

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO ESTADO DO PARÁ
ESCOLA DE NEGÓCIOS, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO - ARGO
BACHARELADO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

Luiz Fellipe dos Santos Sousa

MKBlack: Mesa Aquecida para Impressora 3D

Belém

2018

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO ESTADO DO PARÁ
ESCOLA DE NEGÓCIOS, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO - ARGO
BACHARELADO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

Luiz Fellipe dos Santos Sousa

MKBlack: Mesa Aquecida para Impressora 3D

Trabalho de Curso na modalidade Monografia, apresentado como requisito parcial para obtenção do grau em Bacharelado em Engenharia da Computação do Centro Universitário do Estado do Pará – CESUPA, sob orientação do Professor Esp. Itamar Jorge Vilhena de Brito e Co-orientação de Raphael Souza Rocha.

Belém

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)

Biblioteca do Cesupa, Belém - PA

Sousa, Luiz Fellipe dos Santos.

MKBlack: mesa aquecida para impressora 3D / Luiz Fellipe dos Santos Sousa; orientação de Itamar Jorge Vilhena de Brito, coorientação de Raphael Souza Rocha, 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia da Computação) – Centro Universitário do Pará, Belém, 2018.

1. Impressão digital. 2. Mesa aquecida. 3. Imagens – Técnicas digitais. I. Brito, Itamar Jorge Vilhena de (orient.). II. Rocha, Raphael Souza (coorient.). III. Título.

Luiz Fellipe dos Santos Sousa

MKBlack: Mesa Aquecida para Impressora 3D

Trabalho de Curso apresentado na modalidade monografia, apresentado como requisito parcial para obtenção do grau em Bacharelado em Engenharia da Computação do Centro Universitário do Estado do Pará – CESUPA.

Data da Defesa: 11/06/2018

Banca Examinadora:

Prof. Orientador Esp. Itamar Jorge Vilhena de Brito - CESUPA

Co-orientador Raphael Souza Rocha - CESUPA

Prof^a. Avaliadora Msc. Alessandra Natasha Alcantara Barreiro Baganha – CESUPA

Belém

2018

Aos meus pais Luiz Sergio Mendes de Sousa e Maria do Socorro Pinheiro dos Santos Sousa, irmão Luiz Sergio dos Santos Sousa, amigos e familiares.

AGRADECIMENTOS

- A Deus e a Nossa Senhora de Nazaré, por todas as graças alcançadas e que me abençoou com uma família unida;
- Aos meus pais Luiz Sergio Sousa e Maria do Socorro Sousa, que sempre me apoiaram e me deram forças pra sempre continuar estudando e correndo atrás dos meus sonhos. Fazendo o possível e o impossível para me dar tudo o que eu precisei pra vencer;
- Ao meu irmão que sempre acreditou em mim e sempre está ao meu lado pra tudo o que for preciso, me dando todo o incentivo necessário para torna os meus sonhos realidade;
- As minhas famílias Sousa e Santos que sempre estiveram presentes em todas as ocasiões da minha vida. Em especial aos meus avós Sandoval Taveira e Maria Ruth, que mesmo não estando mais nesse mundo, acredito que sempre estão ao meu lado me apoiando e me dando forças;
- Aos meus amigos e companheiros da LAB3D, Gabriel Almeida, Thiago Claudino, Raphael Rocha e Fabio Trindade que nunca mediram forças para me ajudar em todas as minhas tarefas das quais não consegui executar sozinho;
- Ao meu professor, amigo e orientador Itamar Brito que sempre me apoiou daquele seu jeito bruto, sempre incentivando no desenvolvimento de projetos, me ensinando que todo engenheiro tem que ser pratico, saber escrever e se expressar;
- Ao meu Co orientador e amigo Raphael Rocha que sempre esteve presente, me ajudando e apoiando nos momentos mais difíceis;
- A minha namorada Thaina Vasconcelos que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, me apoiando, dando forças e incentivando dizendo que eu ia conseguir vencer as minhas batalhas sejam elas quais fossem, que mesmo acontecendo uma derrota, ela continua me apoiando para que eu tivesse forças para levantar a cabeça e tentar novamente, até que essa derrota se torne uma vitória.

That happens more than you think, because this is not just engineering and science. There is art, too. Sometimes when you're in the middle of one of these crises, you're not sure you're going to make it to the other end. But we've always made it, and so we have a certain degree of confidence, although sometimes you wonder. I think the key thing is that we're not all terrified at the same time. I mean, we do put our heart and soul into these things.

Steve Jobs

RESUMO

A presente monografia trata sobre a MKBlack: mesa aquecida para impressora 3D, enfatizando por meio de testes comparativos dois modelos de mesas aquecidas, uma com o padrão de circuito e aquecimento, de modelo comercial mais usado no mercado e o modelo proposto pelo presente trabalho: a MKBlack. Esta mostra um padrão de circuito diferenciado e, conseqüentemente um aquecimento não usual com relação ao utilizado pelo mercado atual, enfatizando assim o decréscimo nas falhas das impressões 3D, comumente causadas pelo não aquecimento ou um aquecimento deficiente da mesa aquecida. No mesmo diapasão, frisou-se que mesmo o modelo mais usado no mercado, ainda necessita de mudanças e aperfeiçoamentos significativos. Já que o modelo MK2b é *Open Source*, foi possível utilizá-lo como princípio para desenvolvimento da mesa MKBlack, testada e aprovada em âmbito satisfatório. Tais testes de impressão mostraram a possibilidade de serem impressas peças de maior complexidade, tamanho e de formas diferentes, gerando assim, uma grande variedade de peças em cujo processo de produção não tenha ocorrido *warping*, conforme comprovado nos testes de aquecimento.

