

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Campus DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Caio Martins Luis Pinto
Pedro Dini Magalhães

DESENVOLVIMENTO DE UMA IMPRESSORA 3D
TIPO *DELTA*

Divinópolis
2015

Caio Martins Luis Pinto
Pedro Dini Magalhães

DESENVOLVIMENTO DE UMA IMPRESSORA 3D
TIPO *DELTA*

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Controle, Eletrônica, Mecânica e Programação.

Orientador: Prof. Me. Daniel Alves Costa

Co-orientador: Prof. Me. Cláudio Parreira Lopes

Divinópolis
2015

Caio Martins Luis Pinto
Pedro Dini Magalhães

DESENVOLVIMENTO DE UMA IMPRESSORA 3D
TIPO *DELTA*

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Controle, Eletrônica, Mecânica e Programação.

Comissão Avaliadora:

Prof. Me. Daniel Alves Costa

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG *Campus V*

Prof. Me. Cláudio Parreira Lopes

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG *Campus V*

Prof. Dr. Renato de Sousa Dâmaso

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG *Campus V*

Divinópolis
2015

A TODOS AQUELES QUE DE ALGUMA FORMA ESTIVERAM E ESTÃO PRÓXIMOS DE MIM, FAZENDO ESTA VIDA VALER CADA VEZ MAIS A PENA.

Agradecimentos

- Autor 1 (Caio Martins Luis Pinto)

Agradeço em primeiro lugar, a Deus, pela força durante toda esta longa caminhada e coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades. A Ele que sempre me ajudou a seguir em frente nos momentos difíceis, me guiando e iluminando.

Agradeço, também, a minha família, em especial aos meus pais Sra. Gilca Martins Luis Pinto e o Sr. Geraldo Tadeu Luis Pinto e a minha irmã Lívia Martins Luis Pinto por compartilharem os momentos de alegrias e tristezas durante este período de graduação. Um agradecimento em especial, também, a minha namorada Mayra Dalila Justo que sempre esteve ao meu lado me apoiando e incentivando. Pela companhia e carinho dedico este trabalho a vocês.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecatrônica do CEFET-MG, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta monografia. Eu posso dizer que a minha formação, inclusive pessoal, não teria sido a mesma sem a presença destas pessoas. Junto com a direção, a administração e os funcionários do *Campus* que com certeza ajudaram para uma melhor formação acadêmica e um tornaram o ambiente de estudo mais agradável.

Dedico especial agradecimento ao Daniel Alves Costa, orientador deste trabalho e ao Cláudio Parreira Lopes, co-orientador do trabalho pela paciência na orientação, ajuda e incentivo que tornaram possível a conclusão deste TCC.

Aos amigos de graduação que sempre estiveram presentes durante esta caminhada e pelo companherismo e tempo de convivência compartilhado. Agradeço em especial o aluno Pedro Dini Magalhães, meu companheiro na realização deste projeto, pela sua dedicação e comprometimento.

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma doaram um pouco de si para que a conclusão deste trabalho se tornasse possível.

-
- Autor 2 (Pedro Dini Magalhães)

Agradeço aos meus pais Altamiro e Sandra, à minha irmã Júnia, meus avós Oléria, Altamiro e Maria por todo apoio e carinho nesta caminhada. Um agradecimento especial a minha namorada Thaís Oliveira por todo carinho, amor, compreensão e apoio em todos os momentos.

Agradeço também toda minha família, principalmente minhas madrinhas Netinha e Heloísa, e padrinhos Welington e Marcelo.

Aos meus amigos, com destaque especial ao colega André Lucas, obrigado por tudo, pois sem vocês esta caminhada não seria completa. E mesmo que a distância nos separe, torço pelo sucesso de vocês, me lembrarei sempre dos momentos de alegria que me proporcionaram.

Um grande agradecimento ao colega e parceiro de trabalho Caio Martins Luis Pinto por toda luta e empenho neste trabalho, pois juntos conseguimos conquistar esta vitória.

Aos professores Mestres Daniel Alves Costa e Cláudio Parreira Lopes um grande agradecimento por toda orientação, co-orientação e ajuda neste trabalho.

À Deus, agradeço pela saúde, força, fé, alegrias e grandes momentos que me destes nesta longa caminhada.

A Grande Conquista é o resultado de pequenas vitórias que passam despercebidas.

Paulo Coelho

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

Resumo

Este trabalho aborda o estudo do processo de impressão tridimensional e o desenvolvimento de uma impressora 3D tipo *delta* para a produção de peças de plástico. A técnica de impressão 3D consiste na obtenção de um corpo sólido a partir do modelo computacional, através do fatiamento deste modelo e da impressão sequencial de suas respectivas camadas. A revisão bibliográfica apresenta informações sobre os componentes construtivos da máquina assim como dados sobre os materiais comumente impressos. É apresentado o passo a passo do projeto e construção de uma impressora 3D (mesa aquecida, o *hot end*, extrusora e estrutura) assim como as etapas necessárias para sua calibração. Foram feitos estudos sobre o aquecimento da mesa e do bico de modo a melhorar a eficácia destas partes com relação às encontradas no mercado. Sensores foram analisados com o intuito de propor uma nova ideia de nivelamento da base de impressão. Como resultado deste trabalho foi obtida uma impressora 3D tipo delta com soluções originais e econômicas. Alguns conceitos ainda necessitam de melhorias, mas os resultados foram considerados satisfatórios.

Palavras-chave: Impressora 3D. Mesa aquecida. *Hot end*. Aquecimento.

Abstract

This work focuses on the study of three dimensional printing process and the development of a delta 3D printer for the production of plastic parts. The 3D printing technique is to obtain a solid body from the computational model by slicing of the model and printing sequence of the respective layers. The literature review provides information on the building components of the machine as well as data on commonly printed materials. It is presented step by step of the project and building of a 3D printer (heated platen, the hot end, extruder and structure) as well as the steps required for calibration. Studies were conducted on heatbed and the hot end in order to improve the effectiveness of these parts comparing to those found in the market. Sensors were analyzed in order to propose a new idea of bed auto levelling. As a result of this work a delta type 3D printer was obtained with original solutions and economic. Some concepts still need improvement, but the results were considered satisfactory.

Keywords: 3D printer. Heatbed. Hot end. Heating.

Sumário

Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xv
Lista de Acrônimos e Notação	xvi
1 Introdução	1
1.1 Definição do Problema	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos do Trabalho	3
1.4 Estado da arte	3
1.5 Organização do Documento	4
2 Referencial Teórico	5
2.1 Manufatura aditiva	5
2.2 Obtenção de peças usando impressão 3D	7
2.3 Princípio básico de funcionamento	8
2.3.1 Criação de um modelo de CAD	8
2.3.2 Conversão para o formato STL	9
2.3.3 Fatiamento do arquivo	9
2.3.4 Construção do modelo de camadas	9
2.4 Impressoras 3D no mercado	10
2.5 Materiais impressos	11
2.5.1 ABS	12
2.5.2 PLA	12
2.5.3 Comparações	12
2.5.4 Materiais no mercado	14
2.6 Fundamentação teórica	14
2.6.1 Princípios da termodinâmica	14
2.6.2 Mesa de impressão	15
2.6.3 Controladores de potências	15
2.6.4 O conceito de extrusão	16
2.6.5 Motores de passo	18
2.6.6 Eletrônica de controle	19
2.6.7 Sensores	23
2.6.8 <i>Firmware</i> de uma impressora 3D	26

3	Metodologia	27
3.1	Projeto estrutural da impressora 3D	27
3.1.1	Dimensionamento da impressora 3D	27
3.1.2	Desenho estrutural da impressora	28
3.1.3	Desenho da estrutura <i>delta</i>	30
3.2	Projeto da extrusora <i>bowden</i>	30
3.3	Projeto da mesa aquecida	32
3.4	Controle da mesa aquecida	35
3.4.1	Eletrônica de controle	35
3.4.2	Controlador PID	36
3.5	Projeto do bico aquecido	38
3.6	Programação da impressora 3D	40
3.7	Calibração da impressora 3D	41
4	Resultados obtidos	44
4.1	Desenvolvimento da mecânica da impressora 3D tipo delta	44
4.2	Movimentação da impressora	45
4.3	Bico aquecido	48
4.4	Mesa aquecida	50
5	Conclusões	51
6	Projetos para trabalhos futuros	52
A	Apêndice - códigos	53
A.1	Projeto térmico da mesa aquecida	53
B	Apêndice	60
	Referências	63

Lista de Figuras

2.1	Fabricação aditiva (WIKIMEDIA, 2014).	5
2.2	Fabricação aditiva (FOGGIATO <i>et al.</i> , 2004).	6
2.3	Esquemático do funcionamento da impressora 3D (ROCHA, 2013).	7
2.4	Principais etapas do processo de manufatura por camada (HOTZA, 2009).	8
2.5	Impressora 3D <i>prusa</i> (REPRAP, 2014).	11
2.6	Impressora 3D <i>delta</i> (REPRAP, 2014).	11
2.7	Diagrama tensão/deformação (FOGGIATO <i>et al.</i> , 2004).	13
2.8	Modo de operação de um <i>dimmer</i> (BRAGA, 2014).	16
2.9	O processo de extrusão (BRUCE, 2014).	16
2.10	Extrusora Direta (START3DPRINTING, 2013).	17
2.11	Extrusora <i>bowden</i> (START3DPRINTING, 2013).	18
2.12	Motor unipolar (VIVALDINI, 2009).	19
2.13	Motor bipolar (VIVALDINI, 2009).	19
2.14	<i>Arduino Mega</i> (REPRAP, 2014).	20
2.15	Placa <i>shield</i> (PRINTERSKETCH3D, 2013).	21
2.16	Placa A4988 (ALMIR, 2014).	21
2.17	Esquemático da eletrônica de controle (PRINTERSKETCH3D, 2013).	23
2.18	Comportamento de um termistor (MACIEL, 2014).	24
2.19	Esquemático da chave fim de curso (WENDLING, 2010).	25
2.20	Sensor piezoelétrico (SMAR, 2013).	25
3.1	Maquete Impressora 3D <i>delta</i> .	28
3.2	Parte estrutural da impressora 3D <i>delta</i> .	29
3.3	Estrutura <i>delta</i> .	30
3.4	Extrusora <i>bowden</i> .	31
3.5	Camadas da mesa aquecida.	32
3.6	Modelo de uma mesa aquecida.	33
3.7	Formato e trilhas da mesa aquecida.	34
3.8	Esquemático de um <i>dimmer</i> .	35
3.9	Lugar das raízes.	36
3.10	Resposta do sistema com controlador PID.	37
3.11	Bico aquecido.	38
3.12	Bloco aquecedor.	39
3.13	Bloco dissipador.	39
3.14	Simulação do bloco dissipador.	40
3.15	<i>Interface Repetier-Host</i> .	41

3.16	Parâmetros <i>delta</i> (ELECTRONHACKS, 2014).	42
4.1	Impressora 3D tipo <i>delta</i> - projeto final.	44
4.2	Plotagem da garra.	45
4.3	Cubo impresso.	46
4.4	Braço impresso.	47
4.5	Engrenagem impressa.	47
4.6	Bico aquecido.	48
4.7	Temperatura no bico aquecido.	49
4.8	Extrusão do bico aquecido.	49
4.9	Gráfico da mesa aquecida.	50
B.1	Sistema de troca de calor	60
B.2	Sistema de resistências térmicas	61

Lista de Tabelas

2.1	Relação de impressoras 3D (3DIMPRESSOES, 2013).	10
3.1	Potência x tempo	33
3.2	Parâmetros das trilhas da mesa aquecida	35
3.3	Alocação dos polos e zero e período	37
3.4	Valores utilizados para a calibração	41
3.5	Parâmetros da calibração <i>delta</i>	43
4.1	Parâmetros da impressora 3D	45
4.2	Primeira impressão de um cubo.	46
4.3	Parâmetros da segunda impressão.	46
4.4	Parâmetros da terceira impressão	47
4.5	Temperatura nas regiões do bico aquecido.	48
B.1	Orçamento	62

Lista de Acrônimos e Notação

<i>2D</i>	<i>Second dimension</i> (segunda dimensão)
<i>3D</i>	<i>Third dimension</i> (terceira dimensão)
<i>A</i>	Ampere
<i>ABS</i>	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i> (acrilonitrila butadieno estireno)
<i>AM</i>	<i>Additive Manufacturing</i> (manufatura aditiva)
<i>BAL</i>	<i>bed auto leveling</i> (auto nivelamento da mesa)
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i> (desenho assistido por computador)
<i>CN</i>	Controle numérico
<i>FDM</i>	<i>Fused Deposition Modelling</i> (deposição de material fundido)
<i>h</i>	Coefficiente de convecção
<i>I2C</i>	<i>Intelligent interface controller</i> (controlador de interface inteligente)
<i>k</i>	Kelvin
<i>LOM</i>	<i>Laminated object manufacturing</i> (manufatura de objetos em lâminas)
<i>mm</i>	milímetro
<i>MHZ</i>	<i>Mega hertz</i>
<i>NTC</i>	Coefficiente negativo de temperatura
<i>PID</i>	Proporcional integral derivativo
<i>PLA</i>	<i>Polylactic acid</i> (Ácido poliático)
<i>PTC</i>	Coefficiente positivo de temperatura
<i>RP</i>	<i>Rapid prototyping</i> (prototipagem rápida)
<i>PWM</i>	<i>Pulse width modulation</i> (modulação por largura de pulso)
<i>RMS</i>	<i>Root mean square</i>
<i>SD</i>	<i>Secure digital</i> (segurança digital)
<i>SLA</i>	<i>Stereolithography</i> (Estereolitografia)
<i>SLS</i>	<i>Selective Laser Sintering</i> (Sinterização Seletiva a Laser)
<i>SPI</i>	<i>Serial peripheral interface</i> (Interface periférica serial)
<i>UART</i>	<i>Universal asynchronous receiver/transmitter</i>
<i>USB</i>	<i>Universal serial bus</i>
<i>V</i>	Volt

Introdução

1.1 Definição do Problema

Neste Trabalho de Conclusão de Curso aborda-se um projeto de desenvolvimento e construção de uma impressora 3D para impressão de peças de pequeno porte, atividade que contempla os eixos do curso de Engenharia Mecatrônica nas áreas de Mecânica, Eletrônica, Computação e Controle.

Esta proposta será desenvolvida em dupla, com graduandos do curso, sendo as tarefas assim determinadas:

Autor 1 (Caio Martins Luis Pinto): responsável por: 1) Projeto e fabricação dos componentes mecânicos do cabeçote da impressora 3D; 2) Projeto e fabricação da mini extrusora; 3) Projeto da parte eletrônica responsável pelo aquecimento do cabeçote e da mesa aquecida; 4) Estudo das propriedades termodinâmicas para o controle da temperatura da mesa aquecida; 5) Calibração da movimentação da impressora e dos sensores; 6) Estudo do *software Slicer*.

Autor 2 (Pedro Dini Magalhães): responsável por: 1) Projeto e fabricação dos componentes mecânicos da estrutura da impressora 3D; 2) Projeto eletrônico para controle dos motores e sensores; 3) Programação utilizando *firmware* de código aberto para controlar a impressora. 4) Calibração do nivelamento da mesa aquecida; 5) Estudo do *software Repetier-Host*.

1.2 Motivação

Segundo Fiprototipos (2014) as impressoras 3D abrem concorrência com máquinas de usinagem usadas há anos no mercado. Esta máquina é capaz de construir protótipos precisos em tempos bem inferiores aos obtidos com métodos tradicionais. Com este fato, é possível reduzir custos e riscos, desenvolvendo produtos como ferramentas de aprovação para clientes. A validação visual das peças pode-se aplicar a grandes indústrias ou projetos residenciais.

Além destes, a prototipagem traz vantagens como:

- Impressão das mais complexas geometrias e pequenos detalhes;
- A facilidade de duplicação dos modelos;
- Cópias podem ser feitas em várias escalas;
- Minimizar problemas de engenharia como encaixes, montagens, interferências.

A utilização de prototipagem rápida pela indústria tem como principal área a de produtos eletrônicos de consumo, abrangendo a maior parte do mercado, seguida pela automobilística. Com a evolução da tecnologia, esse processo já é utilizado para produção da peça final.

Conforme Fiprototipos (2014) arquitetos e engenheiros civis estão produzindo maquetes por aproximadamente um quarto do valor que seria gasto normalmente, fora o tempo que chega a ser instantâneo em relação ao que seria gasto pelo profissional manualmente; a completa ausência de materiais tóxicos durante a fabricação; facilidade de limpeza e acabamento nos oferece uma máquina que é de extrema importância e utilidade tanto na indústria como em pequenos negócios.

Segundo Fiprototipos (2014) a indústria médica está cada vez mais aplicada na utilização deste recurso para produção de partes do corpo humano tanto para implantes como para próteses para pessoas que tiveram acidentes de carros, perderam membros, pessoas que têm deficiência ou nasceram sem partes do corpo. O impressionante perfeccionismo dos produtos da prototipagem fornece esta abrangente área de aplicação, tanto na área da saúde (impressão de órgãos e tecidos) como até para grandes indústrias.

A tecnologia da prototipagem rápida já apresenta relatos de grande sucesso nas áreas de medicina e odontologia. O uso de biomodelos tem permitido diminuir o tempo das

intervenções cirúrgicas, trazendo mais conforto ao paciente e diminuindo a chance de erros para o cirurgião. Dentro da odontologia destacam-se as áreas de próteses, implantes, ortodontia e cirurgias como as principais beneficiárias do uso desta tecnologia.

Em âmbito acadêmico, as máquinas de prototipagem fornecem uma gama de trabalhos para serem estudados e descobertos. Sua abrangência das 4 áreas mais importantes da engenharia: mecânica, eletrônica, programação e controle, faz com que a impressora 3D se torne um produto mecatrônico completo e de incríveis resultados. A impressão 3D já traz admiração e curiosidade a qualquer pessoa, mesmo professores, que se deparam com tamanha velocidade, precisão e capacidade de trabalho.

1.3 Objetivos do Trabalho

Desenvolver uma impressora 3D tipo *delta* para a produção de peças de pequeno porte.

- Desenvolver a estrutura mecânica do cabeçote, de uma mini extrusora e de toda a estrutura da impressora;
- Desenvolver e controlar uma mesa aquecida
- Desenvolver a programação de calibração da impressora 3D

1.4 Estado da arte

Até o presente momento podem ser encontrados vários estudos que utilizam impressoras 3D para o desenvolvimento de projetos. Segundo Digital (2014), o modelo XYZ *Printing Food* 3D permite imprimir qualquer tipo de biscoito não cozido e outros doces à base de massas em alguns minutos. O dispositivo conta com tela de 5 polegadas sensível ao toque e imprime o material comestível em camadas com larguras que variam de 0,8 a 6,4 milímetros. O tamanho da comida impressa pode chegar até cerca de 19 centímetros.

