

LUCAS FALCADE GOZZO

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA IMPRESSORA
3D BASEADA NA TECNOLOGIA DA MODELAGEM
POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

LUCAS FALCADE GOZZO

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D BASEADA
NA TECNOLOGIA DA MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO**

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **engenheiro MECATRÔNICO**.

Orientador: Prof. Dr. José Jean-Paul Z. S. Tavares

UBERLÂNDIA – MG

2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família,
namorada e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Wilson e à minha mãe Glaucia, que sempre estiveram presentes e prontos para me dar todo o suporte necessário para a realização desse projeto e durante todo o período de graduação.

Aos meus irmãos Arthur e Matheus pelos momentos felizes.

Ao pessoal de Indaiatuba que mesmo distantes sempre me apoiaram em minha jornada.

À minha namorada Mariana pelo carinho ao longo dessa jornada e em especial às noites cansadas de estudo para a conclusão desse trabalho.

Ao laboratório MAPL pela receptividade às propostas, disponibilização de recursos, espaço e verba para a realização do projeto e também ao Thiago, Victor e Alexandre e a todos que de alguma maneira contribuíram para o sucesso do projeto.

Ao Prof. Dr. José Jean-Paul Z. S. Tavares pela orientação do trabalho, pela paciência, pelas dicas, aprendizados e principalmente por toda a confiança depositada em mim e em meu trabalho.

Aos amigos que vivenciaram juntos comigo esse sonho de nos tornamos engenheiros.

Gozzo, L.F. **Projeto e Construção de uma Impressora 3D Baseada na Tecnologia da Modelagem por Fusão e Deposição**. Monografia de conclusão de curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia (MG), 2017.

RESUMO

Atualmente, novas técnicas de manufatura tem demonstrado ser grandes transformadores a ponto de serem apontadas como base da nova revolução industrial. Uma dessas técnicas refere-se a manufatura aditiva, um processo que cria múltiplas camadas de deposição de material, produz em baixa escala, geralmente mais rápido que processos tradicionais e é capaz de atingir geometrias não atendidas a manufatura convencional. Há diversas técnicas de manufatura aditiva e a modelagem por fusão e deposição é a tecnologia de impressão 3D mais comum. Esta tecnologia se refere a qualquer processo que crie objetos em camadas, produzidos a partir de um material semilíquido que sai através de um bico controlado pelo computador. Esse trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de projeto e construção de uma impressora 3D baseada na tecnologia da modelagem por fusão e deposição. Os objetivos específicos deste trabalho são o desenvolvimento da estrutura, especificação de componentes, aplicação de uma solução de controle em Arduino, fabricação, montagem e realização de testes e ensaios. Desta maneira, um estudo aprofundando sobre as principais técnicas de manufatura aditiva, funcionamento e utilização de *softwares* e *firmware* específicos para a aplicação foram necessários. Após montagem e calibração da impressora foram atendidos os critérios estabelecidos e constatou-se o potencial e qualidade das peças impressas.

Palavras-Chave: Impressão 3D, Manufatura Aditiva, Prototipagem Rápida, RAMPS, FDM, Modelagem por fusão e deposição.

Gozzo, L.F. **Design and Construction of a 3D Printer Based on the Technology of Fusion and Deposition Modeling**. Course completion monograph, Mechanical Engineering School, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil, 2017.

ABSTRACT

Recently, new manufacturing techniques have proven to be great transformers being pointed as the basis of the new industrial revolution. One of these techniques relates to additive manufacturing, a process that creates multiple layers based on material deposition, produces on a low scale, generally faster than traditional processes and is capable of achieving geometries that are not met by conventional manufacturing. There are several additive manufacturing techniques, and fusion and deposition modeling is the most common 3D printing technology. This technology refers to any process that creates layered objects, produced from a semiliquid material that comes out through a computer controlled nozzle. This work has as its main objective the development of a design and construction of a 3D printer based on the technology of fusion and deposition modeling. The specific objectives of this work are the development of the structure, components specification, application of a control solution in Arduino, fabrication, assembly and realization of tests and experiments. In this way, a thorough study on the main techniques of additive manufacturing, operation and use of a specific software and firmware to the application were required. After the assembly and calibration of the printer, the established criteria were met and the potential and quality of the printed parts were verified.

Keywords: 3D Printing, Additive Manufacturing, Rapid prototyping, RAMPS, FDM, Fused Deposition Modeling

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PRINCÍPIO DA TECNOLOGIA DE CAMADAS, FONTE: (GEBHARDT & HOTTER, 2016).....	2
FIGURA 2. SEQUÊNCIA DE OPERAÇÕES DE UMA IMPRESSORA 3D. FONTE: (SRIVATSAN & SUDARSHAN, 2016).	9
FIGURA 3. COMPONENTES CHAVE PARA IMPRESSÃO 3D. FONTE: (SRIVATSAN & SUDARSHAN, 2016).	10
FIGURA 4. TÉCNICA DE ESTEREOLITOGRAFIA E SEUS COMPONENTES CHAVE. FONTE: (SRIVATSAN & SUDARSHAN, 2016).	13
FIGURA 5. PRINCÍPIO DE CONSTRUÇÃO DE MÁQUINA 3D DE SINTERIZAÇÃO. FONTE: (GEBHARDT,2016)	15
FIGURA 6. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO TECNOLOGIA FDM. FONTE: (PALLROLAS, 2013)	18
FIGURA 7. STRATASYS FORTUS 900MC 3D PRODUCTION SUSTEMS. FONTE: (GEBHARDT,2016)	18
FIGURA 8. MICROCONTROLADOR ATMEL AVR XMEGA. FONTE: (VIRTUAL EXPO GROUP, 2017).....	21
FIGURA 9. ARDUINO UNO R3. FONTE: (SILVA, CAVALCANTE, CAMILO, ADAILTON, & VIANA, 2014)	21
FIGURA 10. RAMPS - REPRAP ARDUINO MEGA POLOLU SHIEL.....	22
FIGURA 11. MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL, MOTOR DE IMÃ PERMANENTE E MOTOR HÍBRIDO . ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
FIGURA 12. MONTAGEM DA BASE IMPRESSORA 3D. IMAGEM: L.F.GOZZO.....	28
FIGURA 13. ESTRUTURA MESA AQUECIDA. IMAGEM: L.F.GOZZO	30
FIGURA 14. EIXO TRANSVERSAL. IMAGEM: L.F.GOZZO.....	31
FIGURA 15. FRAME PRINCIPAL. IMAGEM: L.F.GOZZO.....	32
FIGURA 16. DESENHO TÉCNICO FRAME PRINCIPAL. IMAGEM: L.F.GOZZO.....	33
FIGURA 17. DIAGRAMA DE CONEXÃO DE COMPONENTES DA PLACA RAMPS 1.4.....	36
FIGURA 18. SENSOR DE FIM DE CURSO	37
FIGURA 19. MONTAGEM DO FRAME PRINCIPAL E DIVERGÊNCIAS REAL VS PROJETADO. FOTO: L.F.GOZZO	45
FIGURA 20. MONTAGEM DA BASE COM SUPORTE DE MADEIRA, PEÇA IMPRESSA PARA APOIO DO ROLAMENTOS LINEARES E PROJETO INICIAL. IMAGEM: L.F.GOZZO	46
FIGURA 21. ANTES E DEPOIS DAS ALTERAÇÕES DO SUPORTE DO SENSOR DE FIM DE CURSO RELATIVO AO EIXO Z. FOTO: L.F.GOZZO ...	47
FIGURA 22. PERDAS DEVIDO A CABO MAL DIMENSIONADO. FOTO: L.F.GOZZO.	47
FIGURA 23. DIMENSÕES E QUALIDADE DE IMPRESSÃO EM PEÇA IMPRESSA PELA IMPRESSORA 3D DESENVOLVIA. FOTO: L.F.GOZZO ..	50

FIGURA 24. MONTAGEM FINAL DA IMPRESSORA 3D. FOTO: L.F.GOZZO	50
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. TIPOS DE TECNOLOGIAS PARA IMPRESSÃO 3D. FONTE: (SRIVATSAN & SUDARSHAN, 2016).....	8
TABELA 2. DEMANDA MUNDIAL POR IMPRESSORA 3D AO LONGO DO TEMPO EM DÓLARES. FONTE: (SRIVATSAN & SUDARSHAN, 2016)	11
TABELA 3. CLASSIFICAÇÃO ESTÍMULOS DE SENSORES	24
TABELA 4. PARTES E QUANTIDADE PARA MONTAGEM DA BASE.	29
TABELA 5. PARTES E QUANTIDADE PARA MONTAGEM DA ESTRUTURA DA MESA AQUECIDA	30
TABELA 6. PEÇAS E QUANTIDADES PARA MONTAGEM EIXO TRANSVERSAL. IMAGEM: L.F.GOZZO	31
TABELA 7. PEÇAS E QUANTIDADES PARA MONTAGEM FRAME.....	34
TABELA 8. TABELA DE INFORMAÇÕES ARDUINO MEGA	34
TABELA 9. INFORMAÇÕES TÉCNICAS MOTOR DE PASSO	37
TABELA 10. INFORMAÇÕES TÉCNICAS SOBRE A EXTRUSORA MK8.....	37
TABELA 11. PARÂMETROS ALTERADOS NO FIRMWARE MARLIN	38
TABELA 12. RELAÇÃO DE CUSTOS TOTAIS COM A IMPRESSORA 3D	43

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD – *Computer-aided design*

3D – Três Dimensões

MA – Manufatura Aditiva

PR – Prototipagem Rápida

SLS – *Selective Laser Sintering*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

GNU - *General Public License*

SGE – Sistema de Gestão de Energia

FOSS - *Free and open source software*

STL - *Standard Tessellation Language*

3DP – Impressão 3D

SLA – Estereolitografia

CNC - *Computer numerical control*

RAMPS - *RepRap Arduino Mega Pololu Shield*

ABS - Acrilonitrilo butadieno estireno

PLA - ácido poliláctico

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.2 JUSTIFICATIVA	4
1.3 METODOLOGIA	5
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 TENDÊNCIAS DA INDÚSTRIA.....	6
2.2 TIPOS DE TECNOLOGIA	7
2.2.1 Impressão 3D	9
2.2.2 Estereolitografia.....	12
2.2.3 Sinterização seletiva laser - SLS	13
2.2.4 Modelagem por fusão e deposição	16
2.3 SISTEMAS DE CONTROLE.....	20
2.3.1 Microcontroladores.....	20
2.3.2 Arduino	20
2.3.3 RAMPS.....	22
2.3.4 Motor de Passo.....	22
2.3.5 Sensores	23
2.4 FIRMWARE	24
2.5 SOFTWARE DE FATIAMENTO	25
DESENVOLVIMENTO	27
3.1 PROTOTIPAGEM DA MÁQUINA	27
3.1.1 Base	28
3.1.2 Estrutura mesa aquecida	28
3.1.3 Eixo Transversal.....	29
3.1.4 Frame.....	29

3.2	HARDWARE	32
3.2.1	<i>Arduino</i>	32
3.2.2	<i>RAMPS 1.4</i>	35
3.2.3	<i>Motor de passo</i>	35
3.2.4	<i>Sensor chave de fim de curso</i>	35
3.2.5	<i>Extrusora</i>	35
3.3	FIRMWARE	38
3.4	RESOLUÇÃO DOS EIXOS E EXTRUSORA	40
3.5	CUSTOS	42
	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
3.6	MONTAGEM DA IMPRESSORA 3D	44
3.7	RESULTADOS ENCONTRADOS	48
	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A inovação de se criar um objeto tridimensional camada por camada usando o design assistido por computador (CAD) foi originalmente denominada prototipagem rápida (PR), uma técnica valiosa que foi desenvolvida no início dos anos 80 para fins de fabricação (Srivatsan & Sudarshan, 2016). Para (Bandyopadhyay & Bose, 2015) o conceito de PR foi pela primeira vez introduzido por Charles “Chuck” Hull responsável pela primeira forma de impressão 3D denominada estereolitografia.

Em seus estágios iniciais, a PR foi tipicamente usada para criar modelos e protótipos de peças e oferecer uma rápida realização do que os engenheiros tinham planejado. A PR foi um dos processos preliminares que eventualmente culminaram na manufatura aditiva (MA), que permite a impressão de peças finalizadas atreladas a uma ampla gama de aplicações.

Para Gebhardt *et* Hotter (2016) o princípio da tecnologia baseia-se no fato de que qualquer objeto, pelo menos teoricamente, pode ser cortado em camadas e reconstruído usando essas camadas, independentemente da complexidade de sua geometria. A Figura 1 sublinha este princípio mostrando o chamado quebra-cabeça de escultura, em que um objeto tridimensional (3D) tem que ser montado a partir de mais de 100 fatias. Portanto, as camadas devem ser dispostas verticalmente na sequência correta usando uma vara de suporte.



Figura 1. Princípio da tecnologia de camadas. Fonte: (Gebhardt & Hotter, 2016).

Proschek (2012) cita que com a crescente demanda pela tecnologia, surgem novas linhas de pesquisa e tecnologias relacionadas a manufatura aditiva e devido ao fato de que nos últimos anos houveram quedas de patentes, projetos colaborativos de impressoras 3D para computadores pessoais tais como RepRap, criada em 2005, pelo inglês Adrian Bowyer que possuem como objetivo produzir um software grátis e de código aberto (“free and open source software” - FOSS) para impressoras 3D e cujas especificações são liberadas sobre uma “General Public License” (GNU), levaram a um significativo desenvolvimento elevando-se assim a qualidade e reduzindo custos relacionados a tecnologia além de aproximá-la de um novo público de entusiastas.

Gu (2015) argumenta que desde o estabelecimento da MA na década de 80, as vantagens de se produzir pequenas quantidade de peças com geometrias complexas de maneira ágil vem sendo bem aproveitada pelas indústrias de manufatura. As vantagens e benefícios que mais se destacam foram ressaltadas a seguir:

1. Velocidade de produção: Sem a necessidade de moldes de areia ou coquilhas, a tecnologia da MA permite que o fabricante produza protótipos e peças com as mais variadas formas e complexidades sobre demanda.

2. Liberdade de design: A MA traz o design e a inovação a um patamar elevado, pois permite que engenheiros produzam múltiplas iterações simultaneamente com adições mínimas ao custo final. Ter a liberdade criativa durante o processo de produção, sem as penalidades de custo e tempo, é o grande diferencial da MA contra métodos de manufatura tradicionais.

3. Economia de custos: Com o auxílio da tecnologia da MA, as empresas são capazes de eliminar barreiras e limitações relacionadas a logísticas de transporte devido a possibilidade de se transferir arquivos digitais com projetos para qualquer região do mundo detentora de uma máquina de impressão 3D, criando-se assim fábricas digitais e globais. As partes podem ser criadas em fábricas digitais próximas ao local destino, diminuindo-se assim custos de envio e tempo para transporte.

4. Fabricação ecológica: A versatilidade da MA permite com que muitos processos sejam extremamente precisos permitindo assim que somente a quantidade necessária seja depositada no local exato preterido, tornando assim, para determinadas tecnologias presentes na manufatura aditiva, o processo livre de quaisquer desperdícios.

As técnicas mais utilizadas na famílias da manufatura aditiva são:

I. Impressão 3D (3DP)

II. Estereolitografia (SLA)

III. Sinterização Laser Seletiva (SLS)

IV. Modelagem por difusão e deposição (FDM)

1.1 Objetivos

O objetivo geral é projetar e construir uma impressora 3D baseada na tecnologia de da modelagem por fusão e deposição.

Os objetivos específicos são:

- Especificar os requisitos da impressora;
- Desenvolver o projeto estrutural da impressora;
- Aplicar o projeto de controle da impressora;
- Especificar os componentes;
- Confeccionar os desenhos de conjunto e detalhado das peças;
- Fabricar e montar a impressora
- Realizar testes e ensaios.

1.2 Justificativa

O projeto consiste em especificar e construir uma impressora 3D baseada na tecnologia de da modelagem por fusão e deposição. O projeto envolve a idealização e desenho da impressora com precisão de 0,1mm e peças com dimensões entre 300 mm por 300 mm por 200 mm de comprimento, largura e profundidade; a fabricação e montagem da impressora 3D, a integração com circuitos eletrônicos e programação do dispositivo. Esse projeto apresenta dimensões mais adequadas que das impressoras de baixo custo disponíveis e servirá de apoio ao MAPL para desenvolvimento de protótipos.

