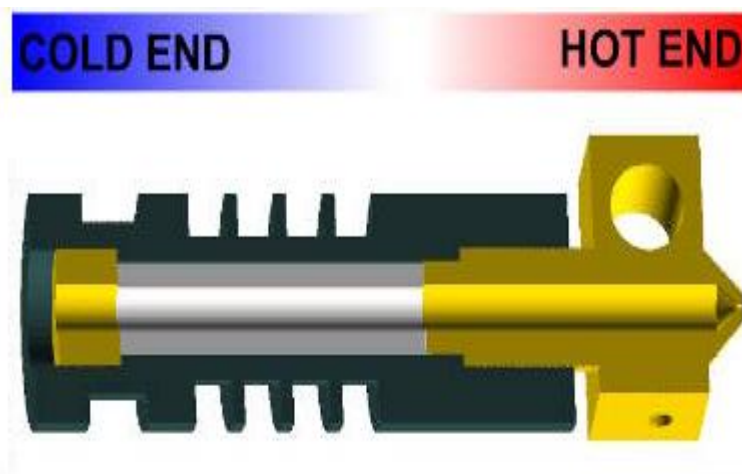


Figura 28 - Faixas térmicas do sistema de extrusão.

Fonte: Disponível em <<https://airtripper.com/1236/j-head-mk-iv-hot-end-clone-design-quick-review/>>
Acesso em 16 de Novembro de 2018.

4.1.2.1 Escolha da Configuração

O bico extrusor foi construído baseando-se no modelo da impressora RepRap Prusa I3, algumas adaptações foram necessárias em função da disponibilidade de material e falta de recursos para usinagens mais elaboradas.

Os critérios para seleção da configuração estão ligados a simplicidade de construção com equipamentos como fresadora convencional e torno mecânico

convencional, onde o modelo selecionado por possuir uma mecânica mais simples em relação a outras encontradas no ramo de impressão 3D foi considerado a melhor opção. Na Figura 29 apresentam-se outros modelos de extrusoras, comumente utilizados em equipamentos de manufatura aditiva, enquanto que na Figura 30 é mostrado o modelo construído para o projeto.



Figura 29 - Tipos de extrusor utilizados no ramo.

Fonte: Disponível em <https://reprap.org/wiki/Hot_End_Comparison> Acesso 17 de Nov 2018



Figura 30 - Modelo de extrusor construído para o projeto.

Fonte: Os autores

4.1.2.2 Usinagem

Algumas peças do sistema de extrusão passaram pelo processo de torneamento e fresamento, ambos processos de usinagem. Para a construção deste conjunto necessitou-se a remoção de material para a formação das seguintes peças: unidade de aquecimento e dissipador de calor.

Na unidade de aquecimento todos os lados foram desbastados na fresadora utilizando uma ferramenta de corte com 25 mm de diâmetro. Após o desbaste esta unidade foi furada com brocas de 2, 5, 6 e 6.5 mm. A broca 2 mm foi utilizada para fazer o furo de acoplamento do termistor. O mesmo faz a leitura da temperatura na unidade. Com a finalidade de alojar a resistência tipo cartucho usou-se uma broca de 6mm. Para a fixação do bico de extrusão utilizou-se uma broca 5 mm e posteriormente um macho manual de usinagem onde foi feita uma rosca de 6 mm. Na união com o dissipador de calor necessitou-se uma furação de 6.5 mm e rosca de 8 mm.

O dissipador teve a maior parte usinada em torno convencional. As operações realizadas para a construção dessa peça são descritas a seguir:

- Faceamento: para realizar o furo de centro e dar continuidade na usinagem;
- Desbaste: com a ferramenta pastilha angular de metal-duro.
- Construção aletas: foi utilizada uma ferramenta Bedame, uma lâmina chata de 2mm, para a construção do corpo e aletas do dissipador;
- Furação: com o intuito de facilitar a passagem do filamento utilizou-se esta ferramenta para transpassar o corpo do dissipador de forma longitudinal, a mesma com diâmetro inicial de 2mm.

A finalização do dissipador de calor deu-se através do rosqueamento realizado com cossinete de 8mm. O resultado final é apresentado na Figura 31. Com todas as peças usinadas e a disposição a próxima etapa a ser realizada é a montagem dessa estrutura.

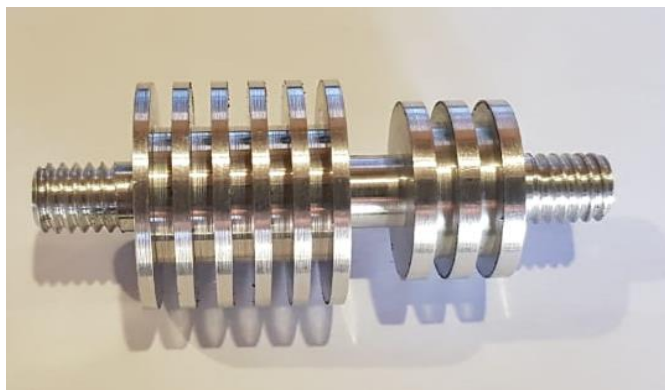


Figura 31 - Dissipador de calor desenvolvido.

Fonte: Os autores.

4.1.2.3 Montagem do sistema de extrusão

Para a realização da montagem desse sistema buscou-se alternativas simples, uma destas a própria impressão 3D. Tal atividade foi realizada da seguinte maneira:

- No motor de passo foi fixado o mecanismo, denominado *drive gear*, para puxar o filamento de material plástico, este construído através da manufatura aditiva;
- Foram acoplados, respectivamente: bico, bloco de aquecimento, dissipador e *drive gear*. Com o conjunto montado o mesmo foi fixado ao suporte de cabeçote. A Figura 32 ilustra a união destes elementos.

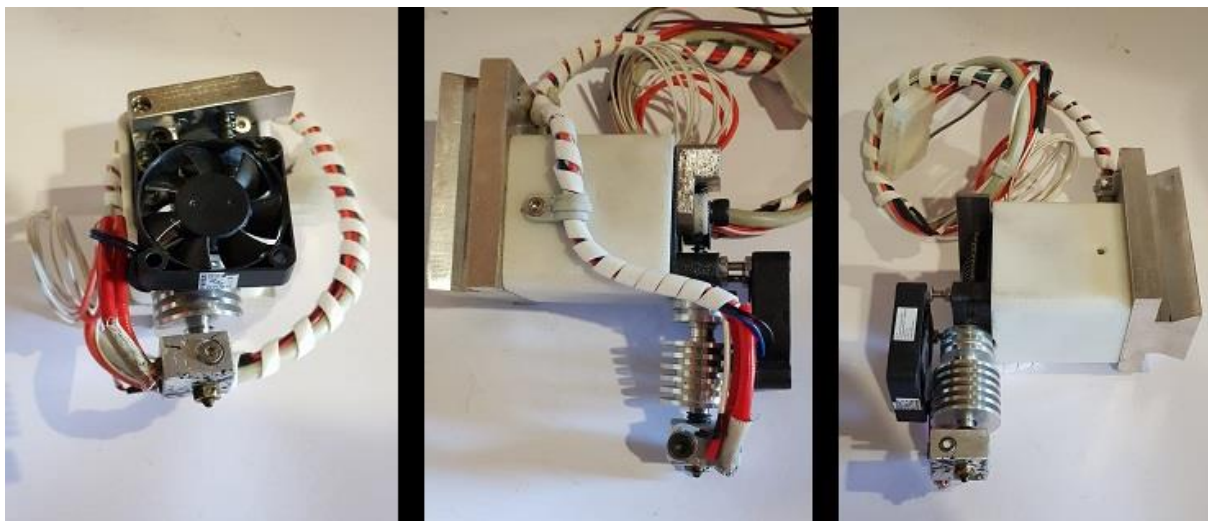


Figura 32 - Conjunto de extrusão

Fonte: Os autores.

Conforme os objetivos deste trabalho, se fez necessária a construção de um suporte de cabeçote que permitisse a troca entre o conjunto anteriormente descrito e o conjunto de usinagem.

4.1.3 Suporte de Troca de Cabeçote

Para atender os objetivos propostos no início do projeto, um deles tornar o equipamento híbrido, necessitou-se o desenvolvimento de um suporte de troca de cabeçote. A escolha da configuração, a usinagem, ajustes e a montagem na estrutura são apresentadas neste subcapítulo.

Um requisito para a troca de função é que a mesma pudesse ser realizada de forma simples e otimizada, e não necessariamente por alguém especializado. Uma troca simples, não é sinônimo de uma troca rápida, uma vez que diante das condições de produção do cabeçote, a velocidade dessa tarefa dependerá de outros fatores, um deles a agilidade de quem opera o equipamento, todavia o projeto da mesma busca simplificar a atividade.

4.1.3.1 Perfil Rabo de Andorinha

O perfil rabo de andorinha, ou guia rabo de andorinha, pode ser encontrado em máquinas que usam posicionamento cartesiano como: fresadora convencional, torno convencional, câmeras de medição, cabeças de laser, microscópio, etc. A escolha do perfil rabo de andorinha para o suporte dos cabeçotes de fresagem e impressão se deu a partir de alguns critérios:

- Disponibilidade de ferramenta de usinagem deste perfil na oficina mecânica do IF-SC, uma fresa angular com haste cilíndrica corte à direita;
- Melhor distribuição das cargas no suporte, pois em comparação com outros perfis, como por exemplo o “T”, o mesmo possui vantagens neste critério;
- Baixa folga dimensional nesse modelo de perfil, isso se dá principalmente quando comparada a outros tipos de perfis.

4.1.3.2 Método de Travamento Cabeçote

A idealização do método de travamento do cabeçote deu-se através de pesquisas realizadas sobre alguns modelos existentes no mercado e utilização de um instrumento para desenvolvimento de produtos conhecido como BrainWriting, esse último realizado na unidade curricular de projeto de máquinas com os estudantes da mesma. Após a realização da atividade os autores analisaram as propostas sugeridas

pelos demais e ponderaram que a melhor opção seria a do perfil rabo de andorinha. A solução encontrada pelos autores para o travamento do cabeçote é simples, utilizou-se a força elástica de molas em conjunto com manipululos e uma placa em alumínio com três ranhuras oblongas.

O método utiliza da força elástica das molas para gerar pressão no suporte. Na Figura 33 o método de travamento pode ser visto na sequência de retirada do cabeçote.



Figura 33 - Método de travamento cabeçote.
Fonte: Os autores.

4.1.3.3 Usinagem e Fixação do Suporte

O suporte de troca de cabeçote foi o que demandou maior tempo de usinagem das partes desenvolvidas para o equipamento. Foram necessárias aproximadamente 30 horas, computando período de usinagem e de preparação do equipamento, considerando o esquadreamento das partes até os ajustes finais.

O processo de fabricação foi composto por três etapas. Inicialmente realizou-se o esquadreamento das peças de alumínio, visto que as mesmas foram cortadas na serra fita, e possuíam grande rugosidade e inconformidade de medidas, em seguida iniciou-se o processo de usinagem do perfil rabo de andorinha, e por fim os ajustes para encaixe do suporte e acabamento.

Na primeira etapa de usinagem efetuou-se o esquadreamento das partes segundo as medidas desejadas. As peças em alumínio foram disponibilizadas pelo IF-SC, no entanto o material disponível estava em formato de barra laminada exigindo o processo de corte com a serra fita, em seguida aplicou-se o procedimento de usinagem nas superfícies das peças para que as mesmas atingissem as dimensões projetadas.

A construção do perfil rabo de andorinha necessitou das etapas descritas no Quadro 13, após a Figura 34 ilustra as peças em construção.