Estudantes da escola de design *ENSCI-Les atellers*, em Paris, na França, criaram o que aparenta ser a primeira máquina de impressão 3D para tatuagens(DIGITAL, 2014).

Conforme Cavalcanti (2014), com a ajuda de ortopedistas, foram feitas duas próteses de patas para um cão, utilizando uma impressora 3D, que permitiram que ele não só andasse, mas também corresse.

Segundo Uol (2014), a tripulação da ISS (Estação Espacial Internacional) produziu uma ferramenta a bordo do laboratório orbital. Depois de receber um *e-mail* enviado

da Terra, os astronautas usaram uma impressora 3D para fabricar uma espécie de chave inglesa, com desenho transmitido pela *internet*.

1.5 Organização do Documento

Para fundamentar o trabalho é inicialmente realizada no Capítulo 2 uma revisão da literatura, com foco inicial no modo de operação de uma impressora 3D e dos materiais a serem impressos. Também será mostrada neste capítulo uma relação entre prototipagem rápida e fabricação aditiva assim como as principais bases teóricas para o desenvolvimento desta máquina.

No Capítulo 3, será descrito a metodologia, onde são detalhadas as etapas do desenvolvimento de uma impressora 3D tipo delta.

No Capítulo 4 são expostos os resultados relacionados ao projeto, assim como, os problemas encontrados durante o desenvolvimento do trabalho. Já no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões feitas desta monografia. No Capítulo 6 são feitas sugestões para trabalhos futuros.

Por último, são apresentadas as referências do projeto.

Referencial Teórico

Este capítulo descreve os conceitos referentes ao projeto e as principais tecnologias sobre modelagem de sólidos que contribuem para a manufatura aditiva.

2.1 Manufatura aditiva

Os processos denominados de manufatura aditiva (AM - *Additive Manufacturing*), ou inicialmente conhecidos como de prototipagem rápida (RP) apareceram comercialmente no final da década de 80 (VOLPATO, 2007). A AM é definida como um processo de fabricação no qual um modelo físico é fabricado pela adição de material em camadas sucessivas a partir de um modelo tridimensional gerado em um programa CAD (*Computer Aided Design*) (GRIMM, 2004). Este processo pode ser observado na Figura 2.1.

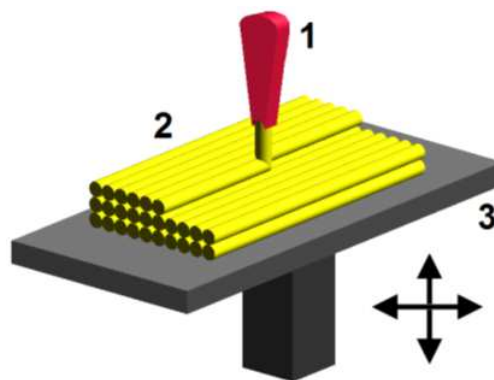


Figura 2.1: Fabricação aditiva (WIKIMEDIA, 2014).

Segundo Zancul (2013) uma das principais vantagens da manufatura aditiva é a flexibilidade para produzir peças a partir do seu projeto em 3D, sem a necessidade de ferramental especial, como moldes, que são caros. Por isso, exigem produção em alta escala, para que o investimento possa ser diluído pelo alto volume de peças. Com a manufatura

aditiva, é possível atender necessidades específicas de clientes, mesmo trabalhando com baixos volumes. Outra vantagem da manufatura aditiva é a possibilidade de fabricar peças com geometrias extremamente complexas, difíceis de serem obtidas por meio de processos tradicionais de manufatura.

A principal desvantagem deste processo é o tempo gasto. A velocidade da impressão 3D é muito menor, se comparada com o tempo gasto na produção com injetoras de plástico. Assim sendo, este processo se torna ineficaz para uma produção em série.

Atualmente, existe um grande número de tecnologias de prototipagem rápida disponíveis no mercado. Entretanto, 4 delas se destacam: estereolitografia (SLA - *Stereolithography*), sinterização seletiva a laser (SLS - *Selective Laser Sintering*), manufatura de objetos em lâminas (LOM - *Laminated object manufacturing*), modelagem por deposição de material fundido (FDM - *Fused Deposition Modelling*) (CHEN, 2000). Este trabalho de conclusão de curso se concentrou na tecnologia FDM, por ser aquela que oferece equipamentos de menor custo (KOCHAN, 2000).

O processo de prototipagem rápida, denominado FDM utiliza um cabeçote extrusor de filamentos para construir objetos pela fusão e deposição adjacente de filamentos em diversos materiais (FOGGIATTO *et al.*, 2004). Este processo é mostrado na Figura 2.2.

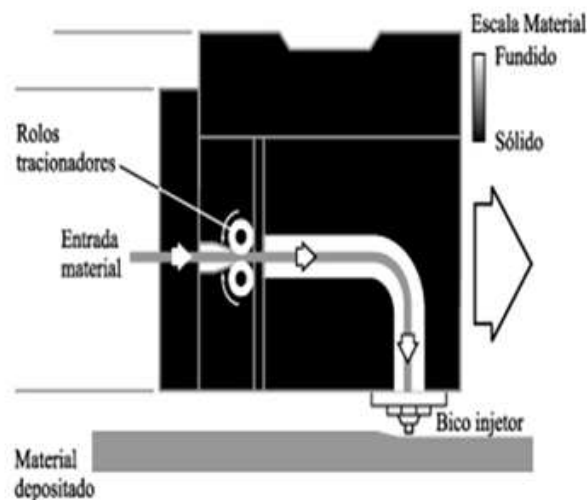


Figura 2.2: Fabricação aditiva (FOGGIATTO *et al.*, 2004).

A FDM se baseia na deposição, sobre uma plataforma, de camadas resultantes do aquecimento e amolecimento de filamentos do material plástico destinado à confecção do modelo. Simultaneamente, outros fios amolecidos vão formando suportes para as superfícies livremente suspensas do modelo, a fim de que elas possam ser construídas.

A partir do protótipo gerado, a equipe de projeto pode analisar o produto adotado como referência, testar suas especificações, testar situações de manufatura ou montagem, propor alterações dimensionais ou construtivas e estabelecer as possíveis melhorias a serem feitas no produto final a ser desenvolvido (MELLO *et al.*, 2011).

2.2 Obtenção de peças usando impressão 3D

A Figura 2.3 representa uma esquematização do funcionamento da impressora 3D. Segundo Rocha (2013), um desenho tridimensional é feito no computador utilizando diferentes tipos de *software* como *AutoCad*, *Solidworks*, entre outros (ver Figura 2.3, item 1); com um *software* da impressora, o usuário ajusta o tamanho e os detalhes do objeto que será modelado (Figura 2.3, item 2); então o desenho é enviado para a impressora onde a máquina seleciona o material a ser usado (Figura 2.3, item 3); em seguida, a impressora sobrepõe as camadas, enquanto a base de sustentação desce de acordo com a impressão do objeto, até que ele seja finalizado (Figura 2.3, item 4). O tempo de impressão varia conforme o tamanho do objeto como, por exemplo, uma peça pequena com um tamanho de 50mm de largura e 10mm de espessura e 10mm de altura é feita em vinte minutos. A Figura 2.3 representa um esquema do funcionamento da impressora 3D.

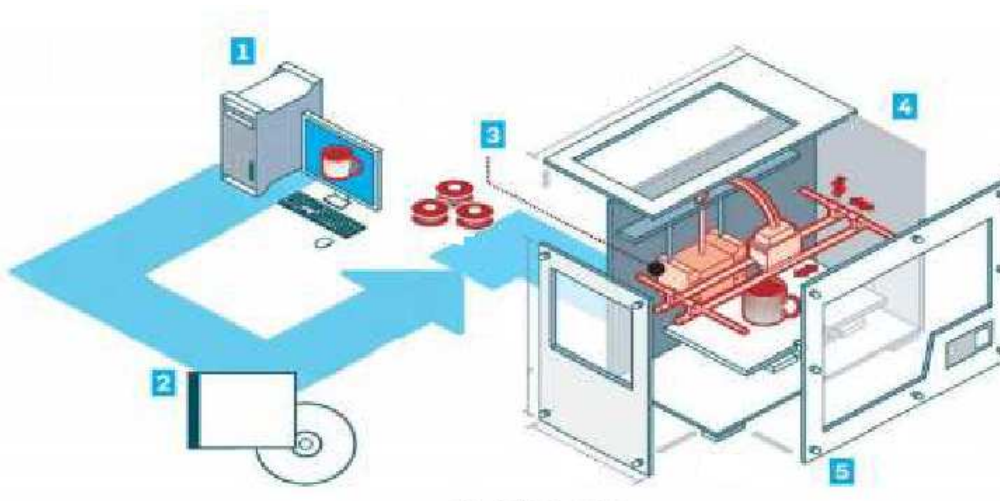


Figura 2.3: Esquemático do funcionamento da impressora 3D (ROCHA, 2013).

2.3 Princípio básico de funcionamento

Segundo Hotza (2009), todas as técnicas de prototipagem rápida empregam o mesmo processo básico de 4 passos, conforme mostrado na Figura 2.4.

- Criação de um modelo de CAD do projeto (Figura 2.4 a)
- Conversão do modelo de CAD para um formato STL (Figura 2.4 b)
- Fatiamento do arquivo STL em camadas finas de seção transversal (Figura 2.4 c,d,e)
- Construção do modelo de camada sobre camada (Figura 2.4 f)

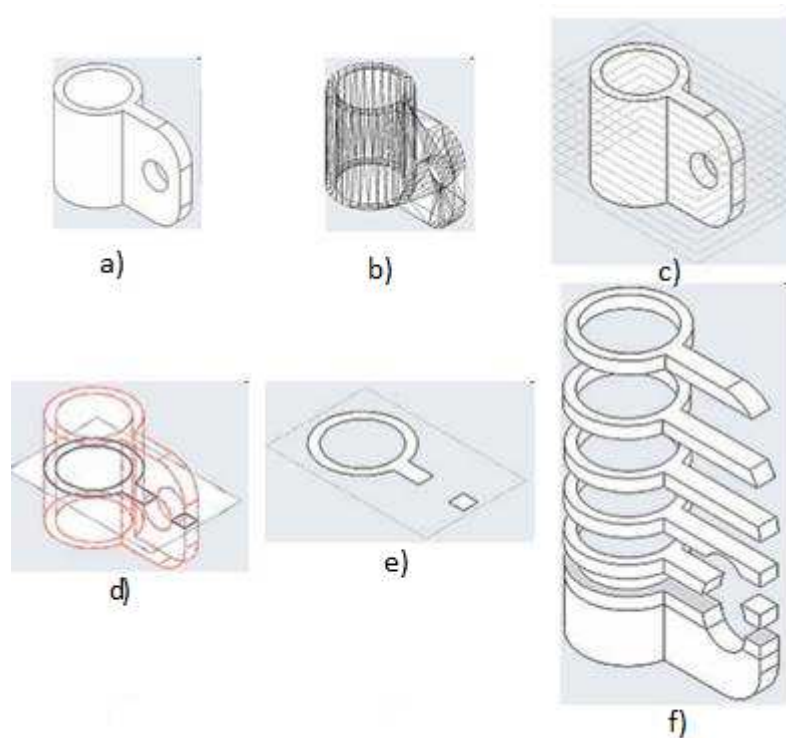


Figura 2.4: Principais etapas do processo de manufatura por camada (HOTZA, 2009).

2.3.1 Criação de um modelo de CAD

Inicialmente, Hotza (2009) aborda que o primeiro passo no processo de obter um modelo em 3D é criar um desenho em 3D ou utilizar desenhos já existentes.

2.3.2 Conversão para o formato STL

Segundo Hotza (2009), vários *softwares* de CAD usam algoritmos diferentes para simular objetos sólidos. Por isso, foi necessário padronizar e foi adotado o formato STL como o padrão da indústria de prototipagem rápida.

O segundo passo é converter o arquivo de CAD para o formato STL. Esta forma representa uma superfície tridimensional como uma montagem de triângulos planares. O arquivo contém as coordenadas dos vértices e a direção da normal externa de cada triângulo. Como o arquivo STL usa elementos planares, estes não podem representar curvas de modo exato, por isso, aumenta o número de triângulos e melhoram a aproximação, porém às custas de um arquivo maior.

2.3.3 Fatiamiento do arquivo

Para o terceiro passo, conforme Hotza (2009), um programa de pré-processamento prepara o objeto contido no arquivo STL para ser construído. Vários programas estão disponíveis, e a maioria permite ao usuário ajustar o tamanho, localização e orientação do modelo. O *software* de pré-processamento fatia o modelo STL em várias camadas de 0,01 mm a 0,7 mm de espessura, dependendo da técnica de construção. O programa também pode gerar uma estrutura auxiliar para apoiar o modelo durante a construção. Apoios são úteis para características delicadas como partes pendentes, cavidades internas e seções de parede fina. Cada empresa fabricante de máquina de prototipagem fornece um *software* de pré-processamento apropriado.

2.3.4 Construção do modelo de camadas

O *software* de fatiamento gera várias linhas de códigos, que são o chamado código G, contendo as instruções dadas à máquina.

O código G é o nome comum para uma linguagem de programação de controle numérico (CN) e atualmente é usado amplamente na fabricação assistida por computador. Este sistema de linguagem foi padronizado pela norma ISO 6983 (2009), que descreve o formato das instruções do programa para máquinas de CN. Esta norma trata-se de um formato geral de programação e não um formato para um tipo de máquina específica.

Segundo Hotza (2009), o quarto passo é a construção real da peça. Usando uma entre várias técnicas, as máquinas de prototipagem rápida constroem uma camada de cada vez a partir de um polímero, papel, pó metálico ou outro material de partida.

2.4 Impressoras 3D no mercado

A tecnologia de impressão 3D existe há mais de duas décadas, mas só agora começa a se popularizar (COSTA, 2014). Com esta popularização os preços vêm caindo. E as impressoras 3D estão se tornando mais acessíveis não só às indústrias como às pessoas leigas. A Tabela 2.1 apresenta uma relação das impressoras atualmente no mercado e respectivos valores de venda.

Tabela 2.1: Relação de impressoras 3D (3DIMPRESSOES, 2013).

Fabricante	Modelo	Tipo	Preço
<i>3D Systems</i>	<i>Cube</i>	Cartesiana	R\$5.447,00
<i>3D Systems</i>	<i>Cube II</i>	Cartesiana	R\$6.398,00
<i>3D Systems</i>	<i>Cube X</i>	Cartesiana	R\$13.490,00
<i>3D Cloner</i>	<i>St</i>	Cartesiana	R\$4.940,00
<i>MovtecH</i>	<i>Prusa Movtech Black</i>	Cartesiana	R\$3.800,00
<i>MovtecH</i>	<i>Prusa Movtech</i>	Cartesiana	R\$3.500,00
<i>Makerbot</i>	<i>Replicador 2x</i>	Cartesiana	R\$12.000,00
<i>Makerbot</i>	<i>Gigabot</i>	Cartesiana	R\$32.900,00
<i>3Dgraf</i>	<i>Rostock Max v2</i>	<i>Delta</i>	R\$7.900,00
<i>3Dgraf</i>	<i>Orion Delta</i>	<i>Delta</i>	R\$10.900,00

Dentre as impressoras que estão disponíveis no mercado, dois modelos destacam-se: a impressora linear e a impressora tipo *delta*. Um modelo de impressora linear pode ser observado na Figura 2.50

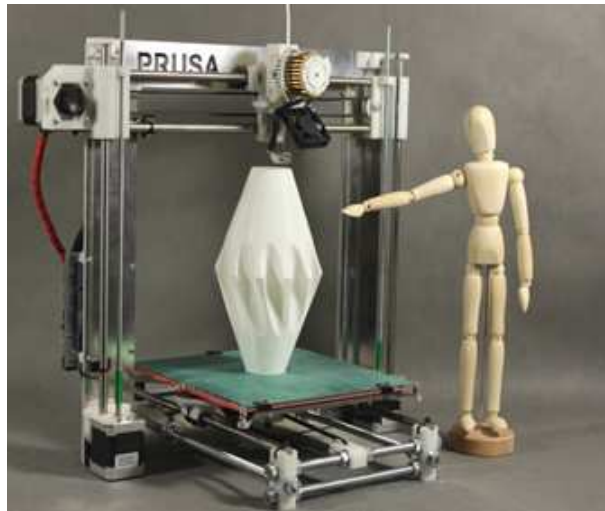


Figura 2.5: Impressora 3D *prusa* (REPRAP, 2014).

Um modelo de impressora delta pode ser visualizado na Figura 2.6.



Figura 2.6: Impressora 3D *delta* (REPRAP, 2014).

2.5 Materiais impressos

Segundo 3Ddoodler (2014), inicialmente a impressão 3D produzia apenas peças de pequeno porte e baixa complexidade com materiais pouco resistentes. Com o passar do tempo novos projetos foram desenvolvidos, e houve, conseqüentemente, uma melhoria na qualidade destes produtos, que passaram a ser maiores, mais resistentes e com geometrias mais complexas.

Atualmente, os produtos impressos em 3D estão atingindo novos patamares. Além de

terem boa qualidade, é possível, hoje, imprimir um número variado de materiais. Entre eles pode-se citar polímeros, metais, cerâmicos até ossos de animais, partes do corpo humano, comida, entre outros.

Segundo Folha (2014), além dos materiais distintos, a diversidade de geometrias e as funções destas peças impressas em 3D variam desde pequenos blocos até próteses para pessoas e animais, estátuas, carros, roupas e casas.

ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e PLA (Ácido poliático) são os dois tipos de polímeros mais utilizados para impressão 3D atualmente, devido ao baixo custo e fácil acessibilidade. Existem vários aspectos que os diferenciam e os assemelham: características na impressão, resistência, temperatura de fusão, precisão, preço, cor, cheiro, composição, tipo de impressora é mais adequada para certo filamento.

2.5.1 ABS

Conforme Aredes (2014), o ABS é um material termoplástico rígido e leve com alguma flexibilidade e resistência na absorção de impacto. Este polímero é feito de derivados de combustíveis fósseis.

2.5.2 PLA

Segundo Karasinski (2013), o PLA é um polímero produzido a partir do ácido láctico fermentado de culturas ricas em amido, como beterraba, milho e trigo. É um material 100% compostável e biodegradável. Isto significa que ele pode ser diluído em água, dióxido de carbono e biomassa, não produzindo qualquer material tóxico.