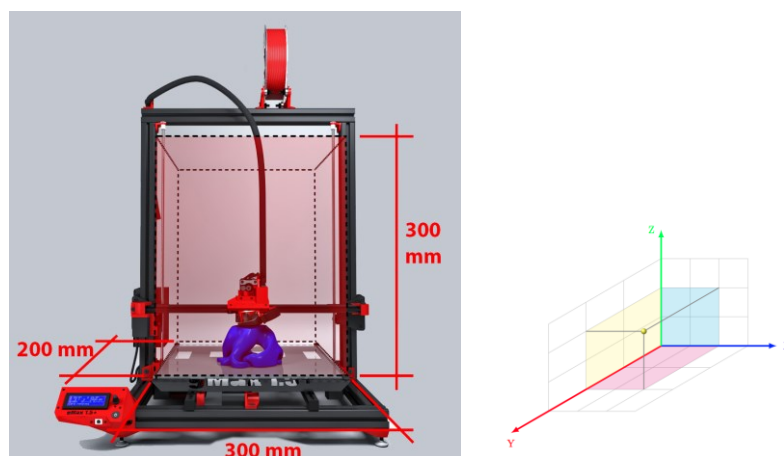


Figura 2. Dimensões de volume de impressão.

1.3 Metodologia

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o assunto do projeto (impressora 3D);
- Projetar o modelo da impressora em questão;
- Adquirir os componentes estruturais, eletrônicos e elementos motores;
- Imprimir parte a estrutura na impressora 3D existente no MAPL;
- Montar a impressora;
- Realizar testes de movimentação no protótipo.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Raulino (2011), a Prototipagem Rápida (PR – “*Rapid Prototyping*”) é um processo de fabricação baseado na adição de material em camadas planas que surgiu no

final dos anos 80, devido à crescente necessidade da indústria em reduzir custos no processo de desenvolvimento de produto.

PR diz respeito a um conjunto de tecnologias que tem por intuito final a confecção de objetos físico com dimensões tridimensionais através de processos que adicionam material, camada a camada, sucessivamente e são capazes de produzir geometrias complexas que muitas vezes são impraticáveis em sistemas tradicionais. (Buswell , 2017) define o termo PR como o método de produção normalmente ligado à fabricação de protótipos por sistemas aditivos à partir de modelos computadorizados gerado em sistemas CAD.

Segundo Narayan (2014), o desenvolvimento da PR está fortemente ligado ao desenvolvimento de computadores e a indústria do software. Em particular, a existência dos CAD tem um papel crítico em praticamente todos os sistemas de PR. A primeira função destes sistemas é a de fabricar protótipos em um curto intervalo de tempo para que haja assim a aceleração na produção e desenvolvimento de produtos. Porém com mais de 30 anos de desenvolvimento, às aplicações da PR, se estendem para uma maior gama de possibilidades do que simplesmente a produção de protótipos. De fato, a mesma está sendo adaptado para endereçar as necessidades específicas de vários tipos diferentes de indústrias.

Por razões históricas, vários termos já foram utilizados para descrever as técnicas de fabricação camada a camada. Alguns desses termos são manufatura por camadas, fabricação rápida, manufatura aditiva e impressão 3D, etc. No passado recente o termo PR era usado com maior frequência sobre outros devido à própria natureza inicial relacionada à fabricação de protótipos ser algo dominante quanto a utilização da tecnologia. Devido à rápida expansão da PR nos últimos anos, muitos processos novos foram criados, e a cada um foi criado um nome distinto para a facilitação de referências, apesar de todos serem baseados em um princípio comum de deposição camada a camada. Ainda segundo Narayan (2014), esta proliferação de termos acabou causando uma série de ambiguidades e confusão. Sendo assim, a fim de facilitar o uso da terminologia, o termo “manufatura aditiva” foi padronizado e reflete o princípio fundamental da PR que é representar todos os tipos de tecnologias relacionadas a fabricação camada a camada.

2.1 Tendências da Indústria

Segundo Anderson (2012), devido à crescente popularização das impressoras 3D e ao fato delas terem a capacidade de criação de objetos sólidos tridimensionais a partir de um desenho provindo do computador, acredita-se que estamos rumo a uma nova Revolução

Industrial. Dado o processo baseado na adição de material em camadas sucessivas, entende-se como micro fábricas que possibilitam a criação de produtos customizáveis à um custo reduzido, menor desperdício e menor necessidade de mão de obra, antagonizando assim com a indústria tradicional. Essencialmente a nova revolução industrial faz referência à várias tecnologias que aumentam significativamente a produtividade dos seres humanos, impactando diretamente na qualidade de vida, influenciando na longevidade e crescimento demográfico humano.

Para Pupo (2008), a PR é uma ferramenta poderosa para reduzir o tempo de produção enquanto aumenta a qualidade e reduz custos.

De acordo com Hugh Bass, CEO da empresa AutoDesk, a capacidade de vender a preços razoáveis e produzir um quantia de itens de qualidade, já está provocando uma grande ruptura econômica. A medida que a demanda por produtos sob medida e de fabricação personalizada aumentam, as impressoras 3D se destacam pela sustentabilidade. Os custos de transportes são menores, visto que a produção pode ser feita no próprio local de utilização do produto. Além disso, os desperdícios são mínimos, pois não se usa mais material do que necessário na impressão. Finalmente, produtos personalizados tendem a ser menos descartáveis, uma vez que os usuários possuem mais afeição a eles, quando comparados a produção em massa.

Anderson (2012) descreve a nova perspectiva da seguinte forma “... o ponto é que a distância entre inventor e empreendedor foi tão encurtada que praticamente não existe mais. ”

Nota-se aqui que a impressão 3D facilita a individualização e customização, ao contrário da fabricação em massa que favorece a repetição e a padronização. Dessa forma, a grande vantagem da fabricação digital é a possibilidade de escolher entre as duas formas de produção. A manufatura aditiva vem sendo considerada um marco histórico no desenvolvimento dos processos de manufatura, já que possibilita a fabricação de objetos acabados, simplificando a fabricação, encurtando significativamente o tempo de produção de peças e planejamento de processos e reduzindo os custos de maneira geral.

2.2 Tipos de tecnologia

Conforme Srivatsan *et* Sudarshan (2016) argumentam, a tecnologia de manufatura aditiva consiste essencialmente em três etapas básicas:

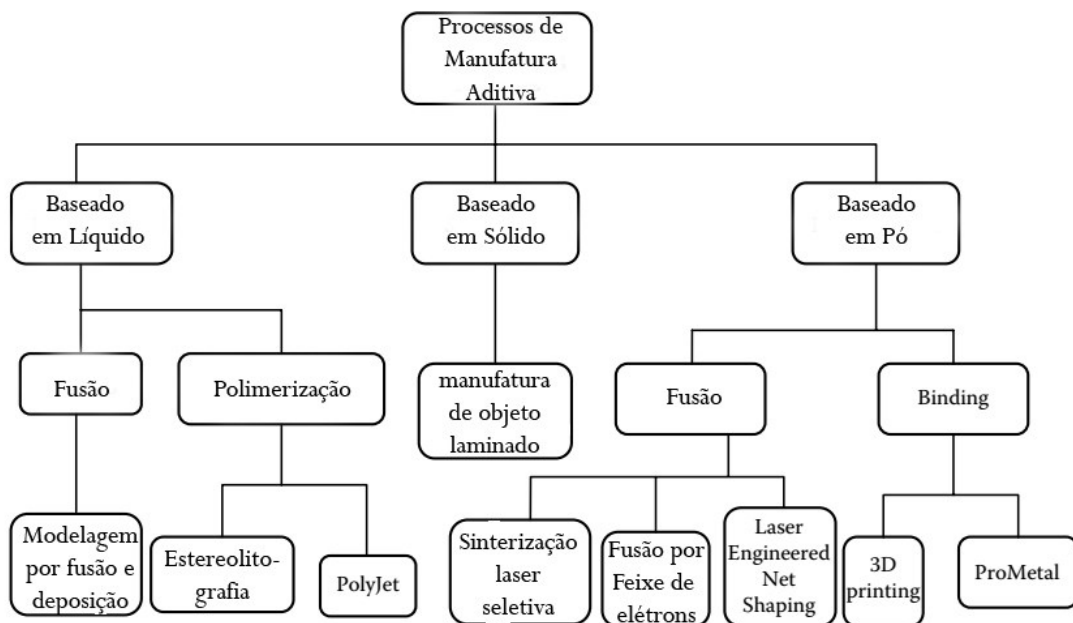
Um modelo eletrônico tridimensional (3D) computadorizado é desenvolvido e convertido em um formato padrão, como o tradicional “Standard Tessellation Language” (STL) ou um formato mais recente.

Este arquivo é então enviado para uma máquina de manufatura aditiva onde é manipulada para que ocorra a mudança quanto a posição, a orientação da peça ou simplesmente a escala da peça.

A peça é então construída camada por camada em uma máquina de manufatura aditiva.

Desde 1987, mais de 100 máquinas para produção digital direta foram desenvolvidas e introduzidas no mercado que seguem o princípio da fabricação de camadas (Gebhardt *et* Hotter, 2016). A visão geral dos diferentes processos é dada na Tabela 1.

Tabela 1. Tipos de Tecnologias para impressão 3D. Fonte: Srivatsan *et* Sudarshan, (2016).



Destas máquinas, as mais usadas e, portanto, as mais importantes foram selecionados e serão apresentados e discutidos de acordo com as principais famílias da manufatura aditiva:

- I. Impressão 3D (3DP)
- II. Estereolitografia (SLA)
- III. Sinterização Laser Seletiva (SLS)
- IV. Modelagem por difusão e deposição (FDM)

2.2.1 Impressão 3D

Segundo Srivatsan et Sudarshan (2016) este processo foi desenvolvido pelo MIT e basicamente diz respeito a um aglutinante líquido à base de água aplicado em um jato que vai em direção a um pó à base de amido para imprimir os dados de um desenho CAD. As partículas de pó ficam em uma cama de pó e se colam um ao outro quando o aglutinante é aplicado. Após a aplicação sequencial das camadas, os pós não ligados são cuidadosamente removidos. A parte pode ser posteriormente aquecida a temperaturas altas para fortalecer ainda mais a ligação. O processo é referido como 3DP principalmente por sua semelhança com o processo de impressão a jato de tinta usado para impressão bidimensional em papel. Inicialmente, a técnica foi utilizada para manusear uma variedade de materiais poliméricos, porém hoje se estende a aplicações para a produção de peças metálicas, cerâmicas e compostos metal-cerâmicos. Esta técnica pode ser usada para criar uma parte de qualquer geometria a partir do material escolhido ao mesmo tempo que facilita o controle tanto da microestrutura como das propriedades resultantes da parte que está sendo produzido. O processo de camadas é repetido até a peça seja completamente impressa. A sequência de operações está bem resumida na Figura 2.

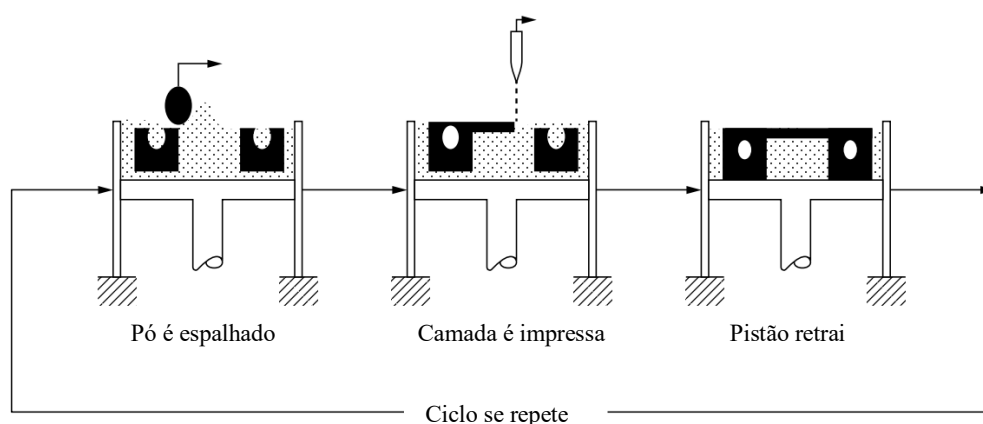


Figura 2. Sequência de operações de uma impressora 3D. Fonte: (Srivatsan *et* Sudarshan, 2016).

Através de esforços contínuos de pesquisa e desenvolvimento da tecnologia 3DP, esta tem sido usada para criar peças com diversos tipos complexos de geometria, incluindo cavidades internas, desde que haja um furo para que as partículas de pó soltas escapem. O suporte fornecido pela cama em pó implica que as peças com saliências, contrações e cavidades internas possam ser criadas com facilidade. A natureza flexível do 3DP está resumido na Figura 3.

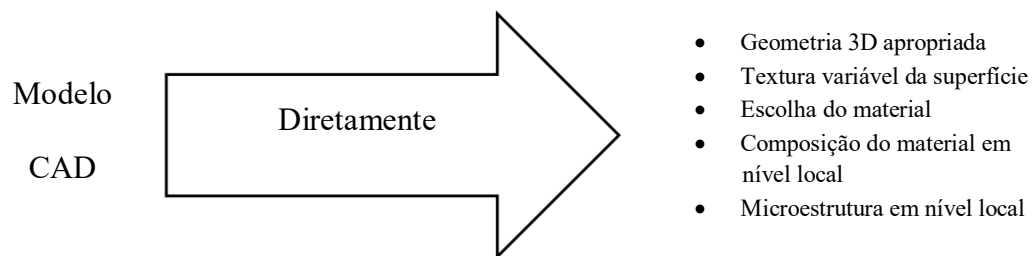


Figura 3. Componentes chave para impressão 3D. Fonte: (Srivatsan *et* Sudarshan, 2016).

Em essência, a técnica de 3DP oferece a vantagem de fabricação com curto tempo de duração e custo reduzido de material. Atualmente, pode ser considerado uma das tecnologias comerciais de manufatura aditiva com o crescimento.

As impressoras 3D de mesa comercialmente disponíveis para uso do consumidor permitem objetos como brinquedos e até mesmo objetos de decoração domésticos serem impressos no conforto de casa. A impressão tridimensional também está sendo cada vez mais utilizada em dispositivos médicos e fabricação de aeronaves, se tornando rapidamente um processo de fabricação padrão em várias atividades relacionadas a estas áreas.

Gebhardt *et* Hotter (2016) comentam sobre a logística relacionado à tecnologia da manufatura aditiva e alega ter o potencial de permitir a fabricação de produtos individuais e personalizados em qualquer lugar do mundo. Ao invés de fabricar bens em uma específica indústria ou localidade e enviá-la para o resto do mundo, a impressão 3D permite enviar

planos de projeto instantaneamente para que os produtos possam ser produzidos localmente onde são necessários.

Os métodos de fabricação tradicionais quase sempre exigiram um investimento significativo nas fábricas em si e no maquinário, mas a impressão em 3D pode reduzir muito esses gastos gerais, ao mesmo tempo que reduz os custos de transporte e os custos associados à logística. A impressão em 3D permite que a logística “*just-in-time*” seja substituída pela manufatura “*just-in-time*”, dando às empresas a oportunidade de serem mais competitivas e ágeis. Ao longo do tempo, a impressão 3D cresceu significativamente e a sofisticar-se cada vez mais.

Srivatsan *et* Sudarshan (2016) fazem uma previsão com base no crescimento do uso de impressoras 3D e tecnologias de impressão 3D de que a demanda mundial pelas impressoras 3D, em conjunto com todos os materiais e software relacionados ou relevantes, tem projetado um aumento de cerca de 20% a cada ano, atingindo US \$ 5 bilhões até 2017 (ver Tabela 2). O uso profissional, como a prototipagem, continuará a representar a maior parte da demanda por impressoras 3D, mas o crescimento das aplicações relacionadas ao consumidor casual também é esperado. Atualmente, as impressoras 3D são preferencialmente utilizadas para a fabricação de peças de produção direta e objetos finalizados para um espectro de aplicações.