Quadro 13 - Etapas de construção do suporte de ferramenta

| Passo | Processo | Ferramenta | Descrição |
|-------|---|--|--|
| 1 | Rasgo passante central | Fresa Ø25mm | Realizado na parte fêmea do suporte para posterior usinagem com ferramenta angular |
| 2 | Perfil na peça fêmea | Fresa angular Ø25mmx60° | Desbaste lateral de 6mm na parte fêmea formando perfil rabo de andorinha |
| 3 | Ranhura horizontal | Fresa Ø5mm | Na parte macho, onde aloja-se ferramenta de usinagem e impressão 3D, utilizou-se uma fresa para ranhura horizontal com profundidade de 5,6mm |
| 4 | Perfil na peça macho | Fresa angular Ø25mmx60° | Desbaste lateral de 5,9mm na parte macho formando o encaixe rabo de andorinha |
| 5 | Desbaste batente | Fresa Ø25mm | Para o fechamento inferior entra a parte fêmea e macho foi usinado um batente |
| 6 | Desbaste dispositivo travamento suporte | Fresa Ø5mm | Nesta parte realizou-se 3 ranhuras oblongas de forma simétrica para fixação da peça |
| 7 | Fixação do conjunto | Fresa Ø25mm, Broca Ø6,5mm e Escareador | A peça que fixa todo o conjunto foi esquadrejada, usinada nas medidas especificadas, foram feitos três furos para fixação no equipamento. |

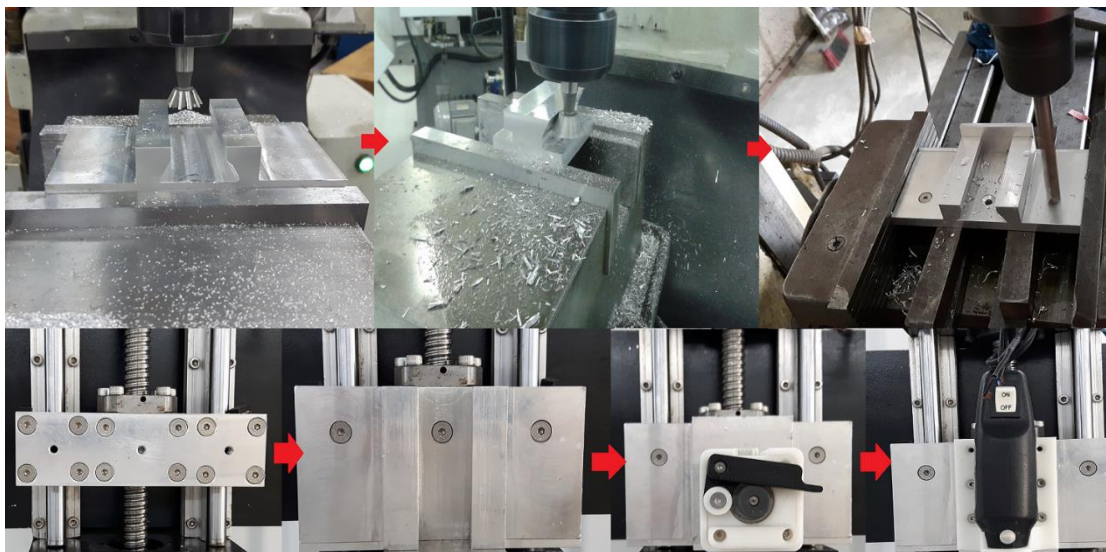


Figura 34 - Processo de usinagem e instalação do suporte de ferramenta.
Fonte: Os autores

4.1.4 Mesa de Impressão

Na inclusão da mesa de impressão foram necessários alguns ajustes para adaptar a mesma no equipamento. A mesa/cama aquecida (do inglês *heatbed*) tem como objetivo fixar o material na sua superfície durante a impressão, especialmente na primeira camada.

A mesa aquecida usada no projeto é do modelo Mk2b *dual power* que pode ser visto na Figura 35 e possui dimensões 200x200 mm. As furações contidas na placa não eram compatíveis com as do equipamento, portanto foi necessária a adaptação de suportes para a mesma, esses podem ser vistos instalados na Figura 36 bem como a inserção de molas para o nivelamento da superfície.



Figura 35 - Mesa aquecida.

Fonte: Disponível em <https://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed> Acesso em 17 de Novembro de 2018.

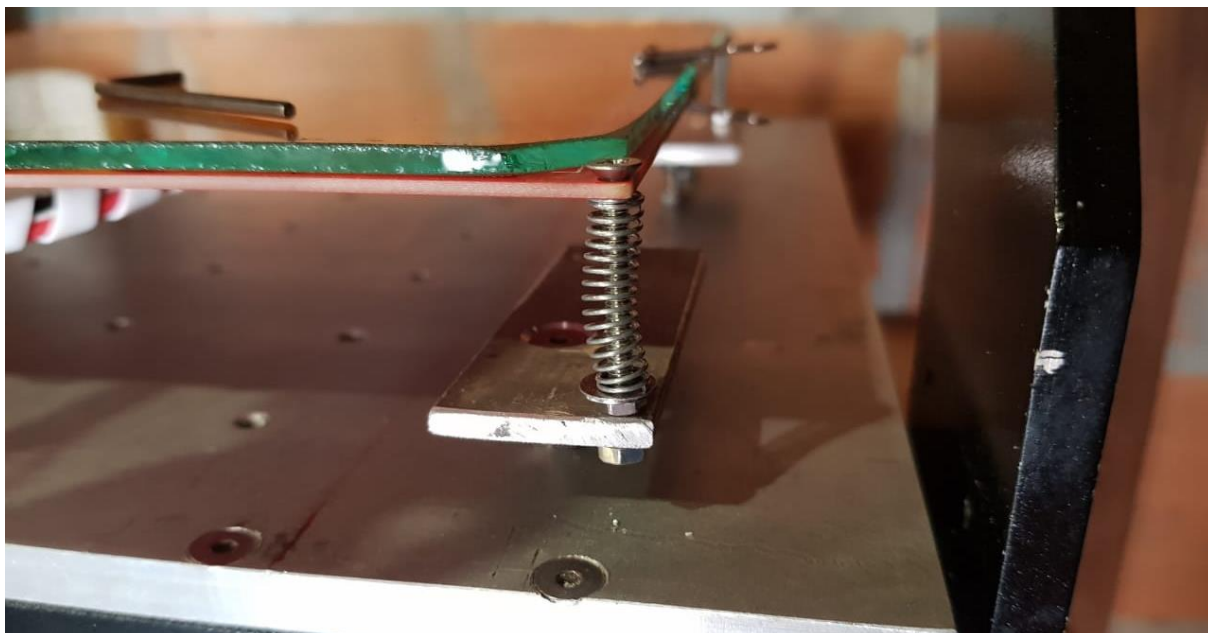


Figura 36 - Suportes mesa.

Fonte: Os autores.

4.1.5 Mesa de Usinagem

Os materiais que compõem a mesa de usinagem são: madeira laminada, chapa de aço e cantoneira de alumínio. Para a construção da mesma optou-se por uma alternativa simples que possibilitou a fixação do conjunto sem ser necessário a remoção da mesa de impressão.

A madeira laminada foi cortada nas seguintes medidas: uma peça com 245 x 293 mm utilizada na parte superior, uma peça com 225 x 50 mm e duas peças com 293 x 50 mm, todas estas com espessura de 10 mm unidas com parafusos de rosca soberba de 15 mm com 2,5 mm de diâmetro.

Considerando a praticidade na fixação do material a ser usinado utilizou-se uma chapa de aço com 192 x 290 mm e espessura de 2 mm em conjunto com ímãs de neodímio e parafusada na parte superior da madeira. Com a cantoneira de alumínio fixou-se todas as partes no equipamento em adaptação, mais detalhes podem ser observados na Figura 37.

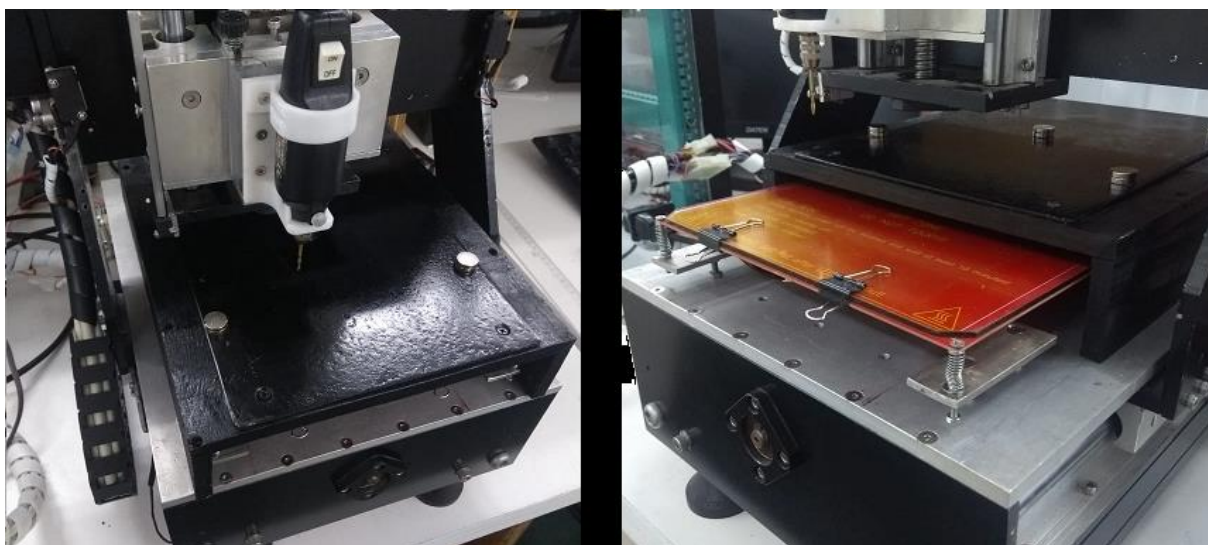


Figura 37 – Mesa de Usinagem
Fonte: Os autores.

4.1.6 Construção do painel

O equipamento original possuía um painel em madeira, tendo em vista os riscos que o material apresenta ao trabalhar com energia elétrica, mesmo em baixa tensão, optou-se em fazer a substituição do mesmo por um novo painel construído em policarbonato.

Os processos envolvidos na fabricação do novo painel foram: corte do alumínio da estrutura, corte dos policarbonatos, montagem e pintura do conjunto .

As dimensões do novo painel são 200x400x360mm. Na estrutura o material utilizado foram cantoneiras de alumínio 20x20 mm com perfil representado na Figura 38, cortadas nas dimensões contidas no Quadro 14. Os policarbonatos utilizados no projeto tem espessura de 6mm, as medidas utilizadas estão evidenciadas no Quadro 15.

No processo de montagem do painel para a fixação das cantoneiras gerando a estrutura do painel foram utilizados parafusos cabeça escareada M5, nas fendas das cantoneiras foram inseridas as placas de policarbonato fixada somente com pressão. Em seguida os furos e rasgos necessários para colocação de componentes foram feitos, são eles para: tela LCD, dois furos para botões (reserva), entrada de alimentação e passagem de cabos. Por fim foram colocadas as dobradiças para a porta do painel e imãs para o fechamento do mesmo. A Figura 39 mostra o painel finalizado.

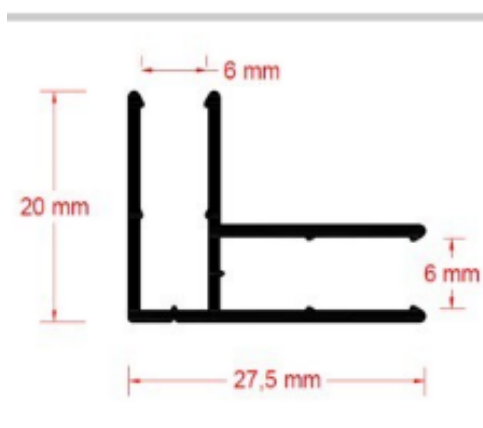


Figura 38 - Perfil cantoneira painel.

Fonte: Disponível em

<<http://www.policarbonatoonline.com.br/catalog/product/gallery/id/202/image/2737/>> Acesso em 14 de Novembro de 2018.

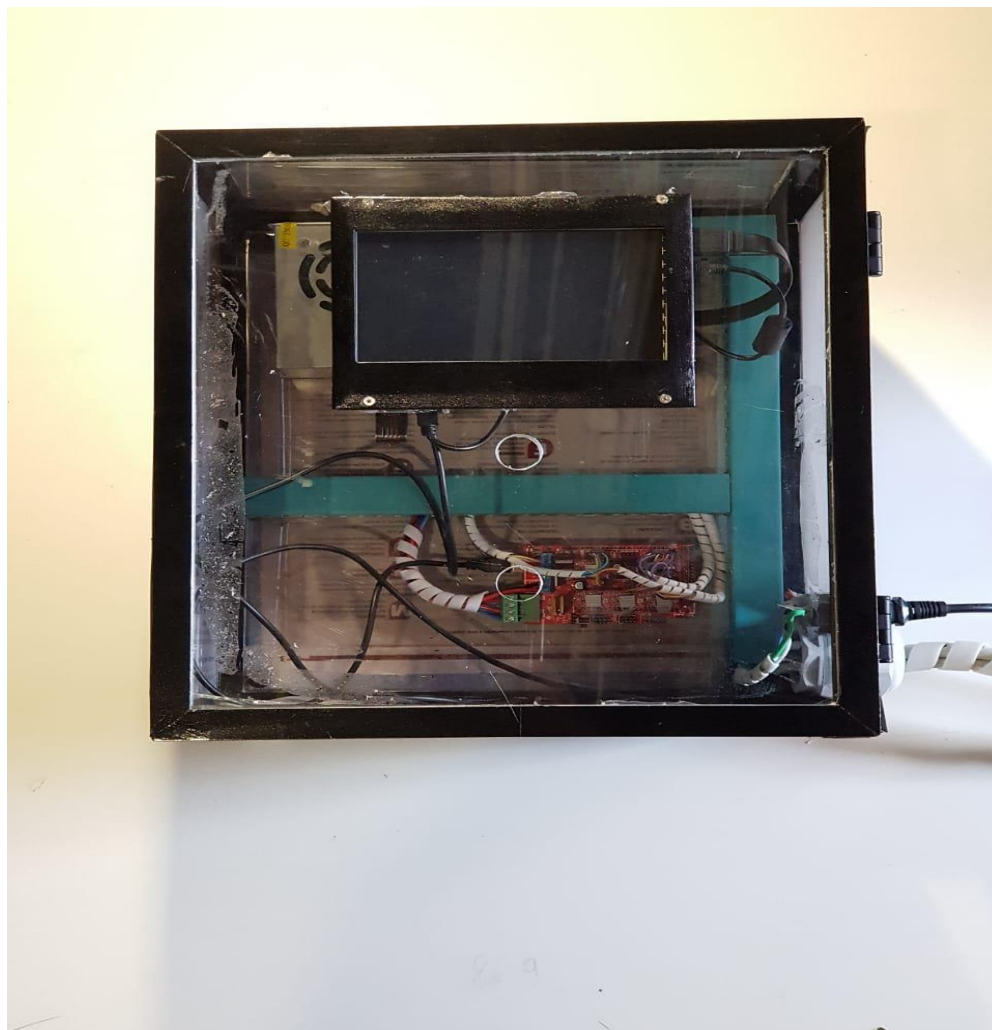


Figura 39 - Painel do equipamento.
Fonte: Os autores.