2.5.3 Comparações

Segundo Chilson (2013), diversas comparações podem ser feitas para estes polímeros, uma delas é a questão do brilho que é mais evidente em impressões utilizando o PLA, porém este material pode deformar antes do ABS quando a temperatura começa a se elevar. A temperatura de fusão do ABS é de 220 a 240 °C, enquanto do PLA é mais baixa, de 180 a 220 °C.

O ABS necessita de uma mesa aquecida para deposição do material; para o PLA não é extremamente necessário, mas desejável. Por sua alta temperatura de fusão o ABS, em certos casos, dependendo do bico aquecido (*hot end*), requer um *cooler* de resfriamento.

Uma crítica feita ao ABS é o mau cheiro de seu fumo quando extrudado. O PLA, por controvérsia, apresenta um cheiro agradável devido aos gases liberados durante a extrusão.

O PLA se apresenta mais quebradiço, propenso a rachaduras, delaminações e deformações, e o ABS apresenta uma maior resistência e flexibilidade, propenso a ondulações de cantos e saliências, é mais pesado e inflamável (CHILSON, 2013).

Conforme Karasinski (2013), outra comparação interessante apresenta-se na viscosidade, o PLA mostra-se mais viscoso em estado líquido exigindo menos força da extrusora.

Com relação à precisão, naturalmente seria o PLA o material com melhores detalhes devido à temperatura de fusão e viscosidade, mas o ABS apresenta ótimos resultados com uma impressora bem calibrada, com temperatura bem regulada e bicos bem instalados e mesa aquecida em perfeitas condições de impressão (CHILSON, 2013).

Segundo Foggiatto *et al.* (2004), ensaios de tração para os corpos de prova injetados em moldes de ABS e aço mostraram que o limite de resistência à tração e o módulo de elasticidade tiveram valores bastante próximos conforme visto na Figura 2.7. Sugerindo não existir diferenças marcantes nestas propriedades mecânicas das peças injetadas nestes materiais.

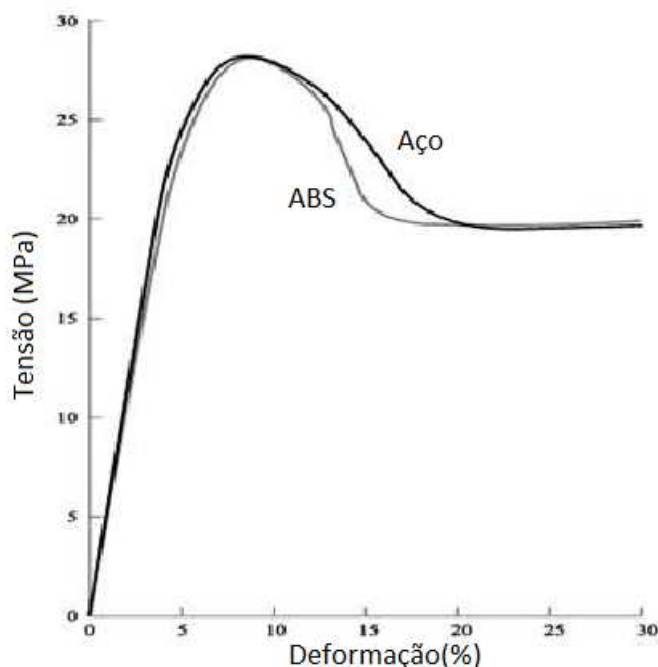


Figura 2.7: Diagrama tensão/deformação (FOGGIATTO *et al.*, 2004)

2.5.4 Materiais no mercado

Estes materiais (ABS e PLA), já descritos, são encontrados no mercado na forma de filamentos. Os filamentos comerciais são encontrados com diâmetros de 1,75 mm e 3 mm. Estes valores são os padronizados pelos fabricantes, por isso é necessário a adaptação das impressoras para que estas trabalhem com estas dimensões.

2.6 Fundamentação teórica

Para desenvolver este projeto se faz necessário o estudo de vários assuntos, cada um possuindo diferentes soluções e características para atender as necessidades do projeto. Tais características devem ser ponderadas para se chegar a uma solução final. Os itens seguintes contextualizam o funcionamento básico de uma máquina de fabricação aditiva, na qual se baseia o projeto, bem como alguns conceitos para o entendimento do processo.

2.6.1 Princípios da termodinâmica

É importante definir os aspectos térmicos envolvidos na concepção do projeto. A mesa aquecida e o cabeçote deverão ter um controle de temperatura e, para isto, são necessários conceitos teóricos na área de termodinâmica.

Segundo Saphiro *et al.* (2005) o termo condução se refere à troca de calor que ocorre em um meio, ou seja, quando há diferença de temperatura em um meio estacionário, existirá uma troca de calor no meio.

O mecanismo físico da condução envolve os conceitos de atividade atômica e molecular, que sustenta a transferência de energia das partículas mais energéticas para as com menor energia devido às suas interações.

É possível quantificar os processos de transferência de calor em termos das equações de taxas de transferências de calor apropriadas. Essas equações são utilizadas para calcular a quantidade de energia sendo transferida por unidade de tempo. A Equação 2.1 descreve a transferência de calor em um meio (SAPHIRO *et al.*, 2005).

$$q_x^n = -k \frac{dt}{dx} \quad (2.1)$$

Conforme Saphiro *et al.* (2005), o conceito de convecção se refere à transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento ou estacionário quando

estão em temperaturas diferentes.

O modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos. Além da transferência de energia devida ao movimento molecular aleatório (condução), a energia é também transferida através o movimento global, ou macroscópico, do fluido.

A Equação 2.2 descreve a convecção e é conhecida também como a lei de resfriamento de Newton:

$$q^n = h(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Onde h é o coeficiente de convecção, T_s é a temperatura ambiente e T_∞ é a temperatura do objeto.

2.6.2 Mesa de impressão

Segundo Bootindustries (2013), as mesas aquecidas são usadas porque aumentam muito a qualidade da impressão mantendo o plástico extrudado quente e também prevenindo o efeito *warp*. Este efeito ocorre porque alguns polímeros tendem a deformar caso o material se esfrie rapidamente, e de forma não uniforme, especialmente se as peças forem maiores.

Nem todos os tipos de materiais que podem ser impressos sofrem desse problema. No entanto, alguns polímeros mais comuns como ABS e PLA, que serão utilizados no projeto, podem sofrer esta deformação. O efeito *warp* é visto normalmente nas bordas das peças, que são levantadas para fora da plataforma de construção (PINESI, 2014).

A impressão em uma mesa aquecida permite que a parte impressa se mantenha aquecida durante o processo e, ao esfriar de forma uniforme, não deforme. Por isso as peças impressas tem um resultado melhor quando impressas em mesas aquecidas (PINESI, 2014).

Conforme Molitch-Hou (2014) uma importante tarefa é fazer o nivelamento da mesa aquecida, já que é fundamental para o sucesso de uma impressão. Se a mesa não estiver nivelada ou se a impressora não contar com o ângulo da mesa de impressão, o filamento extrudado não se fixará em todos os pontos de trabalho igualmente.

2.6.3 Controladores de potências

Dimmers são nada mais que circuitos controladores de potência. A partir dele é possível controlar a potência de saída da carga. Esta carga pode ser resistiva (lâmpadas)

ou indutiva (motores). Geralmente, o circuito é ligado em uma fonte alternada e o *dimmer* tem a função de controlar o quanto dessa onda alternada será conduzida até a carga (BRAGA, 2012).

Este controle é feito através do ângulo de disparo, que em um *dimmer* convencional pode ser feito através de um potenciômetro, que ao variar a sua resistência, varia o ângulo de disparo. Na Figura 2.8 pode-se observar a condução da tensão para a carga dependendo do ângulo de disparo:

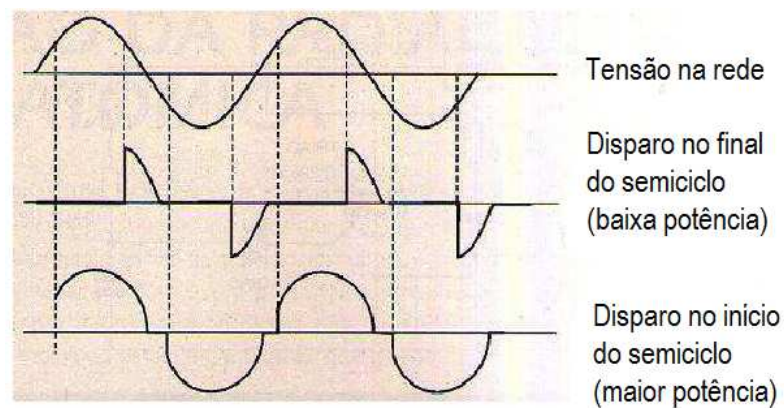


Figura 2.8: Modo de operação de um *dimmer* (BRAGA, 2014).

2.6.4 O conceito de extrusão

O processo de extrusão de uma impressora 3D pode ser visualizado na Figura 2.9. Este processo é composto por uma extrusora e um bico aquecido.

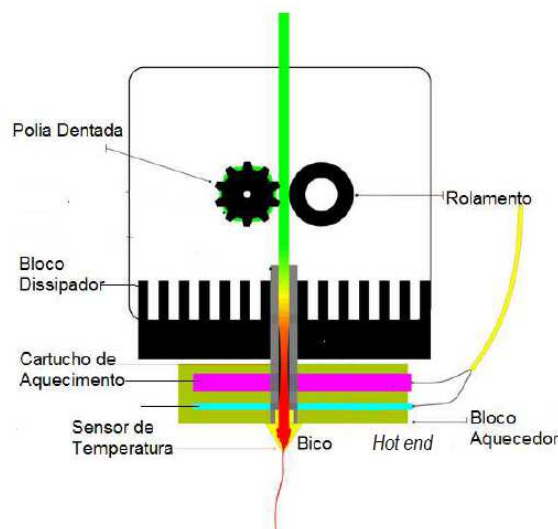


Figura 2.9: O processo de extrusão (BRUCE, 2014).

A polia dentada é acoplada a um motor de passo, que ao rotacionar empurra o filamento para baixo em direção ao *hot end*. O movimento acontece porque o filamento é pressionado entre uma superfície lisa, o rolamento, e uma superfície dentada que ao rotacionar empurra o filamento (BRUCE, 2014). No bloco aquecedor este filamento é derretido e depositado na mesa de impressão através do bico. O bloco dissipador mantém o topo do *hot end* frio, que garante que o filamento esteja sólido e rígido naquela posição.

O filamento chega ao *hot end*, onde é aquecido até uma temperatura de 250°C, onde é fundido e a temperatura é monitorada pelo sensor de temperatura. O filamento que ainda está rígido e continua sendo extrudado empurra para baixo o filamento fundido e também cria uma pressão ou uma força sobre o filamento em fusão, extrudando-o, pelo pequeno orifício no bico. Segundo Bruce (2014), sem essa pressão ou força, não seria possível a impressão.

Existem dois tipos de extrusoras no mercado, segundo Start3dprinting (2013). O tipo direto é frequentemente utilizado nas impressoras cartesianas, ele é apresentado na Figura 2.10. A característica principal desta extrusora é que ela é ligada diretamente ao bico aquecido.

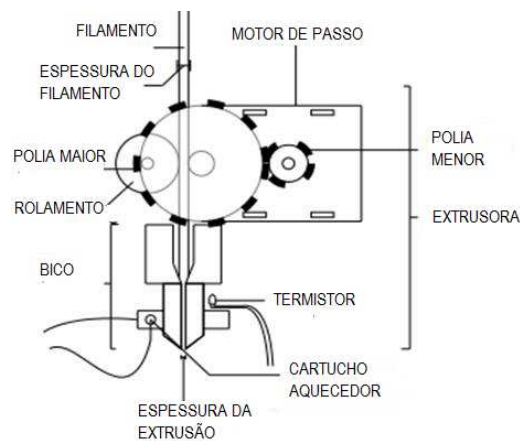


Figura 2.10: Extrusora Direta (START3DPRINTING, 2013).

O outro tipo de extrusora é a *bowden*, ela é utilizada nas impressoras 3D tipo *delta*. O nome *bowden* é referente ao tubo flexível que guia o filamento do motor de extrusão ao *hot end* conforme mostrado na Figura 2.11).

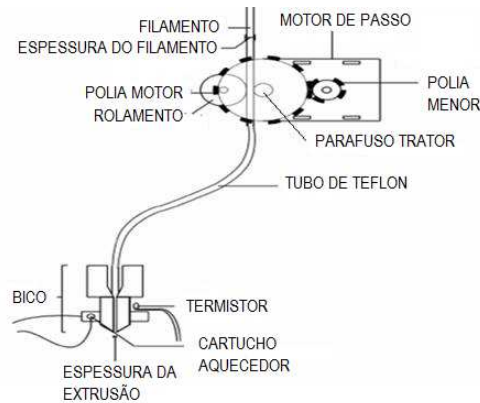


Figura 2.11: Extrusora *bowden* (START3DPRINTING, 2013).

A vantagem de se usar este tipo de extrusora é devido à redução de peso nos componentes móveis. Com isto o *hot end* move-se com menos esforços, menos vibrações e permite maiores velocidades de impressão.

Segundo Start3dprinting (2013), os cabos *bowden* são utilizados para transferir ação mecânica de um ponto ao outro. Em uma impressora 3D, a extrusora *bowden* usa seu tubo para guiar um fio de filamento, transferindo a força do motor de extrusão em pressão no *hot end*.

Percebe-se na Figura 2.11 que há uma redução ligada ao motor de passo e há um parafuso trator acoplado a esta redução. Conforme 3dmachine (2013), o parafuso trator é usado para tracionar o filamento.

2.6.5 Motores de passo

Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares discretas. O rotor ou eixo de um motor de passo é rotacionado em pequenos incrementos angulares, denominados passos (BRITES; SANTOS, 2008). A maior qualidade dos motores de passo não é sua força (torque), nem tão pouco sua velocidade, e sim a possibilidade do controle de movimentos precisamente.

Segundo Brites e Santos (2008), o funcionamento básico do motor de passo é dado pelo uso de solenóides alinhados dois a dois que quando energizados atraem o rotor, fazendo-o se alinhar com o eixo determinado pelos solenóides, causando assim uma pequena variação de ângulo que é chamada de passo.

Os motores de passo unipolares são facilmente reconhecidos pela derivação central em cada um dos enrolamentos, são formados por imã permanentes ou híbridos. O número de fases é duas vezes o número de bobinas, uma vez que cada bobina se encontra dividida em duas (VIVALDINI, 2009). Na Figura 2.12 tem-se a representação de um motor de passo unipolar de 4 fases.

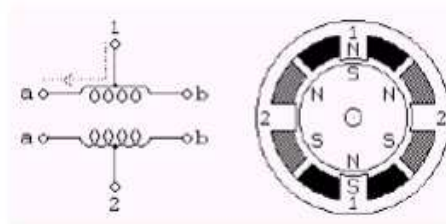


Figura 2.12: Motor unipolar (VIVALDINI, 2009).

Segundo Vivaldini (2009), ao contrário dos motores de passo unipolares, os motores bipolares requerem um circuito de atuação bem mais complexo. Os motores de passo bipolares são conhecidos pela excelente razão tamanho/torque: proporcionam um maior torque comparativamente a um motor unipolar do mesmo tamanho. A Figura 2.13 mostra a representação de um motor de passo bipolar.

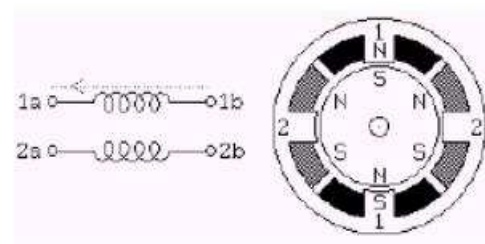


Figura 2.13: Motor bipolar (VIVALDINI, 2009).

2.6.6 Eletrônica de controle

A eletrônica de controle da impressora 3D é composta por 3 sistemas; o *Arduino Mega*, por uma placa *shield* (escudo) e por *drivers Polulu A4988*.

Segundo Lopes e Almeida (2013), a plataforma *Arduino* é bastante utilizada em projetos *open source* de impressoras 3D. Isto se deve a sua facilidade de elaboração das soluções e grande quantidade de documentação referente a essa plataforma microcontrolada de desenvolvimento de projetos eletrônicos.

O *Arduino Mega 2560* é uma placa de microcontrolador baseado no *ATMEGA2560*. Ele tem 54 pinos digitais de entrada / saída (dos quais 15 podem ser usados como saídas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de *hardware*), um cristal oscilador de 16 MHz, uma conexão USB, um botão de *reset*. O *Arduino* é um microcontrolador completo com diversas aplicações, sua programação é feita por código C/C++. É possível observar na Figura 2.14 o *Arduino Mega*:

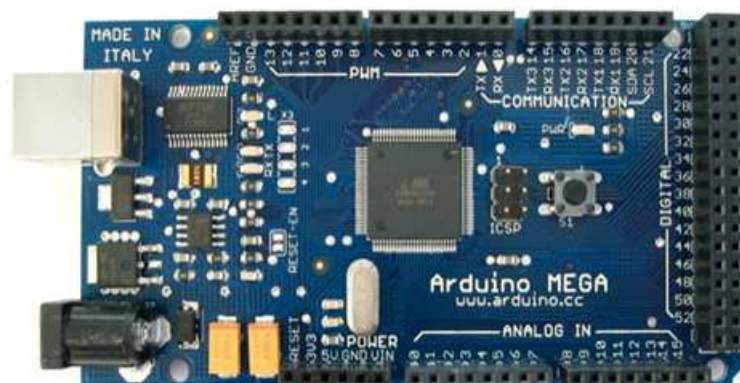


Figura 2.14: *Arduino Mega* (REPRAP, 2014).

Segundo Reprap (2014), a placa *shield* foi desenhada e criada para encaixe perfeito sobre a placa *Arduino*. A *Shield RepRap Mega* é projetada para encaixar toda a eletrônica necessária para uma impressora 3D em um pacote pequeno de baixo custo. Suas principais características são:

- 3 saídas *mosfets* controladas com *PWM* para controle de potência da mesa aquecida e do bico aquecido;
- Entrada para 3 circuitos de termistores;
- 5 soquetes para *drivers Pololu A4988* para motor de passo;

- Possui conectores para colocar chaves de fim de curso, *leds*, motores e outros sensores.
- Entrada para cartão *SD*
- Pinos extras para: *PWM*, comunicação serial e *SPI, I2C*.