Tabela 2. Demanda mundial por impressora 3D ao longo do tempo em dólares. Fonte: Srivatsan *et* Sudarshan (2016)

Região	Demanda (Milhões de \$)				Crescimento Anual (%)	
	2007	2012	2017	2022	2007-2012	2012-2017
América do Norte	361	900	2285	5120	20	20.5
Estados Unidos	335	825	2085	4610	19.8	20.4
Canadá	26	75	200	510	23.6	21.7
Europa Ocidental	194	495	1225	2750	20.6	19.9
Ásia - Pacífico	183	445	1170	2930	19.4	21.3
China	56	155	500	1450	22.6	26.4
Japão	81	165	330	660	15.3	14.9
Demais locais Ásia	46	125	340	820	22.1	22.2
América Central e Sul	7	25	75	22	29	24.6
Europa Oriental	13	35	103	290	21.9	24.1
África/Oriente Médio	17	50	142	390	24.1	23.2
Total	775	1950	5000	11700	20.3	20.7

2.2.2 Estereolitografia

Para Srivatsan (2016) a estereolitografia, inicialmente desenvolvida pela 3D Systems, Inc. (Rock Hill, SC), foi a primeira e o mais aplicado processo de prototipagem rápida. A patente para SLA (Patente U.S. 4575330) foi expirada em 1986. Em essência, é um processo à base de líquido que consiste na cura ou solidificação de um polímero fotossensível quando um laser ultravioleta faz contato com a resina. O processo começa com a construção de um modelo usando o software CAD. O modelo é então traduzido para um STL, as peças são cortadas em "fatias", com cada fatia contendo as informações necessárias para cada camada. A espessura de cada camada, bem como a sua resolução, depende do equipamento utilizado. Uma plataforma é criada para segurar a peça e suportar qualquer estrutura pendente. Um laser ultravioleta é aplicado e a resina inicia a consolidação em locais específicos de cada camada. Quando a camada é finalizada, a plataforma é abaixada. Quando o processo é efetuado, qualquer excesso de resina é drenado e posteriormente reutilizado. O progresso contínuo ao longo dos anos resultou no desenvolvimento de um avanço desse processo que passou a oferecer uma resolução muito maior e é conhecido como microstereolitografia. Neste processo, uma espessura de camada inferior a 10 microns é facilmente alcançada. A técnica de microstereolitografia ajuda a fornecer microestruturas tridimensionais.

A técnica possibilitou muitas novas aplicações nos domínios que abrangem Eletrônicos de consumo, médicos e de defesa. Alguns exemplos incluem o seguinte:

- I. Eletrônica incorporada em componentes estruturais de um veículo ou edifício;
- II. Eletrônica implantável composta por materiais biocompatíveis;
- III. Eletrônicos utilizáveis que são feitos para uma indústria específica.

Os principais componentes ou partes de uma máquina de estereolitografia são mostrados na Figura 4.

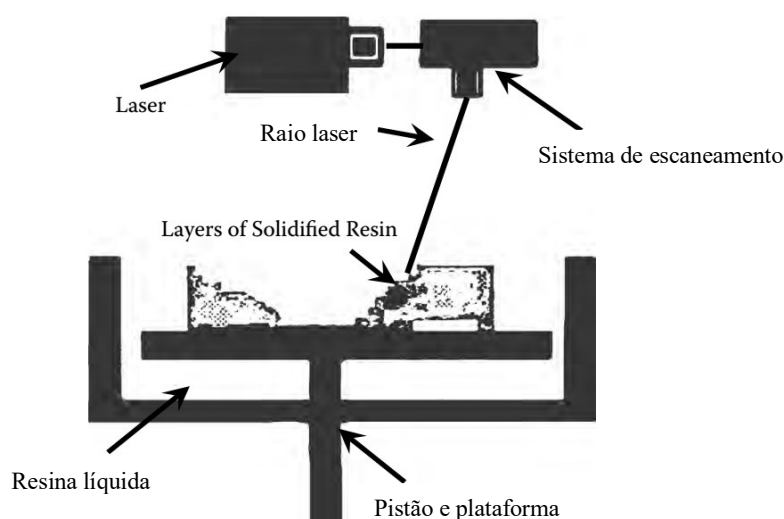


Figura 4. Técnica de estereolitografia e seus componentes chave. Fonte: Adaptado de (Srivatsan & Sudarshan, 2016).

O princípio básico que regula o processo de estereolitografia é a fotopolimerização. Isto é essencialmente um processo em que um monómero líquido ou um polímero é convertido em um sólido pela aplicação de luz ultravioleta. A luz ultravioleta age como um catalisador para as reações; O processo também é conhecido como cura por ultravioleta. A descrição detalhada da produção de peças utilizando-se da estereolitografia dá uma boa ideia geral dos processos aditivos como um todo e pode ser aplicado para outros métodos em muitos aspectos. Portanto, esta seção é recomendada para todos interessados na tecnologia de processo aditivo, mesmo que ele ou ela não esteja interessado em estereolitografia (Gebhardt *et* Hotter, 2016)

2.2.3 Sinterização seletiva laser - SLS

A tecnologia de manufatura aditiva "sinterização" é conhecida como sinterização a laser por causa do uso de lasers quando foi desenvolvido na década de 1990 Gebhardt (2016). Para Gu (2015) a escolha do laser possui uma grande influência em como o pó irá se consolidar devido a dois principais fatores; a absorção do laser pelo material e o comprimento de onda do laser.

Para separar o processo de sinterização industrial, o nome "sinterização laser seletiva" foi denominado como mais adequado porque a solidificação do material é limitada a uma área selecionada.

Srivatsan *et* Sudarshan (2016) salientam que este processo de fabricação de aditivos usa um laser de alta potência para fundir pequenas partículas do material de construção (metal, cerâmica, polímero, vidro ou qualquer material que possa ser facilmente pulverizado). O leito em pó para fabricação é aquecido logo abaixo do ponto de fusão do material com o objetivo principal de minimizar a distorção térmica e simultaneamente facilitar a fusão para a camada anterior. Cada camada é então desenhada na cama em pó usando um laser para sinterizar o material. O material sinterizado forma a parte desejada enquanto o pó sem inércia permanece no lugar para suportar a estrutura. O pó não utilizado pode ser limpo e reciclado uma vez que a parte do interesse foi construída. Este processo de sinterização laser seletiva oferece a liberdade de construir peças complexas que muitas vezes são mais duráveis e oferecem uma melhor funcionalidade comparado com outros processos de manufatura aditiva existentes. Além disso, neste processo não é necessário tempo para que a cura ocorra fazendo com que o tempo de construção seja visivelmente mais rápido.

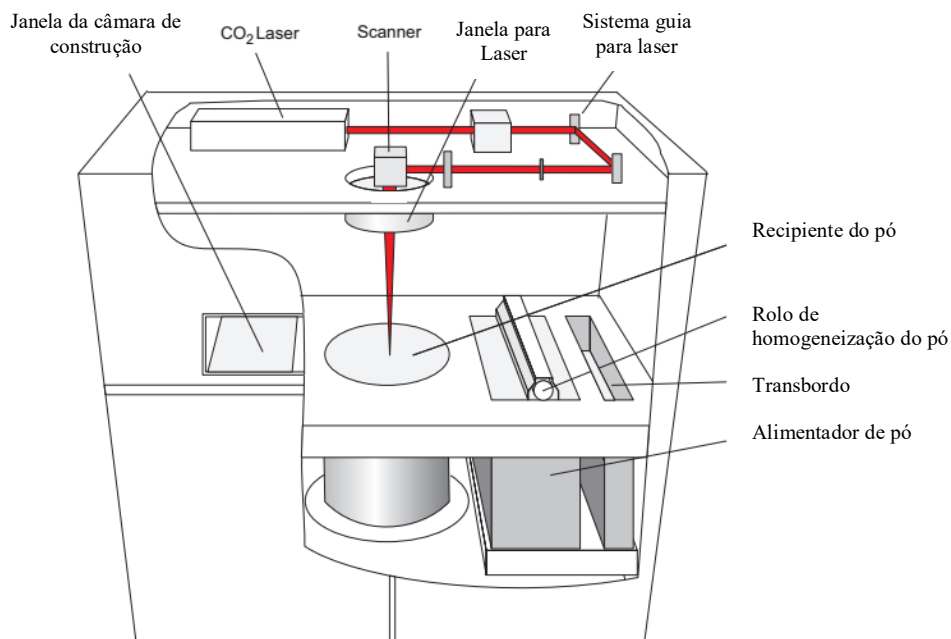


Figura 5. Princípio de construção de máquina 3D de sinterização. Fonte: Gebhardt(2016)

Srivatsan *et* Sudarshan (2016) argumentam que podem ser utilizadas uma grande variedade de materiais e os normalmente escolhidos incluem (1) plásticos, (2) metais, (3) ligas de metais, (4) combinação de metais e polímeros e (5) combinação de metais com cerâmica. Outros materiais que foram utilizados são materiais compósitos e polímeros reforçados. Para o caso específico de metais, é necessário haver um aglutinante. O aglutinante é muitas vezes feito de um polímero, que é removido durante o aquecimento ou mistura de metais com pontos de fusão muito diferentes. Esta técnica particular foi usada para construir partes de alumínio com alta resistência mecânica. O álcool pode ser usado como um tipo de aglutinante orgânico.

Seu mecanismo se assemelha à estereolitografia (SLA), mas ao invés de resina líquida, são utilizadas resinas em pó. Uma fonte de laser transforma o pó em sólido por um processo de aquecimento instantâneo que permite que as superfícies de partículas se fundam numa operação de “sinterização” (Shodek, 2005). O cilindro do pó indicado atua sobre o alimentador de pó a fim de nivelar e espalhar o pó homogeneamente. O feixe de laser então se desloca por um sistema de varredura e é direcionado no alojamento do pó, cujas partículas são sinterizadas de acordo com a geometria do plano preterido. A superfície que está logo abaixo da cama de pó se movimenta para baixo no eixo Z, exatamente a espessura da nova

camada que será espalhada pelo rolo do pó. Este processo então é repetido até que a geometria da peça esteja completa com todas as camadas realizadas. O pó que não foi sinterizado irá servir de suporte para a estrutura que está sendo criada, permitindo assim a criação de geometrias complexas.

Gu (2015) cita que, em geral, essa técnica de manufatura aditiva pode ser categorizada como complexa, uma vez que várias variáveis de construção devem ser cuidadosamente controladas.

As desvantagens especificadas para este processo incluem o seguinte:

- I. A precisão é estritamente limitada pelo tamanho das partículas do material escolhido.
- II. A oxidação deve ser evitada executando o processo em uma atmosfera inerte ou vácuo.
- III. O processo deve ocorrer a uma temperatura constante próxima ao ponto de fusão do material escolhido.

2.2.4 Modelagem por fusão e deposição

Barnatt (2016) defende que em termos de unidades de hardware vendidas, a tecnologia de impressão 3D mais comum é a referente a extrusão de materiais. Esta tecnologia se refere a qualquer processo que crie objetos em camadas, produzidos a partir de um material semilíquido que sai através de um bico controlado pelo computador. Diferentes materiais podem ser empregados para a confecção de objetos incluindo concreto, cerâmica e até mesmo metais. Porém os materiais mais amplamente utilizados para a extrusão são os plásticos, tecnicamente conhecidos como termoplásticos que podem ser derretidos temporariamente para que ocorra sua saída através do bico da máquina.

Ainda segundo Barnatt (2016) a extrusão de materiais termoplásticos foi inventada pela empresa líder de mercado chamada Stratasys, que rotulava a tecnologia de modelagem por fusão e deposição ou 'FDM'. O termo FDM tornou-se amplamente usado para se referir a extrusão de termoplásticos. A Stratasys é, no entanto, o único fabricante de impressoras 3D que pode usar os nomes “Modelagem por fusão e deposição” e “FDM”, por possuir patentes relacionadas ao nome. A rival no ramo das impressões 3D, 3D systems nomeou posteriormente esta tecnologia como "impressão a jato de plástico" (PJP). Outros nomes para o processo são "modelagem de filamentos fundidos" (FFM), “modelagem derretida e

extrudida” (MEM), ”fabricação de filamentos fundidos” (FFF) ou “método de deposição fundida”.

Para Srivatsan *et* Sudarshan (2016), as vantagens que se pode observar deste método incluem a não necessidade de quaisquer químicos durante o pós-processamento, equipamentos relativamente mais baratos que outras tecnologias porque as resinas não necessitam tempo de cura, e quanto ao uso do material resultando em um processo com bom custo-benefício.

A Figura 6 fornece uma ilustração da extrusão do material. Aqui um carretel de material de construção referido como filamento é alimentado lentamente a uma cabeça de impressão que é aquecida a uma temperatura entre 180 ° C e 250 ° C. Isso derrete o filamento, que é então extrudido através de um bico fino e geralmente achatado ligeiramente pela cabeça de impressão em sua saída.

Gebhardt *et* Hotter (2016) definem o processo de confecção do modelo FDM da seguinte forma, inicialmente, o filamento fundido é depositado diretamente sobre uma superfície plana e horizontal conhecida como a plataforma de compilação da impressora 3D ou a mesa de impressão. Ali, o filamento esfria muito rapidamente e solidifica, com a cabeça de impressão movendo-se no espaço 2D para rastrear a primeira camada do objeto sendo impresso. Algumas impressoras de extrusão de material realizam esse movimento movendo a cabeça de impressão em um eixo norte-sul e oeste-leste. Alternativamente, outros modelos deslizam a cabeça de impressão para frente e para trás em um eixo e move a cama de impressão no outro.

Uma vez que a primeira camada de um objeto foi traçada, a cama de impressão ou a cabeça de impressão é afastada ligeiramente no eixo Z e a próxima camada de filamento é depositada em cima dela. Esse processo então se repete geralmente durante um período de muitas horas até que um objeto completo tenha sido fabricado.

Barnatt (2016) defende que, amplamente disponíveis, as impressoras de entrada podem ser adquiridas atualmente em forma de kits por um valor em torno de US \$ 200, já os modelos de consumo totalmente montados custam a partir de US \$ 230 até cerca de US \$ 5.000. No outro extremo do espectro temos as impressoras de extrusão termoplástica para uso profissional com valores de entrada entre US \$ 5.000 e US \$ 20.000. As máquinas de ponta no mercado de impressão 3D, são geralmente destinadas a aplicações fabris e são denominados "sistemas de produção 3D" e custam até US \$ 500.000.

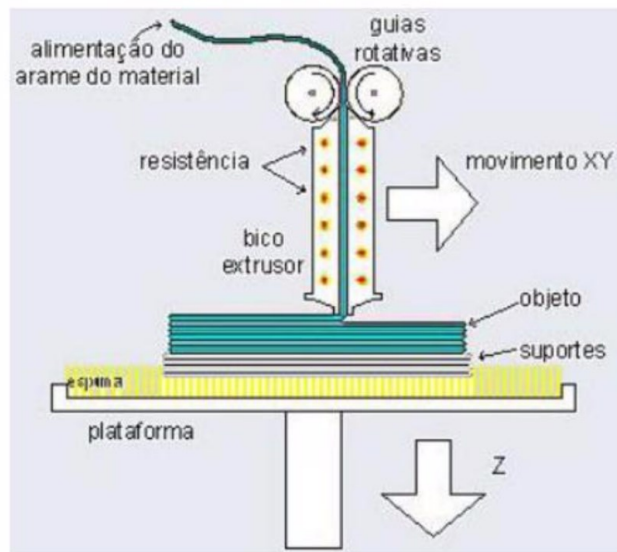


Figura 6. Princípio de funcionamento tecnologia FDM. Fonte: (Pallrolas, 2013)

A Figura 7 mostra uma impressora 3D Stratasys Fortus 900mc em uma configuração industrial.



Figura 7. Impressora Stratasys Fortus 900mc 3D. Fonte: (Gebhardt,2016)

Assim como as impressoras 2D têm uma "área de impressão" máxima, as impressoras 3D têm um "volume de construção" que determina as maiores dimensões possíveis para se efetuar a impressão de um objeto. Os volumes de construção normalmente começam em torno de 100 x 100 x 100 mm e vão até sistemas industriais de produção em 3D com dimensões de 914 x 610 x 914 mm para a máquina da figura 7 (Fortus 900mc). Uma impressora 3D desse

tamanho pode ser usada não apenas para fazer objetos grandes, mas também para fabricar muitos itens menores lado a lado em um trabalho de impressão único.