Quadro 14 - Dimensões cantoneiras cortadas

| Dimensão (mm) | Quantidade (unidades) |
|----------------------|------------------------------|
| 200 | 4 |
| 360 | 6 |
| 400 | 6 |

Quadro 15 - Dimensões policarbonato

| Dimensões (espessura x largura x comprimento) | Quantidade (unidades) | Descrição |
|---|-----------------------|----------------------------------|
| 6x344x180 | 2 | Superior e Inferior |
| 6x400x180 | 2 | Laterais |
| 6x400x360 | 2 | Porta e Fundo |
| 6x360x320 | 1 | Placa de Fixação dos Componentes |

4.2 ELETRÔNICA

4.2.1 Aquecimento do bico

O aquecimento do bico é o principal responsável pela liquefação do filamento e consequentemente pela extrusão do material como visto no Capítulo 2. Para tal foi utilizada uma resistência tipo cartucho de 24 V e 40 W, essa segundo o fabricante pode atingir temperaturas de até 300 °C.

O controle de temperatura do bico é feito através da leitura de um sensor do tipo termistor NTC de vidro de 100 kΩ esse segundo o fabricante possui faixa de trabalho entre -55 °C à 275 °C. Com a variação deste componente a placa de controle efetua a conversão de um sinal de tensão em Volts para um valor em graus Celsius, na placa encontra-se também para o efeito de *pull-up* um resistor de 4,7 kΩ.

Tendo em vista a elevação da temperatura que acontece no bloco de aquecimento e na região de *HotEnd* foi necessária também a instalação de um *cooler* visando a refrigeração da região de *ColdEnd* garantindo que o filamento não derreta no caminho até o bico, o que poderia gerar entupimento do mesmo.

4.2.2 Aquecimento da mesa

A mesa aquecida também conhecida como *HeatBed* instalada no projeto é construída em fenolite com uma camada de tinta e verniz, a mesma é basicamente uma placa de circuito com uma só trilha onde passa a tensão aplicada e por possuir

baixa resistência elétrica gera calor. Existem também outros modelos de mesa aquecida, utilizando resistores, no entanto essa configuração foi a escolhida por ser de fácil acesso no mercado.

Para a instalação da mesa é necessário ter em vista a tensão da fonte que alimenta o equipamento, pois a mesma pode ser acionada com 12 VDC ou 24 VDC. Tendo em vista que neste projeto é utilizada uma fonte de 24 VDC a ligação da mesa se dá com o polo positivo no terminal 2 e o negativo no terminal 3 conforme observado na Figura 40.

Assim como no bico, para mensurar a temperatura da mesa aquecida, foi utilizado um termistor de 100 k Ω também conectado a placa de controle e operando da mesma maneira.

O aquecimento da placa se deve a tensão aplicada de forma controlada nos seus terminais, esse controle é feito através da placa RAMPS 1.4 que será apresentada neste capítulo, o circuito da placa RAMPS 1.4 utilizado para o controle da mesa não é o mesmo circuito utilizado para controle do bico, uma vez que utilizar o mesmo poderia sobrecarregar alguns componentes.



Figura 40 - Conexão mesa aquecida
Fonte: Os autores

4.2.3 Cabos e Conexões

As respectivas ligações elétricas do equipamento serão apresentadas neste subcapítulo. Na maior parte dessas utilizou-se cabos manga 22AWG e 16AWG, ambos com quatro, oito e dez vias. Para a mesa de aquecimento optou-se em fazer

um cabeamento a parte visto que é uma das partes da máquina que mais consome potência, este em duas vias de 1,5 mm².

Todos os cabos passaram por dois conectores de vinte vias cada um, suficientes para atender a demanda do projeto e facilitar a desconexão entre máquina e painel. Visando facilitar a contribuição de futuras implementações neste projeto o Anexo 1 apresenta as conexões realizadas no equipamento.

Ainda é válido mencionar a utilização de conectores para a ligação dos motores de passo, para que em futuras manutenções se tenha facilidade na troca dos mesmos, e para troca de cabeçote, suprimindo um dos objetivos deste trabalho.

4.2.4 Placas de Controle

O conjunto de controle inicialmente escolhido para o projeto seguiria o esquema apresentado na Figura 41 através de um fluxograma.

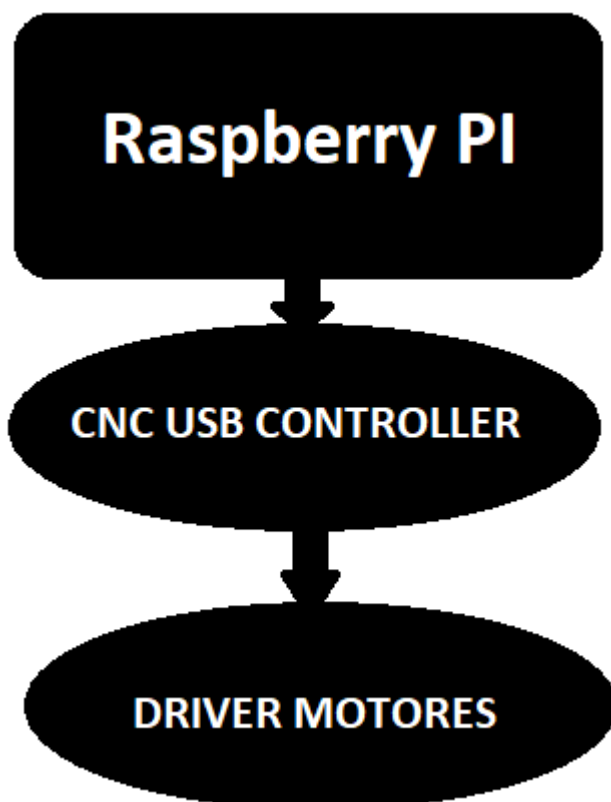


Figura 41 - Fluxograma controle do equipamento (simplificado)
Fonte: Os autores.

Nessa configuração a placa Raspberry Pi funciona como um computador que envia os comandos para placa CNC USB Controller através da USB, que por sua vez envia os sinais para o driver dos motores de passo e por conseguinte gera o movimento do equipamento. No entanto durante o processo de desenvolvimento foi constatado que a placa CNC USB Controller não poderia ser utilizada, o modelo da mesma é MK1, uma versão mais antiga da placa, e em pesquisas os autores não encontraram nenhum software compatível com o sistema operacional da placa Raspberry Pi, o Debian. Foi necessário então a busca de uma solução para esse problema, a troca da placa CNC USB Controller por uma nova placa que desempenhasse a mesma função, porém possuísse software compatível com o Debian. Nos próximos tópicos são apresentadas as soluções encontradas.

4.2.5 Arduino e RAMPS 1.4

Diante da dificuldade encontrada para utilização da placa CNC USB Controller foi realizada uma pesquisa de possibilidades de substituição. Três modelos de placa foram encontrados, abaixo o nome de cada modelo e sua respectiva análise de cumprimento dos requisitos:

- **CNC Shield V3 + Arduino Uno:** este é o modelo mais barato encontrado custo aproximado de R\$ 70 a 90, no entanto atende apenas a movimentação do equipamento sem controlar a temperatura da mesa e bico;
- **RAMPS 1.4 + Arduino Mega:** custo mais elevado que o anterior valores variam de R\$ 110 a 160, possui além do controle de movimento (controle CNC) também o controle de bico extrusor e mesa podendo ser controlado através de porta serial pela placa Raspberry Pi;
- **Protoner RPi CNC Hat:** custo similar ao anterior em torno de R\$ 120 a 150, compatível com Raspberry Pi conectado em modo de shield na mesma, no entanto bem como o primeiro modelo controla apenas o movimento do equipamento, não possibilitando controle do bico extrusor e mesa aquecida.

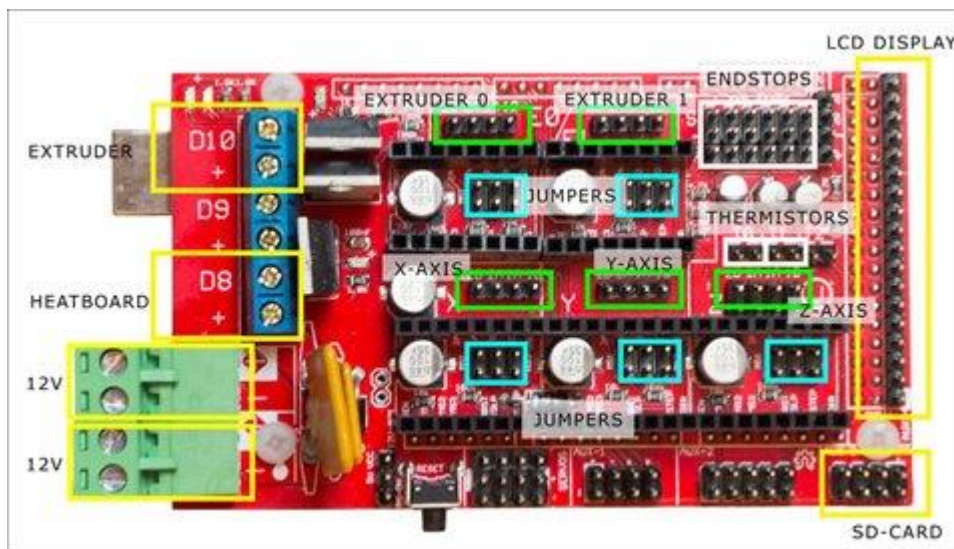


Figura 42 - Ramps 1.4 conexões.

Fonte: Disponível em <<https://www.martaduino.com.br/ramps-14-reprap-shield-para-arduino>> Acesso em 13 de Novembro de 2018.



Figura 43 - Arduino Mega 2560.

Fonte: Os autores.

A placa selecionada foi a RAMPS 1.4 vista na Figura 42, em conjunto com o Arduino Mega 2560 Rev3 Figura 43.

A instalação do conjunto de controle é simples, a placa RAMPS 1.4 é um *shield* (do inglês escudo, na eletrônica é o nome dado a uma placa com função específica que possui conectores que se encaixam a parte superior de um outro dispositivo) que é conectada na parte superior da placa Arduino Mega 2560 tornando “um só dispositivo”. Ainda no processo de instalação foi identificado que a placa RAMPS 1.4 opera originalmente com 12 VDC, no entanto no projeto a fonte instalada fornece 24 VDC. Sendo assim o processo de testes se deu da seguinte maneira:

- Inicialmente foi utilizada uma fonte ATX que fornece 12 VDC. Foi identificado que com essa tensão os motores não se movimentavam, portanto ficando inviável a utilização da mesma.
- Em seguida foi realizado o teste dos motores com 24 VDC, e observado que os mesmos se movimentavam normalmente. No entanto para operar com essa tensão são necessárias algumas modificações na placa RAMPS 1.4 apresentadas na sequência.

Utilizando as informações contidas em <https://reprap.org/wiki/RAMPS_24v> foram feitas as alterações necessárias para a utilização da placa RAMPS 1.4 com alimentação de 24 VDC. A seguir os dois passos realizados para tal:

- Inicialmente foi retirado o varistor de entrada de alimentação do circuito que controla a temperatura da mesa aquecida e alimenta a placa Arduino Mega 2560 através do pino Vin, essa ação pode ser visualizada na Figura 44.
- Em seguida o varistor de 16 V original da placa foi substituído por um *jumper* na entrada de energia para o circuito dos motores e alimentação do HotEnd e ventoinha de refrigeração;
- Por fim foi retirado o diodo D1 que alimenta a placa Arduino Mega 2560 através da entrada de tensão da placa RAMPS 1.4, essa ação se fez necessária pois o regulador de tensão da placa Arduino suporta no máximo 12 V pois a tensão de saída deste é 5 V, sendo assim com a retirada do diodo D1 a alimentação da placa Arduino deve ser feita de outra forma, nesse caso através da entrada USB conectada a placa Raspberry PI 3.