O uso destes pinos extras pode ser feito para instalação de um *display* que mostre a temperatura do bico ou da mesa aquecida, ou então, a posição tridimensional onde está imprimindo; conectar-se um cartão de memória com dados para impressão, sendo assim possível a impressão no modo *stand alone*. A placa *shield* pode ser observada na Figura 2.15.

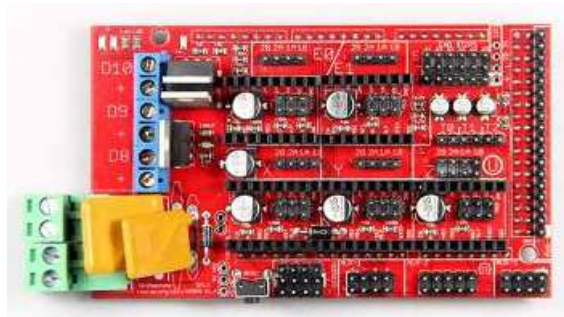


Figura 2.15: Placa *shield* (PRINTERSKETCH3D, 2013).

O terceiro item que compõe a eletrônica de controle é o *driver* chamado de A4988 (Figura 2.16). Ele permite o controle de um motor de passo bipolar de até 2A por fase e também permite o controle de micropassos, tem proteção contra sobrecorrente e possui internamente um tradutor de pulsos para facilitar a operação.



Figura 2.16: Placa A4988 (ALMIR, 2014).

Segundo Polulu (2014), com apenas dois pinos pode-se controlar o motor de passo, um controla o sentido de giro e o outro os micropassos. O *drive* A4988 possui algumas características chaves:

- Interface de controle simples de passo e direção;
- Cinco resoluções de passo diferentes: passo cheio, meio passo, um quarto, um oitavo e um dezesseisavos;
- Controle do modo de decaimento de corrente (combinado ou lento);
- Controle de corrente ajustável permite a marcação de corrente máxima de saída com um potenciômetro;
- Desligamento por superaquecimento, travamento por sub-voltagem e proteção contra corrente cruzada;
- Proteção contra curto ao terra e curto à alimentação.

Utilizando o sistema combinado de controle de corrente, o ruído produzido pelo motor é reduzido, a precisão do passo é aumentada e as perdas em dissipação de calor são reduzidas.

Conforme Polulu (2014), motores de passo normalmente têm um tamanho de passo específico (geralmente $1,8^\circ$ ou 200 passo por revolução), que se aplicam a passos cheios. Um controlador de micropassos como o A4988 permite resoluções maiores através de alocações em passos intermediários, o que é alcançado energizando as bobinas com níveis intermediários de corrente.

O conjunto eletrônico pode ser visualizado na Figura 2.17.

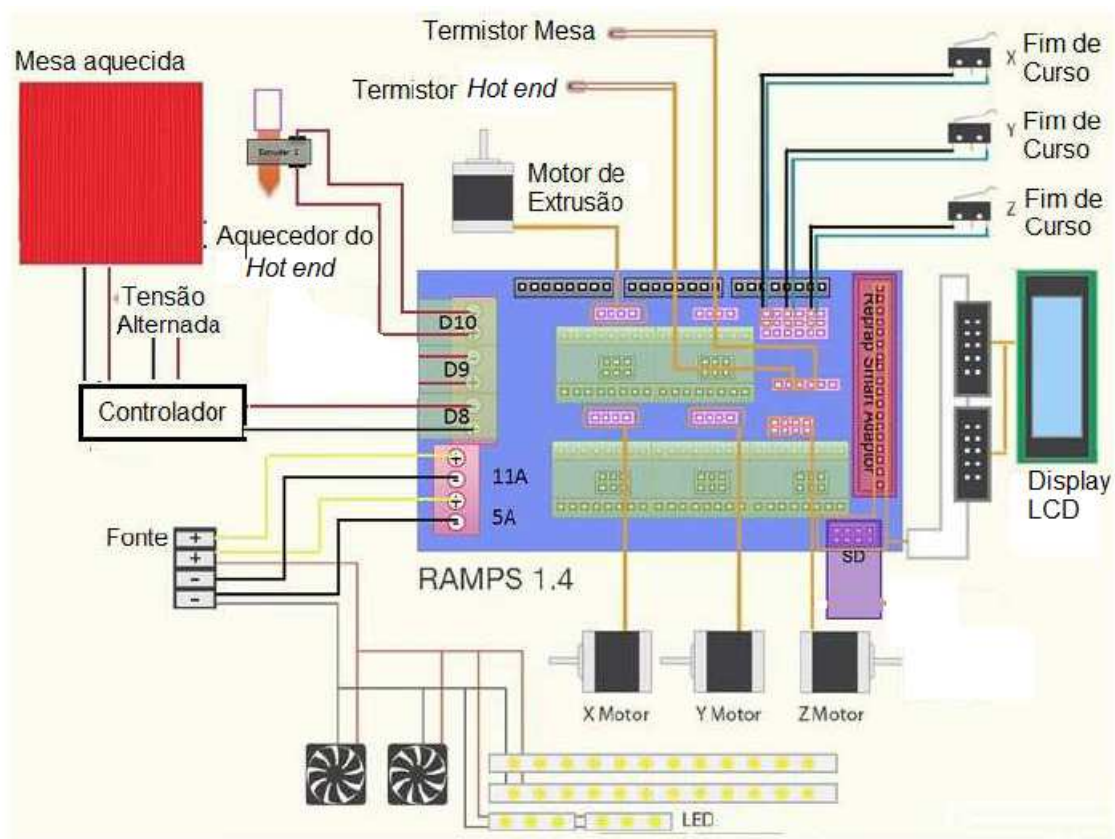


Figura 2.17: Esquemático da eletrônica de controle (PRINTERSKETCH3D , 2013).

Pode se perceber como é o esquema de ligação de todas as partes de uma impressora 3D. Os *drivers* A4988 estão conectados nos soquetes logo abaixo da ligação de cada motor. Há 5 *drivers* para 5 motores. A mesa aquecida e os aquecedores do *hot end* são ligados a uma fonte de 12V. Os sensores de temperatura (termistores) e chaves de fim de curso também são conectadas a esta placa e todos os componentes são controlados por um *firmware* que é compilado no microcontrolador (*Arduino*).

2.6.7 Sensores

Sensores são componentes eletrônicos que detectam eventos ou mudanças quantitativas e fornecem na saída geralmente sinal elétrico ou óptico. Alguns destes sensores serão descritos a seguir.

Termistores

Segundo Maciel (2014), termistores são resistores variáveis com a temperatura. São muito utilizados em aplicações que necessitem de uma alta sensibilidade com mudança de temperatura. No entanto, não são lineares.

Conforme Maciel (2014), existem dois tipos de termistores, o PTC (coeficiente positivo de temperatura) e o NTC (coeficiente negativo de temperatura), essa distinção é devida ao material de sua construção. Esses dispositivos são construídos a partir de misturas cerâmicas de óxidos semicondutores, como titânio de bários para os PTCs e magnésio, níquel, cobalto, titânio, ferro e cobre para os NTCs.

No caso do termistor NTC, sua resistência diminui à medida que a temperatura aumenta. Desenvolvidos com uma tecnologia que permite tolerância de variação de 1%, são usados principalmente para faixas de medições entre -55° a 300°C (MACIEL, 2014).

Devido ao baixo custo e ao excelente desempenho, o NTC possui uma vasta utilização nas indústrias, seja para refrigeração e ar condicionado, linhas automotivas, controle de temperatura, sistemas de detecção e alarmes contra incêndio dentre outras (MACIEL, 2014).

A curva que define o comportamento da temperatura em relação à resistência tem um comportamento exponencial, pode ser vista na Figura 2.18.

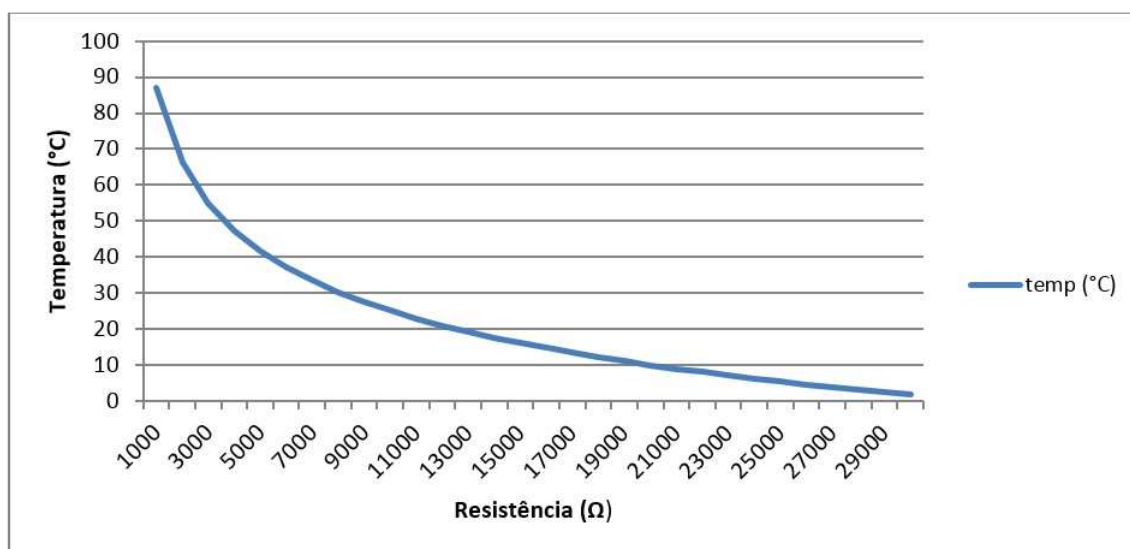


Figura 2.18: Comportamento de um termistor (MACIEL, 2014).

Como desvantagens, sua temperatura de atuação varia apenas entre -55 a 330°C , e são não lineares. Como vantagens possuem baixo custo, uma boa sensibilidade à resposta rápida.

Chaves de fim de curso

Sensores de fim de curso são interruptores ou chaves comutadoras que atuam sobre

um circuito no modo liga ou desliga quando uma ação mecânica acontece no seu elemento atuador. A Figura 2.19 demonstra o modo de atuação de uma chave de fim de curso, se mantém aberta (mantendo uma interrupção no circuito) quando não pressionada e, quando pressionada, fecha uma conexão em um circuito indicando uma atuação sobre ela, indicando uma posição final de um elemento (WENDLING, 2010).

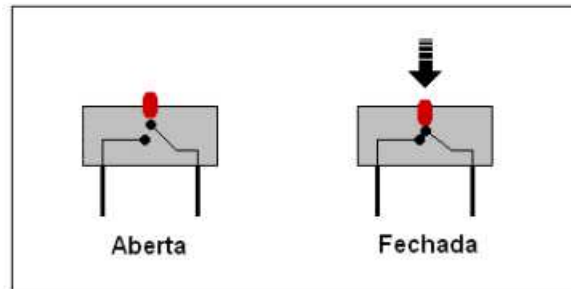


Figura 2.19: Esquemático da chave fim de curso (WENDLING, 2010).

Piezoelétricos

Materiais piezoelétricos possuem a propriedade de converter energia elétrica (campo magnético e carga elétrica) em energia mecânica (força e deslocamento) e vice versa (IKEDA, 1996). Isto ocorre porque, quando o material piezoelétrico está em repouso todas as cargas elétricas positivas e negativas estão simetricamente distribuídas, de modo que a carga total é neutra. Quando uma força é exercida sobre este material, essa simetria é desfeita e a distribuição irregular das cargas faz surgir uma tensão. Devido a essa capacidade de gerar uma tensão com a aplicação de um esforço mecânico, os materiais piezoelétricos podem ser utilizados em várias áreas. Além de serem ideais para a elaboração de sensores de vibração, são amplamente usados em sensores e atuadores eletromecânicos e acelerômetros (PATSKO, 2006). É possível perceber este processo na Figura 2.20.

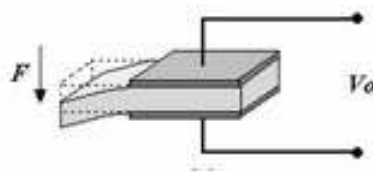


Figura 2.20: Sensor piezoelétrico (SMAR, 2013).

2.6.8 *Firmware* de uma impressora 3D

Firmware é um programa que reside na placa mãe da impressora 3D e é o elo entre *software* e *hardware*, ele interpreta os comandos do arquivo de código G e controla a movimentação. A configuração do *firmware* é única para cada impressora 3D, reconhecendo as suas propriedades como as dimensões ou configurações de aquecimento, desempenhando um papel importante na qualidade da impressão (SOLIDUTOPIA, 2014).

Metodologia

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para realização deste trabalho. Com o objetivo de uma abordagem ao processo de impressão 3D, são aplicadas em cada etapa do projeto, conceitos e técnicas aprendidas durante o curso de Engenharia Mecatrônica. De forma a tomar decisões mais coerentes e lógicas para o projeto.

3.1 Projeto estrutural da impressora 3D

Nesta seção será apresentado os métodos e materias utilizados para o desenvolvimento da parte estrutural da impressora 3D.

3.1.1 Dimensionamento da impressora 3D

Para dimensionar uma impressora 3D necessita-se definir dois parâmetros básicos. O primeiro foi o volume de impressão da impressora. A princípio, definiu-se a área da mesa de impressão como sendo de um quadrado de 150x150mm e sua respectiva altura, também de 150mm.

Após defição destes parâmetros iniciais, fez-se uma maquete simulando uma estrutura em *delta*, que pode ser observada na Figura 3.1.

Figura 3.1: Maquete Impressora 3D *delta*.

Nesta maquete, desenhou-se um triângulo circunscrito em um círculo de diâmetro 210mm na madeira. Escolheu-se este diâmetro por ser o menor possível para uma área de impressão de 150x150mm. Colocou-se 3 eixos nos vértices deste triângulo, de forma que eles fiquem a uma mesma distância do centro e também espaçados em 120° entre eles. Prendeu-se barbantes às buchas e estes simularam os braços da impressora. Estes barbantes encontram-se no *carriage*, que é a parte móvel da impressora 3D.

Realizaram-se diversos testes com esta maquete no *campus* do CEFET-MG em Divinópolis, no laboratório de protótipos, sala 304, de forma a realizar-se a análise da movimentação em *delta* e suas limitações. Utilizou-se para realização desta maquete: furadeira, martelo, barras de aço, barbantes, madeira e peças em ABS (bucha e carro).

Com base neste estudo da maquete desenvolveu-se um programa no *software MatLab* para cálculo do tamanho dos braços, da base e a altura da impressora, sendo a entrada um valor referente a área de impressão. Este programa pode ser encontrado no Apêndice A.

Este foi apenas o projeto estrutural inicial. Com o desenvolvimento do trabalho, decidiu-se 90mm sendo o raio de impressão final. Assim, atualizaram-se os parâmetros conforme o programa feito em *software MatLab*.

3.1.2 Desenho estrutural da impressora

Desenvolveu-se o projeto virtual de todas as peças da estrutura da impressora 3D em *software SolidWorks*. Desenharam-se os motores, barras lisas, barras de fixação, bases superior e inferior. Este desenho da parte estrutural pode ser observado na Figura 3.2.

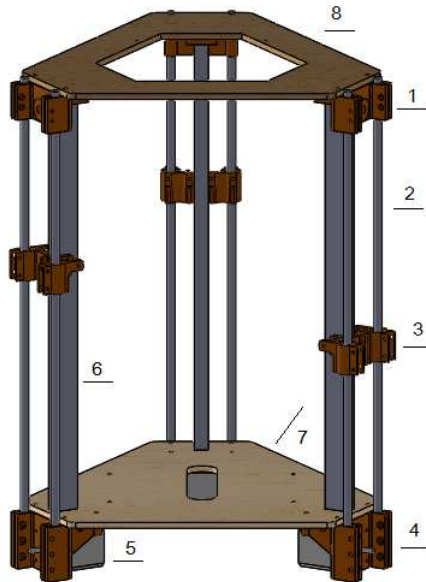


Figura 3.2: Parte estrutural da impressora 3D *delta*.

Conforme a Figura 3.2, os números 7 e 8 representam respectivamente as bases inferior e superior da impressora que são feitas em madeira. Acima da base inferior será colocada a mesa de impressão. Os números 1, 3 e 4 são as partes impressas em ABS por uma outra impressora 3D já existente. Estas são chamadas de *idler*, *carriage* e base do motor, respectivamente. O número 5 é o motor de passo, o 2 são as barras lisas e o 6 é a barra de fixação.

As partes 1 e 4, impressas em ABS, apresentam a função de acoplar as peças da impressora, a base do motor (4) acopla o motor, a base inferior, a barra de fixação e as barras lisas. Já o *idler* (1), acopla a base superior, a barra de fixação e as barras lisas, na parte superior da impressora.

O *carriage* (3) é a peça que acopla-se na estrutura *delta*. A correia efetua a junção do motor ao *idler* e ao *carriage*. Assim, ao girar o motor, o *carriage* movimentada verticalmente para cima ou para baixo, dependendo do sentido do giro do motor.

Inicialmente utilizou-se apenas as barras lisas para interligar a parte inferior e a parte superior da impressora 3D. No entanto, adicionou-se a barra de fixação para aumentar a resistência mecânica e diminuir o efeito de movimento cisalhante, que pode ocorrer entre a parte superior e inferior devido à movimentação do *carriage* da impressora.

3.1.3 Desenho da estrutura *delta*

O desenho da estrutura delta pode ser visto na Figura 3.3. A estrutura *delta* é a parte móvel da impressora 3D, que ao movimentar realiza a impressão.

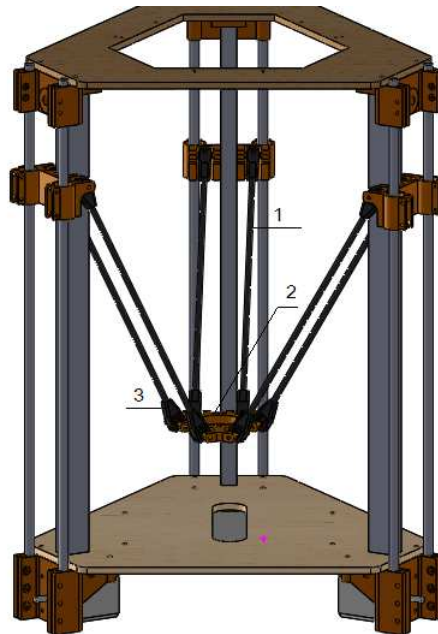


Figura 3.3: Estrutura *delta*.