“A tecnologia mais comum hoje em dia é a chamada Modelagem por Fusão e Deposição (“Fused Deposition Modeling” – FDM), que utiliza material plástico ABS e policarbonatos em forma de filamento. Devido ao número de pesquisas investidas neste tipo de tecnologia, é possível encontrar, hoje, impressoras com preços acessíveis, em tamanhos equivalentes aos formatos desktop. O processo de impressão é simples que consiste no tracionamento do filamento plástico para um cabeçote com um bico extrusor, derretido e expelido, também em filamentos, criando camada por camada (com o equivalente a 0.127 mm, dependendo do bico), até completar o modelo. O cabeçote de extrusão aquecido movimenta-se nos eixos X e Y , enquanto a base, onde a peça será construída, movimenta-se no eixo Z . À medida que o filamento de material, já derretido, chega à extremidade do bico extrusor, vai sendo depositado e solidificado, aderindo-se à camada anterior. A distância de movimento no eixo Z vai depender dos ajustes pré-estabelecidos no software utilizado para a preparação do arquivo. Seus modelos têm boa durabilidade, com a possibilidade de processamento em cera ou plásticos coloridos”. (Medeiros, Pupo, Kegler *et Braviano*, 2014, p. 4)

Barnatt (2016) alega que embora muitos materiais possam ser potencialmente utilizados em uma impressora de extrusão termoplástica 3D, o mais comum é o acrilonitrilo butadieno estireno, também conhecido como 'ABS'. Este é um termoplástico à base de petróleo que é amplamente utilizado em exemplos como, peças de “Lego”, capacetes de ciclismo e canetas e são moldados por injeção em tipos diferentes de ABS. “E-readers”, celulares e outros vários dispositivos de computação também se utilizam da injeção moldada em ABS para a fabricação das carcaças e botões.

Os carretéis de filamentos de ABS estão disponíveis em uma variedade de cores, com um filamento típico sendo de 1,75 mm ou 3 mm de diâmetro. Outros materiais de construção termoplástica incluem nylon e outras poliamidas, acrilonitrilo acrilato de estireno (ASA), policarbonatos (PC), poli (tereftalato de etileno) glicol modificado (PETG), poliestireno de alto impacto (HIPS) e compósitos de policarbonato de ABS.

Além dos materiais de construção à base de petróleo acima mencionados, outro filamento popular é o ácido polilático, também conhecido como "PLA". Este é um bioplástico que é atualmente produzido a partir de produtos agrícolas, como amido de milho ou cana-de-açúcar, e conseqüentemente mais ecológico do que o ABS. O PLA também é

muito seguro para se trabalhar pois não emite fumaça tóxica quando aquecida. É, portanto, muito utilizado pelos educadores que desejam introduzir a crianças o conceito de impressão 3D em escolas ou faculdades.

2.3 SISTEMAS DE CONTROLE

Richard *et* Bishop (2001) definem sistema de controle como uma conjunto de dispositivos que formam uma configuração sistemática que irá promover uma resposta desejado do sistema.

2.3.1 Microcontroladores

“*Future Lighting Solutions*” (2017) define microcontrolador como um sistema autônomo com periféricos, memória e processador que pode ser usado como um sistema embarcado. A maioria dos microcontroladores programáveis que são usados hoje estão incorporados em outros produtos de consumo ou máquinas, incluindo telefones, automóveis. Devido a isso, outro nome para um microcontrolador é "controlador embarcado". Alguns sistemas embutidos são mais sofisticados, enquanto outros possuem exigências mínimas de memória e duração da programação e uma baixa complexidade de software. Os dispositivos de entrada e saída incluem solenóides, monitores LCD, relés, interruptores e sensores para dados como umidade, temperatura ou nível de luz, entre outros.

Para Zanco (2005), o microcontrolador é uma unidade central de processamento de pequeno porte, capaz de executar várias tarefas sucessivas chamadas instruções.

Os microcontroladores foram desenvolvidos para otimizar e embarcar sistemas de controle nas máquinas ou dispositivos eletrônicos que precisem de controle lógico. A Figura 8 mostra um exemplo de microprocessador atmel.

2.3.1 Arduino

Segundo Batista, França *et* Queiroga (2012) é estratégico o papel que o conhecimento e uso de plataformas microcontroladas possuem na vida contemporânea, estando presente nas mais diversas áreas como automação industrial, agronegócio, computação embarcada e doméstica. Esta demanda de conhecimento tem o intuito de agilizar e melhorar processos produtivos através da integração de softwares com os equipamentos.

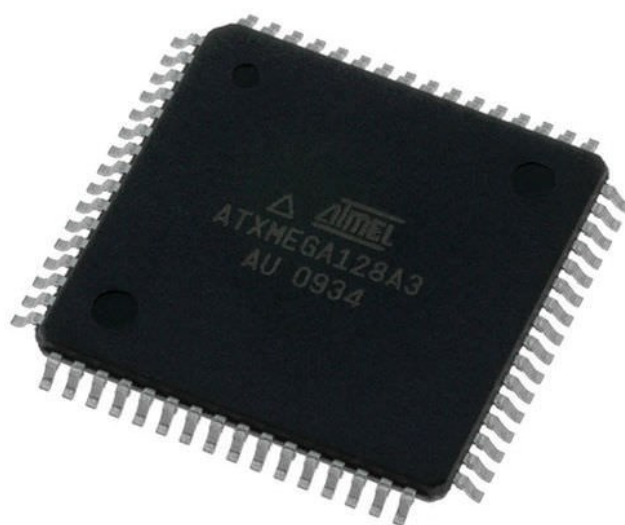


Figura 8. Microcontrolador Atmel AVR XMEGA. Fonte: (Virtual Expo Group, 2017)

“O conceito Arduino surgiu na Itália no ano de 2005, com o objetivo de criar um dispositivo para controlar projetos e protótipos construídos, com menor custo que outras plataformas disponíveis no mercado. A plataforma Arduino é do tipo “open-source” baseada em hardware e software destinado as áreas de automação e robótica. Na placa pode-se adicionar diversos tipos de componentes eletrônicos direcionados e programados para uma determinada atividade. Tal plataforma usa um Microcontrolador ATMEGA1 (chip controlador regravável) com a função de receber e entregar o fluxo de informações de maneira controlada por uso de software. A linguagem de programação trabalhada no Arduino consiste em um conjunto de funções da linguagem C/C++ com pequenas alterações”. (Silva, Cavalcante, Camilo, Adailton, et Viana, 2014)

A Figura 9 apresenta um Arduino Uno R3.

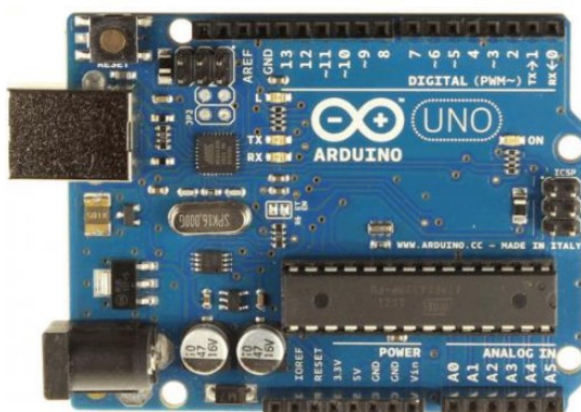


Figura 9. Arduino Uno R3. Fonte: (Silva, Cavalcante, Camilo, Adailton et Viana, 2014)

2.3.2 RAMPS

“RepRap Arduino Mega Pololu Shield”, ou RAMPS foi projetado para caber toda a eletrônica necessária para uma máquina de impressão 3D RepRap em um pacote pequeno e de baixo custo. O RAMPS é caracterizado com um *shield* (placa que pode ser conectada acima do Arduino Mega) dando ao microcontrolador a possibilidade de expansão. O design modular inclui encaixes para motores, sensores, chaves de fim de curso, display e outros dispositivos compatíveis com a tecnologia para Arduino. (RepRap, 2017)

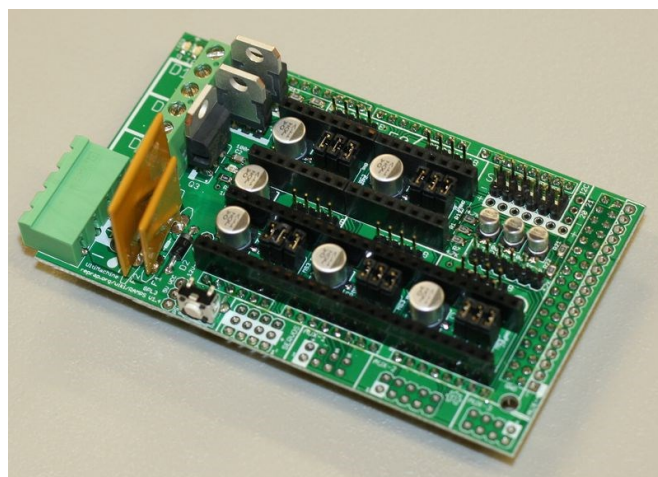


Figura 10. RAMPS - *RepRap Arduino Mega Pololu Shiel*

Fonte: (RepRap, 2017)

2.3.3 Motor de Passo

Earl (2017) define motores de passo como motores de corrente contínua que se deslocam em etapas discretas. Eles têm múltiplas bobinas que são organizadas em grupos denominados "fases". Ao energizar cada fase em sequência, o motor girará, um passo de cada vez.

Com os passos controlados pelo computador, é possível conseguir um posicionamento e ou controle de velocidade muito preciso. Por este motivo, os motores passo são os motores escolhidos para muitas das aplicações onde o controle de movimentos é necessário ser realizado com precisão.

Segundo Araújo (2014), os motores de passo podem ser diferenciados quanto ao tipo e estrutura, sendo os tipos classificados como unipolar ou bipolar de acordo como os enrolamentos por fase. No unipolar se possui dois enrolamentos por fase, sendo um para cada sentido e os bipolares que apresentam apenas um enrolamento por fase.

Quanto à estrutura destacam-se os motores de relutância variável, que consistem de um rotor de ferro, com múltiplos dentes e um estator com enrolamentos, os motores de Imã permanente que contém um imã fixo no eixo do rotor e não contém dentes e os Híbridos, que combinam as melhores características dos motores de imã permanente e dos de relutância variável. O rotor é multidentado como no motor de relutância variável e contém um imã permanente ao redor do seu eixo.

Earl (2017) cita como principais vantagens para a utilização de motores de passo:

- Posicionamento - Uma vez que os *steppers* se movem em etapas repetitivas precisas, eles se destacam em aplicações que exigem posicionamento preciso, como impressoras 3D, CNC, plataformas de câmera.
- Controle de velocidade - incrementos precisos de movimento também permitem um excelente controle de velocidade de rotação para automação de processos e robótica.
- Torque de baixa velocidade - Os motores DC normais não têm muito torque a baixas velocidades, já os motores de passo possuem máximo torque em baixas velocidades, por isso são uma boa escolha para aplicações que requerem baixa velocidade com alta precisão.

2.3.4 Sensores

Wilson (2005) define um sensor como um dispositivo que recebe um sinal ou estímulo e responde com um sinal elétrico, enquanto um transdutor é um conversor de um tipo de energia em outro. Na prática, no entanto, os termos são frequentemente utilizados de forma intercambiável.

Os sensores e seus circuitos associados são usados para medir várias propriedades físicas tais como temperatura, força, pressão, fluxo, posição, intensidade da luz, etc. As propriedades atuam como estímulo para o sensor e a saída do sensor é condicionada e processada para fornecer a medida correspondente da propriedade física.

Ainda segundo Wilson (2005), os sensores podem ser classificados de várias maneiras. Olhando pela perspectiva de condicionadores de sinal é útil classificá-los como ativos ou passivos. Um sensor ativo requer uma fonte externa de excitação. Sensores baseados em resistências, como termistores, e “strain gages” são exemplos de sensores ativos, porque uma corrente deve ser passada através deles para que uma tensão correspondente seja medida.

Groover (2011) classifica os tipos de estímulos de sensores em cinco principais categorias de estímulo, sendo elas de natureza elétrica, térmica, radiação, magnética, química e mecânica e as variáveis físicas medidas são mostradas de acordo com a tabela 3.

Tabela 3. Classificação estímulos de sensores

Categorias do estímulo	Exemplo de variáveis físicas
Elétrico	Tensão elétrica, corrente, carga, resistência, condutividade, capacitância.
Térmico	Temperatura, calor, fluxo de calor, condutividade térmica, calor específico.
Radiação	Tipo de radiação (por exemplo, raios gama, raios X, luz visível), intensidade, comprimento de onda.
Magnético	Campo magnético, fluxo, condutividade, permeabilidade.
Químico	Identidades de componentes, concentração, níveis de pH, presença de ingredientes tóxicos, poluentes.
Mecânico	Poissão (deslocamento linear e angular), velocidade, aceleração, força, torque, pressão, desgaste, tensão, massa, densidade

Fonte: (Groover, 2011)

2.4 “FIRMWARE”

Lima *et* Mesquita (2014) alegam que, independente da natureza, “firmware” (também conhecidos como softwares embarcados) são softwares embutidos em qualquer equipamento. Citam como exemplos de “firmware” os equipamentos portáteis de medição, os sistemas operacionais de celulares, os softwares de máquinas fotográficas digitais, máquinas de lavar, impressoras, entre outros. No meio eletrônico, são considerados sistemas embarcados os softwares desenvolvidos para executarem tarefas específicas em equipamentos específicos, diferente de equipamentos de propósito geral como um computador pessoal.

Firmware: É um software interpolado num dispositivo de hardware que permite a leitura e execução de software, porém não permite modificação. O termo firmware foi originado para indicar um substituinte de hardware em microcontroladores. Em outras palavras, o firmware é um controlador de entrada e saída de baixo nível que gerencia dispositivos de hardware. No computador, ele permite a comunicação entre software e hardware. A linguagem de programação dos firmwares é, primordialmente, a

linguagem de máquina, mas hoje alguns microcontroladores interpretam, também, funções da linguagem C. (Andrade, 2012)

Para se fazer o controle, interface e comunicação do equipamento de impressão 3D com o operador, são utilizados determinados firmwares open source, destacando-se os firmware Marlin.

I. Marlin

Para (Marlin, 2017), este *firmware* é implementado principalmente em máquinas adequadas a tecnologia da modelagem por fusão e deposição (FDM). Este firmware é executado na placa principal da impressora 3D, gerenciando todas as atividades em tempo real da máquina. Ele coordena os aquecedores, motores de passo, sensores, luzes, display LCD, botões e tudo mais envolvido no processo de impressão em 3D.

O controle de linguagem para Marlin é um derivado do código G. Os comandos do código G indicam a uma máquina que faça coisas simples como "ajustar o aquecedor 1 a 180°" ou "mover para XY na velocidade F." Para imprimir um modelo com Marlin, ele deve ser convertido em código G usando um programa chamado "slicer".

2.5 SOFTWARE DE FATIAMENTO

Segundo Gu (2015), todo o processo da MA pode ser dividida em alguns procedimentos básicos:

- I. Criar o modelo CAD do objeto a ser construído;
- II. Converter o modelo CAD para o formato STL;
- III. Fatiar o arquivo STL em pequenas camadas de seção transversal;
- IV. Construir o modelo camada a camada;
- V. Pós processamento.

Através de um arquivo STL, arquivo que gera representações triangulares da superfície de objetos tridimensionais, os softwares de fatiamento atuam diretamente na terceira etapa do processo e convertendo arquivos STL, em um arquivo de código G, linguagem de programação com parâmetros *X*, *Y*, *Z* para a movimentação da máquina, criando assim camadas transversais à orientação do objeto e indicando o trajeto que o extrusor irá percorrer para que haja a correta deposição do material de maneira que sejam formadas as camadas sucessivas do objeto.

Os softwares de fatiamento com maior destaque são:

- I. Slic3r;
- II. Cura;

III. Simplify3D.

Enquanto o Simplify 3D destaca-se por ser uma solução comercial robusta compatível com aproximadamente 90% dos modelos de impressora 3D desktop, Slic3r e Cura são softwares de código aberto, gratuitos baseados no trabalho colaborativos da comunidade RepRap.