Palavras-chave: Mesa aquecida. Impressora 3D. *Warping*.

ABSTRACT

This monograph deals with MKBlack: a heated bed for a 3D printer, emphasizing by means of comparative tests two models of heated bed, one with the pattern of circuit and heating, of commercial model most used in the market and the model proposed by the present work: to MKBlack. This shows a differentiated circuit pattern and, consequently, unusual heating in relation to the current market, thus emphasizing the decrease in 3D printing failures, usually caused by non-heating or poor heating of the heated bed. In the same tuning fork, it was emphasized that even the most widely used model on the market still needs significant changes and improvements. Since the MK2b model is Open Source, it was possible to use it as a principle for the development of the MKBlack heat bed, tested and approved satisfactorily. Such print tests have shown the possibility of printing parts of greater complexity, size and in different forms, therefore generating a large variety of parts in the production process that did not occur warping, as proven in the heating tests.

Keywords: Heated bed. 3D printer. Warping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Primeira Impressora 3D FDM chamada de hot glue Project	22
Figura 2 – Impressora Darwin	23
Figura 3 – Modelo de Extrusor FDM	24
Figura 4 – Estrutura de impressão FDM	25
Figura 5 – Darwin	26
Figura 6 – Mendel	27
Figura 7 – Prusa i3 MK2	28
Figura 8 – Mesa aquecida com vidro	32
Figura 9 – Mesa aquecida MK2b	32
Figura 10 – Esquema de montagem	33
Figura 11 – Esquema de ligação	34
Figura 12 – Configuração e análise da temperatura	35
Figura 13 – Configuração do controle de temperatura	36
Figura 14 – Impressão com Warping	37
Figura 15 – Medidas de y1 e y2	38
Figura 16 – Impressão que não aderiu na mesa	38
Figura 17 – Circuito do modelo MK2b	40
Figura 18 – Pontos do início e final de cada circuito	41
Figura 19 – Circuito da MKBlack	42
Figura 20 – Pontos de alimentação do circuito	43
Figura 21 – Divisão dos circuitos	44
Figura 22 – Mesa aquecida MKBlack	44
Figura 23 – Termovisor FLIR E4	46
Figura 24 – Processo de aquecimento do modelo MK2b	47
Figura 25 – Processo de aquecimento do modelo MKBlack	47
Figura 26 – Processo de Aquecimento não uniforme do modelo MK2b	48
Figura 27 – Processo de Aquecimento uniforme do modelo MKBlack	49
Figura 28 – Gráfico tempo X temperatura	49
Figura 29 – Impressão com múltiplas peças	50
Figura 30 – Duas peças com warping em pontos distintos	51
Figura 31 – Testes de impressões com e sem warping	52
Figura 32 – Modelo de teste	53

Figura 33 – Modelo impresso na MKBlack.....	54
Figura 34 – Modelo impresso na MK2b	55
Figura 35 – Local do warping que causou o erro de impressão	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações técnicas da mesa aquecida MK2b	42
Quadro 2 – Especificações técnicas da mesa aquecida MKBlack.....	45
Quadro 3 – Configuração utilizadas no teste.....	53
Quadro 4 - Resultados obtidos nos testes de comparação	56

LISTA DE SIGLAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>
DIY	<i>Do It Yourself</i>
FDM	<i>Fused Deposition Processing</i>
GND	<i>Ground</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
NO	Normalmente aberto
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PCL	Polycaprolactone
PLA	Ácido Poliláctico ou Políácido Láctio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	MOTIVAÇÃO.....	17
1.4	OBJETIVO.....	17
1.4.1	Objetivo geral	17
1.4.2	Objetivo específico	17
1.5	METODOLOGIA.....	18
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	EMBASAMENTO TEÓRICO PARA O DESENVOLVIMENTO DA MESA	
	AQUECIDA	19
2.1	LEI DE OHM.....	19
2.1.1	História.....	19
2.1.2	Primeira lei de ohm	20
2.1.3	Segunda lei de ohm	20
2.2	LEI DE JOULE.....	20
2.2.1	História.....	20
2.2.2	Lei de joule	21
2.3	EVOLUÇÃO DAS IMPRESSORAS 3D	21
2.4	FUNCIONAMENTO.....	23
2.5	MODELOS DE IMPRESSORAS 3D.....	25
2.5.1	Darwin	26
2.5.2	Mendel.....	27
2.5.3	Prusa	28
3	OPERAÇÃO COM A MESA AQUECIDA.....	30