A parte móvel é composta por garras (item 3 da Figura 3.3) que prendem o *carriage* à base *delta* (item 2 Figura 3.3). Estas garras unem-se à base *delta* através de braços (item 1 Figura 3.3) tubulares de fibra de carbono. Escolheu-se este material devido à relação resistência/peso. Sendo esta impressora de configuração *delta* torna-se necessário que a parte móvel seja a mais leve possível, assim, possibilita-se atingir maiores velocidades de impressão. Com a menor massa dos elementos móveis, são necessárias menores forças de inércia. Utilizou-se 2 tubos de fibra de carbono para cada *carriage* afim de obter uma maior estabilidade da base *delta*. Os braços devem ter exatamente o mesmo comprimento para que o carro de impressão fique paralelo à base inferior da estrutura, melhorando assim, a qualidade de impressão.

O carro de impressão é a estrutura onde acopla-se o *hot end* e foi impressa em uma impressora 3D já existente, assim como as garras.

3.2 Projeto da extrusora *bowden*

Inicialmente, para projetar a extrusora é necessário definir qual o diâmetro do filamento

do material a utilizar-se. Para impressão de um certo volume em ABS de diâmetro de 3mm utiliza-se quase a metade do comprimento linear necessário para imprimir com o diâmetro de 1,75mm. Sendo assim, para um filamento de 1,75mm, o motor necessita dar mais passos por mm^3 proporcionando uma maior resolução no extrusor. Por este motivo definiu-se o filamento de 1,75mm para o projeto.

Devido a pouca informação disponível sobre extrusoras 3D, falta de artigos, livros ou publicações sobre o assunto, aplicou-se um estudo de engenharia reversa em vários tipos de extrusoras. A partir dos conhecimentos adquiridos no curso de engenharia, pesquisou-se uma extrusora que melhor se adequasse ao projeto.

Primeiramente estudou-se a distância entre o rolamento e o parafuso trator (que é uma superfície dentada) o qual deve ter o tamanho do diâmetro do filamento, que neste o projeto é de 1,75mm. Caso esta distância seja maior que 1,75mm, a polia dentada não dará pressão no filamento com o rolamento, e conseqüentemente, não acontecerá o movimento de extrusão.

Posteriormente, definiu-se a redução utilizada. Conforme a revisão bibliográfica o filamento é extrudado quando há um movimento entre uma superfície lisa e uma dentada. Sendo possível ligar diretamente na polia dentada do motor a um rolamento. Desta forma, há um grande esforço do motor ao realizar a extrusão. Portanto, utilizou-se uma redução de forma a aliviar o esforço do motor. Na Figura 3.4 pode ser visualizada a extrusora escolhida para o projeto.

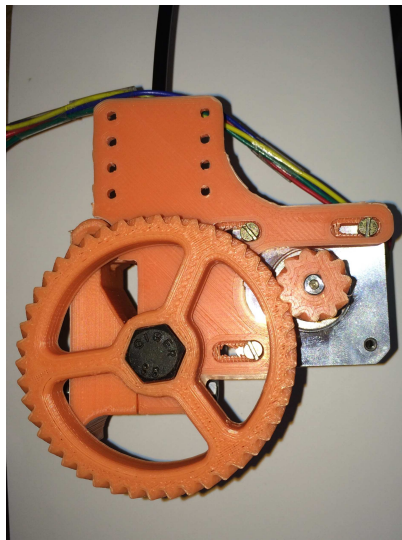


Figura 3.4: Extrusora *bowden*.

Há um par de engrenagens acoplado ao motor de passo. A razão entre o número de

dentos entre a engrenagem maior e a menor é de 4:1. Ao inserir esta redução, aumenta-se a razão de torque por esforço do motor. Tendo como base estudos feitos sobre várias extrusoras escolheu-se um modelo já existente no mercado chamado de *Alex's extruder*. Por se tratar de um projeto aberto, obteve-se acesso aos desenhos em CAD. Em seguida, estes foram confeccionados por uma impressora 3D já existente.

3.3 Projeto da mesa aquecida

Após realizar vários estudos sobre sistemas de aquecimento encontrados no mercado, decidiu-se que o sistema seria como o da Figura 3.5.

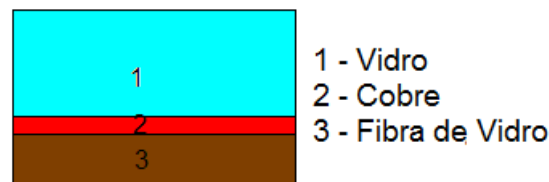


Figura 3.5: Camadas da mesa aquecida.

O cobre, distribuído em formato de trilhas na placa, tem uma resistência de 25 ohms, que ao ser aplicada uma tensão elétrica dissipa potência na forma de calor. Este é transferido para o vidro e para a fibra de vidro. Efetuou-se a escolha do vidro por possuir boas propriedades térmicas e elétricas. Tais características são de suma importância, pois o vidro é a superfície onde há a deposição do material. Escolheu-se a fibra de vidro devido a sua alta resistividade térmica, porque não há necessidade de aquecer a parte inferior da mesa.

Escolheu-se este sistema por apresentar um aquecimento rápido e uniforme. Utilizou-se uma placa de circuito impresso de fibra de vidro e fixou-se um vidro sobre ela. Sendo o ABS o material escolhido para realizar as impressões, a mesa deverá ser aquecida até 110°C, o que possibilita a adesão deste.

Desenvolveu-se um modelo matemático para simulação da temperatura em função do tempo, sendo a entrada do sistema uma potência dada em *Watts* e a saída dada em temperatura. Para construção do modelo (Figura 3.6) utilizou-se o *Simulink* do *software MatLab* com base nas equações de termodinâmica descritas na revisão bibliográfica. O memorial de cálculos que demonstra as equações do sistema em regime permanente e transitório podem ser encontrados no Apêndice B. O programa que simula este modelo

pode ser encontrado no Apêndice A.

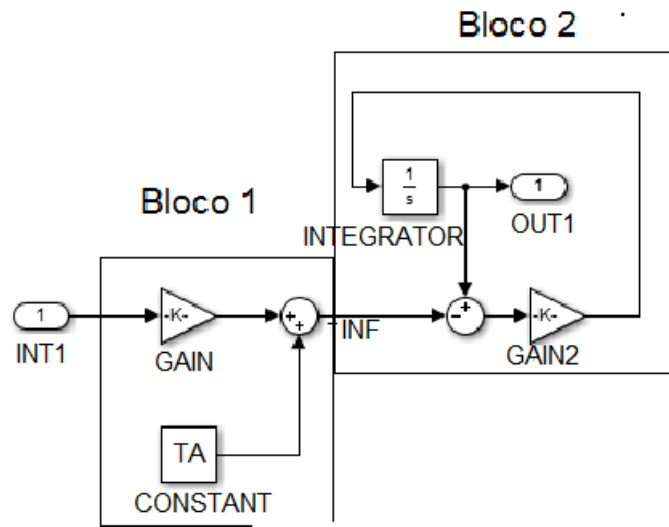


Figura 3.6: Modelo de uma mesa aquecida.

Como visto na Figura 3.6, o bloco 1 representa as equações em regime permanente e o bloco 2, em regime transitório. As equações de ambos os blocos estão descritas no Apêndice B. O *input* é a entrada de potência da planta e o *output* é a temperatura de saída. Afim de encontrar a potência ideal para atingir temperatura desejada (110°C) no menor tempo possível, realizou-se ensaios conforme a Tabela 3.1 (ver código no apêndice A).

Tabela 3.1: Potência x tempo

Potência(W)	Tempo(s)
500	61
400	71
300	96
200	171
140	496
120	Não Chega

Após obtenção destes dados decidiu-se utilizar a potência de 500W, possibilitando atingir a temperatura desejada em um menor tempo possível. Para isto desenvolveu-se um circuito eletrônico de potência, o *dimmer*, controlador descrito na seção posterior.

Como próximo passo, definiu-se o formato da mesa aquecida e das trilhas de cobre. Na Figura 3.7 pode-se observar o desenho da mesa aquecida.

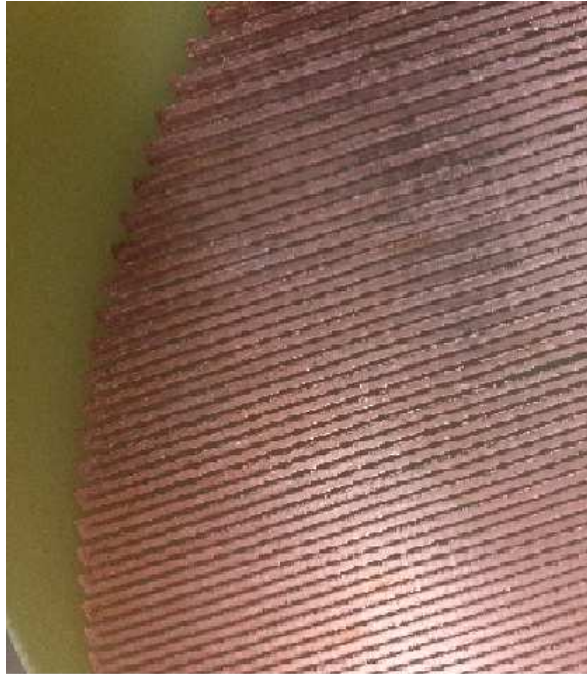


Figura 3.7: Formato e trilhas da mesa aquecida.

Definiu-se o formato redondo da mesa aquecida por ser o que mais se adequa a uma impressora 3D em *delta*, sendo sua base triangular. Realizou-se a confecção das trilhas na placa de circuito impresso com o auxílio de uma impressora 3D já existente. Definiu-se o diâmetro da mesa como 180mm porque este é o limite máximo de impressão desta impressora. Para o cálculo das trilhas desenvolveu-se uma rotina de códigos no *software MatLab*(ver apêndice A) a qual apresenta como entrada os parâmetros da espessura de trilhas e espaçamento entre elas. Obtem-se como resposta a resistência do cobre à tensão aplicada e a corrente máxima para uma potência de entrada de 500W. Os valores de resistência, tensão e corrente para diferentes espessuras e distâncias entre as trilhas podem ser analisados conforme Tabela 3.2 .

Para escolha, analisou-se a corrente máxima da mesa e a espessura das trilhas. Quanto maior a corrente mais robusto seriam os componentes eletrônicos necessários para fazer o controle da mesa. Conseqüentemente o projeto seria caro. Por controvérsia, sendo a espessura da trilha maior, facilita-se o desenho da mesma e um menor risco da confecção e corrosão da placa traria. Com isto, escolheu-se o item 3 da Tabela 3.2, o qual a espessura é de 0,6mm e sua corrente máxima de 5,8A.

Tabela 3.2: Parâmetros das trilhas da mesa aquecida

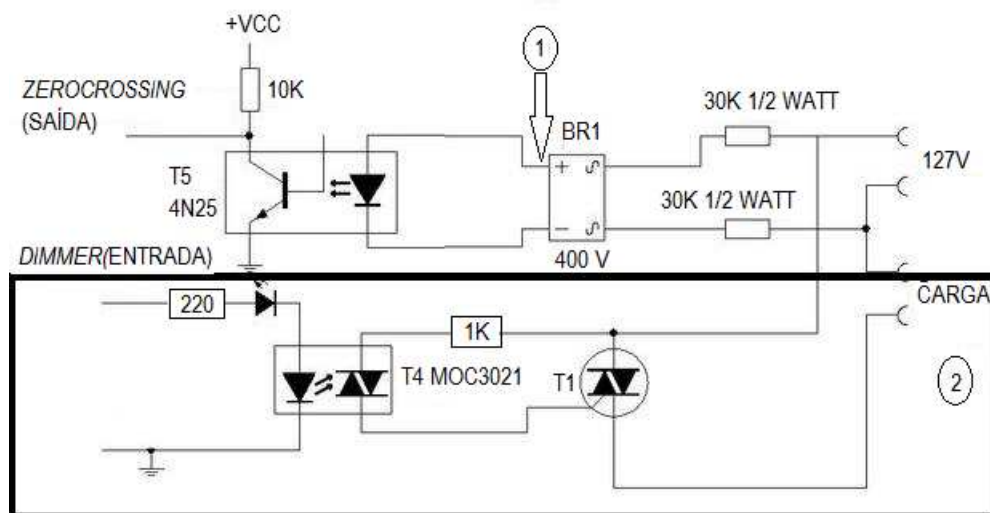
	Espessura (mm)	Distância trilhas(mm)	Resistência(Ω)	Tensão(V)	Corrente(A)
1	1	1	5	50	10
2	0,5	0,5	17,4	93	5,3
3	0,6	0,4	14,5	85	5,8
4	0,7	0,3	12,4	78	6,3

3.4 Controle da mesa aquecida

Para o controle da mesa aquecida descreveu-se dois processos. O primeiro foi a eletrônica de controle, ou seja, o circuito eletrônico, seus componentes e sua função. Já o segundo processo decorreu-se sobre um controlador PID.

3.4.1 Eletrônica de controle

Utiliza-se o *dimmer* para controle da tensão aplicada na mesa aquecida e consequentemente sua temperatura. O circuito utilizado para a confecção está apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8: Esquemático de um *dimmer*.

Para este circuito, utilizaram-se componentes eletrônicos como *triacs*, optoacopladores, diodos e resistências. Desenhou-se o circuito no *software Proteus*. Após esta etapa, corroeu-se o mesmo sobre uma placa de cobre de fenolite.

O circuito apresentado na Figura 3.8 pode ser explicado em duas etapas:

1- Na parte superior do circuito (item 1), sua função é a contagem das vezes que a onda alternada passa pelo zero. Os resistores de 30k são utilizados para diminuição da corrente que passa pelos diodos. O BR1 é um retificador, para obtenção de apenas semi-ciclos positivos, sendo que o diodo do 4N25 apenas conduz em um sentido. Toda vez que a onda alternada passa por 0, o fotodiodo não emite luz e assim, o transistor não conduz. Deste modo, a tensão na saída (*ZeroCrossing*) é 5V e está em um dos pinos de saída do *Arduino*. Sua repetição é na faixa de 120 vezes por segundo.

2- A segunda etapa é realizada pelo item 2 da Figura 3.8. Cada vez que o circuito identificar a passagem por zero, o programa do *Arduino* definirá, por tempo, qual o ângulo de disparo do *dimmer*. Com isto, aplicará 5V na entrada do *dimmer*. Assim, ativa-se o fotodiodo do *MOC3021* conduzindo o *triac* e aplicando a tensão desejada na carga.

O código que controla o *dimmer* pode ser encontrado no Apêndice A.

3.4.2 Controlador PID

Desenvolveu-se o controlador PID nos programas *SISOtool* e *SIMULINK/MatLab*. Utilizou-se o modelo da Figura 3.6, com isto, possibilitou a plotagem do gráfico, lugar das raízes, discretizado, no qual alocaram-se os polos e zeros. Calibrou-se os ganhos de forma a conseguir uma resposta que o tempo de assentamento fosse 120 segundos e não houvesse *overshoot* (Figura 3.9).

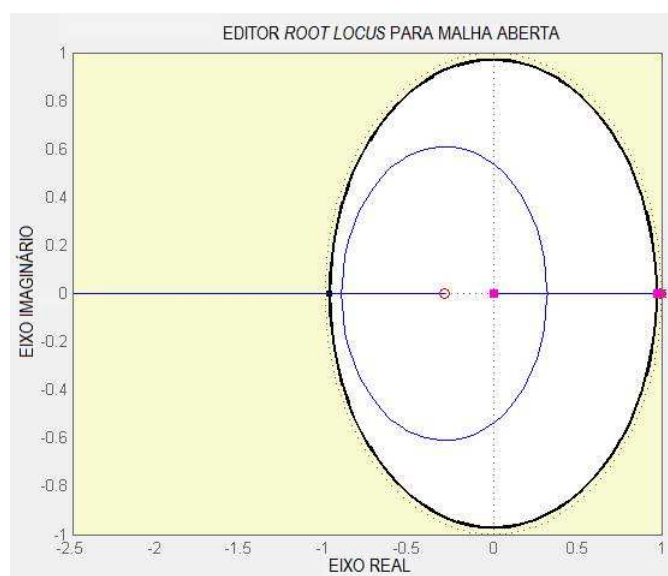


Figura 3.9: Lugar das raízes.

Os polos e zeros estão alocados segundo a Tabela 3.3

Tabela 3.3: Alocação dos polos e zero e período

Polos	0	1
Zeros	-0.281	0.997
Período	1 segundo	-

Encontrou-se o melhor controlador, desta forma, os valores dos ganhos do controlador PID são:

$$K_i = 0,0516$$

$$K_d = -3,76$$

$$K_p = 17,2$$

Aplicando os valores do controlador PID em malha fechada no modelo da planta, encontrou-se o resultado mostrado na Figura 3.10. O eixo das ordenadas é o da temperatura da mesa e o eixo das abscissas é o de tempo em segundos.

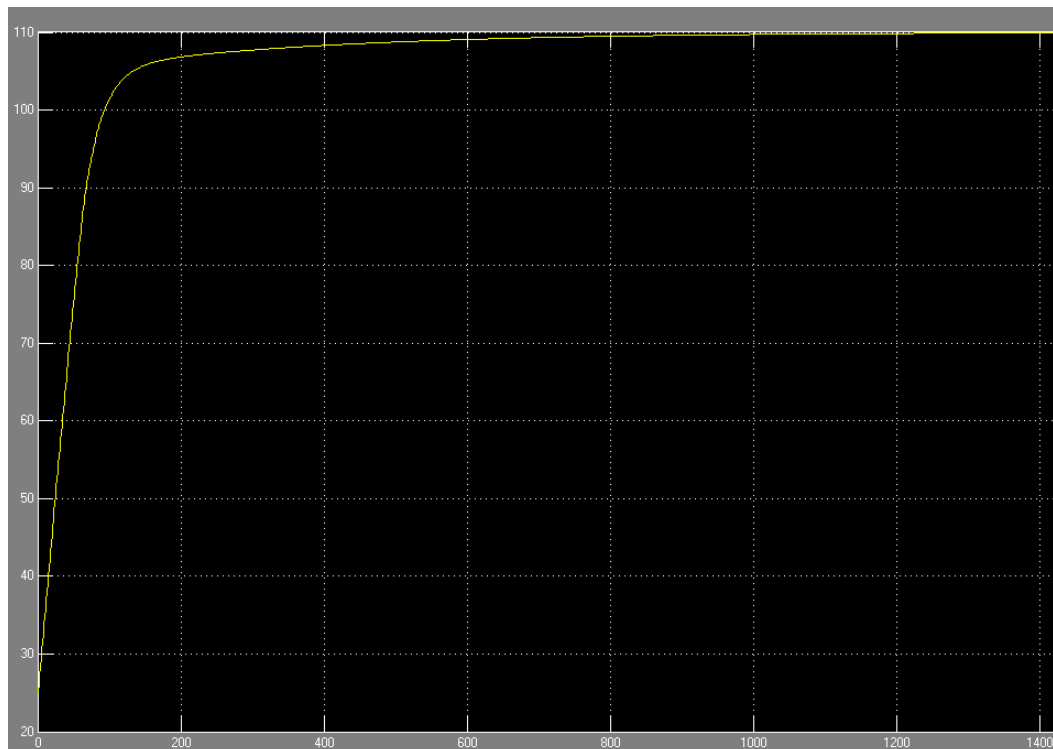


Figura 3.10: Resposta do sistema com controlador PID.