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO

3.1 PROTOTIPAGEM DA MÁQUINA

Inicialmente foi criado um modelo geométrico em programa CAD porque ele é mais conveniente e econômico que a criação de objetos ou processos reais. Através desse modelo fica mais fácil e prático analisá-lo e testá-lo. Esta modelagem é o ingrediente básico de sistemas “Computer Aided Design” (CAD)/ “Computer Aided Manufacturing” (CAM).

O SolidWorks, software escolhido, é um programa CAD (“Computer-aided design”) 3-D (Três Dimensões), ou seja, uma ferramenta de projeto que utiliza modelagem paramétrica de sólidos, baseada nas características e propriedades de cada elemento e ação, sendo possível alterá-las em qualquer altura do processo de simulação.(SolidWorks, 2013).

Utilizando-se do software, foram criadas subpastas contendo as peças e montagens referentes à base, cama aquecida, eixo transversal, extrusor e portrato da impressora 3D.

3.1.1 Base

Nesta montagem encontra-se a sustentação no plano XY , realizado principalmente através de guias roscadas, porcas e peças impressas em ABS em outra impressora 3D. Destaca-se também o alojamento para os eixos retificados e o motor de passo que irá movimentar a cama aquecida ao longo do eixo Y . A Figura 11 apresenta o desenho de montagem da base da impressora 3D e a Tabela 4 seus componentes e quantidades.

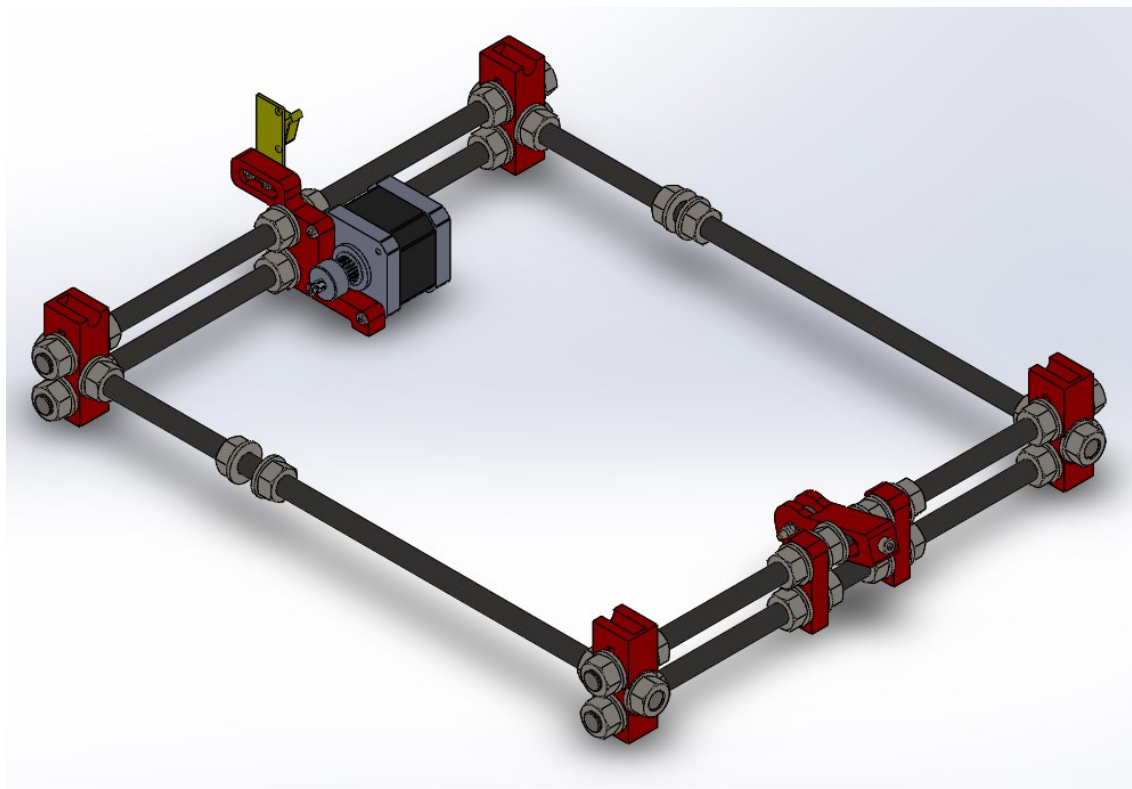


Figura 11. Montagem da base impressora 3D.

3.1.2 Estrutura mesa aquecida

Nesta estrutura destacam-se os eixos retificados contendo rolamentos lineares modelo LMU8, a base em metal para suporte da cama aquecida de dimensões de área útil de 200x300 mm e o suporte para a correia responsável por tracionar o eixo Y (ver Figura 12). A lista de materiais da estrutura da mesa se encontra na Tabela 5.

Tabela 4. Partes e quantidade para montagem da base.

PARTES BASE			
Item	Parte	Descrição	Quantidade
1	Canto Base	ABS	4
2	Acoplador motor	ABS	1
3	Suporte Polia GT2 20T	ABS	1
4	Apoio	ABS	2
5	Haste Roscada	M10x310mm	4
6	Haste Roscada	M10x380mm	2
7	Rolamento SKF 624	4mm	1
8	Porca travante	M3	1
9	Motor de Passo	NEMA 17 39mm	1
10	Sensor Fim de Curso		1
11	Parafuso cabeça interna sextavada	M3x25mm	1
12		M4x20mm	1
13		M3x12mm	3
14		M3x10mm	2
15	Arruela	M3	3
16		M10	42
17	Porca	M4	1
18		M3	2
19		M10	40
20	Polia	GT2 20T	1

3.1.1 Eixo Transversal

No eixo transversal, ou eixo x , há a movimentação do suporte onde estará acoplada a extrusora da impressora, análogo ao eixo Y , a movimentação do eixo X se dá por meio do tracionamento da correia posicionada paralelamente aos eixos retificados não mostradas na Figura 13. A lista de componentes está descrita na Tabela 6.

3.1.2 Frame

O *frame* (Figuras 14 e 15) é composto pelo *frame* principal, os motores em paralelo de movimentação dos fusos responsáveis pela subida ou descida do eixo transversal ao longo do eixo Z e eixo retificados que servem como sustentação e direção aos fusos de movimentação.

A Tabela 7 apresenta a lista de materiais do *frame*.

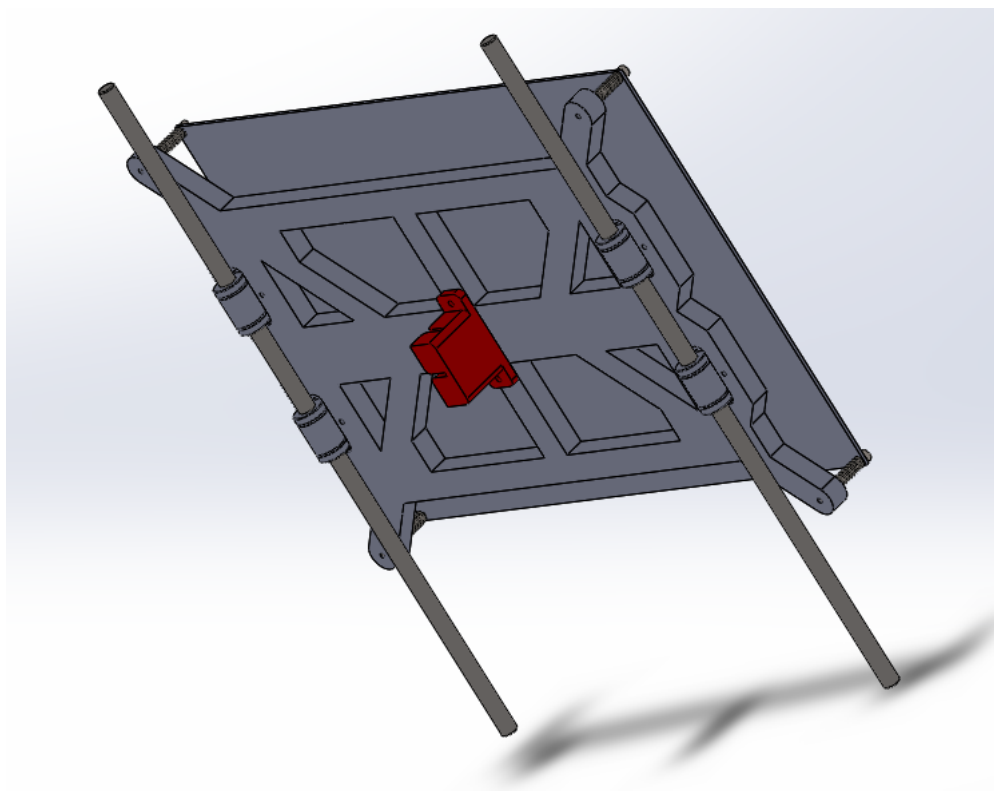


Figura 12. Estrutura mesa aquecida.

Tabela 5. Partes e quantidade para montagem da estrutura da mesa aquecida

PARTES ESTRUTURA MESA AQUECIDA			
Item	Parte	Descrição	Quantidade
1	Parafuso cabeça cilíndrica sextava do interno	M3x30mm	4
2	Mola		4
3	Cama Aquecida	300x200mm	1
4	Suporte cama	Alumínio	1
5	Segurador cinta Y	ABS	1
6	Parafuso cabeça interna sextavada	M3x12mm	2
7	Rolamento Linear	LMU8	4
8	Eixo Linear retificado_h6	8X350mm	2

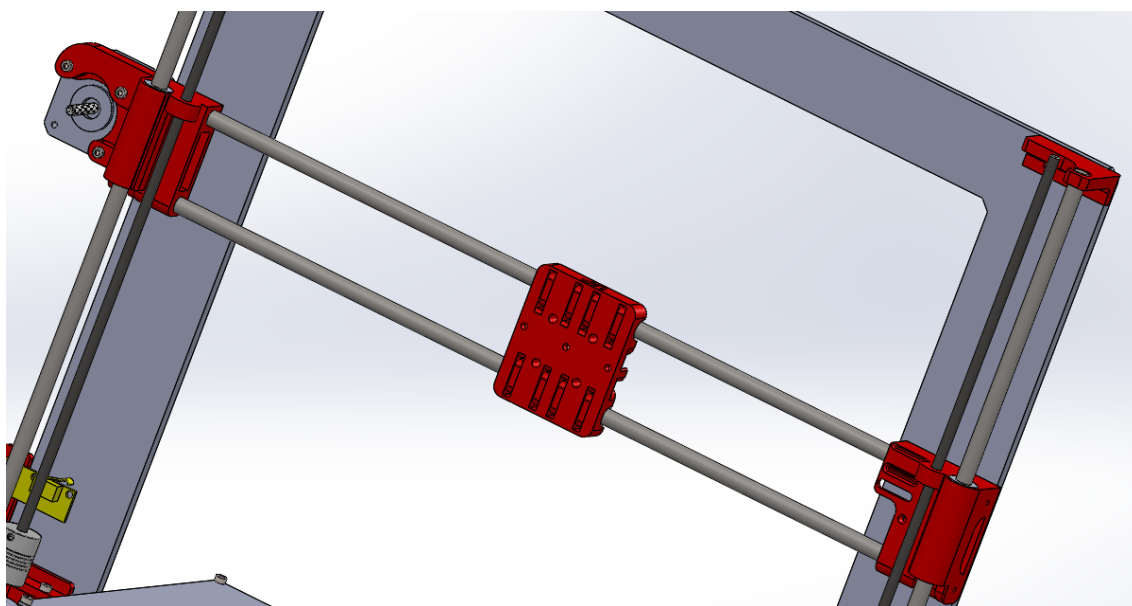


Figura 13. Eixo Transversal.

Tabela 6. Peças e quantidades para montagem eixo transversal.

PARTES EIXO TRANSVERSAL			
Item	Parte	Descrição	Quantidade
1	Eixo Lineares Retificado	4x470mm	2
2	Suporte Lateral	ABS	1
3	Parafuso cabeça interna sextavada	M3x12mm	5
4	Motor de Passo	NEMA 17 39mm	2
5	Rolamento Linear	LMU8	8
6	Suporte Lateral Motor	ABS	1
7	Eixo Linear etificado_h6	8X350mm	2
8	Suporte eixo X	ABS	1
9	Sensor Fim de Curso		1

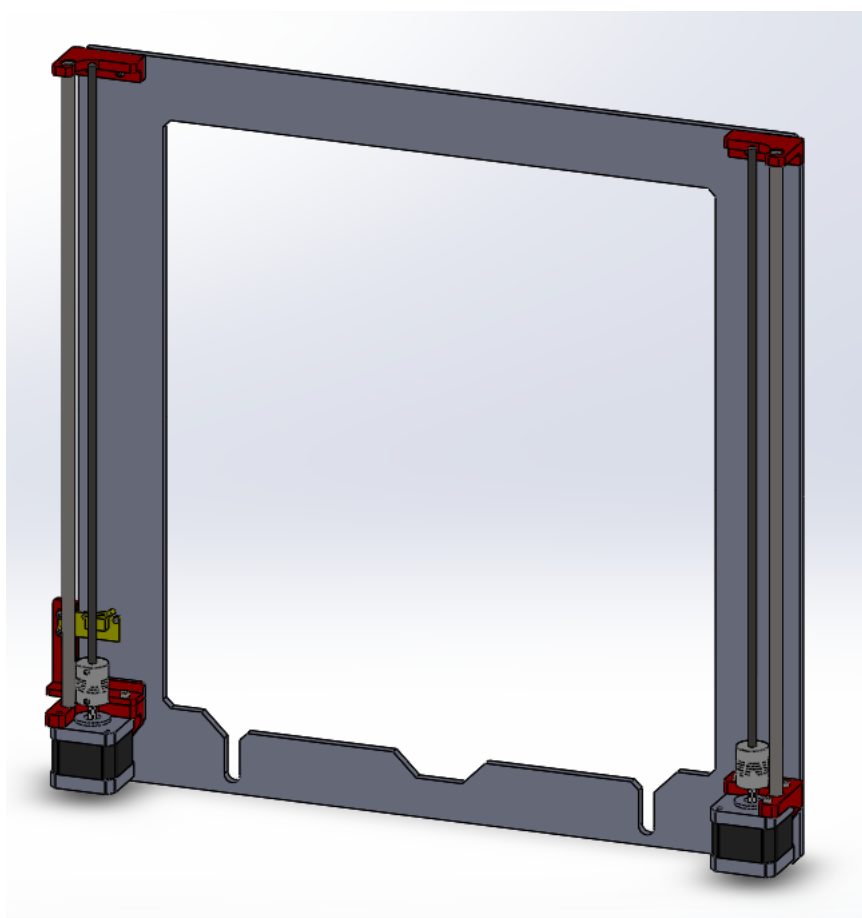


Figura 14. *Frame principal.*

3.2 HARDWARE

3.2.1 Arduino

Para o controle embarcado da máquina, foi utilizado o Arduino mega 2560 por se tratar de uma ferramenta de fácil acesso, uso e pequenas proporções. Além disto destaca-se a facilitação do controle por meio do *shield* RAMPS que é atrelado ao arduino 2560, no qual irá atender a maioria das características necessárias para o desenvolvimento de uma impressora 3D. As principais características do arduino 2560 são o micro controlador atmega 2560 da Atmel (AVR), conexão USB, entrada de alimentação, conexão Ics, 54 pinos de entradas e saídas, oscilador de cristal de 16mhz e um botão reset. Mais detalhes sobre o arduino estão detalhas na Tabela 8.