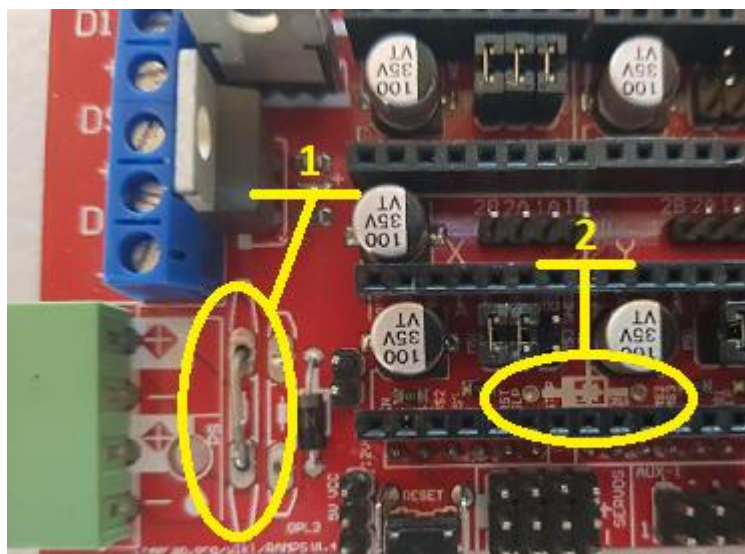


Figura 44 -(1) Retirada varistor e curto circuito nos pólos (2) Retirada diodo D1.
 Fonte: Os autores

4.2.6 Driver A4988

No capítulo 3.3 foi apresentada a eletrônica original do equipamento incluindo os drivers de acionamentos dos motores de passo. No entanto com a troca da placa de controle MK1 para a RAMPS 1.4 os drivers de motor de passo também foram substituídos.

O driver então utilizado é o A4988 da fabricante Allegro™ MicroSystems, LLC, suas características eletrônicas são descritas no Quadro 16.

Quadro 16 - Características Eletrônicas A4988

| | |
|-----------------------------|---|
| Chip | A4988 |
| Tensão lógica (operação) | 3,3 - 5 V |
| Tensão de saída dos motores | 8 - 35 V |
| Corrente por bobina | 2 A (4 A de pico) |
| Resoluções | full-step, half-step, 1/4-step, 1/8-step, 1/16-step |
| Regulador de tensão | Embutido |
| Segurança | Proteção contra sobrecarga de corrente e curto-circuito |

Fonte: Os autores.

O Driver A4988 é de fácil instalação na placa RAMPS 1.4 pois possui um slot preparado para tal. No projeto foram utilizados 4 drivers deste modelo, podendo ser inserido ainda mais um driver no caso de dois extrusores.

4.2.7 Dispositivo de Usinagem de Placas PCB

Para atingir um dos objetivos pretendidos, houve a necessidade de adaptação de uma mini retífica acionada em 24 VDC, fornecendo aproximadamente 12000 rotações por minuto, esta configurando o equipamento como *router*. Com toda a parte mecânica alinhada a instalação do dispositivo de usinagem necessitou somente a passagem de duas vias (Cabo positivo e negativo com 24 VDC) até o conector elétrico que faz parte do sistema de troca de cabeçote.

O acionamento do dispositivo é feito através de um interruptor contido no mesmo. A Figura 45 ilustra o sistema descrito.



Figura 45 -Mini retífica e conector elétrico.

Fonte: Os autores.

4.3 SOFTWARE DE CONTROLE

4.3.1 Raspbian

O OS (do inglês *Operating System*, ou Sistema Operacional) oficial para todos os modelos de Raspberry Pi é o Raspbian. Neste subcapítulo serão descritos quais passos foram fundamentais para instalação do mesmo.

Inicialmente utilizou-se o site da empresa Raspberry <raspberrypi.org> para obter o arquivo com extensão .zip (arquivo compactado para otimização de espaço) do sistema requerido.

Para instalar o sistema de forma correta é indispensável que o cartão de memória (este do tipo micro SD - Secure Digital Card) tenha no mínimo 8GB de armazenamento, pois o arquivo de imagem do Raspbian é superior a 4GB descompactado. Outro ponto relevante na questão de armazenamento é a possibilidade de atualizações e instalação de novos aplicativos.

Tendo feito o download do OS e possuindo um cartão de memória com os requisitos, antes da instalação da imagem, é necessário formatar o micro SD com o software SD Card Formatter.

Por fim com o auxílio do software Etcher (utilizado para gravações em SD), sem descompactar o arquivo do Raspbian inicia-se a instalação do OS no cartão de memória. Após a instalação basta inserir o micro SD na placa Raspberry Pi e fazer as devidas configurações do sistema como: resolução de tela, idioma, hora, conexão com a rede de internet e atualizar aplicativos se necessário.

4.3.2 CNC USB Controller

O software de controle da placa MK1 (placa de comando G-Code original do equipamento) é o CNC USB Controller, esse com interface compatível para Windows XP, Vista, 7, 8 ou 8.1 (32 bit ou 64 bit), no entanto sem compatibilidade para Debian sistema operacional do Raspberry Pi.

A versão PlanetCNC TNG 2018.9.7 - RaspberryPi possui compatibilidade com o Debian e foi instalada para testes na placa do projeto, essa versão também disponível para Windows e foi instalada em um computador. Nos testes de

comunicação com a placa verificou-se que ao mexer na posição via software nada acontecia no equipamento, então foram investigadas os possíveis problemas, uma vez que com o teste do software CNC USB Controller que já era utilizado no projeto o equipamento se movimentou normalmente. Dessa forma nas pesquisas foi identificado que o software somente funcionava com a placa MK3, uma versão superior a existente no projeto.

Tendo em vista essa dificuldade foi necessário a troca de software bem como da placa de interpretação do G-Code.

4.3.3 GRBL - Firmware Marlin

A placa Arduino Mega 2560 é o principal controle do equipamento descrito neste projeto. A mesma transforma os comandos advindos do software de impressão 3D/usinagem em código G para sinais eletrônicos na placa RAMPS 1.4. Para tal a placa Arduino utiliza um software conhecido como GRBL.

O GRBL é um software *Open Source* desenvolvido para a plataforma Arduino com o intuito de comandar impressoras 3D e CNC's em geral. Existem diversas variações deste software, uma delas é o desenvolvido para impressoras que utilizam a placa RAMPS 1.4, a variação utilizada nesse caso é o software Marlin.

O software utilizado no projeto é o Marlin 1.1 bugfix, uma versão mais atual do software atualizada com possíveis erros. O software basicamente é um código criado na IDE da plataforma Arduino, obviamente explorando de diversos recursos mais sofisticados como a criação de bibliotecas. Sendo assim sua edição é relativamente simples, uma vez que isso pode ser feito facilmente através da IDE da plataforma Arduino.

Cada equipamento tem suas características próprias, dimensões, passo de fuso ou correias, tensão de alimentação, entre outras variáveis que necessitam ser ajustadas para o bom funcionamento da máquina. Abaixo serão apresentadas e descritas as configurações feitas no software Marlin para adaptá-lo ao equipamento do projeto.

Para edição do software primeiramente é necessário realizar o download do mesmo no site <<http://marlinfw.org/meta/download/>> no formato compactado .zip e descompactá-lo em uma pasta da preferência do usuário. Em seguida abrindo a pasta

descompactada abre-se o arquivo Marlin.ino a visualização do mesmo é ilustrada na Figura 46.

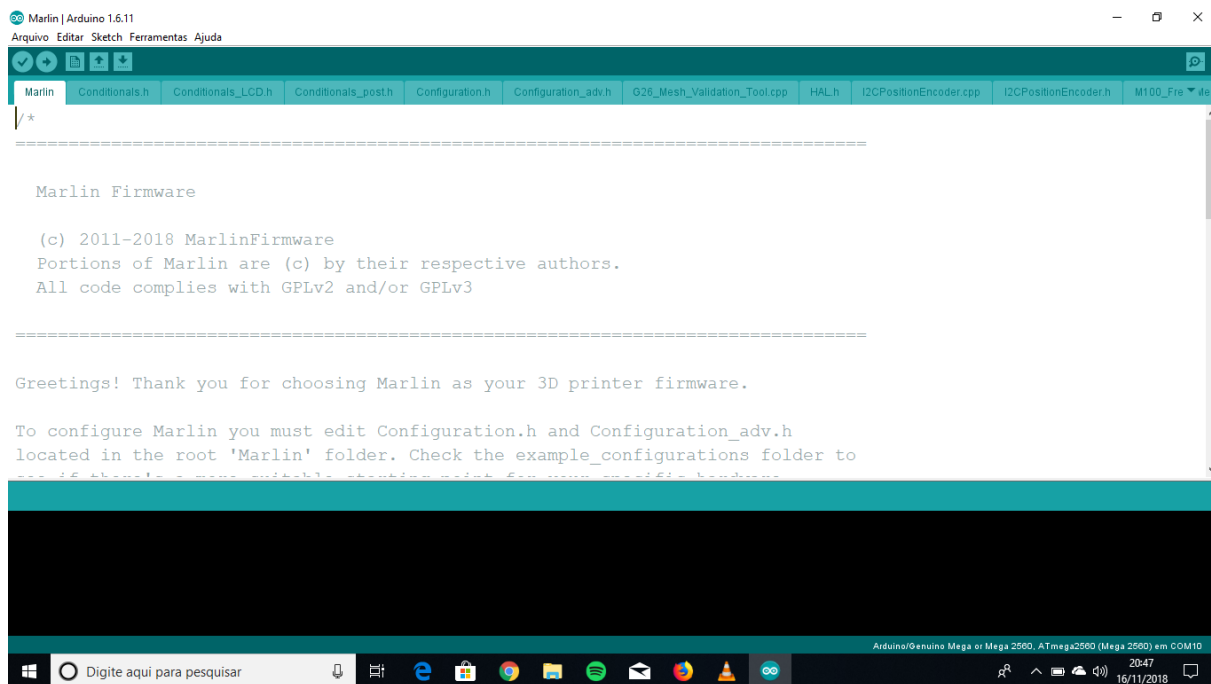


Figura 46 - Visualização do software Marlin na IDE Arduino.
Fonte: Os autores

O próximo passo é abrir a aba Configuration.h, esta uma biblioteca do software onde estão concentradas a maioria das configurações para utilização do mesmo. O usuário poderá a partir desse passo revisar a pré-configuração do Marlin se orientando através dos comentários contidos no código - todos em inglês - ou então acessar o site <http://marlinfw.org/docs/configuration/configuration.html> e acompanhar a descrição dos parâmetros verificando a necessidade de edição ou não.

O primeiro comando editável é o que se refere a porta serial onde o dispositivo Arduino está conectado:

```
#define SERIAL_PORT 0
```

O valor '0' pode ser trocado pelo número da porta serial onde o Arduino está conectado, ou mantendo o '0' o software detecta automaticamente a porta.

Em seguida é necessário editar a velocidade de comunicação serial, um valor estável para o BAUDRATE é de 115200 definido através do comando:

```
#define BAUDRATE 115200
```

Prosseguindo na edição é necessário certificar-se de estar utilizando a configuração para a placa RAMPS correta, uma vez que existem diversos modelos, a correta é definida pelo seguinte comando:

```
#define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_14_EFB
```

Posterior a esse passo é definido o número de extrusores do projeto, nesse caso um e logo em seguida o diâmetro do filamento utilizado, para isso as respectivas configurações:

```
#define EXTRUDERS 1
```

```
#define DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA 1.75
```

O próximo passo é a definição do tipo de fonte utilizado, para fontes ATX e outros modelos de fonte chaveada o valor utilizado na configuração é 1, definido no código da seguinte maneira:

```
#define POWER_SUPPLY 1
```

Com a modificação do tipo de fonte encerram-se as configurações gerais e iniciam-se as específicas de funcionamento. A Primeira delas é a definição do tipo de sensor termistor utilizado, nesse caso:

```
1 : 100k thermistor - best choice for EPCOS 100k (4.7k pullup)
```

Alterando o código da seguinte maneira:

```
#define TEMP_SENSOR_0 1
```

```
#define TEMP_SENSOR_BED 1
```

O próximo passo de edição relacionado às configurações térmicas é a definição da temperatura máxima e mínima do extrusor e cama aquecida, da seguinte forma:

```
#define HEATER_0_MINTEMP 5
```

```
#define BED_MINTEMP 5
```

```
#define HEATER_0_MAXTEMP 245
```

```
#define BED_MAXTEMP 150
```

Ainda focado nas configurações de segurança térmica do equipamento as seguintes alterações se fazem necessárias:

```
#define PREVENT_COLD_EXTRUSION
```

```
#define EXTRUDE_MINTEMP 170
```

```
#define THERMAL_PROTECTION_HOTENDS
```

```
#define THERMAL_PROTECTION_BED
```

O próximo setor de alterações são as relacionadas a mecânica do equipamento e as suas movimentações. A primeira delas em relação a quantidade de fim-de-curso utilizadas e suas respectivas posições nos eixos, sendo assim no projeto a seguinte configuração foi utilizada:

```
#define USE_XMIN_PLUG
```

```
//#define USE_YMIN_PLUG
#define USE_ZMIN_PLUG
//#define USE_XMAX_PLUG
#define USE_YMAX_PLUG
#define USE_ZMAX_PLUG
```

Desta forma os eixos X e Y possuem somente uma fim-de-curso cada enquanto o eixo Z possui duas. Essa configuração influencia diretamente no processo de *homing* do equipamento.