Observa-se com o controlador PID que a mesa aquecida chegará a uma temperatura de 108°C em 200 segundos, fato que permite impressão de peças em ABS.

3.5 Projeto do bico aquecido

O bico aquecido (*hot end*) é a parte da impressora onde o material é fundido. Como o material a ser fundido é o ABS, este deverá aquecer-se até a temperatura de 250°C. Estudou-se sobre os *hot ends* atualmente comercializados fornecendo base para decisão do bico aquecido desejado para o projeto. A montagem dele pode ser observada na Figura 3.11.

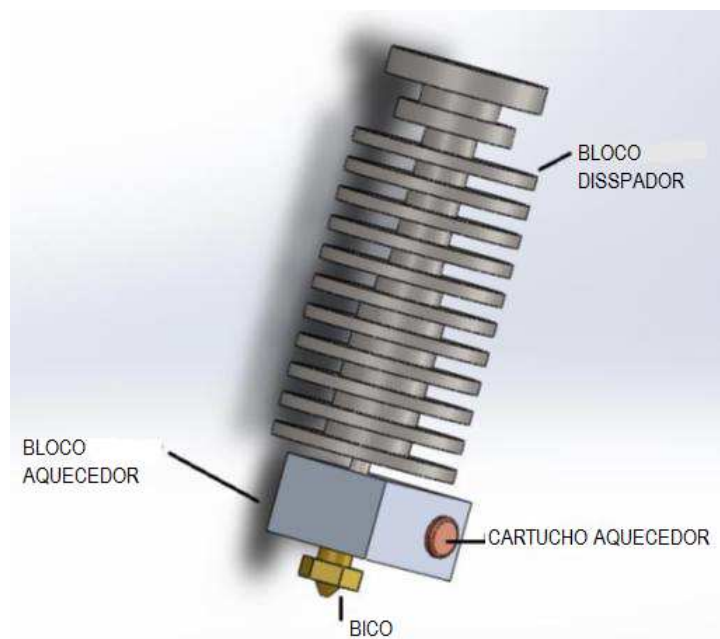


Figura 3.11: Bico aquecido.

O bloco aquecido possui quatro partes principais: 1) bico, tida como parte final, onde o plástico já derretido será depositado na mesa aquecida. O bico é feito de cobre e possui um orifício de saída de 0,3mm. 2) cartucho aquecedor, constituído por um tubo metálico oco com um elemento de aquecimento resistivo. Este cartucho aquecedor é de 40W, potência necessária para aquecer o bloco até temperatura de 250°C. 3) bloco aquecedor, uni-se ao bloco dissipador e aquece o sistema. Este é feito de alumínio devido à sua boa condutividade térmica e apresenta dimensões de 21x17x12mm. O bloco aquecedor pode ser observado na Figura 3.12.

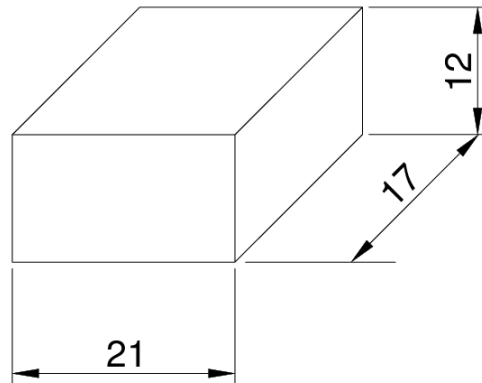


Figura 3.12: Bloco aquecedor.

E por último o bloco dissipador, responsável pela dissipação do calor. Este bloco pode ser visualizado na Figura 3.13.



Figura 3.13: Bloco dissipador.

Esta apresentou-se como parte crítica do projeto. Primeiramente, calculou-se seu dimensionamento tomando como base os blocos dissipadores encontrados no mercado. Sabe-se que a temperatura da extremidade do bico deve ser 250°C e na parte contrária, máxima 50°C . Com estes valores desenvolveu-se um bloco que possuísse aletas de forma a dissipar o calor ao longo do seu comprimento. Caso a temperatura seja superior a 50°C , poderá danificar o tubo *bowden*, o qual é acoplado na parte superior do bloco. Por isso, utilizou-se o material aço INOX 304, este possui baixa condutividade térmica.

A altura total da peça é de 60mm. Definiu-se a espessura das aletas sendo de 2mm e a distância entre as aletas de 2,5mm, devido à limitação da ferramenta de corte. Para cálculo do número de aletas necessárias para dissipar o calor até 50°C, utilizou-se simulação do *software SolidWorks* (Figura 3.14). Aplicou-se como entrada os parâmetros de coeficiente de transferência de calor (h) igual a 25 e o fluxo de calor de condução de $4000 \frac{W}{m^2}$. Tomou-se como base um ambiente onde o ar esteja parado.

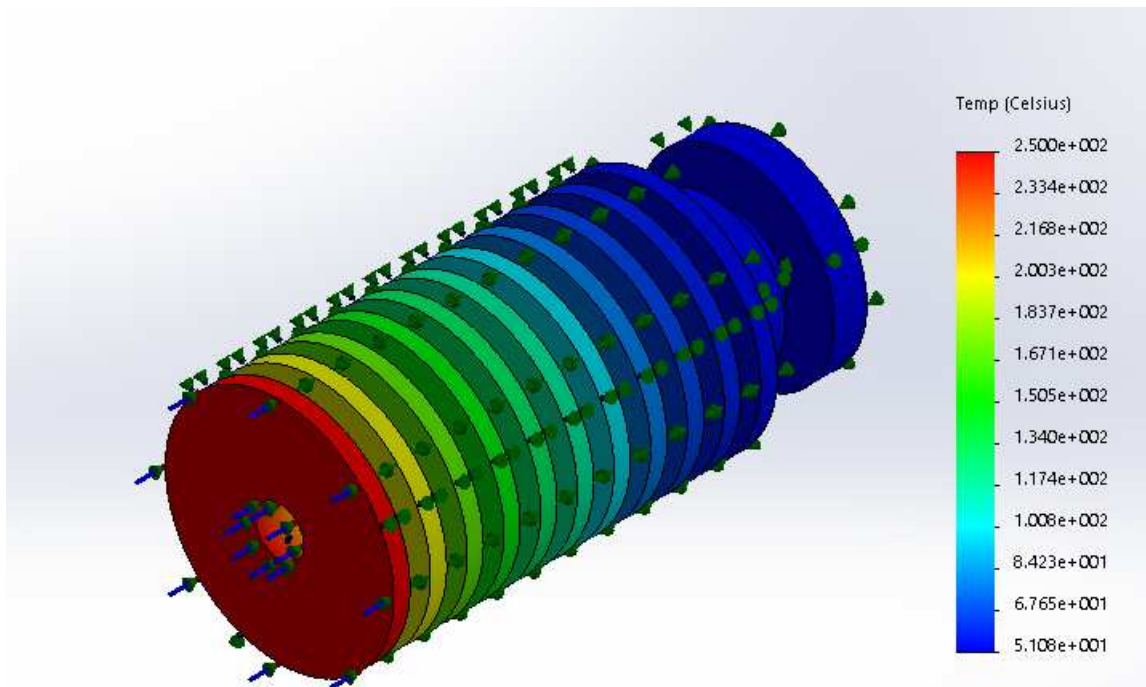


Figura 3.14: Simulação do bloco dissipador.

Portanto, com 11 aletas, na superior do bloco dissipador a temperatura seria de 51°C. Dado que apresenta-se ideal para o projeto.

3.6 Programação da impressora 3D

Para a programação utilizou-se o *software Repetier-HOST* (Figura 3.15), o qual é *open source*, ou seja, é um *software* aberto, sem licença para uso. Desenvolveu-se o programa especificamente para utilização de impressoras 3D. Este possui um *software* interno chamado *Slicer*, de fatiamento de peças em 3D. O *Repetier-Host* tem suporte para impressoras 3D tipo linear, *delta*, podendo ser usado também para CNC.

Utilizou-se o *firmware Marlin*, o qual possui melhores possibilidades de calibração da impressora.

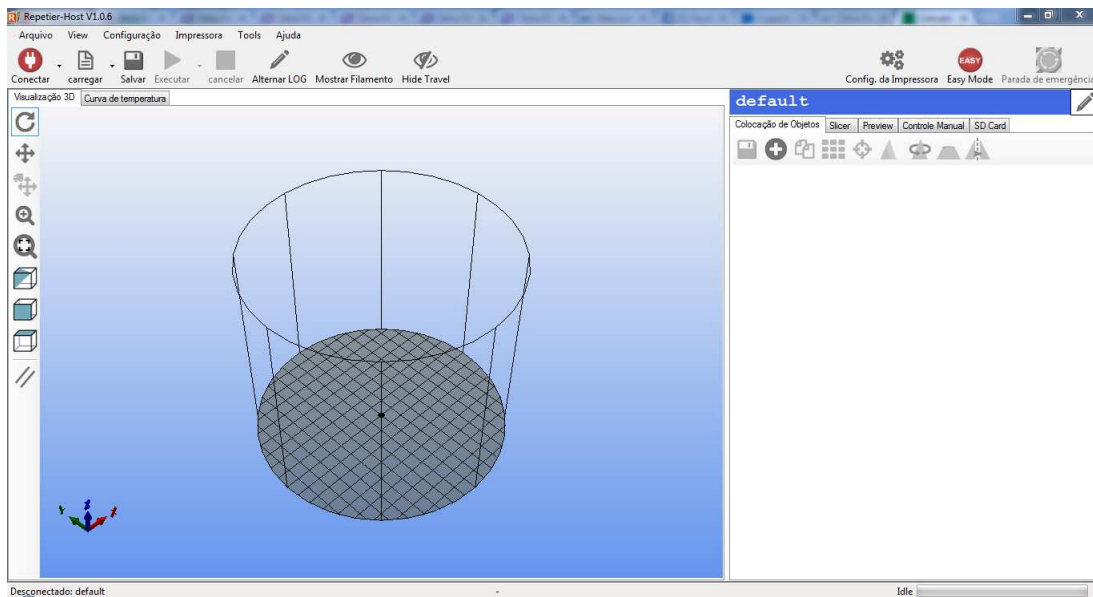


Figura 3.15: *Interface Repetier-Host.*

Este *software*, *Repetier-Host*, de impressão 3D apresenta uma *interface* muito interativa com o usuário. No centro coloca-se o desenho tridimensional do objeto a ser impresso. Na parte superior direita possui abas do *Slicer*, códigos G e controle manual. Neste local é possível o fatiamento do desenho em várias camadas, visualizar o programa em código G e há possibilidade também do controle manual da impressora 3D. Neste controle pode-se movimentar motores, aquecer a mesa aquecida ou o *hot end*.

3.7 Calibração da impressora 3D

A calibração envolve o ajuste do modo que o microcontrolador interpreta as instruções do código G e traduz estes em movimentos reais e precisos.

O *firmware Marlin* possui uma variável chamada *steps/mm* (passos por mm) o qual corresponde a quantos passos o motor necessita para movimentar 1 milímetro. Necessita-se para a calibração considerar alguns parâmetros físicos do motor, da polia e do A4988, os quais são descritos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Valores utilizados para a calibração

Estrutura	Valores
Nº de dentes da polia	36
Passos por revolução do motor	200
Micro-passo	1/16

Tendo estes valores definidos, o valor do *steps/mm* é calculado através da Equação 3.1

$$\text{Steps/mm} = \frac{\text{Passos/Revol} * \text{Micro.Passo}}{\text{Dentes.Polia} * \text{Passo.Polia}} \quad (3.1)$$

Utilizou-se esta calibração para os motores de movimentação. Neste ponto, necessita-se da calibração do motor da extrusora pela seguinte Equação 3.2.

$$E.\text{Steps/mm} = \frac{(\text{Passo/Revol} * \text{Micro.Passo}) * \frac{\text{Dentes.engre_Maior}}{\text{Dentes.engre_Menor}}}{\text{Diâmetro.efet} * \pi} \quad (3.2)$$

Como a extrusora possui uma redução, necessita-se que a relação entre os dentes destas polias entrem na equação. O valor dos dentes da engrenagem maior é de 46, e o da menor é de 11. O diâmetro efetivo é o diâmetro da engrenagem menor.

Estas calibrações são necessárias para que ao enviar um comando ao motor para movimentação, por exemplo 10mm, este deverá movimentar exatamente o requerido, a fim das dimensões projetadas serem iguais às projetadas.

As distâncias referentes à estrutura *delta* são outros parâmetros para calibração, como pode ser visto na Figura 3.16.

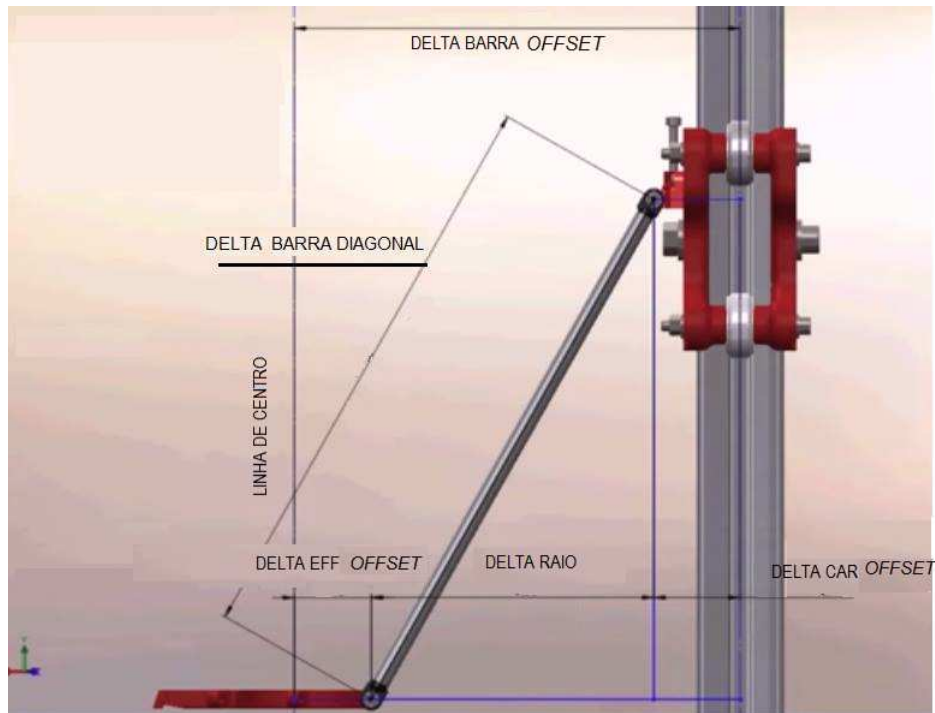


Figura 3.16: Parâmetros *delta* (ELECTRONHACKS, 2014).

Estas distâncias são únicas para cada impressora *delta* e interferem na movimentação

do sistema. Mediu-se estes valores com um paquímetro e são mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Parâmetros da calibração *delta*

Estrutura	Valores(mm)
<i>DELTA BARRA OFFSET</i>	190
<i>DELTA BARRA DIAGONAL</i>	255
<i>DELTA RAI0</i>	139
<i>DELTA CAR OFFSET</i>	23
<i>DELTA EFF OFFSET</i>	28

É necessário, também, fazer a calibração das chaves de fim de curso. Há possibilidade do uso destes sensores de diversas formas. Neste projeto, instalou-se as chaves de fim de curso na parte inferior do *idler*, fixada na parte superior da impressora. Este sensor é utilizado como proteção e também como posição final da altura da impressora. Esta posição final é chamada de *homing* e é definida como sendo a coordenadas $X = 0$, $Y = 0$ e $Z = MAX$. Estas correspondem à altura máxima da impressora, 136mm. A cada impressão os *carriages* são levados a posição *homing* e a impressão pode ser iniciada.

Outro fator a ser calibrar é a mesa aquecida. Este nivelamento é chamado de BAL (*bed auto leveling*). O auto nivelamento da mesa é um mecanismo criado para facilitar a impressão. No método antigo, o usuário deveria nivelar sua mesa de forma manual, por meio de ajustes com molas (conectadas abaixo da mesa) ou parafusos (fixadores de fim de curso). Gasta-se muito tempo com este método, pois o bico da impressora deve ser aproximado a 0,1 mm de distância da mesa aquecida e marcado como a "posição zero". Após isto, desloca-se a impressora para outro ponto e repete-se a ação.

O BAL utiliza um sensor preso ao bico aquecido ou conectado abaixo da mesa aquecida, podendo ser uma chave de fim de curso, sensor de vibração, sensor óptico, sensor ultrassom, ou pastilhas piezoelétricas. Neste trabalho foram feitos testes com sensores piezoelétricos fixados abaixo da cortiça de isolamento térmico. No entanto, não foi possível a implementação do BAL utilizando este método.

Resultados obtidos

4.1 Desenvolvimento da mecânica da impressora 3D tipo delta

Com a construção de toda parte estrutural, mesa aquecida, bico aquecido, extrusora e todas as outras partes já descritas, chegou-se à impressora 3D tipo *delta* (Figura 4.1).