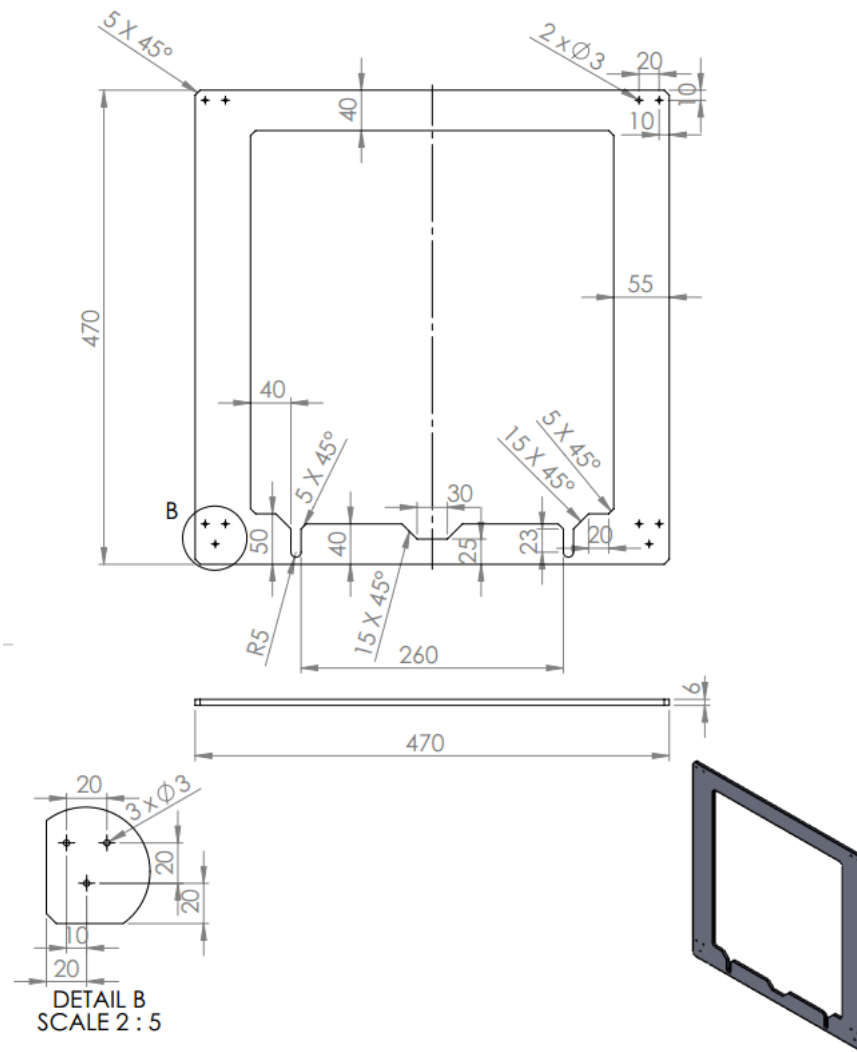


Figura 15. Desenho Técnico *frame* principal.

Tabela 7. Peças e quantidades para montagem *frame*.

PARTES FRAME PRINCIPAL			
Item	Parte	Descrição	Quantidade
1	Portrato	Alumínio	1
2	Suporte Motor Direita Inferior	ABS	1
3	Parafuso cabeça interna sextavada	M3x10 mm	15
4	Eixo Linear	8x420mm	2
5	Suporte Motor Direita Superior	ABS	1
6	Suporte Motor Esquerda Superior	ABS	1
7	Suporte Motor Esquerda Inferior	ABS	1
8	Motor de Passo	NEMA 17 39mm	2
9	Suporte fim de curso	ABS	1
10	Parafuso cabeça interna sextavada	M3x14mm	2
11	Acoplamento Flexível		2
12	Haste roscada	M5x400mm	2
13	Sensor Fim de Curso		1
14	Porca	M3	2

Tabela 8. Tabela de informações Arduino Mega

ARDUINO MEGA 2560		
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		
	Microcontrolador	ATmega2560
	Voltagem de alimentação	5V
	Voltagem de entrada (recomendada)	7-12V
	Voltagem de entrada (limites)	6-20V
	Pinos digitais I/O	54 (dos quais 14 podem ser saídas PWM)
	Pinos de entrada analógica	16
	Corrente contínua por pino I/O	40 mA
	Corrente contínua para o pino 3.3V	50 mA
	Memória Flash	256 KB dos quais 4 KB são usados por bootloader
	SRAM	8 KB
	EEPROM	4 KB
	Velocidade de Clock	16 MHz

3.2.2 RAMPS 1.4

Acoplado ao arduino Mega 2560, a “shield” Ramps 1.4 possibilita o desenvolvimento rápido e prático de uma impressora 3D, este “shield” dá a opção de se controlar um complexo conjunto de motores de passo e outros módulos de forma a dar maior funcionalidade a impressora 3D. O Ramps 1.4 permite controlar e operar um motor de passo X, um motor de passo Y, dois motores de passo Z, a mesa aquecida, o “Hot-end” (bico aquecido), a extrusora, o sensor de temperatura do “Hot-end”, o sensor de temperatura da mesa aquecida, as chaves fim de curso e o cooler para refrigeração.

A Figura 16 mostra como foi ligado os motores, sensores chaves de fim de curso, termistores, extrusora, ventiladores e alimentação de energia.

3.2.3 Motor de passo

Para a movimentação dos eixos foram utilizados 4 motores de passo bipolar Nema 17, contendo o torque necessário para o deslocamento dos eixos, proporções adequadas à aplicação e pouco peso (288g). As especificações técnicas do motor estão transcritas na Tabela 9.

3.2.4 Sensor chave de fim de curso

Para limitar o deslocamento máximo e mínimo de cada um dos 3 eixos, foram utilizados sensores mecânicos como chaves de fim de curso (Figura 17). Foram utilizados um destes sensores em cada eixo, totalizando o consumo de 3 sensores. Dentro do ambiente de firmware temos como possibilidade configurar o limite máximo de deslocamento de cada eixo, não havendo assim a necessidade de implantação de outro sensor na outra extremidade de atuação de cada eixo.

3.2.5 Extrusora

Foi adotado uma solução comercial quanto a utilização da extrusora. Destaca-se no modelo utilizado, conforme Tabela 10, a utilização de alumínio para a confecção das engrenagens e componentes estruturais, a transmissão direta de engrenagem o que garante um tamanho e peso compactos assim como rigidez e excelente acabamento para a estrutura e a utilização de dissipadores térmicos e ventilador para melhor controle da temperatura. Na tabela abaixo é possível conferir as principais informações sobre a extrusora adotada.

RepRap Arduino Mega Pololu Shield 1.4

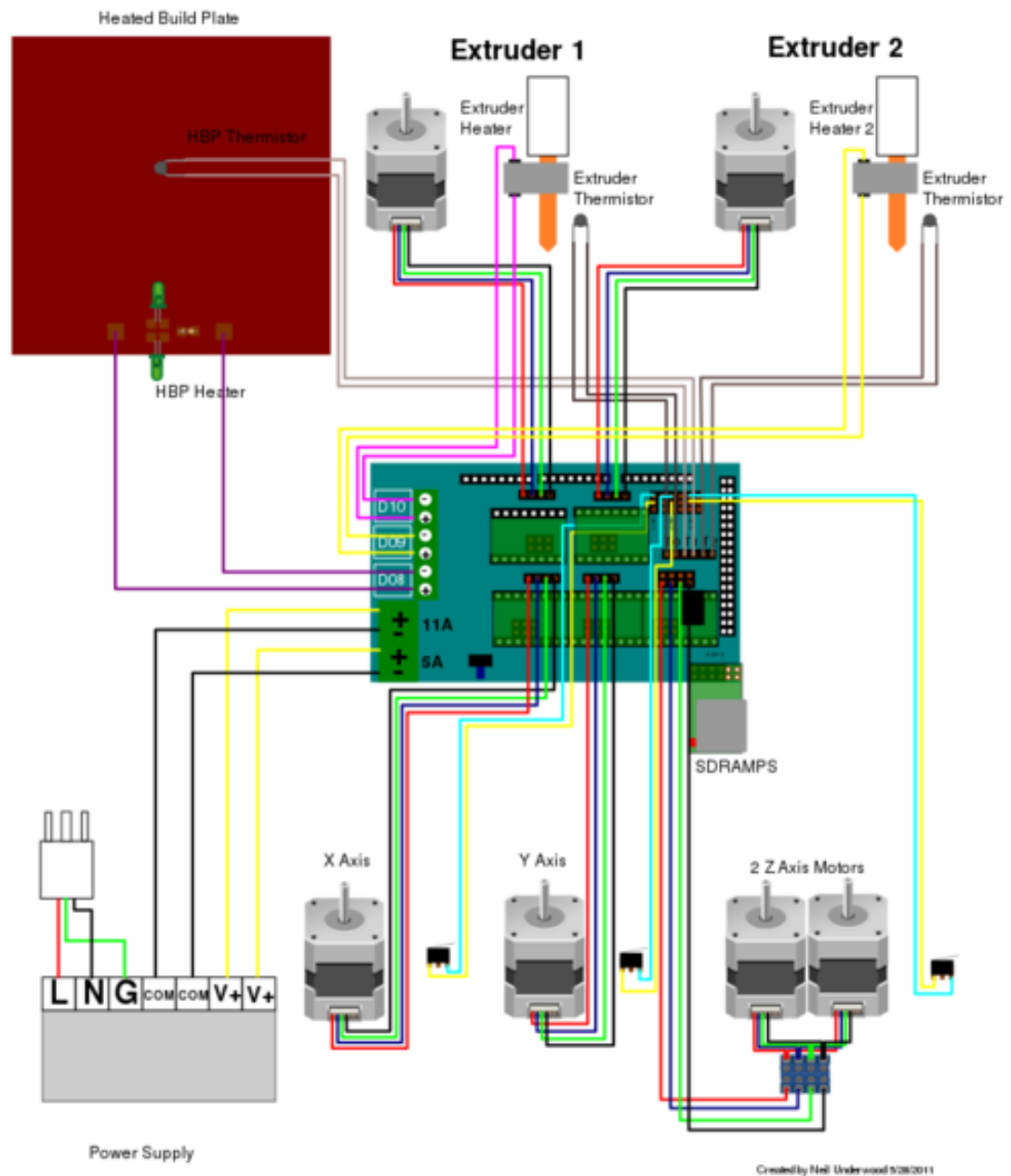
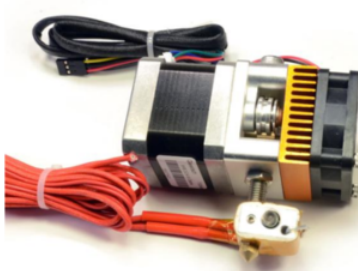


Figura 16. Diagrama de Conexão de componentes da placa RAMPS 1.4 Fonte: Rep Rap (2017)

Tabela 9. Informações técnicas Motor de passo

MOTOR NEMA 17		
	Modelo 17HS4401	Valores
	Ângulo de passo (Graus)	1.8
	Torque de fixação (N.cm Min)	40
	Tensão nominal (Volts)	12
	Fases	2
	Resistencias por fase (Ohm)	1.5
	Indutância por fase (mH)	2.8
	corrente nominal (Amperes)	1.7
	Inércia do rotor (g.cm ²)	54
	Peso (Gramas)	280
	Eixo (mm)	5
	Torque de Retenção (N.cm Máx)	2.2

**Figura 17.** Sensor de fim de curso**Tabela 10.** Informações Técnicas sobre a Extrusora MK8.

EXTRUSORA		
	Modelo MK8	Valores
	Nozzle(mm)	0.4
	Tamanho do filamento (mm)	1.75
	Taxa de Fluxo (cc / h)	24
	Voltagem elemento aquecedor (Volts)	12
	Potência elemento aquecedor (Watts)	30
	Modelo Termistor: 100k NTC 3950	
	Voltagem do ventilador (Volts)	12

3.3 FIRMWARE

Conforme descrito anteriormente, devido ao fato de o “firmware” Marlin ser implementado principalmente em máquinas adeptas a tecnologia da modelagem por fusão e deposição (FDM) e possuir vasta biblioteca de funções e módulos pré implementados ligada à esse tipo de impressão, além de ser “open-source” e frequentemente atualizado pela comunidade, o mesmo foi escolhido para compor este projeto.

A Tabela 11 mostra o ambiente de configuração e principais parâmetros alterados no código nativo do Marlin.

Tabela 11. Parâmetros alterados no *Firmware* Marlin

Comando	Valor	Descrição
#define BAUDRATE	250000	Define a velocidade de comunicação entre a placa eletrônica e o computador
#define MOTHERBOARD	BOARD_RAMPS_14_EFB	Define qual o tipo de placa eletrônica é utilizada, no caso o modelo RAMPS 1.4 com saídas de alimentação para hotend, ventilador de exaustão e cama aquecida respectivamente.
#define SERIAL_PORT	0	Define qual porta serial será utilizada na placa para comunicação com o servidor
#define TEMP_SENSOR_0	1	Define qual o tipo de termistor será utilizado na extrusora E0
#define TEMP_SENSOR_BED	1	Define qual o tipo de termistor será no <i>hotend</i> da extrusora
#define HEATER_0_MINTEMP	5	Define uma temperatura mínima diferente de 0 para check se o termistor está funcionando. Medida de segurança utilizada para prevenir que o hot end esquente indefinidamente caso o termistor do hotend ou mesa aquecida apresente falhas.
#define BED_MINTEMP	5	
#define HEATER_0_MAXTEMP	230	Define a temperatura máxima de aquecimento para a extrusora E0
#define BED_MAXTEMP	120	Define a temperatura máxima de aquecimento para

		mesa aquecida
#define EXTRUDERS	1	Define o número de extrusoras na impressora 3D
#define USE_XMIN_PLUG	TRUE	Habilita porta para que haja o posicionamento do sensor de fim de curso que limita a distância mínima no eixo X
#define USE_YMIN_PLUG	TRUE	Habilita porta para que haja o posicionamento do sensor de fim de curso que limita a distância mínima no eixo Y
#define USE_ZMIN_PLUG	TRUE	Habilita porta para que haja o posicionamento do sensor de fim de curso que limita a distância mínima no eixo Z
#define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING	TRUE	Habilita para inverter a lógica da chave de fim de curso para a posição mínima em X
#define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING	TRUE	Habilita para inverter a lógica da chave de fim de curso para a posição mínima em Y
#define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING	TRUE	Habilita para inverter a lógica da chave de fim de curso para a posição mínima em Z
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT	{ 80, 80, 4000, 500 }	Número de passos necessários para por unidade de distância (mm) para respectivamente, X, Y, Z, E0
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE	{ 300, 300, 5, 25 }	Define a velocidade máxima em mm/s para respectivamente X, Y, Z, E0
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION	{ 3000, 3000, 100, 10000 }	Define a aceleração máxima em mm/s para respectivamente X, Y, Z, E0
#define INVERT_X_DIR	FALSE	Inverte o sentido de rotação do motor de passo no eixo X
#define INVERT_Y_DIR	TRUE	Inverte o sentido de rotação do motor de passo no eixo Y
#define INVERT_Z_DIR	FALSE	Inverte o sentido de rotação do motor de passo no eixo Z
#define INVERT_E0_DIR	FALSE	Inverte o sentido de rotação do motor de passo na extrusora E0
#define X_HOME_DIR	-1	Define onde deve ser colocado o fim de curso para o home do eixo X (min = -1, max = 1)

#define Y_HOME_DIR	-1	Define onde deve ser colocado o fim de curso para o home do eixo Y (min = -1, max = 1)
#define Z_HOME_DIR	-1	Define onde deve ser colocado o fim de curso para o home do eixo Z (min = -1, max = 1)
#define X_BED_SIZE	290	Define o tamanho da área de mesa aquecida em X
#define Y_BED_SIZE	150	Define o tamanho da área de mesa aquecida em Y
#define Z_MAX_POS	200	Define altura limite de altura em Z

3.4 RESOLUÇÃO DOS EIXOS E EXTRUSORA

Segundo Prusa (2017), o cálculo necessário para se chegar a resolução de sistemas guiados por correias, por barras roscadas e para a extrusora são dados respectivamente pelas equações 1, 2 e 3 presentes abaixo:

$$Resolução1 = \frac{PC * NDP}{PMR * MD} \quad (1)$$

Onde,

Resolução 1 : Resolução para sistemas guiados por correias e polias (mm)

PC : Passo da correia (mm)

NDP : Número de dentes da polia

PMR : Número de passos por revolução do motor

MD : *Microstepping do driver*

De acordo com os componentes dimensionados para essa aplicação, temos para os eixos de movimentação *X* e *Y* a utilização das correias GT2 que possuem passo de 2 mm, polias também do modelo GT2 com 20 dentes em alumínio. Os motores de passo modelo NEMA17 utilizados possuem ângulo de passo de 1,8 graus, e considerando uma volta 360

graus chegamos ao número de passos por revolução de 200 e por fim o driver utilizado modelo a44988 possui um *microstepping* máximo de 16. Assim, ao utilizarmos os dados na fórmula chegamos ao valor:

$$Resolução1 = \frac{2*20}{200*16} = 0,0125 \text{ mm}$$

Para todos os demais cálculos são considerados os mesmo valores de número de passos por revolução do motor e *microstepping* máximo do driver de 200 e 16 respectivamente.

$$Resolução2 = \frac{PBR}{PMR * MD} \quad (2)$$

Onde,

Resolução 2 : Resolução para sistemas guiados por barras roscadas (mm)

PBR : Passo da barra roscada (mm)

PMR : Número de passos por revolução do motor

MD : *Microstepping* do driver

A barra roscada utilizada no projeto é uma M5 com passo de 0.8 mm, assim:

$$Resolução2 = \frac{0,8}{200*16} = 0,00025 \text{ mm}$$

Por fim, para a extrusora temos:

$$Resolução3 = \frac{DE * \pi}{PMR * MD} \quad (3)$$

Onde,

Resolução 3 : Resolução para sistemas de extrusão (mm)

DE : Diâmetro primitivo da engrenagem acoplada no motor (mm)

PMR : Número de passos por revolução do motor

MD : *Microstepping* do driver

A engrenagem acoplada ao motor de passo adotada da solução comercial MK8 possui 10,95 mm de diâmetro, assim:

$$Resolução3 = \frac{10,95 * \pi}{200 * 16} = 0,0107 \text{ mm}$$

Para o cálculo do parâmetro `#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT` que diz respeito ao número de passos necessários por unidade de distância (mm) para respectivamente, *X*, *Y*, *Z*, *E0*, é basicamente utilizado-se o inverso dos resultados das resoluções 1, 2 e 3 calculadas neste tópico. Assim, temos (80,80,4000,93) como valores encontrados.