Em seguida é necessário definir o número de passos necessários para movimentar 1 mm ao longo dos eixos e também do extrusor, para tal utilizou-se de uma ferramenta disponível no site <<http://atividademaker.com.br/calculadora-de-passos>> para calcular o valor necessário. A Figura 47 apresenta a ferramenta com os valores do projeto em questão.

FUSOS EM MILÍMETROS

Se a sua máquina se movimenta através de fusos em milímetros, utilize esse formulário!

| | |
|---|---|
| <p>Qual a Revolução do seu Motor</p> <input type="text" value="1.8 (200 passos por revolução)"/> | <p>Como você configurou seus Micropassos</p> <input type="text" value="1/16 Passo"/> |
| <p>Passos do fuso (mm/revolução)</p> <input type="text" value="5"/> | |
| <input type="button" value="CALCULAR"/> | |
| <p>Passos por milímetro = 640 Steps/mm</p> | |
| <p>Resolução da máquina = 0.0015625 mm</p> | |

Figura 47 -Cálculo do número de passos para movimentar 1 mm nos eixos X/Y/Z.
Fonte: Os autores.

Com essa informação a modificação realizada no código é:

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 640, 640, 640, 50 }
```

Sendo:

```
{X, Y, Z, E0 [, E1[, E2[, E3[, E4]]]]}
```

Posteriormente é necessário a definição das direções dos motores de passo, essa modificação pode ser feita de duas formas diferentes, manualmente invertendo

o conector do motor de passo na placa RAMPS 1.4 ou via software, trocando o valor lógico que define a direção do motor de 'true' para 'false' ou vice e versa, da forma apresentada a seguir:

```
#define INVERT_X_DIR false
#define INVERT_Y_DIR true
#define INVERT_Z_DIR true
#define INVERT_E0_DIR false
```

A seguir é preciso modificar as configurações de *homing* do equipamento, citadas anteriormente em relação às fim-de-curso utilizadas, para essa alteração o número -1 define que o movimento será para os valores mínimos do eixo, enquanto o 1 define o contrário. A configuração utilizada no projeto é apresentada a seguir:

```
#define X_HOME_DIR -1
#define Y_HOME_DIR 1
#define Z_HOME_DIR -1
```

Na sequência de modificações é preciso configurar o tamanho da mesa aquecida utilizada no projeto, o padrão mais utilizado nas impressoras é de uma mesa com dimensões 200x200 mm, desta forma a configuração fica da seguinte maneira:

```
#define X_BED_SIZE 130
#define Y_BED_SIZE 100
```

Por fim em relação às configurações de impressão é preciso editar os valores de temperatura para os dois materiais mais utilizados em impressão 3D, o PLA e o ABS, também é necessário a edição da porcentagem de velocidade que a ventoinha de refrigeração do HotEnd irá girar, esse valor pode variar entre 0 - 255, desta forma tem-se os seguintes valores:

```
#define PREHEAT_1_TEMP_HOTEND 180
#define PREHEAT_1_TEMP_BED 70
#define PREHEAT_1_FAN_SPEED 200 // Value from 0 to 255
#define PREHEAT_2_TEMP_HOTEND 240
#define PREHEAT_2_TEMP_BED 110
#define PREHEAT_2_FAN_SPEED 255 // Value from 0 to 255
```

Tendo realizado todas essas edições é necessário gravar o código na placa Arduino Mega 2560, portanto é feito a compilação do programa para a mesma. Em seguida para realizar os testes a conexão com o software de comando se faz necessária, no caso desse projeto o Pronterface que será apresentado a seguir.

4.3.4 Pronterface

Diante das dificuldades de comunicação entre a Raspberry Pi e a placa MK1 uma nova busca de software teve de ser feita para que a nova configuração ficasse de acordo com os objetivos deste trabalho. Através de pesquisas descobriu-se a possibilidade de comandar o equipamento com o Pronterface em conjunto com o Firmware Marlin.

Após estudos e tentativas, devido a problemas de instalação do pronterface na Raspberry Pi, o sucesso de instalação do software deu-se utilizando a ferramenta LXTerminal da Raspberry e executando a sequência de passos listados a seguir com seus respectivos comandos:

1. Antes de tudo o Pronterface teve que ser instalado direto da fonte conforme a documentação oficial em:

```
<https://github.com/kliment/Printrun/tree/master#running-from-source>
```

2. Através dos comandos abaixo deu-se início a instalação das dependências (componentes de software necessários para a execução do Pronterface):

```
sudo apt install python3-serial python3-numpy cython3  
python3-libxml2 python3-gi python3-dbus python3-psutil  
python3-cairosvg libpython3-dev python3-appdirs python3-  
wxgtk4.0 python3-pip python3-venv
```

```
pip3 install --user pyglet
```

3. Na sequência instalou-se o Git e feito uma cópia (clone) do repositório do Printrun, que contém Pronterface:

```
sudo apt install git
```

```
git clone https://github.com/kliment/Printrun.git
```

Dessa forma, Printrun será copiado para a pasta Printrun dentro da pasta pessoal (/home/pi).

4. Para executar o Pronterface utilizou-se a versão mais recente do Python, compilada direto da fonte conforme a documentação oficial em: <<https://wiki.wxpython.org/BuildWxPythonOnRaspberryPi>>

5. A continuidade da instalação das dependências pode ser realizada com os comandos as seguir:

```
sudo apt install build-essential tk-dev libncurses5-dev  
libncursesw5-dev libreadline6-dev libdb5.3-dev libgdbm-  
dev libsqlite3-dev libssl-dev libbz2-dev libexpat1-dev  
liblzma-dev zlib1g-dev
```

6. Na sequência transferência e instalação do Python 3.6.5 com os seguintes comandos:

```
Wget https://www.python.org/ftp/python/3.6.5/Python-  
3.6.5.tar.xz  
tar xf Python-3.6.5.tar.xz  
cd Python-3.6.5  
./configure  
make  
sudo make altinstall
```

7. O Pronterface precisa ser executado dentro de um ambiente virtual Python, criado da seguinte forma:

```
python3.6 -m venv wx
```

O comando acima cria o ambiente virtual e salva-o numa pasta chamada wx dentro da pasta pessoal. O argumento “-m venv” indica a execução do módulo venv (python3-venv, instalado anteriormente com o apt), e wx é o nome do ambiente virtual criado.

8. Para executar o Pronterface dentro do ambiente virtual, utilizou-se:

```
/home/pi/wx/bin/python /home/pi/Printrun/pronterface
```

9. O comando do oitavo passo pode ser executado via terminal ou, preferencialmente, através de um atalho. No ambiente gráfico LXDE, utilizado pelo Raspbian, o atalho é criado escrevendo um arquivo de texto denominado Pronterface.desktop e o salvando no local desejado (como a área de trabalho). O conteúdo do arquivo é apresentado abaixo:

```
[Desktop Entry]
Name=Pronterface
Comment=3D Printer
Exec=/home/pi/wx/bin/python /home/pi/Printrun/pronterface
Icon=/home/pi/Printrun/pronterface.ico
Terminal=false
Type=Application
```

10. Por fim um ajuste importante no código deve ser feito tomando atenção para a linha iniciada por `Exec=`, que é quem efetivamente executa a aplicação, da mesma forma indicada anteriormente.

O comando `Icon=` indica o caminho para o arquivo de ícone a exibir no atalho, `Terminal=false` indica que a aplicação deve abrir sem a exibição de um terminal de texto e `Type=Application` indica que se trata de um atalho de aplicativo (e não de, por exemplo, pasta ou endereço da Web).

5 TESTES E AJUSTES

Neste capítulo serão apresentados os testes realizados no equipamento durante e após a montagem do mesmo, bem como os ajustes necessários para o correto funcionamento.

A exemplo dos demais capítulos deste trabalho permanece com a mesma estrutura, dividindo as áreas de desenvolvimento em: mecânica, eletrônica e software.

5.1 MECÂNICA

A partir da estrutura mecânica completamente montada foram realizados alguns testes de movimentação, aquecimento e extrusão de material. Os testes e seus respectivos ajustes são descritos a seguir.

5.1.1 Movimentação

Foram feitos testes de movimentação nos três eixos do equipamento bem como no extrusor do filamento, conforme demonstrado no capítulo 4.3.3 o cálculo que define quantos passos são necessários para movimentar 1 mm no eixo pode ser calculado através de três variáveis do projeto: nº de passos por revolução, configuração microstep, passo do fuso. A equação que define o nº de passos/mm portanto é $((n^{\circ} \text{ de passos/revolução}) * \text{microstep})/\text{passo fuso}$ (EQ.1), desta forma obtém-se o resultado de 640 passos/mm para o equipamento montado.

No entanto foi constatado nos testes de movimentação que havia um pequeno erro quanto a movimentação desejada e a real. A cada 10 mm de movimentação nos eixos X ou Y foi constatado através de medição com paquímetro com resolução de 0.02 mm que o eixo se movimentava 10,1 mm. Em seguida o teste foi realizado com 100 mm de movimentação, constatando que o resultado foi de 101 mm, configurando portanto o erro percentual de 1%. Para ajustar o erro de movimentação foi recalculado o número de passos utilizando a equação (EQ.1) inserindo o percentual de erro, obtendo portanto o valor de 633,6 ~ 634 passos.

Nos testes de movimentação também foram inseridas as fim-de-curso limitando as distâncias úteis do equipamento. O Quadro 17 apresenta o valor as distâncias máximas em cada eixo.

Quadro 17 - Distâncias máximas dos eixos com a instalação das fim-de-curso.

| EIXO | DISTÂNCIA POSSÍVEL | DISTÂNCIA DE TRABALHO |
|------|--------------------|-----------------------|
| X | 150 mm | 130 mm |
| Y | 240 mm | 100 mm |

| | | |
|---|--------|--------|
| Z | 115 mm | 105 mm |
|---|--------|--------|

Fonte: Os autores.

5.2.2 Sistema de Extrusão

Os testes realizados no sistema de extrusão iniciaram pelo bloco de aquecimento ligando-o através do software a temperatura padrão para o material PLA 185 °C, no entanto houve um aquecimento excessivo no dissipador onde o mesmo não desempenhava sua função da forma correta, desta maneira o aquecimento foi interrompido e o conjunto analisado para detecção do problema. Após a análise do conjunto de extrusão de uma impressora Marlin foi percebido que a mesma possuía uma diferença de materiais na conexão do bloco de aquecimento com o dissipador, utilizando uma barra roscada de aço para tal. Sendo assim se fez necessário uma alteração mecânica no dissipador térmico do sistema de extrusão visando a diminuição da temperatura do mesmo, esta foi a troca da interligação entre o dissipador e o bloco aquecedor, inserindo um parafuso de aço minimizando a transmissão de calor entre as partes, tal modificação pode ser vista na Figura 48.



Figura 48 - Dissipador de calor desenvolvido.

Fonte: Os autores.

5.2 SOFTWARE

Os softwares utilizados para desempenhar as duas funções do equipamento são:

- Marlin: firmware GRBL para placa Arduino com RAMPS 1.4;

- Pronterface: executa em tempo real o G-Code;
- MakerCam: com a função de gerar o G-Code para usinagem;
- Slic3r: utilizado para preparar o G-Code das peças para impressão 3D.

5.2.1 Homing

Para realização do homing é necessário definir quais os extremos dos eixos serão as referências para o equipamento. O homing do projeto é executado em X-min, Y-máx e Z-min. Esta configuração é a mais otimizada para aproveitamento do espaço da mesa de impressão, desta forma a área útil de impressão se tornam as distâncias máximas de X e Y contidas no Quadro 17.

As configurações para o homing são feitas no software Marlin através do comando:

```
// Direction of endstops when homing; 1=MAX, -1=MIN
// :[-1,1]
#define X_HOME_DIR -1
#define Y_HOME_DIR 1
#define Z_HOME_DIR -1
```

5.3.2 Cálculo de Passos

Conforme demonstrado no capítulo 5.1.1 na equação (EQ.1) para ajustar a precisão do equipamento foi necessário recalcular o número de passos para movimentar 1 mm, após calculado o novo valor foi inserido no Firmware Marlin através da alteração do comando:

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 640, 640, 640, 110 }
```

5.3.3 Usinagem

A usinagem era a função inicial do equipamento em estudo, para manter o recurso com as alterações feitas no projeto foi necessário utilizar um software que converte imagens em G-Code chamado MakerCam, encontrado no site <<http://www.makercam.com/>>, este software é online, gratuito e não é necessário login para utilizá-lo. O passo a passo para conversão de um arquivo de imagem para G-Code pode ser visto na Figura 49.