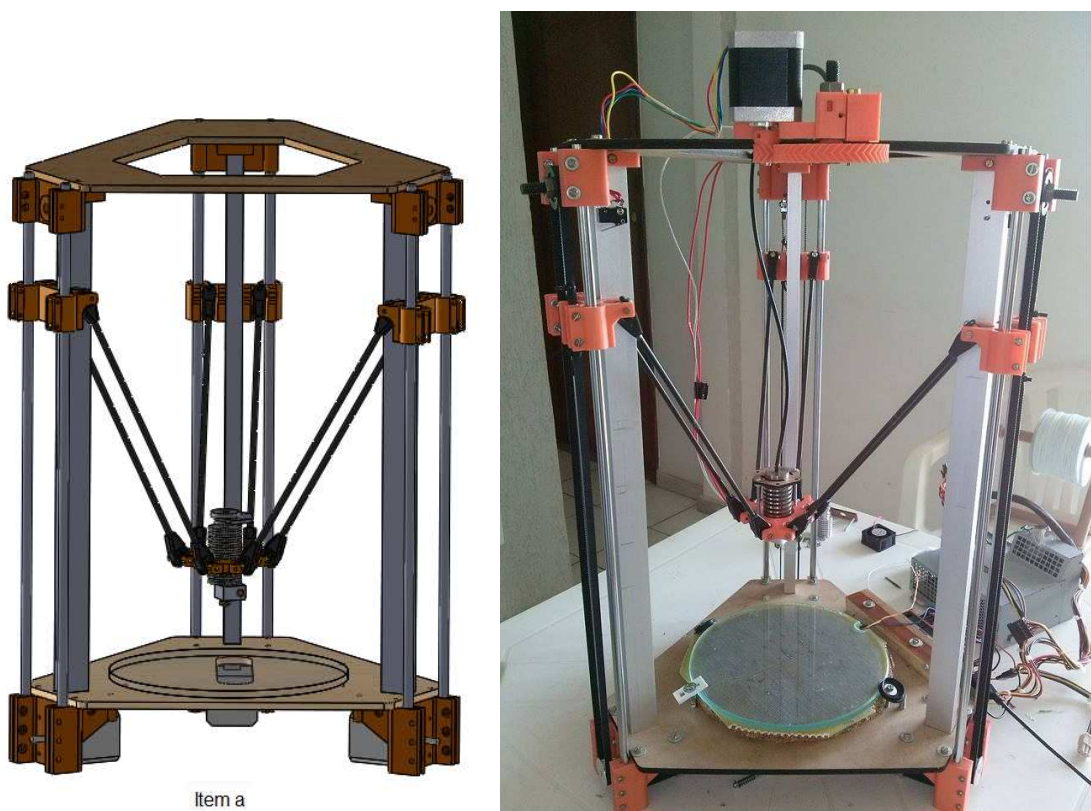


Figura 4.1: Impressora 3D tipo *delta* - projeto final.

A Figura 4.1 item a mostra o projeto final feito no *software SolidWorks* e, em seguida, o projeto final da impressora 3D montada. Pode-se perceber que todas as partes descri-

tas no projeto foram implementadas no desenvolvimento final. A Tabela 4.1 mostra os parâmetros da impressora assim como sua superfície de impressão.

Tabela 4.1: Parâmetros da impressora 3D

Estrutura	Medida
Altura total	550mm
Altura de impressão	136mm
Braços	230mm
Largura Total	340mm
Raio de impressão	75mm
Área de impressão	$176,62cm^2$
Volume total de impressão	$2650cm^3$

A mesa aquecida projetada inicialmente possuía 90mm de raio. No entanto, após teste de movimentação percebeu-se que ao movimentar a impressora para os limites da mesa havia interferência entre a barra fixa e os braços. Sendo necessário, então, diminuir o raio de impressão para 75mm.

4.2 Movimentação da impressora

Após feitas todas as calibrações necessárias na impressora, foi substituído o bico aquecido por uma caneta a fim de testar a movimentação e dimensão de impressão. Então, foi realizado uma plotagem de uma peça utilizada na máquina para comparação (Figura 4.2).



Figura 4.2: Plotagem da garra.

Após o teste da plotagem, foram feitas impressões em 3D de 3 peças diferentes. A primeira foi de um cubo com 10mm de aresta (Figura 4.3). E os resultados podem ser vistos na Tabela 4.2.

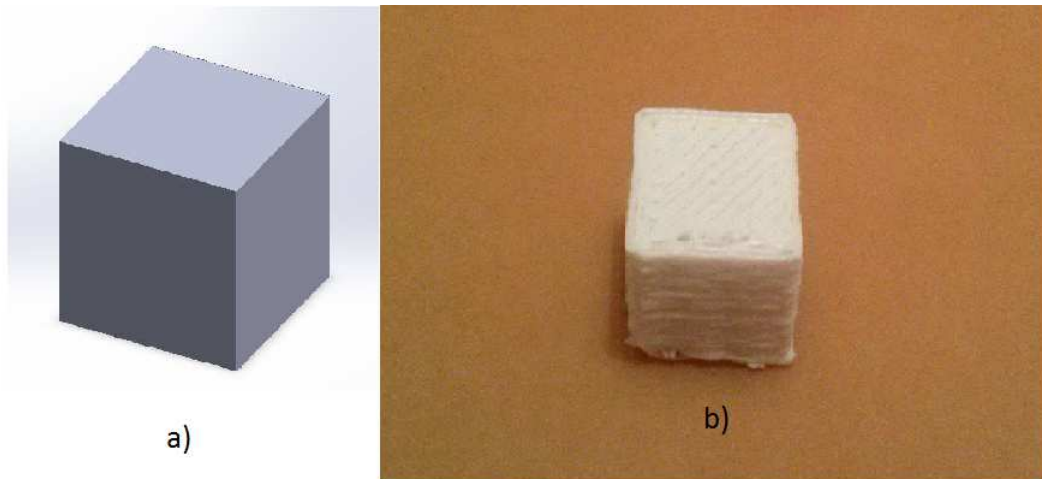


Figura 4.3: Cubo impresso.

A Figura 4.3 item a) representa a peça desenhada no *software* CAD e o item b) a peça impressa.

Tabela 4.2: Primeira impressão de um cubo.

	Medida Desenho (mm)	Medida Real (mm)	<i>Erro</i> (%)
Comprimento	10	10,2	2
Largura	10	10,1	1
Altura	10	10,1	1

Pode-se perceber que o cubo impresso possui dimensões de 11x9,5x9,7mm.

A segunda impressão foi de uma garra que pode ser vista na Figura 4.4 item b). E os resultados podem ser vistos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros da segunda impressão.

	Medida Desenho (mm)	Medida Real (mm)	<i>Erro</i> (%)
Comprimento total	28	30,5	8,9
Largura total	14	15	7,1
Altura total	10	9,9	1
Diâmetro do furo maior	6	5,8	3,3

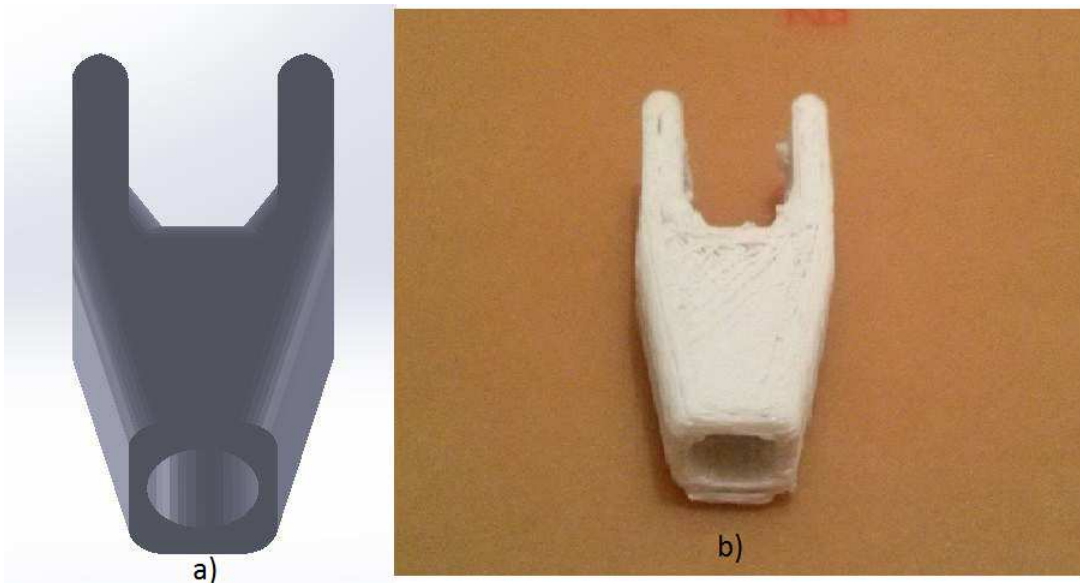


Figura 4.4: Braço impresso.

A terceira impressãõ foi de uma engrenagem que pode ser vista na Figura 4.5. E os resultados podem ser vistos na Tabela 4.4.

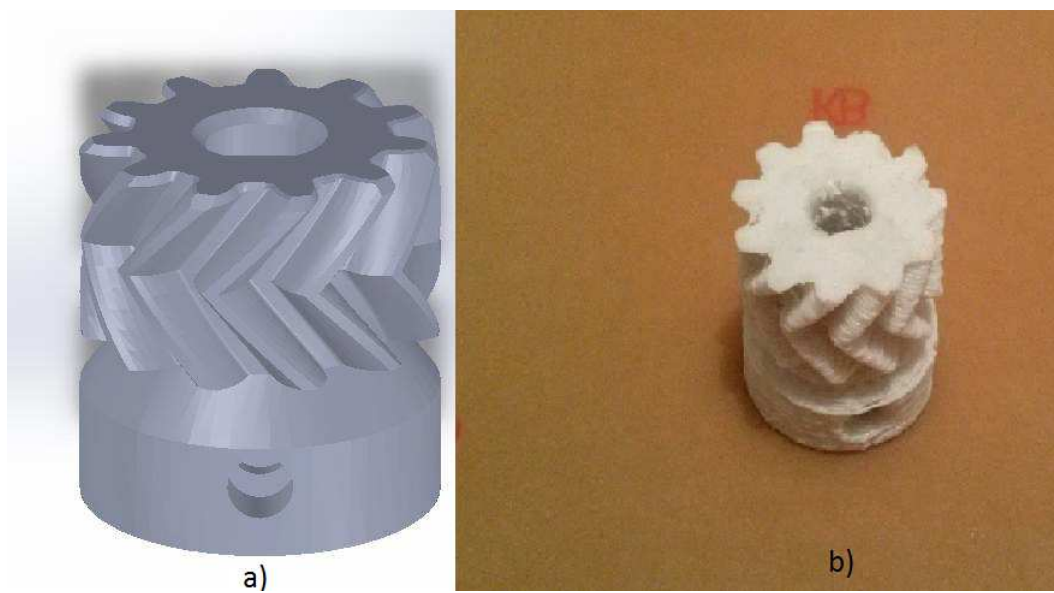


Figura 4.5: Engrenagem impressa.

Tabela 4.4: Parâmetros da terceira impressãõ

	Medida Desenho (mm)	Medida Real (mm)	<i>Erro</i> (%)
Diâmetro da base	17,5	19	8,5
Altura total	18,6	18,5	0,5
Diâmetro do furo	5,4	5,3	1,8

Pode-se perceber que foi possível imprimir peças de pequeno porte em 3D. No entanto, ainda são necessárias algumas calibrações para que a peça possua as dimensões mais próximas possíveis do desenho. Algumas medidas apresentaram um erro de até 10% em relação ao original. Este erro foi encontrado na maioria das vezes no comprimento horizontal das peças, sendo os erros referentes à altura da peça menos expressivos. É possível perceber que as peças impressas possuem rebarbas, sendo necessário, também, melhorar a calibração para ter qualidades maiores em impressões futuras.

4.3 Bico aquecido

O *hot end* que foi construído no Galpão de Mecânica do CEFET-MG pode ser observado na Figura 4.6.



Figura 4.6: Bico aquecido.

Foram feitos testes de aquecimento para verificar com os resultados obtidos na simulação do bico aquecido (Tabela 4.5).

Tabela 4.5: Temperatura nas regiões do bico aquecido.

Estrutura	Temperatura($^{\circ}C$)
Bloco Aquecedor	230
Bloco Dissipador	48

A Figura 4.7 mostra a curva de temperatura do bico aquecido, o eixo abscissas mostra o tempo total em minutos e o eixo das ordenadas mostra a temperatura. É possível perceber que o bico é aquecido até uma temperatura de 230°C em pouco menos de dois minutos.

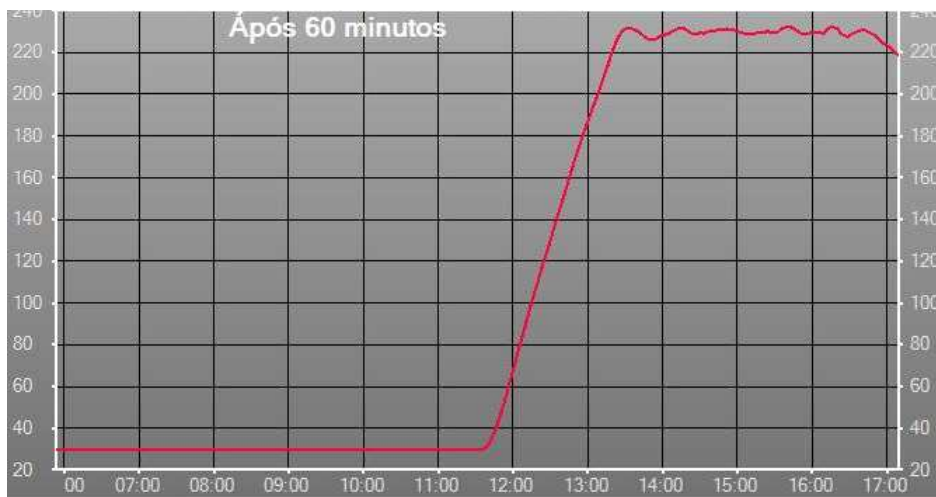


Figura 4.7: Temperatura no bico aquecido.

Ao chegar a uma temperatura de 220°C o ABS começa a ser extrudado, o que mostra que o bico está realizando sua função (Figura 4.8).

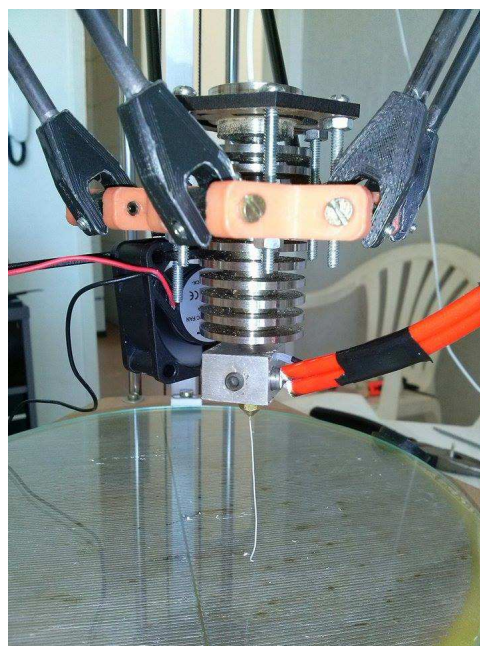


Figura 4.8: Extrusão do bico aquecido.

Pode-se perceber que o bico aquecido obteve os valores desejados e obtidos na simulação, já que o bloco aquecedor deveria ficar com a temperatura próxima de 240°C , que é ponto de fusão do ABS e na extremidade do bloco dissipador com uma temperatura de aproximadamente 50°C para não danificar o tubo *bowden*.

4.4 Mesa aquecida

Foram feitos vários testes utilizando o *dimmer* para controlar a tensão alternada na mesa aquecida. Foi aplicada uma tensão de 50V rms na entrada da mesa aquecida e foram adquiridos valores da temperatura em função do tempo. Utilizando o *MatLab* foi plotado o gráfico (temperatura x tempo) que pode ser visto na Figura 4.9.

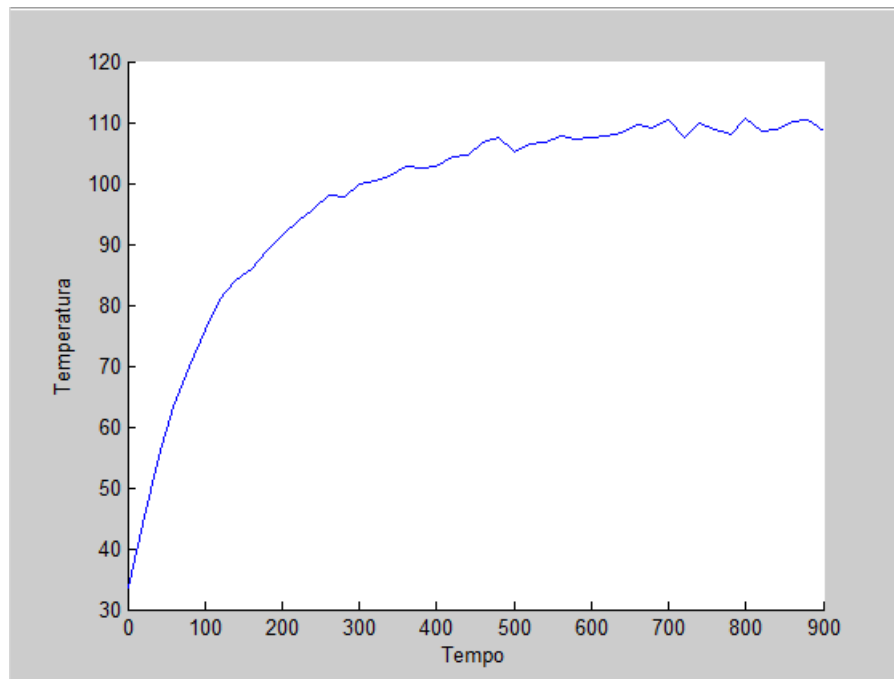


Figura 4.9: Gráfico da mesa aquecida.

Pode-se perceber que para uma tensão de 50 V RMS a temperatura final em regime permanente variou entre 110°C e 108°C , e o tempo para que a temperatura atingisse o regime permanente foi de 660 segundos.

Conclusões

A partir dos resultados mostrados na análise e discussão, pode-se tirar as seguintes conclusões sobre o desenvolvimento de uma impressora 3D.

1) O *hot end* projetado foi aquecido até 230°C e o calor foi dissipado para que a temperatura chegasse a 48°C na extremidade do bloco dissipador, fazendo com que o bico aquecido trabalhe em temperaturas ideais, e junto com a mini extrusora, para que ocorra a extrusão do material.

2) O projeto do *dimmer* foi realizado com sucesso de modo a controlar a tensão alternada de entrada para a mesa aquecida.

3) Ao aplicar 50 V RMS na mesa aquecida esta aquece-se até 110°C, temperatura necessária para a impressão do ABS. No entanto, o controlador PID não foi implementado, fazendo com que o aquecimento da mesa fosse mais demorado.

4) A estrutura da impressora 3D foi totalmente construída e possibilitou tanto a plotagem de desenhos em 2D como impressões de peças em 3D.