3.5 CUSTOS

Ao fim do processo de prototipagem da impressora foi levantado os custos totais necessários para aquisição de todos os componentes referentes à impressora. Esta relação é possível ver na Tabela 12.

Tabela 12. Relação de custos totais com a impressora 3D

Componente	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total
Motor Nema 17 17hs4401 4 Kgf	4	R\$ 79.90	R\$ 319.60
Fim De Curso Endstop C/ Fio 70cm	3	R\$ 5.90	R\$ 17.70
Kit Impressora 3d Ramps 1.4 5 x a4988 mega2560	1	R\$ 209.90	R\$ 209.90
Kit 4 Molas Para Mesa Aquecida	1	R\$ 9.90	R\$ 9.90
Kit Mecânico Impressora3d Movimento Completo 12x rolamentos lineares LM8UU 4x rolamentos 608ZZ 1x rolamento 624ZZ 2x Acoplamentos para eixo diâmetro5x5mm 2 metros de correia GT2 2X polias de aluminio de 20 dentes	1	R\$ 129.90	R\$ 129.90
Frame em aço 1020	1	R\$ 170.00	R\$ 170.00
Base Aquecida 300x200	1	R\$ 136.41	R\$ 136.41
Fonte	1	R\$ 102.00	R\$ 102.00
Extrusora mk8	1	R\$ 179.00	R\$ 179.00
Correia GT2	1	R\$ 6.99	R\$ 6.99
Eixo Retificado 8mm h7 1METRO	3	R\$ 18.00	R\$ 54.00
Parafusos, porcas e demais	1	R\$ 20.00	R\$ 20.00
TOTAL			R\$ 1,355.40

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Montagem da impressora 3D

Após a impressora 3D ter sido projetada em um ambiente CAD, selecionado os componentes, dimensionando-os e realizado o orçamento total para confecção do modelo, a última etapa consiste na montagem da mesma.

Nesta etapa destaca-se que houveram necessidades de adaptações do projeto inicial, devido a considerações não previstas anteriormente durante a fase de prototipagem ou dificuldades em se conseguir alcançar as tolerâncias dimensionais necessárias para a perfeita execução do projeto. Desta maneira os resultados a seguir condizem com a realidade do

projeto físico onde foi necessário adaptar-se ou refazer totalmente alguns determinados componentes.

É possível ver na Figura 18 o frame fabricado em aço 1020 bem como sua conexão com a base da impressora. Em vermelho, está evidenciado que, devido às margens de tolerância dimensional da máquina responsável pelo corte da chapa de aço 1020, a distância entre os dois pontos indicados, responsáveis por alojar as hastes de sustentação da base, divergem em 0.5 mm do projetado teoricamente.

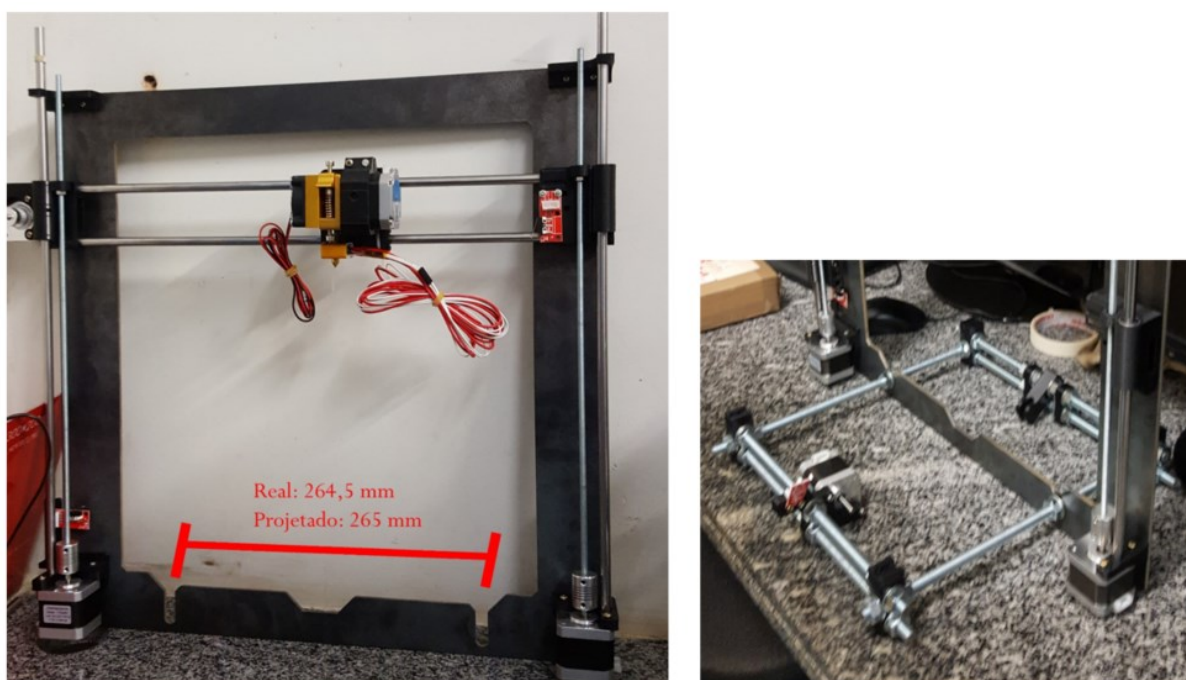


Figura 18. Montagem do frame principal e divergências real *versus* projetado.

Esta divergência de 0.5 mm impacta principalmente no posicionamento dos rolamentos lineares encontrados na estrutura da cama aquecida, uma vez que seu alinhamento com os eixos lineares retificados que se encaixam na base deve ser preciso o suficiente para permitir que a mesa aquecida corra sem interferência ao longo do eixo *Y*.

Desta maneira foi alterado o projeto inicial onde o suporte para a mesa aquecida, local onde haveria o encaixe dos rolamentos lineares, que seria produzido com o mesmo método e material do frame principal, para uma opção mais simples, leve e que seria possível adaptar-se as divergências de distância encontradas. Conforme figura abaixo é possível observar-se que a solução encontrada foi a de utilizar-se uma chapa de madeira como suporte para a cama aquecida e peças impressas em outra impressora 3D para os rolamentos lineares onde o

posicionamento destes suportes poderia ser modulado de acordo com a furação na placa de madeira (Figura 19).

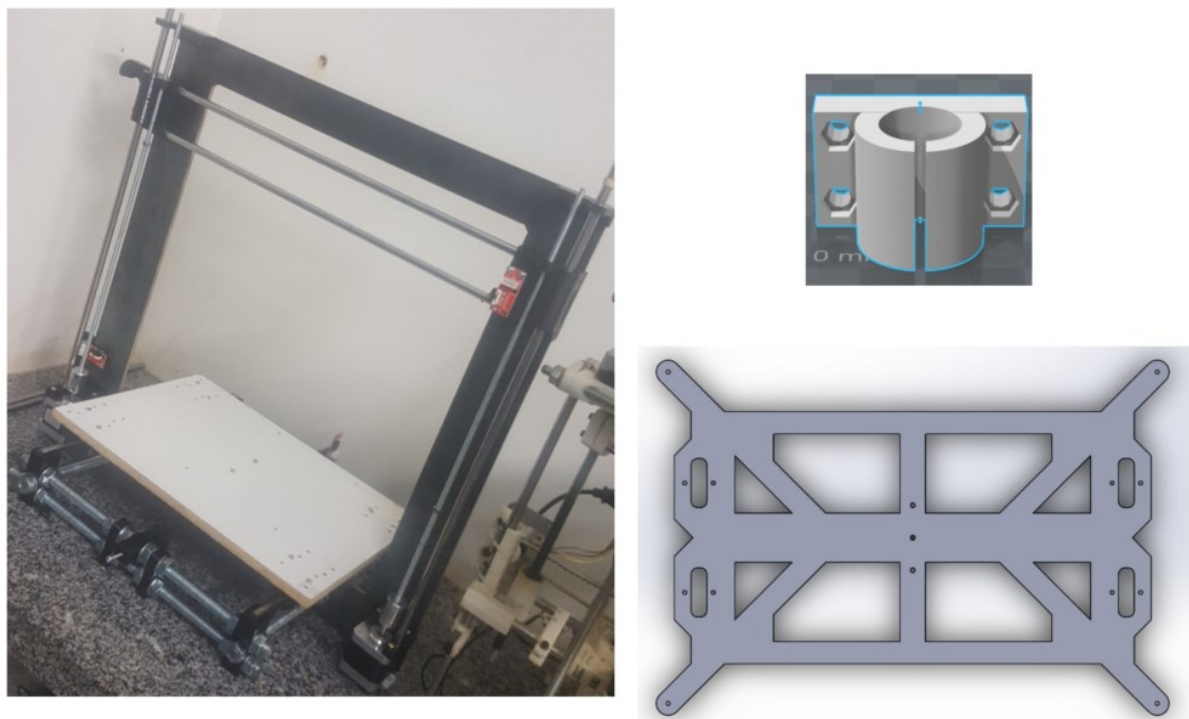


Figura 19. Montagem da base com suporte de madeira, peça impressa para apoio do rolamentos lineares e projeto inicial.

Devido a maior espessura da placa de madeira em relação ao projeto inicial em aço, a altura em Z total da base mais a mesa aquecida da impressora foi incrementada, assim o suporte para sensor de mecânico de fim de curso relativo ao eixo Z também teve seu projeto alterado aumentando-se em cerca de 20 mm a altura do suporte (Figura 20).

Foi notado durante os primeiros ensaios um sobreaquecimento dos cabos de alimentação para a mesa aquecida, causando uma queda de tensão de cerca de 1,0 V entre os terminais do cabo, fazendo assim com que a mesa aquecida apresentasse dificuldade em chegar na temperatura de *set-point* preterida (Figura 21).

Visando sanar ambos os problemas, foi trocado os cabos por outros com a secção transversal maior e aumentado na fonte chaveada a tensão nominal de 12,33 V para 13,5 V a fim de que fosse garantido a alimentação correta de 12 V na entrada de alimentação da mesa aquecida. Após a troca do cabo, as perdas no cabo passaram para a casa dos 0,2 V.

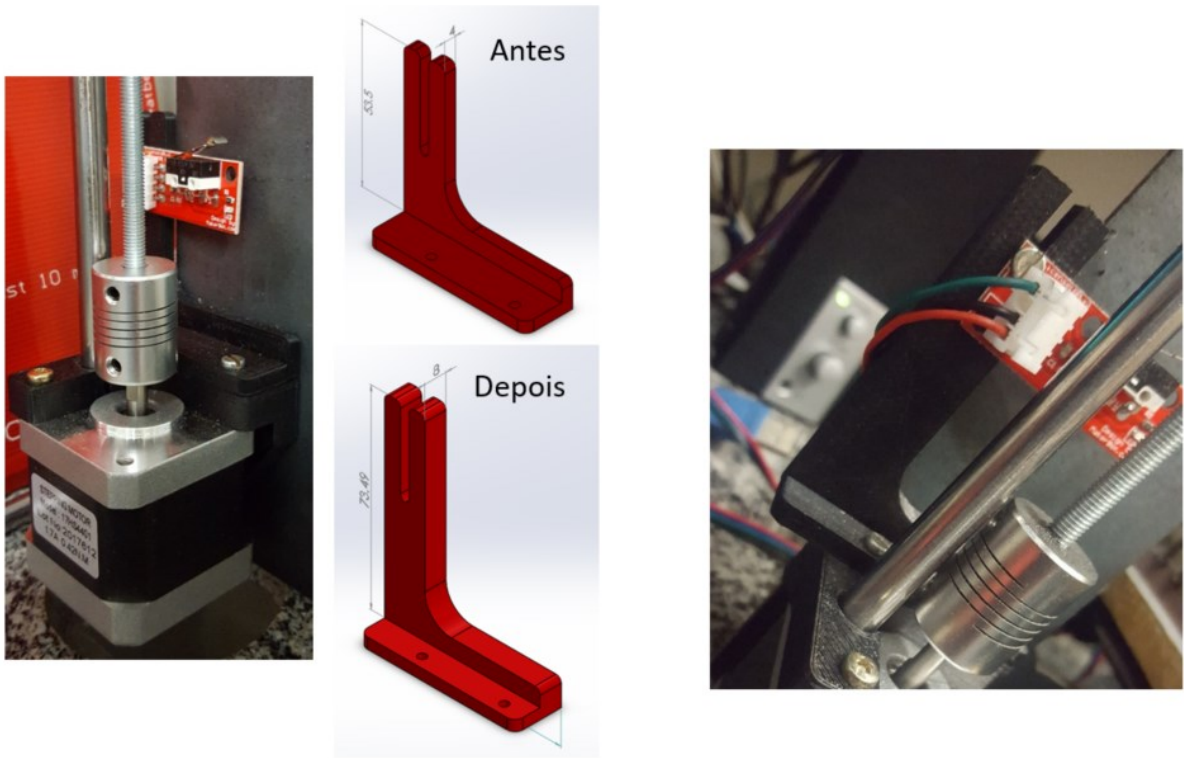


Figura 20. Antes e depois das alterações do suporte do sensor de fim de curso relativo ao eixo Z.

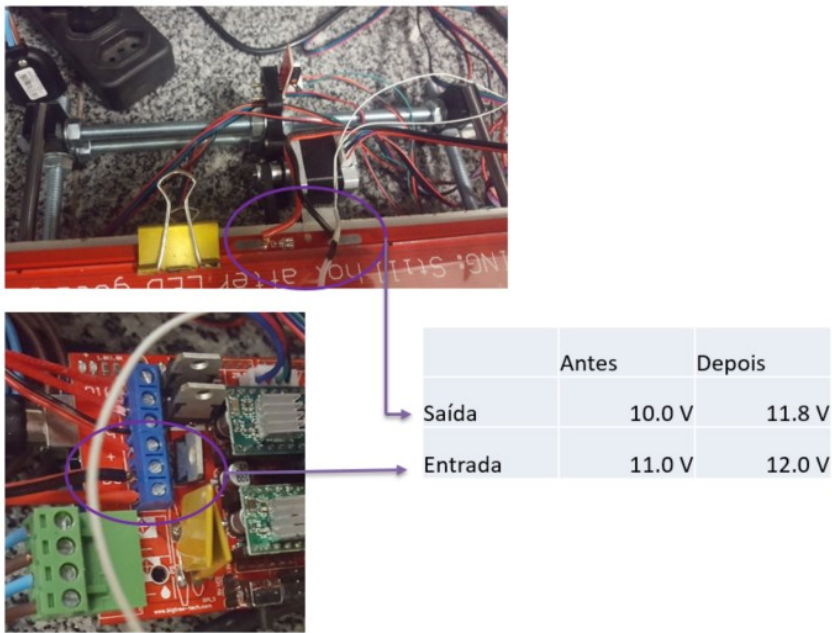


Figura 21. Perdas devido sobreaquecimento do cabo.