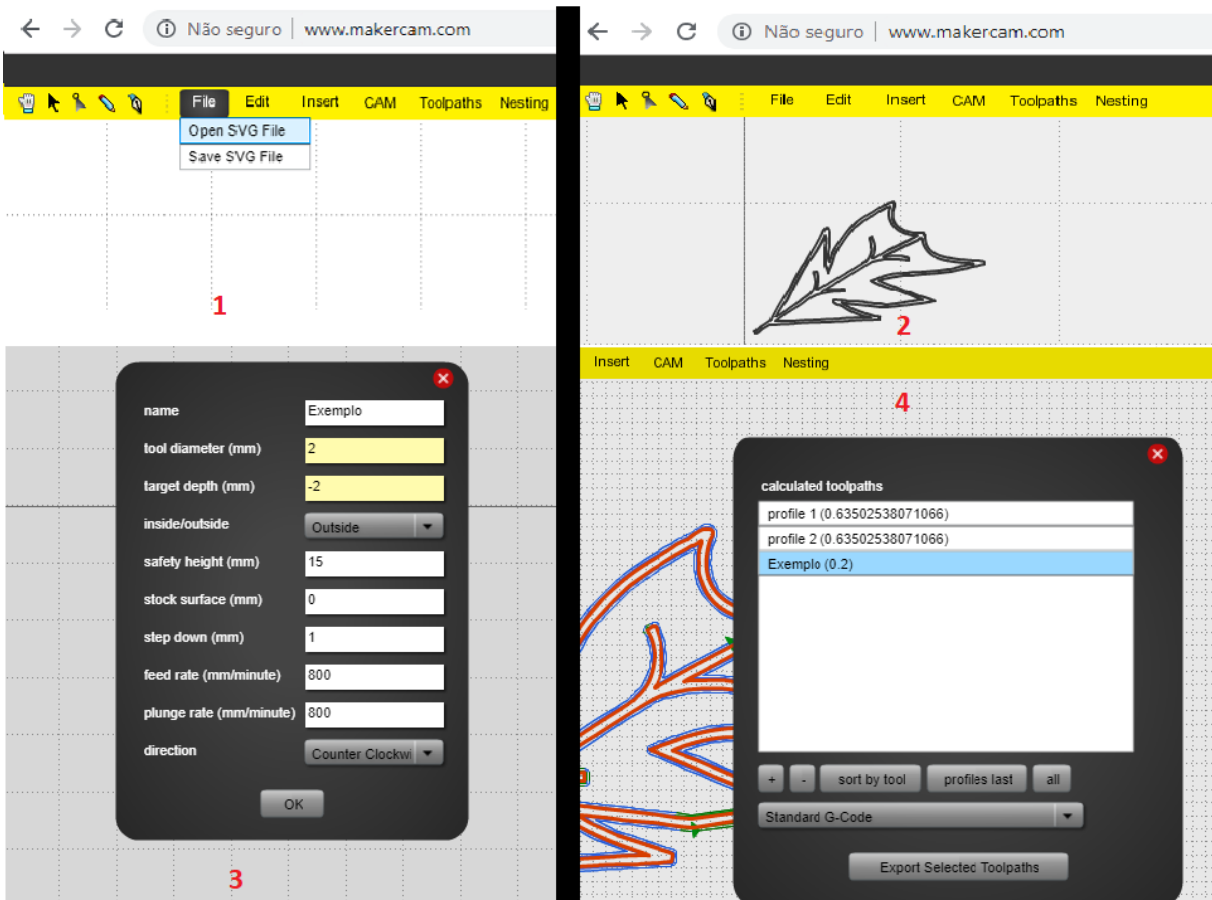


Figura 49 - Passos para conversão G-Code no MakerCam.
 Fonte: Os autores.

5.3.4 Impressão Cubo Padrão

Os testes realizados com a função de impressão 3D do equipamento foram feitos com a prototipagem de um cubo padrão de dimensões 20x20x20 mm, o mesmo pode ser visto na Figura 50.

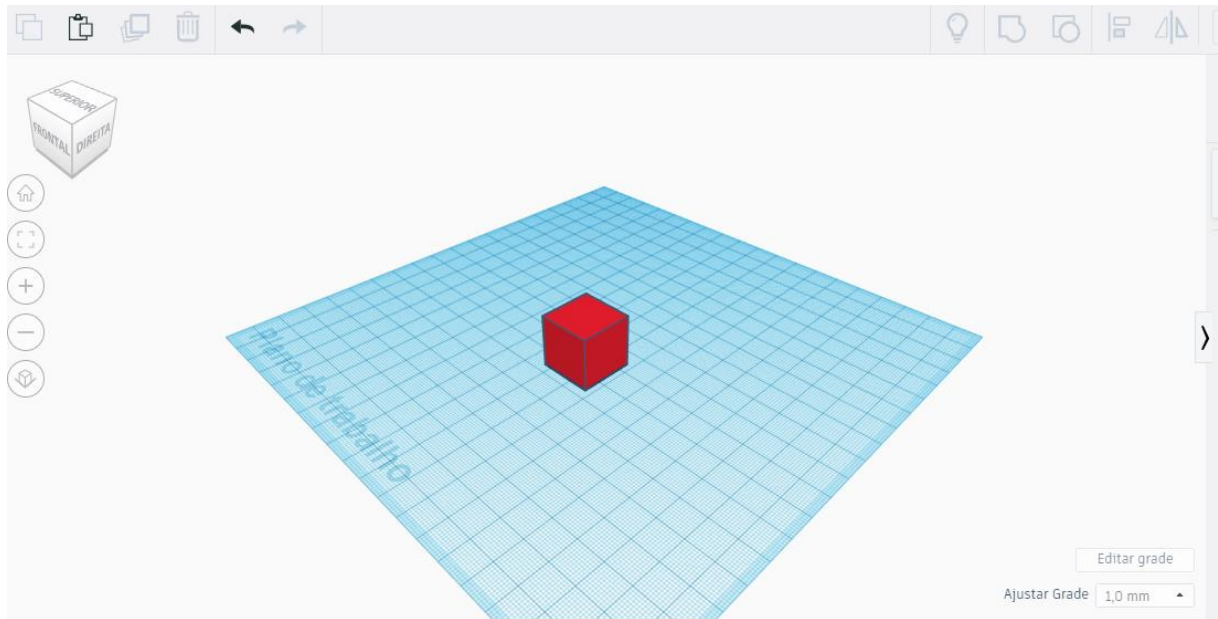


Figura 50 - Modelo de cubo padrão.
Fonte: Os autores.

As configurações utilizadas no programa Slic3r para preparar o modelo .STL para impressão podem ser vistas nas Figuras 51 e 52, em seguida a peça foi exportada para G-Code e salva em um PenDrive que foi inserido na placa Raspberry Pi.

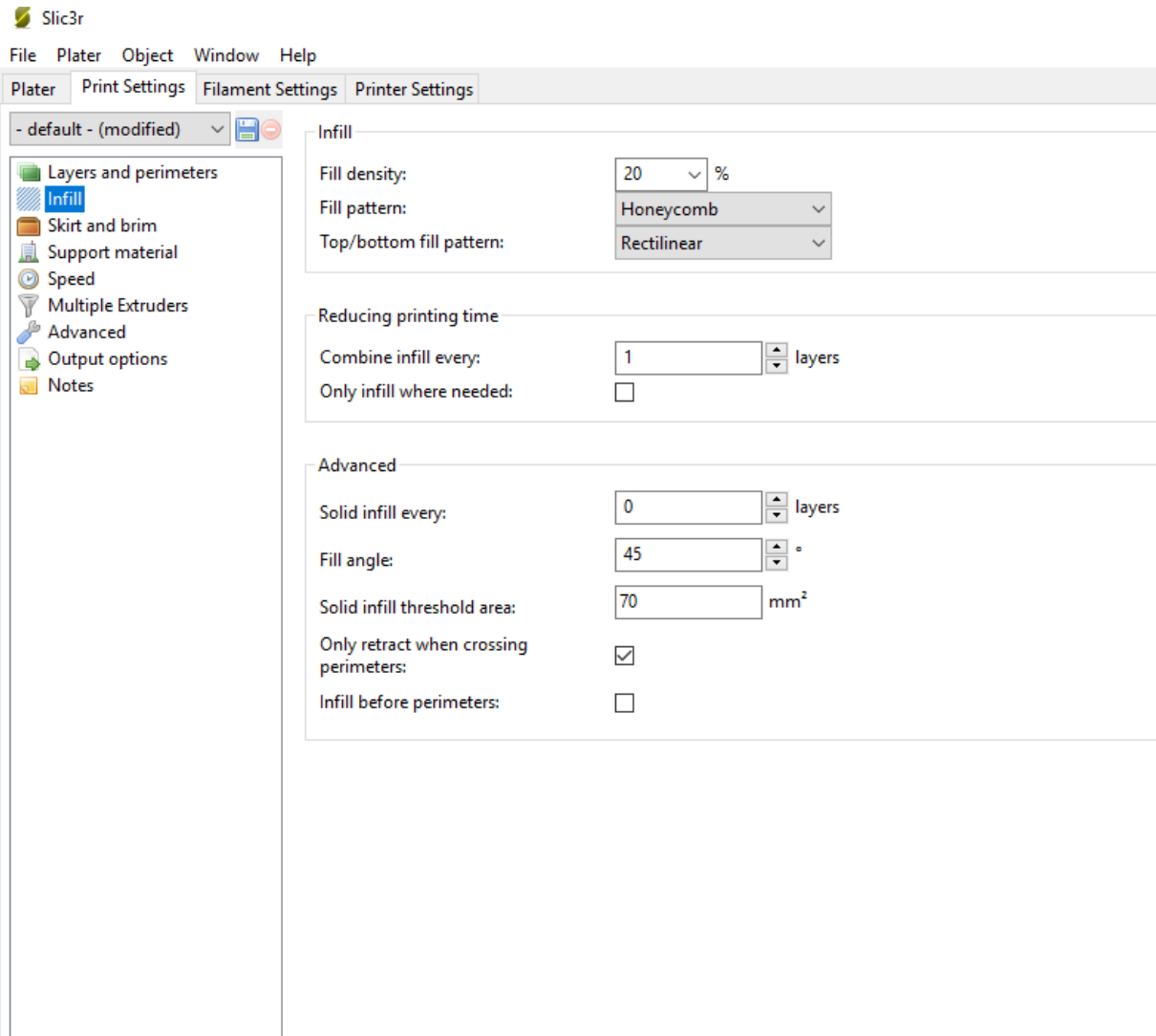


Figura 51 - Configuração de impressão no Slic3r.
Fonte: Os autores.