5) A calibração foi feita de modo que as impressões em 3D tivessem erros bem pequenos comparados com o tamanho real da peça. No entanto, melhorias ainda devem ser implementadas de forma a aumentar a qualidade de impressão. Peças de maior comprimento não foram impressas por causa da não implementação do BAL.

6) O orçamento final do trabalho (Apêndice B) foi de aproximadamente R\$ 850,00. Comparando com o modelo *Rostock Max v2* apresentado na Tabela 2.1, de configuração semelhante, mas com dimensões de impressão de 280mm de diâmetro e 170mm de altura, pode-se perceber que o valor é quase 10 vezes menor (R\$ 7900,00).

Projetos para trabalhos futuros

Os resultados obtidos através do desenvolvimento deste trabalho podem ser consideravelmente ampliados através dos seguintes trabalhos futuros:

- Implementação de um controlador PID para o aquecimento rápido da mesa aquecida;
- Implementação do auto nivelamento da mesa para o nivelamento da mesa aquecida usando sensor piezoelétrico;
- Melhoria na calibração da impressora 3D de forma a produzir peças com melhor qualidade.

Apêndice **A**

Apêndice - códigos

A.1 Projeto térmico da mesa aquecida

1 - Programa para calcular os parâmetros de uma impressora delta

```
function MedidasI3D
alturamotor=5
aresta=input('Entre com a aresta do cubo que será a área de trabalho da
impressora=')
diagonaldoquadrado=aresta*sqrt(2);
diametrodamesaaquecida=diagonaldoquadrado+1
alturadotriangulo=1.5*diametrodamesaaquecida;
ladobasetriangular=1.1547*alturadotriangulo + 3

ladobasetriangulararredondada=ladobasetriangular/2

raiobasearredondada=diametrodamesaaquecida/4
comprimentoarco=2*3.1415*raiobasearredondada/3

comprimentobracos=diametrodamesaaquecida-0.5+3-5
alturaimpressora=alturamotor+aresta+comprimentobracos
```

2 - Programa para controle do *dimmer*

```
#define loadR 4
volatile int power = 250;
volatile int passouzero=0;
unsigned long currentTime = 0; //this variable will be overwritten by millis()
each iteration of loop
unsigned long pastTime = 0; //no time has passed yet
int currentState = 0

void zero_crosss_int()
{
// Cálculo do ângulo de disparo: 60Hz-> 8.33ms (1/2 ciclo)
// (8333us - 8.33us) / 256 = 32 (aprox)
// Mantém o circuito desligado por powertime microssegundos
passouzero = 1;
}

void setup()
{
Serial.begin(9600);
pinMode(loadR, OUTPUT);
// Inicializa interrupção. 0 número zero indica a porta 2 do Arduino,
// zero_crosss_int é a função que será chamada toda vez que o pino 2
// "subir" (RISING) de valor de 0 para 1.
attachInterrupt(0, zero_crosss_int, RISING);
}

void loop()
{
// Seta a potência para diferentes níveis. Se o sistema estiver conectado a
uma lâmpada,
// esta vai variar de brilho.
```

```
if (passouzero==1)
{
int powertime = (32*(256-power));
delayMicroseconds(powertime);
// Envia sinal ao TRIAC para que ele passe a conduzir
digitalWrite(loadR, HIGH);
// Espera alguns microssegundos para que o TRIAC perceba o pulso
delayMicroseconds(8.33);
// Desliga o pulso
digitalWrite(loadR, LOW);
passouzero=0;
}
//currentTime = millis();
//if (currentTime - pastTime > 2000)
if (Serial.available())
{
Serial.read();
currentState++;
if (currentState==1)
{
power=0;
} else
if (currentState==2)
{
power=50;
} else
if (currentState==3)
{
power=100;
} else
if (currentState==4)
{
```

```
power=150;
} else
if (currentState==5)
{
power=200;
} else
if (currentState>5)
{
power=255;
currentState=0;
}
pastTime = currentTime; //currentTime at this point is the current time
from the previous iteration, this should now be pastTime }
}
```

3 - Programa *MatLab* para cálculo das espessuras das trilhas e as distâncias entre elas:

```
clc
clear all
close all

ro = 1.7*10^-8; %Resistividade do cobre
R_dese = 30; % Resistencia desejada
esp = 5*10^-5; %camada de cobre depositada na placa de fibra
largura = 0.001; %largura da trilha em m
A = esp*largura
R = R_dese;
L1 = (R*A)/ro %Largura total de cobre

%% Simulacao 1
```



```
% 1mm por 1mm
LarMax2 = 0.17*85+0.17
LarMax3 = LarMax2*(pi*0.09^2)/(0.17^2)
R2 = (ro*LarMax2)/A
P=500;
V = sqrt(P*R2)

%% Simulacao 2
%Se a trilha tivesse 0.5mm de largura e 0.5mm de distancia entra elas seria
%aproximadamente;

largura2 = 0.0005;
A2=esp*largura2;
LarMax3 = 0.170*170+0.17
LarMax4 = LarMax3*(pi*0.09^2)/(0.17^2)
R3 = (ro*LarMax4)/A2
V4 = sqrt(P*R3)
Corrente = V4/R3

%% Simulacao 3
%Se a trilha tivesse 0.6mm de largura e 0.4mm de distancia entra elas seria
%aproximadamente;

largura3 = 0.0006;
A3 = esp*largura3
LarMax5=0.17*170+0.17
LarMax6= LarMax5*(pi*0.09^2)/(0.17^2) + 0.18
R4 = (ro*LarMax6)/A3
V3 = sqrt(P*R4)
Corrente = V3/R4

%% Simulacao 4
```

```
%Se a trilha tivesse 0.7mm de largura e 0.3mm de distancia entra elas seria
%aproximadamente;
largura4 = 0.0007;
A4 = esp*largura4
LarMax7=0.17*170
LarMax8= LarMax7*(pi*0.09^2)/(0.17^2)
R5 = (ro*LarMax8)/A4
V5 = sqrt(P*R5)
Corrente = V5/R5
```

4 - Cálculo do da curva de temperatura da mesa aquecida:

```
clc
clear all
close all

%% Regime Permanente
h=25;
A=0.0314;
q=500;
p2=q/A;
Ti = 25;
R2 = 0.003/237;
R4 = 1/h;
R5 = 0.0015/0.046;
Rtot1 = R2+R4;
Rtot2 = R4+R5;
Ts1 =p2*(Rtot1*Rtot2)/(Rtot1+Rtot2) +(Rtot1*Rtot2)*Ti;
Ts3 = Ts1 - p2*R2

%% Regime Transiente
p = 2700;
```

```
c=875; % calor especifico J/kg.k
m=0.3;
V =A*0.001;
Tin = Ts3;
tal = p*V*c/(h*A);
Rt = (Tin - Ti)/q;
Ct = m*c;

for t = 1:5:3000
Tst = Tin-(Tin-Ti)*exp(-t/(Rt*Ct));
Ts = Tst - p2*R2;
hold on
plot (t,Ts)
xlabel('Tempo')
ylabel('Temperatura')
end
```

Apêndice B

Apêndice

1 - Memorial de cálculo para o sistema da mesa aquecida: O sistema da mesa aquecido foi escolhido como mostrado na Figura B.1.

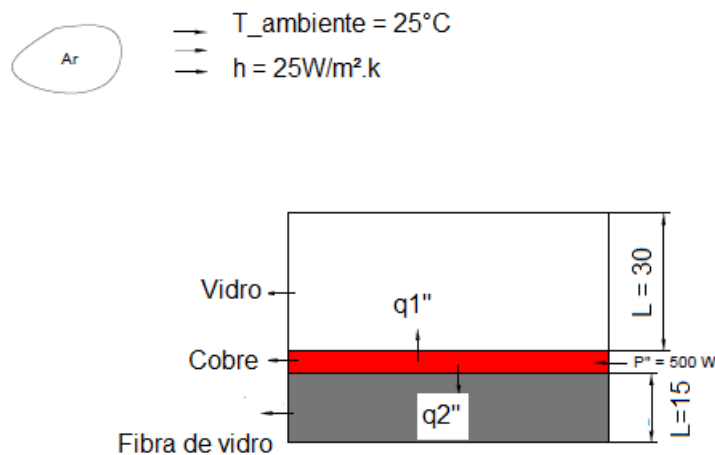


Figura B.1: Sistema de troca de calor

Este apresenta uma camada de vidro de 30mm de espessura, uma camada de 0,05mm de cobre e uma camada de 1,5mm de fibra de vidro. Uma potência máxima de 500W é aplicada no cobre e calor será dissipado pelo vidro. Uma analogia muito importante é a relação entre condução de calor e corrente elétrica. Descobriu-se que assim como uma resistência elétrica está associada à condução de eletricidade, uma resistência térmica pode ser relacionada à condução de calor. Então foi concluído por Saphiro (2005) que a resistência térmica na condução em uma parede plana é dada pela Equação B.1.

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{kA} \quad (\text{B.1})$$

E a resistência térmica na convecção é dada pela Equação B.2:

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (\text{B.2})$$

Onde, A é a área de contato, k é o coeficiente de resistividade e h é o coeficiente de convecção.

Então, utilizando o sistema de resistências térmicas, que pode ser visto na Figura B.2 e tomando como algumas suposições que:

- Condução é unidimensional
- Troca de calor por radiação térmica desprezada
- Propriedades constantes

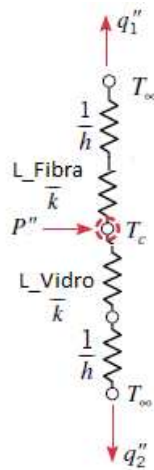


Figura B.2: Sistema de resistências térmicas

Descobriu-se que para uma potência de 500 W a temperatura em regime permanente é de 410°C:

Tendo o valor da temperatura em regime permanente, é necessário descobrir agora o valor da em regime transitório. Para descobrir o valor da condução transiente foi utilizado o métodos da capacitância concentrada, que tem como formula da temperatura em função do tempo descrita na Equação B.4

$$T_{(x)} = T_{infinito} - (T_{infinito} - T_i)e^{(-\frac{t}{R_t * C_t})} \quad (\text{B.3})$$

Os parâmetros R_t e C_t podem ser descobertos através da Equação B.4.

$$\tau_i = \frac{1}{hA} * \rho * V * c = R_t * C_t \quad (\text{B.4})$$

Onde, V = volume

c = calor específico

ρ = densidade.

2 - Orçamento do projeto:

Tabela B.1: Orçamento

Item	Preço(R\$)
Motores	160
Polias	21
Correias	12
Rolamentos	15
Barras cromadas	130
Parafusos	40
Estrutura MDF	15
Tarugo aço INOX	27
Barras de alumínio	10
ABS	75
Eletrônica	150
Cortiça	10
Vidro	10
Termistor/Cartucho Aquecedor	10
Bico	5
Sensores	10
Fita <i>kapton</i>	14
Fibra de carbono	50
Fonte de alimentação	30
Placa Fibra de Vidro	10
Total	847

Referências

- 3DIMPRESSOES. Relação Fabricante x modelo x preço impressoras 3D. –, [S.l.], 2013. Disponível em <http://www.3dimpressoras.com/modelos-precos-impressoras-3d/>, acessado em 20/10/2014.
- 3DOODLER. ABS vs PLA. –, [S.l.], 2014. Disponível em <http://the3doodler.com/2014/11/14/abs-vs-pla-whatwillyouchoose/>, acessado em 04/06/2014.
- ALMIR, A. Placa A4988. –, [S.l.], 2014. Disponível em <http://omecatronico.com.br/blog/a4988-driver-de-motor-de-passo>, acessado em 20/10/2014.
- AREDES, M. Tubulações industriais. *Universidade Santa Ursula*, [S.l.], 2014.
- BOOTSINDUSTRIES. Reasons for using a heat bed. –, [S.l.], 2013. Disponível em <https://bootsindustries.com/portfolio-item/heat-bed-3d-printing/>, acessado em 20/10/2014.
- BRAGA, N. C. Dimmers e controles de potência. –, [S.l.], 2012.
- BRITES, F. G.; SANTOS, V. P. A. Motor de Passo. *Universidade Federal Fluminense*, [S.l.], 2008. Disponível em <http://goo.gl/j74bDL>, acessado em 20/10/2014.
- BRUCE. How does the UP 3D printer's print head (Extruder) work? –, [S.l.], 2014. Disponível em <http://goo.gl/HZorv9>, acessado em 20/10/2014.
- CAVALCANTI, M. Cachorro deficiente consegue correr com ajuda de próteses feitas em impressora 3D. *uol*, [S.l.], 2014. Disponível em <http://goo.gl/nj8Sx5>, acessado em 05/10/2014.

- CHEN, L. C. Reverse engineering in the design of turbine blades - a case study in applying the MAMDP. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, [S.l.], v.16, p.161–167, 2000. Disponível em [http://dx.doi.org/10.1016/S0736-5845\(99\)00044-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0736-5845(99)00044-7), acessado em 20/10/2014.
- CHILSON, L. The Difference Between ABS and PLA for 3D Printing. –, [S.l.], 2013. Disponível em <http://goo.gl/r8Zgeh>, acessado em 29/10/2014.
- DIGITAL. Impressora 3D de alimentos chega ao mercado este ano. *uol*, [S.l.], 2014. Disponível em <http://olhardigital.uol.com.br/>, acessado em 30/10/2014.
- ELECTRONHACKS. Parâmetros *delta*. –, [S.l.], 2014. Disponível em <http://www.youtube.com/watch?v=Nexaf7X0oPg>, acessado em 20/10/2014.
- FIPROTOTIPOS, M. Prototipagem rápida 3D. –, [S.l.], 2014. Disponível em <http://www.fiprototipos.com.br/faq-informacoes-gerais/>, acessado em 20/10/2014.
- FOGGIATTO, J. A. *et al.* Moldes de ABS construídos pelo processo de modelagem por fusão e deposição para injeção de PP e PEBD. *SciELO*, [S.l.], v.14, 2004. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282004000500013>, acessado em 20/10/2014.
- FOLHA. Impressoras 3D de comida chamam atenção na CES. *Folha uol*, [S.l.], 2014. Disponível em <http://goo.gl/BXwDFT>, acessado em 03/12/2014.
- GRIMM, T. User's guide to Rapid Prototyping. *Society of Manufacturing Engineers*, [S.l.], 2004.
- HOTZA, D. Prototipagem rápida de pilhas a combustível de óxido sólido. *SciELO*, [S.l.], v.14, 2009. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762009000400003>, acessado em 20/10/2014.
- IKEDA, T. Fundamentals of Piezoelectricity. *Oxford University Press*, [S.l.], 1996.
- KARASINSKI, V. Analise: impressora 3d makerbot replicator 2x. –, [S.l.], 2013.
- KOCHAN, A. Rapid prototyping gains speed, volume and precision. *Assembly Automation*, [S.l.], v.20, p.295–299, 2000. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1108/01445150010378425>, acessado em 23/09/2014.

- LOPES, J. A. L.; ALMEIDA, L. C. Metodologia para concepção de prótese ativa de mão utilizando impressora 3D. *Universidade de Brasília*, [S.l.], 2013.
- MACIEL, M. Utilizando um sensor de temperatura - Termistor NTC 10K no PIC. -, [S.l.], 2014. Disponível em <http://goo.gl/OLVYj1>, acessado em 20/11/2014.
- MELLO, C. H. P. *et al.* Reprojetado de um dispositivo eletromecânico em uma abordagem de engenharia reversa integrada ao projeto para manufatura e montagem e á prototipagem rápida. *SciELO*, [S.l.], v.21, 2011. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132011005000059>, acessado em 20/10/2014.
- MOLITCH-HOU, M. Force Sensing Resistors Make for Auto Bed Levelling for 3D Printers. -, [S.l.], 2014. Disponível em <http://goo.gl/nEVpmi>, acessado em 20/10/2014.
- PATSKO, L. F. TUTORIAL Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores. *Universidade estadual paulista*, [S.l.], 2006. Disponível em <http://goo.gl/DXHVKN>, acessado em 05/10/2014.
- PINESI, M. Instalando a mesa aquecida. -, [S.l.], 2014. Disponível em <http://www.mattlab.com/blog/2014/11/16/instalando-a-mesa-aquecida/>, acessado em 01/07/2014.
- POLOLU. A4988 Stepper Motor Driver Carrier. -, [S.l.], 2014. Disponível em <http://www.pololu.com/product/1182>, acessado em 20/10/2014.
- PRINTERSKETCH3D. Placa *Shield*. -, [S.l.], 2013. Disponível em <http://printersketch3d.lojaintegrada.com.br/placa-ramps-14-reprap>, acessado em 20/10/2014.
- REPRAP. Arduino Mega Pololu Shield. -, [S.l.], 2014. Disponível em http://reprap.org/wiki/Arduino_Mega_Pololu_Shield, acessado em 28/07/2014.
- ROCHA, C. Como funciona a impressão 3D. -, [S.l.], 2013. Disponível em <http://blogs.estadao.com.br/link/como-funciona-a-impressao-3d/>, acessado em 20/10/2014.
- SAPHIRO, H. N. *et al.* *Introdução a Engenharia de Sistemas Térmicos*. [S.l.]: LTC, 2005.

-
- SMAR, A. Sensor piezoelétrico. –, [S.l.], 2013. Disponível em <http://goo.gl/14nI9R>, acessado em 20/10/2014.
- SOLIDUTOPIA. Marlin firmware user guide for beginners. –, [S.l.], 2014. Disponível em <http://solidutopia.com/marlin-firmware-user-guide-basic/>, acessado em 10/11/2014.
- START3DPRINTING. What is a Bowden extruder? –, [S.l.], 2013. Disponível em <http://start3dprinting.com/2013/07/what-is-a-bowden-extruder/>, acessado em 11/09/2014.
- UOL. Tripulação da ISS fabrica ferramenta com impressora 3D. , [S.l.], 2014. Disponível em <http://goo.gl/4Tm3AV>, acessado em 10/11/2014.
- VIVALDINI, K. C. T. Motores de Passos. *ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP*, [S.l.], 2009. Disponível em http://www.mecatronica.eesc.usp.br/wiki/upload/0/0a/Motor_passo.pdf, acessado em 20/12/2014.
- VOLPATO, N. Os principais processos de prototipagem rápida. –, [S.l.], p.31–57, 2007.
- WENDLING, M. Sensores. *Universidade estadual paulista*, [S.l.], 2010. Disponível em <http://goo.gl/19H3T0>, acessado em 01/10/2014.
- WIKIMEDIA. Fabricação aditiva. –, [S.l.], 2014. Disponível em <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:FDMbyZureks.png/>, acessado em 20/10/2014.
- ZANCUL, E. Manufatura aditiva já 'e realidade. *em Foco*, [S.l.], 2013.