4.2 RESULTADOS

Após sanado os problemas encontrados, foi realizado os testes de movimentação dos eixos *X*, *Y* e *Z* de maneira individual através da utilização do software de controle *Repetier* que possui em sua interface a opção de movimentação de cada um dos eixos. Para cada destes mais a extrusora foram enviados comandos via software para que houvesse o deslocamento de 50mm a partir da posição inicial, em seguida era realizado uma marca nos eixos retificados com caneta esferográfica e medido com um paquímetro para que houvesse o confronto entre a deslocamento virtual *versus* real. Em todos os eixos e extrusora os valores calculados através do cálculo da resolução teórica se mostraram verdadeiros não sendo necessário realizar alterações de parâmetros.

Após a montagem final do projeto da impressora foi possível constatar um volume de impressão de 300 mm x 280 mm x 150 mm para respectivamente os eixos de movimentação *Z*, *X*, *Y* frente aos 300 mm x 300 mm x 200 mm estipulados como especificações de projeto. Para o eixo *X* a diferença de 20 mm ocorreu devido ao volume projetado no sentido de movimentação do eixo *X* causado pelo acoplamento do motor de passo e do ventilador na extrusora presentes na solução comercial MK8, quanto ao eixo *Y*, devido ao fato de não ter sido considerado durante o dimensionamento da estrutura da impressora o volume ocupado pela guia que sustenta o rolamento da correia que passa pelo eixo *Y*, que possui aproximadamente 50 mm, ocorreu esta divergência entre os resultados teóricos e práticos, porém esta problemática é facilmente resolvida com a substituição das hastes roscadas e eixos retificados da base da impressora por outros com dimensões 50 mm maiores.

Para iniciar os testes de impressão, foi necessário primeiro fazer as configurações do *software* de fatiamento Slic3r de acordo com as configurações da máquina e do material a ser extrudado.

O material utilizado foi o ABS preto com 1.75 mm de diâmetro. Finalmente foram feitos os primeiros testes utilizando-se da impressora. Para isso foi carregado um arquivo 3D de um cubo com as arestas de 20 mm no slic3r para ser fatiado automaticamente e gerar o arquivo em código G. Após sucessivos testes

Os principais parâmetros configuráveis no Slic3r para se ter uma boa impressão são mostrado a seguir:

- “bed_temperature” = 110
- “disable_fan_first_layers” = 5
- “filament_density” = 1
- “filament_diameter” = 1.75
- “filament_type” = ABS
- “fill_angle” = 45
- “fill_density” = 22%
- “fill_pattern” = rectilinear
- “first_layer_height” = 0.2
- “first_layer_speed” = 40%
- “first_layer_temperature” = 250
- “infill_overlap” = 15%
- “infill_speed” = 60
- “interface_shells” = 0
- “layer_height” = 0.2
- “max_fan_speed” = 50
- “max_layer_height” = 0
- “max_print_speed” = 80
- “nozzle_diameter” = 0.4
- “small_perimeter_speed” = 15

A Figura 22 mostra a qualidade de impressão alcançada com a impressora utilizando-se dos parâmetros acima. Dimensões encontradas cubo teste com arestas de 20 mm

X= 19,7 mm Y=18,9 mm Z=19,5mm

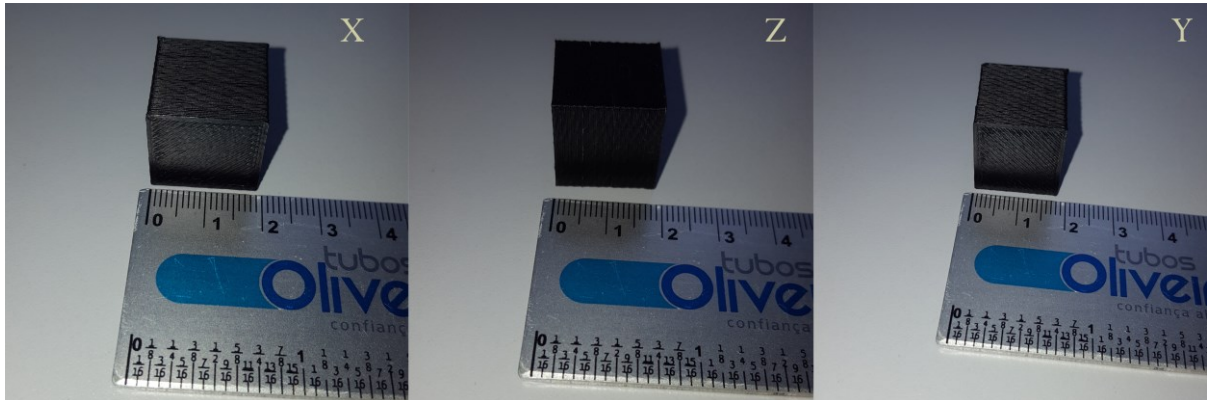


Figura 22. Dimensões e qualidade de impressão em peça impressa pela impressora 3D.

Na Figura 23 é possível ver a montagem da impressora finalizada.

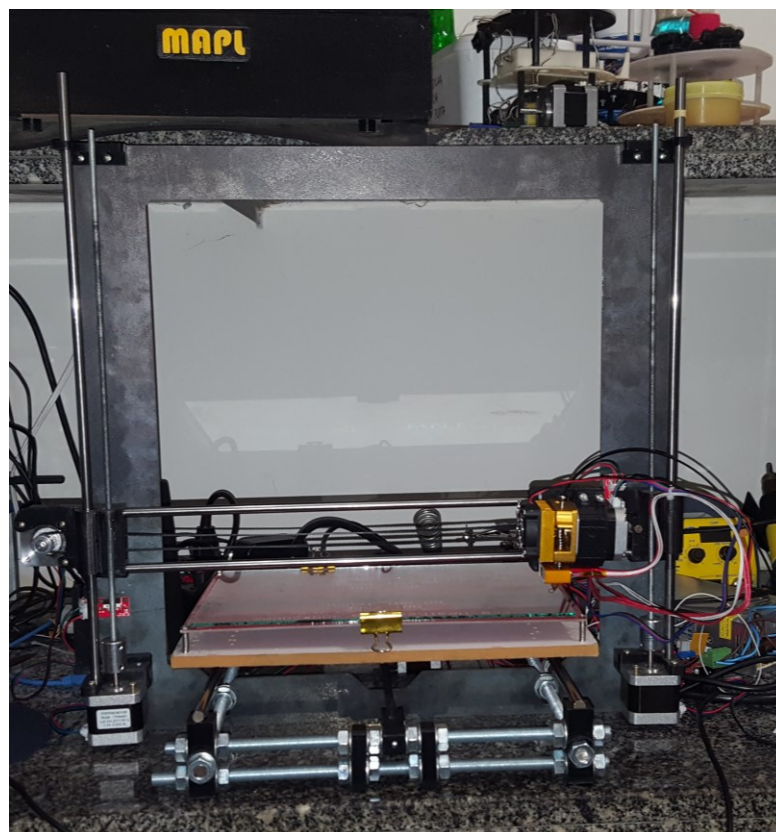


Figura 23. Montagem final da impressora 3D.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido neste trabalho, em suma, atende parcialmente as especificações e todos os objetivos gerais e específicos propostos. Dessa maneira foram estipulados os requisitos da impressora bem como os componentes e desenhos CAD, detalhando partes e conjuntos para a confecção das peças em ABS através da impressora já disponível no laboratório MAPL, para que fosse possível dar seguimento ao projeto estrutural da impressora 3D. Em seguida foi confeccionada o frame principal da estrutura responsável por apoiar os eixos de movimentação X e Z da impressora em uma empresa terceira para ai então montar-se a impressora com todos os componentes e peças. Após esta etapa foram aplicados os projetos de controle da impressora através do *firmware* Marlin e dos *software* Repetier e *software* de fatiamento Slic3r para que fosse gerado um código G, através de um arquivo tridimensional computadorizado, correspondente aos movimentos necessários de execução pela impressora.

O conteúdo desta monografia se inicia contextualizando ao leitor sobre o advento e os princípios básicos da tecnologia relacionada a criação de objetos tridimensionais camada a camada, a partir de um modelo gerado computacionalmente, detalha as principais aplicações e benefícios da tecnologia, situa sobre as tendências da indústria sobre o uso da manufatura aditiva como um marco dos processos de manufatura e descreve os principais tipos de tecnologia relacionadas à temática como o 3DP, SLA, SLS e FDM.

Em seguida é detalhado os principais objetivos que se pretendem alcançar com o projeto, desenvolvendo através do *software* solidworks a modelagem do projeto em CAD, facilitando a análise, identificação e correção de falhas e dificuldades técnicas encontradas ao longo do projeto.

Através do firmware Marlin, foi realizado a interpolação entre o dispositivo de controle, composto por um Arduino Mega 2560 acoplado a um *shield* RAMPS, e o software dedicado *Repetier* em conjunto com o software de fatiamento Slic3r. Estes softwares foram de extrema importância visto que possuem parâmetros configuráveis o que possibilita o melhor entendimento sobre o assunto e a busca por resultados melhores e mais otimizados para a aplicação desenvolvida.

A estrutura geral da máquina manteve-se sólida e rígida para todos os testes e modificações realizadas e a resolução dos eixos e extrusora atendem com folga as especificações estipuladas no projeto.

Os testes de movimentação foram satisfatórios com todos os eixos se deslocando em valores real *versus* virtual muito próximos, porém as dimensões reais relacionadas ao volume de impressão encontradas no eixo Y ficaram um pouco aquém do estipulado inicialmente no projeto devido ao tamanho das hastes roscadas presentes no eixo Y, divergindo assim aproximadamente 50 mm dos 200 mm estipulados para este eixo de acordo com as especificações iniciais. Testes de impressão indicam para peças com a qualidade próxima a de impressoras encontradas comercialmente.

Em suma o projeto deu a possibilidade ao autor de exercitar seu raciocínio lógico através de um projeto prático e que cobre várias áreas e temáticas do conhecimento vistas durante o curso de graduação em engenharia mecatrônica, destacando-se a elaboração de projetos em CAD, implementação dos componentes necessários para automação e suas aplicações na manufatura (sensores, atuadores, controladores, componentes eletrônicos,

programas de computadores que integram este sistema), layout de máquinas, conhecimento das características técnicas, construtivas e de aplicação dos elementos de máquinas para aplicação no projeto da impressora 3D, planejamento e criação de elementos mecânicos necessários para a confecção da impressora.

Como projetos futuros para a impressora, a fim de se facilitar o uso e melhorar ainda mais a qualidade da impressão existente, temos a implementação de um display LCD onde será possível modificar valores de parâmetros relacionados à impressão de maneira autônoma ao computador em que a mesma está ligada, sendo possível também a utilização de uma cartão SD para carregamento de peças diretamente na impressora, a confecção de um sistema de treliças a fim de se melhorar a rigidez estrutural do *frame* principal e evitar assim que vibrações indesejadas interfiram na qualidade final da peça, refinamento dos parâmetros existentes no *software* Repetier, otimizando-os ainda mais para a impressora em questão, enclausuramento da impressora a fim de haver um melhor controle da temperatura do ambiente e conseqüentemente da temperatura de impressão e fixação da impressora e todos seus componentes em uma base para que haja uma movimentação de sua estrutura de maneira mais simples e efetiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, C. (2012). *Makers: a Nova Revolução Industrial*. Brasil: Alta Books.
- Andrade, T. A. (2012). *Um Estudo dos Firmwares Utilizados em Sistemas Embarcados*. Barreiras: Curso Técnico em Informática – IFBA.
- Araújo, T. (17 de 12 de 2014). *Série Motores: Introdução ao motor de passo*. Fonte: Fazedores: <http://blog.fazedores.com/serie-motores-introducao-ao-motor-de-passo/>
- Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2015). *Additive manufacturing*. Boca Raton, Florida, Estados Unidos: CRC press.
- Barnatt, C. (2016). *3D printing* (3 ed.). Explainingthefuture.com.
- Batista, B., França, P., & Queiroga, S. (2012). *Aplicabilidade dos microcontroladores em inovações tecnológicas*. Palmas -TO: VII Connepi.
- Brites, F., & Santos, V. (2008). *Motor de passo*. Niterói: Universidade Federal Fluminense.
- Earl, B. (30 de 07 de 2017). *All about step motors*. Fonte: Adafruit learning system: <https://learn.adafruit.com/all-about-stepper-motors>
- Future Lighting Solutions. (25 de 07 de 2017). *Future Eletronics*. Fonte: futureelectronics.com: <http://www.futureelectronics.com/en/Microcontrollers/microcontrollers.aspx>
- Gebhardt, A., & Hotter, J.-S. (2016). *Additive Manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. (C. Verlag, Ed.) Cincinnati, Ohio, Estados Unidos: Hanser Publications.
- Groover, M. P. (2011). *Automação Industrial e sistemas de manufatura*. São Paulo: Pearson.

- Gu, D. (2015). *Laser additive manufacturing of high-performance materials*. Nanjing, China: Springer.
- Lima, M., & Mesquita, R. (2014). *Sistema de telemetria para automatizar o abastecimento de água utilizando da plataforma Java*. Santa Rita do Sapucaí: INATEL - Instituto nacional de telecomunicações.
- Marlin. (30 de 07 de 2017). *Marlin*. Acesso em 30 de 07 de 2017, disponível em Introduction to Marlin: <http://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>
- Medeiros, I. L., Pupo, R., Kegler, A., & Braviano, G. (2 de outubro de 2014). Prototipagem rápida e design de produto assistivo. *11 P&D Design*, p. 12.
- Narayan, R. (2014). *Rapid Prototyping of Biomaterials: Principles and Application*. Sawston, UK: Woodhead Publishing.
- Proschek, D. (2012). Extruder to Recycle Plastic Milk Bottles. *University of Ulster*.
- Prusa, J. (2017). *Prusa Printers*. Acesso em 27 de 10 de 2017, disponível em Prusa Printers: <https://www.prusaprinters.org/calculator/#MotorStuffSPML>
- Pupo, R. T. (2008). *Ensino da prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção no Brasil*. Campinas: Parc.
- Rep Rap. (10 de 27 de 2017). *RAMPS 1.4*. Acesso em 27 de 10 de 2017, disponível em Rep Rap Wiki: http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4
- Repetier*. (30 de 07 de 2017). Acesso em 30 de 07 de 2017, disponível em Repetier Firmware Documentation: <https://www.repetier.com/documentation/repetier-firmware/repetier-firmware-introduction/>
- RepRap*. (27 de 07 de 2017). Fonte: http://reprap.org/wiki/Arduino_Mega_Pololu_Shield
- Richard, C., & Bishop, R. (2001). *Modern Control Systems*. Prentice Hall.
- Silva, J., Cavalcante, M., Camilo, R., Adailton, L., & Viana, E. (2014). *Plataforma Arduino integrado ao PLX-DAQ: Análise e aprimoramento de sensores com ênfase no LM35*. Feira de Santana: XIV Escola regional de computação Bahia, Alagoas e Sergipe.
- Srivatsan, T., & Sudarshan, T. (2016). *Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications*. Boca Raton, Florida, Estado Unidos: CRC Press.
- Virtual Expo Group. (25 de 07 de 2017). *Direct Industry*. Fonte: <http://www.directindustry.com/prod/atmel/product-13779-584844.html>.
- Volpato, N. (2007). *Prototipagem rápida: Tecnologias e aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher.
- Wilson, J. (2005). *Senso technology handbook*. Burlington: Elsevier.
- Zanco, W. S. (2005). *Microcontroladores PIC 16f628A/648A: uma abordagem prática e objetiva*. São Paulo: Érica.