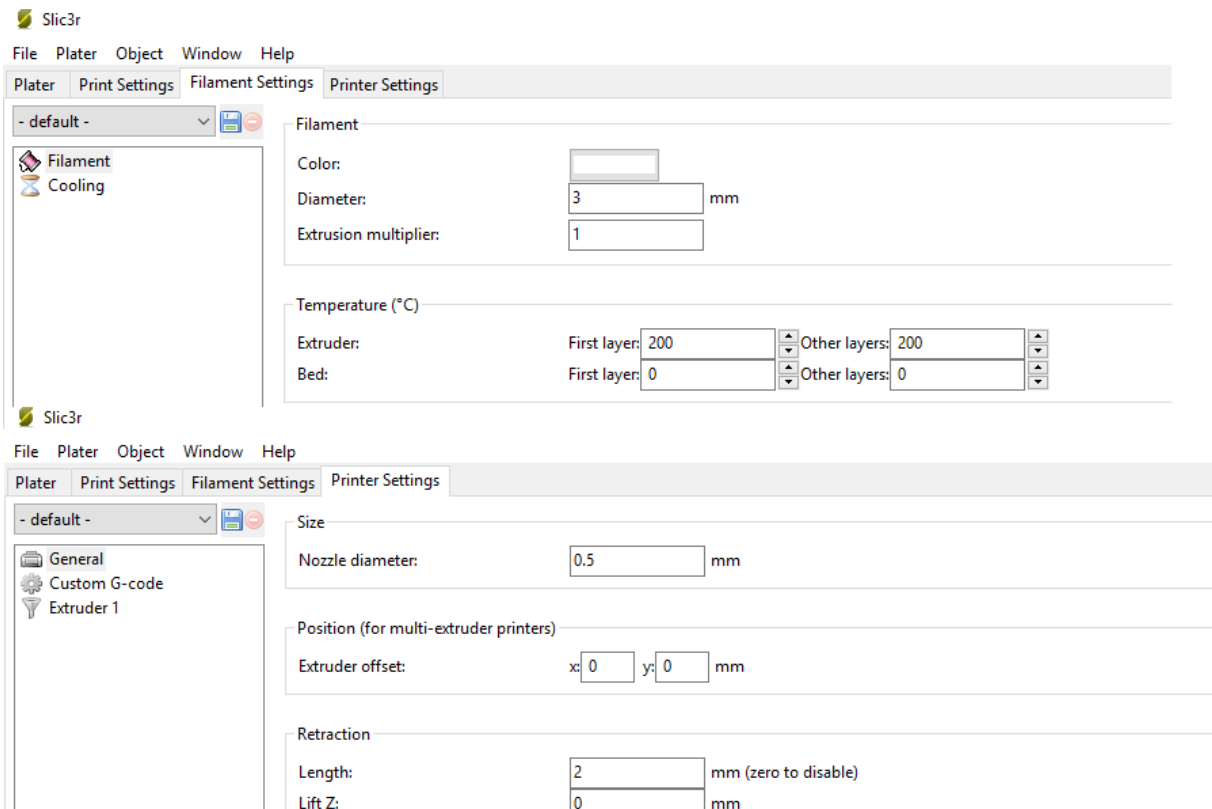


Figura 52 - Configuração de filamento/temperatura.
Fonte: Os autores.

Visando facilitar os testes foi utilizada uma ferramenta para acesso remoto a placa Raspberry Pi chamada VNC Viewer, a qual pode ser adquirida através do site <<https://www.realvnc.com/en/connect/download/viewer/>>. Desta maneira o programa Pronterface foi acessado através de um outro computador, no entanto a partir do início do processo de impressão o mesmo foi desconectado e o processo seguiu normalmente, tornando-se uma ótima possibilidade quando se tem o equipamento conectado à mesma rede que o computador.

O resultado visual da impressão do cubo padrão pode ser visto na Figura 53 e suas dimensões no Quadro 18.

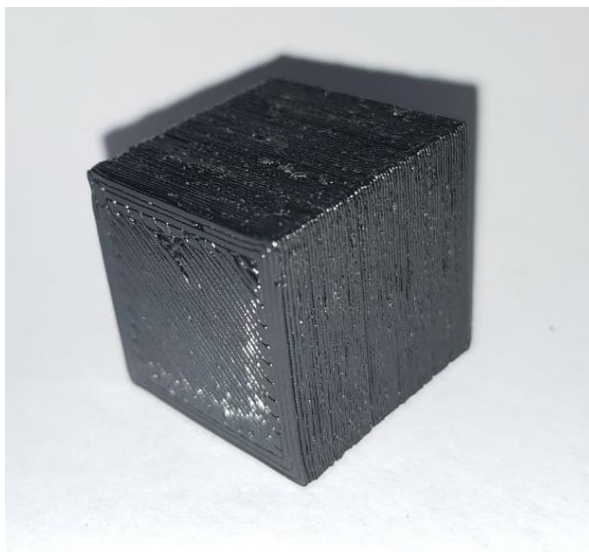


Figura 53 - Cubo padrão prototipado no equipamento.
Fonte: Os autores.

Quadro 18 - Dimensões cubo padrão

| Dimensão | Expectativa dimensional (mm) | Medida real (mm) |
|-------------|------------------------------|------------------|
| Comprimento | 10 | 10,14 |
| Largura | 10 | 10,2 |
| Altura | 10 | 10,3 |

A partir dos resultados das dimensões de cada eixo pode-se deduzir que as diferenças entre as dimensões esperadas e as reais possivelmente devem-se ao fato de inércia na movimentação ou ainda a algum possível pulo de passo na rotação dos motores, uma vez que quando calibrados os mesmo não apresentaram erro dimensional.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta do trabalho de implementação da função de impressão 3D em um equipamento de placas PCB foi atingida com sucesso através das modificações e adaptações realizadas no equipamento. Tendo em vista os objetivos propostos no início deste projeto são evidenciados os trabalhos realizados para atingi-los:

- **Realizar o *retrofitting* no equipamento existente**, com a troca dos parafusos de aço carbono por parafusos de aço inox e com a pintura das partes do equipamento;
- **Construção de um suporte de cabeçote para troca otimizada de função**, utilizando-se dos meios disponíveis de fabricação mecânica de peças foi possível a construção do conjunto que possibilita, além das funções de impressão 3D e prototipagem de placas PCB, a oportunidade de integração de novas modalidades no equipamento;
- **Construção de bico extrusor**, na integração da função de impressão 3D no equipamento o conjunto de extrusão é um componente essencial, a produção do mesmo demandou no projeto maior tempo de pesquisa e ajuste;
- **Adaptação da mesa para atender as duas funções do equipamento**, para alcançar este objetivo fez-se necessária a utilização de duas mesas, no entanto visando ser fiel a proposta de troca otimizada criou-se uma mesa de usinagem que pode ser inserida sem a necessidade da retirada da mesa de impressão através da sobreposição da mesma.

Na área mecânica a maior dificuldade encontrada foi o desenvolvimento do conjunto de extrusão, uma vez que o projeto térmico do mesmo envolve muitas variáveis e por não ser um objetivo central do projeto despendeu maior tempo do que o planejado.

Enquanto que na área eletroeletrônica houve dificuldades relacionadas a troca das placas de controle do equipamento, sendo que para utilização da mesma tensão

de alimentação foram necessários alguns ajustes, que não haviam sido previstos de início.

Com relação ao software os principais obstáculos foram inicialmente a comunicação entre a placa Raspberry Pi e o sistema de controle existente no equipamento, que ocasionou na troca da placa CNC USB Controller pelas placas Arduino Mega 2560 em conjunto com a placa Ramps 1.4 e por conseguinte a instalação do software Pronterface no Debian.

Por fim são sugeridas algumas modificações para melhorias ou futuros projetos com o equipamento:

- Nivelamento automático da mesa;
- Otimização do tamanho do painel;
- Inclusão de mais extrusores possibilitando impressões com cores diferentes;
- Adaptação de nova função no equipamento como por exemplo gravação a laser;
- Enclausuramento da área de impressão;
- Substituição dos Drivers A4988 por outro com maior corrente para as bobinas;
- Suporte de filamento;
- Aumentar a área útil de impressão e usinagem;

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TIRONI, Luís F. Inovação incremental ou radical: Há motivos para diferenciar? Uma abordagem com dados da Pintec. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2008. 40 p.
2. MIETTI, Marco A.; VENDRAMETO, Oduvaldo. **Uso de Prototipagem Rápida como Fator de Competitividade**. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2000_E0007.PDF>. Acesso em: 29 mai. 2018.
3. CUNICO, Marlon W. M. **Impressoras 3D: O novo meio produtivo**. 1. ed. Curitiba: Concep3D Pesquisas Científicas Ltda, [2014]. 158 p.
4. VIANA, Augusto N. C., BORTONI, Edson da C., NOGUEIRA, Fábio J. H., et al. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. PEE ANAEL 1. Ed. Campinas, 2012.
5. ARRUDA, Caio Carlos de, et al. **Conversão de fresadora CNC para impressora 3D**. Disponível em: <<http://sistemaolimpo.org/midias/uploads/04c8348c00d7755f56ad3dc070b3e714.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.
6. FRANCO, Douglas Eduardo Miranda. **Estudo e projeto de adaptação de uma máquina de manufatura aditiva a partir da estrutura de uma fresadora por comando numérico computadorizado**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Coordenação de Mecânica - Engenharia Mecânica. Ponta Grossa, 2014.
7. 3BE. **Impressão 3D Multifuncional** – Zmorph 2.0. Disponível em: <<http://3be.com.br/produtos/zmorph/>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

8. MARCICANO, João Paulo P. **Introdução ao Controle Numérico**. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/cnc.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2018.
9. MACHADO, Aryoldo. **O Comando numérico: aplicado às máquinas-ferramenta**. 3.ed. ampl. atual. São Paulo: Ícone, 1989. 461 p.
10. FERRARI, Alfredo. **Tornos Automáticos: do Came ao CNC**. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/tornos-automaticos-do-came-ao-cnc/>>. Acesso em: 16 ago. 2018.
11. PROTOPTIMUS. **Máquinas CNC: A história do Comando Numérico Computadorizado**. Disponível em: <<http://www.proptimus.com.br/maquinas-cnc-historia-comando-numeric-computadorizado/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
12. MENDES, Mariane. **Brasil Escola: Mecânica**. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/mecanica.htm>>. Acesso em: 10 out. 2017.
13. STOETERAU, R. L. **Comportamento Estático e Dinâmico de Mancais Aerostáticos Cilíndricos para Guias Lineares**. Florianópolis: UFSC, 1992. Dissertação.
14. THYER, G. E. **Computer Numerical Control of Machine Tools**. Nova Iorque: Industrial Press, 2ª edição, 1991.
15. STOETERAU, R. L. **Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas**. Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.
16. DUARTE JR., D. **Trilogia, Lubrificação e Mancais de Deslizamento**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2005.

17. NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. Tradução de Konstantinos Dimitriou Stavropoulos. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.
18. ENCOPEL. **Mancais fixos**. Disponível em:
<<http://www.gtxe.com.br/encopel/mancais-fixos>>. Acesso em: 6 jun. 2018.
19. VISÃO ROLAMENTOS. **Mancais e rolamentos pillow block**. Disponível em:
<<http://www.visaorolamentos.com.br/mancais-rolamentos-pillow-block.php>>. Acesso em: 6 jun. 2018.
20. TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE. **Rolamentos I**: Aula 18. São Paulo. 1997. 8p.
21. NSK. **Rolamentos**. Disponível em:
<[http://www.nsk.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK\(1\).pdf](http://www.nsk.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK(1).pdf)> Acesso em: 22 de Agosto de 2018.
22. SKF DO BRASIL. **Rolamentos lineares de esferas**. Disponível em
<<http://www.skf.com/br/products/linear-motion/linear-guides-and-tables/linear-ball-bearings/index.html>>. Acesso em 31 jul. 2017.
23. ARIEIRO, Tiago Jorge Ruela. **Manutenção e reparação de máquinas ferramentas de comando numérico**. Universidade do Minho, 2013.
24. KALATEC AUTOMAÇÃO. **Fuso de Esferas Laminado e Retificados**. Disponível em <<http://www.kalatec.com.br/produtos/fusos-de-esferas/>>. Acesso em 31 jul. 2017.
25. ANTARES ACOPLAMENTOS. **Acoplamentos**: Peças Fundamentais para o Setor Industrial. Disponível em:

- <<http://www.antaresacoplamentos.com.br/mundo-antares/acoplamentos-pecas-fundamentais-para-o-setor-industrial>>. Acesso em: 12 jun. 2018.
26. ELETROBRÁS. et al. **Acoplamento Motor Carga: Guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2008. 142 p.
27. SIEMENS. **Modelando Uma Peça Usando Superfícies**. Disponível em: <https://support.industrysoftware.automation.siemens.com/training/se/pt/ST4/pdf/spse01560-s-1040_en.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2018.
28. 3DHUBS. **What Is 3D Printing? The definitive guide to additive manufacturing**. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing>>. Acesso em: 03 jul. 2018.
29. SPECK, Henderson José. **Proposta de Método para Facilitar a Mudança das Técnicas de Projetos: Da Prancheta à Modelagem Sólida (CAD) para Empresas de Engenharia de Pequeno e Médio Porte**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.
30. 3DSYSTEMS. **What Is An STL File?**. Disponível em: <<https://br.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file>>. Acesso em: 05 jul. 2018.
31. FABBERS. **The STL Format**. Disponível em: <https://www.fabbers.com/tech/STL_Format>. Acesso em: 05 jul. 2018.
32. GOPRINT3D. **What is Slicing Software, And What Does it Do?** Disponível em: <<https://www.goprint3d.co.uk/blog/what-is-slicing-software-and-what-does-it-do/>>. Acesso em: 26 ago. 2018.
33. BOUTIQUE3D. **Softwares de Fatiamento (Slicers) & CAM**. Disponível em: <<https://boutique3d.net.br/links/softwares-de-fatiamento-slicers-cam/>>. Acesso em: 26 ago. 2018

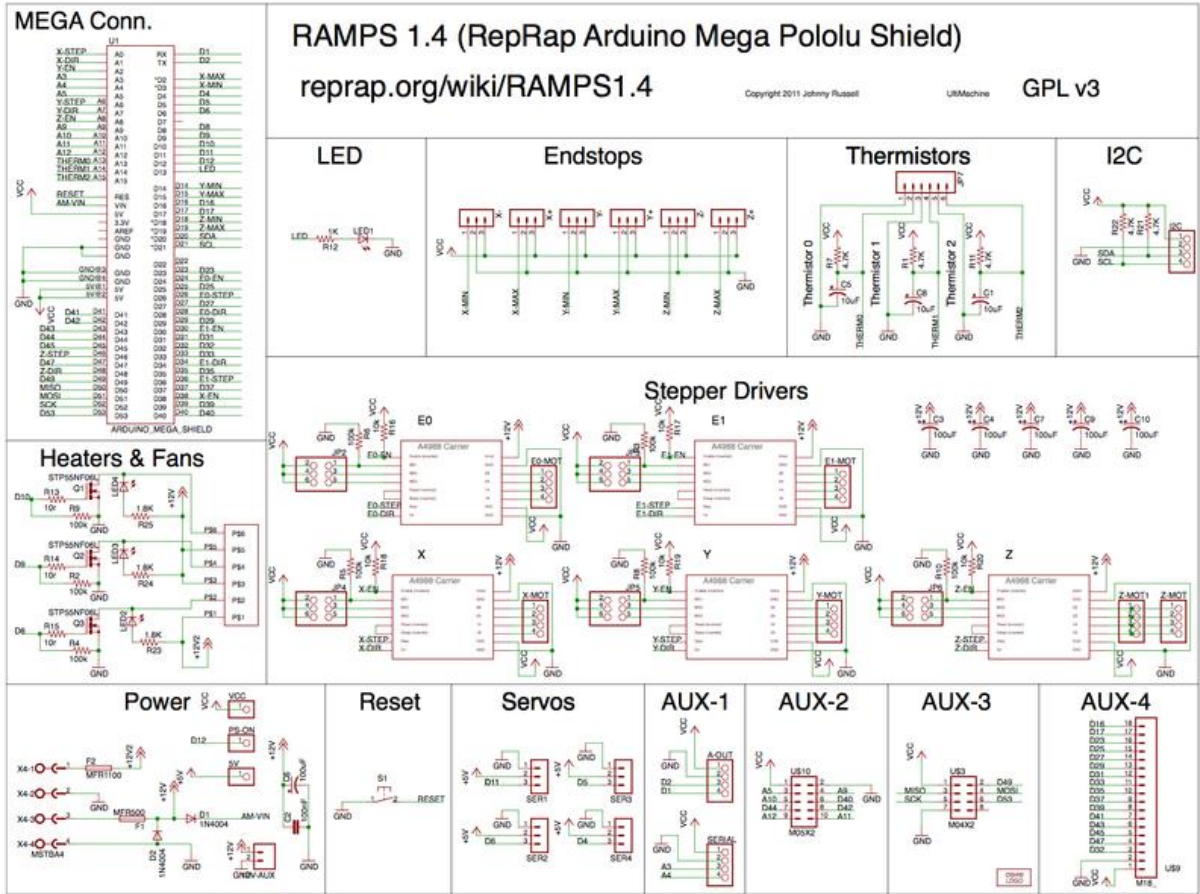
34. BEEPRINTED. **10 Perguntas e Respostas Sobre Impressão 3D**. Disponível em: <<https://beeprinted.com.br/tutorial/perguntas-respostas-impressao-3d/>>. Acesso em: 23 ago. 2018.
35. DANTAS, Rodrigo de Souza. **Estudo de um Sistema Modular de Movimentação para Equipamentos de Impressão 3D**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2016.
36. 3DPRINTING. **10 Dicas para um bom acabamento em impressão em uma peça de impressão 3D**. Disponível em: <<http://www.3dprinting.com.br/10-dicas-para-um-bom-acabamento-em-uma-peca-de-impressao-3d/>>. Acesso em: 27 ago. 2018.
37. CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, [2011]. 817 p.
38. RESINEX. **ABS – ACRILONITRILO – BUTADIENO – ESTIRENO**. Disponível em: <<http://www.resinex.pt/tipos-de-polimeros/abs.html>>. Acesso em 28 ago. 2018.
39. IMPRESSAO3DFACIL. **Conheça os diferentes tipos de materiais para impressão 3D FDM**. Disponível em: <<http://www.impressao3dfacil.com.br/conheca-os-diferentes-tipos-de-materiais-para-impressao-3d-fdm/>>. Acesso em 28 ago. 2018.
40. CLIEVER. **Desvendando o PETG**. <<https://www.cliever.com/pt-br/blog/post/21/desvendando-o-petg>>. Acesso em: 28 ago. 2018.
41. ABIPLAST. **Processo de transformação para materiais plásticos: Extrusão**. Disponível em <http://file.abiplast.org.br/download/links/links%202014/apresentacao_sobre_transformacao_vf.pdf>. Acesso em 31 jul. 2017.

42. VOLPATO, Neri. **Prototipagem Rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.
43. SHAMIEH, Cathleen; Gordon McComb. **Eletrônica para Leigos**. 2^o ed. Rio de Janeiro: Atlas Books, 2011. 416p.
44. ARRABAÇA, Devair Aparecido; GIMENEZ, Salvador Pinillos. **Conversores de energia elétrica CC/CC para aplicações em eletrônica de potência: conceitos, metodologia de análise e simulação**. São Paulo: Érica, 2013. 156 p.
45. OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 2^a ed. Editor PHB, Rio de Janeiro 1993. 781 p.
46. THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro U. Braga. **Sensores Industriais Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2005. 224 p.
47. BRAGA, Newton C. **Fontes de Alimentação - Volume 1**. 1^a ed. São Paulo: NCB, 2013. 238 p.
48. [49] Silva Jr., Pedro Armando da; Souza, Pedro P. Corrêa de. **Fontes de Tensão Reguladas**. Disponível em: <https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/5/5f/1_Fontes_Reguladas.pdf>. Acesso em: 4 set. 2018.
49. ANZO CONTROLES ELÉTRICOS. **Apostila Conhecendo Resistores e Capacitores**. Disponível em: <http://www.anzo.com.br/downloads/Apostila-Resistor-Capacitor-v1.0.pdf> Acesso em: 10 set. 2018.
50. RESISTEN. **Resistência e Cartucho**: Resistência elétrica cartucho alta carga e baixa carga. Disponível em: <<http://www.resisten.com.br/resistencia-cartucho>>. Acesso em: 06 set. 2018.

51. WEBARTIGOS. **Resistências Elétricas Cartucho Alta Carga e Baixa Carga**. Disponível em: <<https://www.webartigos.com/artigos/resistencias-eletricas-cartucho-alta-carga-e-baixa-carga/130333>>. Acesso em: 06 set. 2018.
52. ELETROBRÁS. et al. **Motor elétrico: Guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2009. 190 p.
53. KALATEC AUTOMAÇÃO. **Motores de Passo – Definição e Características**. Disponível em <<http://www.kalatec.com.br/definicao-de-motor-de-passo/>>. Acesso em 11 set. 2018.
54. PLANETCNC. **CNC USB Controller User manual**. Disponível em: <<https://planet-cnc.com/wp-content/uploads/2016/03/CNCUSBController.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2018.
55. PORTESCAP. **Por que usar um drive**. Disponível em: <<http://www.portescap.com.br/produtos/acess%C3%B3rios-do-motor/como-selecionar-um-drive>>. Acesso em: 12 set. 2018.
56. [22] EDWARDS, C. (2013). Not-so-humble raspberry pi gets big ideas. *Engineering and Technology*, 8(3), 30-33.
57. UPTON, Eben. **Raspberry Pi: Manual do usuário**. São Paulo: Novatec Editora, 2013. 269 p.
58. BERSELLI, Guilherme B. T.; et al. CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE. 3º, 2012, Bento Gonçalves - RS Cubo padrão prototipado no equipamento., Brasil. **Caracterização dos polímeros presentes em telas de LCD de matriz ativa provenientes de aparelhos celulares**. Local de publicação: UFRGS, 25 de Abril de 2012. 8 p.

59. MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de Automação Industrial**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 347 p.
60. ADDTHERM. **Características dos Sensores de Temperatura NTC e PTC**. Disponível em: <<http://www.addtherm.com.br/2017/01/12/sensores-de-temperatura-ntc-e-ptc/#>>. Acesso em: 06 de jun. 2018.
61. CRUZ, Terezinha C. Firmino da. **Direito autoral no uso de programas de computador e desenvolvimento**. Disponível em: <<https://jus.com.br/artigos/4215/direito-autoral-no-uso-de-programas-de-computador-e-desenvolvimento>> 16 ago. 2018.
62. RASPIBIAN. **Welcome to Raspbian**. Disponível em: <<https://www.raspbian.org/>>. Acesso em: 15 set. 2018.
63. REPETIER-SERVER. **Control your 3d printer from everywhere – anytime!** Disponível em: <<https://www.repetier-server.com/>>. Acesso em: 02 out. 2018.
64. OCTOPRINT. **The snappy web interface for your 3D printer**. Disponível em: <<https://octoprint.org/>> Acesso em 02 out. 2018.
65. SLIC3R. **About**. Disponível em: <<http://slic3r.org/about>>. Acesso em: 02 de out. 2018.
66. ULTIMAKER. **O Cura é o software para impressoras 3D mais avançado do mundo**. Disponível em <<http://ultimaker.utopica3d.com/software/cura>> Acesso em 02 out. 2018.

ANEXO 1

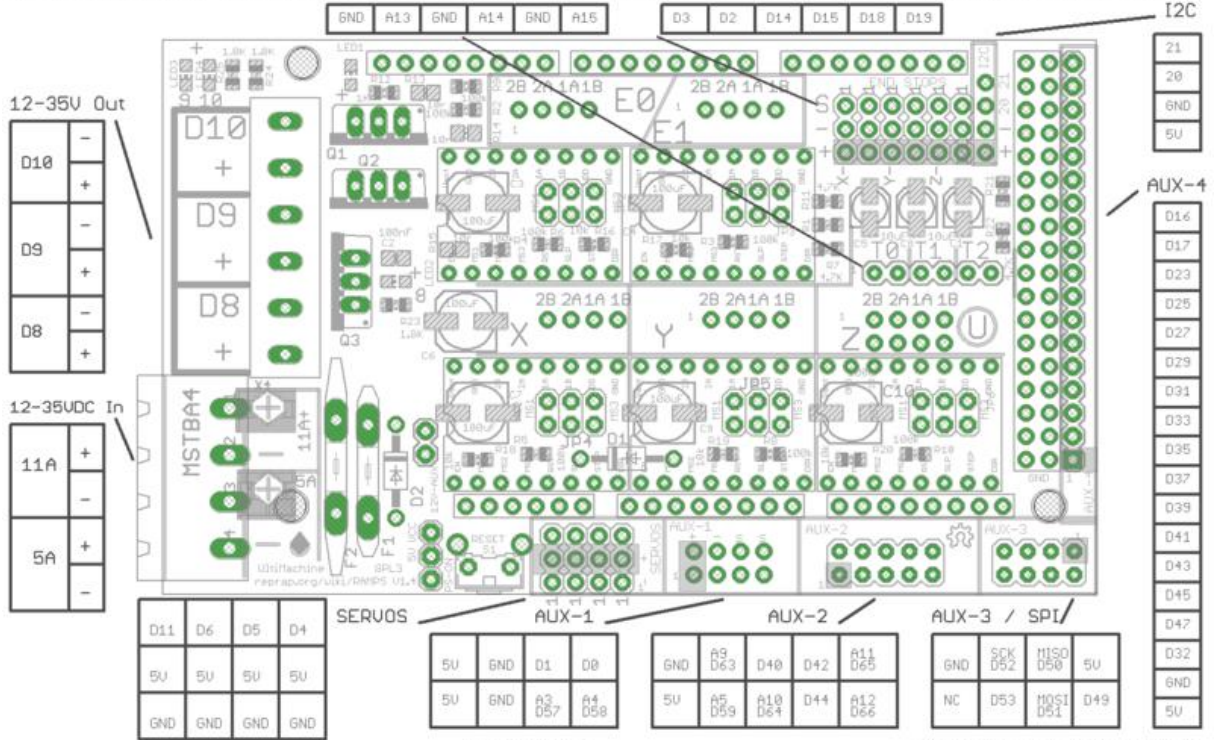


ANEXO 2

RAMPS 1.4 (RepRap Arduino MEGA Pololu Shield)
reprap.org/wiki/RAMPS1.4

GPL v3

Reversing input power, and inserting stepper drivers incorrectly will destroy electronics.



ANEXO 3