3.1	O QUE É UMA MESA AQUECIDA?	30
3.2	TEORIA DAS MESAS AQUECIDAS	30
3.3	MESA AQUECIDA PCB	31
3.4	MONTAGEM E FUNCIONAMENTO	33
3.5	PORQUE USAR MESA AQUECIDA	36
3.5.1	Warping	36
3.5.2	Impressão não aderindo na mesa	38
4	COMPARAÇÃO DOS CIRCUITOS	40
4.1	COMPARAÇÃO DOS CIRCUITOS	40
4.1.1	Circuito MK2b	40
4.1.2	Circuito MKBlack	42
5	RESULTADOS OBTIDOS	46
5.1	COMPARAÇÃO DO AQUECIMENTO.....	46
5.2	TESTES DE IMPRESSÕES 3D	50
5.3	COMPARAÇÃO DE IMPRESSÃO	52
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS ENTRE AS MESAS AQUECIDAS	56
6	CONCLUSÃO	57
6.1	DIFICULDADES ENCONTRADAS	58
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	59
7	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A produção de impressoras 3D comumente conhecidas como DIY (*Do It Yourself*) reduziu o custo dos componentes principais que acompanham a máquina. Além disso, as indústrias que desenvolvem impressoras 3D estão sempre se atualizando com novos modelos. Essa variedade diz respeito a configurações únicas que cada máquina pode atingir de acordo com a área de impressão disponível e os polímeros suportados para trabalho. Destaca-se aqui a mesa aquecida, peça fundamental na qualidade final da impressão 3D devido ao seu papel de garantir adesão do polímero aquecido por meio de uma distribuição de calor uniforme em sua superfície.

No cenário atual, empresas como a Prusa (2018) investem na tecnologia de suas mesas aquecidas como diferencial no mercado, assim como outras startups se especializam apenas em adesivos e materiais autocolantes que garantem um upgrade para as mesas existentes no mercado.

A mesa aquecida se destaca como um dos maiores atrativos e modificações desejadas pelas indústrias e usuários. Devido à existência de meios economicamente viáveis de produção de uma mesa, a partir de conhecimentos adquiridos por experiência em impressão 3D e conhecimento das teorias da física aplicada e da eletrônica. Porém ainda existe dificuldade na questão da qualidade e da funcionalidade das mesas de baixo custo.

Nos dias de hoje existem alguns modelos de mesa aquecida à venda no mercado, as quais, em sua maioria são feitas tendo como base a primeira mesa aquecida desenvolvida por Josef Prusa (REPRAP, 2018).

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Muitas impressões são perdidas ou não terminam da forma desejada, por problemas que acontecem, onde, muitas das vezes ocorrem de forma inevitável. Devido a própria impressora 3D não ter um componente adequado para que esse problema seja evitado. Muitos dessas perdas de impressão são causadas pela perda brusca de temperatura e no descolamento total da peça. Esses erros acontecem

devido à ausência da mesa aquecida, cuja função principal é amenizar ou até mesmo evitar que esses erros aconteçam.

1.2 JUSTIFICATIVA

A necessidade de evitar erros constantes em impressões tridimensionais devido a uma má aderência dos polímeros, ensejou o desenvolvimento de uma mesa aquecida com três circuitos separados, contendo correntes diferentes em áreas distintas que conferem uma melhor distribuição de temperatura e estabilidade térmica. Essa nova abordagem de suporte tecnológico, otimiza ainda mais a performance da impressão 3D.

1.3 MOTIVAÇÃO

A oportunidade de contribuir com mais informações para uma tecnologia ainda em crescimento, utilizando como base os estudos bibliográficos e a própria experiência obtida por trabalhos já realizados nessa área, impulsionaram a criação de um produto que apresenta utilidade no mercado atual, devido ao fato de solucionar erros de um dos componentes mais importantes da impressora 3D, no caso a mesa aquecida. Visa-se, com isso, o aprimoramento constante das tecnologias que nos rodeiam e podem trazer melhorias no cotidiano de milhares de usuários e empresas e por ser mais uma opção de componente para a tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*).

1.4 OBJETIVO

1.4.1 Objetivo geral

Desenvolver o circuito de uma mesa aquecida para solucionar problemas como o tempo total de aquecer até estabilizar, o aquecimento de modo uniforme em toda a sua área, a mudança brusca de temperatura e a não adesão de impressões na mesa.

1.4.2 Objetivo específico

- Comparar a performance via aferição do tempo de aquecimento entre as duas mesas aquecidas.

- Analisar mediante o emprego de câmera térmica para a verificação do aquecimento uniforme.
- Testar a adesão das impressões para verificar se ocorrem ou não mudanças bruscas de temperatura ou o descolamento total da impressão na mesa proposta.

1.5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesse projeto está de acordo com os estudos feitos em circuitos resistivos, na Lei de Ohm, na Lei de Joule e nas mesas aquecidas existentes no mercado. Tais componentes também serviram de base para o desenvolvimento do circuito, onde foi utilizado o *software* EAGLE da AUTODESK.

Nos testes utilizou-se do método de aferição por meio de uma câmera térmica para a coleta de dados e verificação da temperatura para melhor comparação do aquecimento entre a mesa aquecida proposta e uma já existente. Logo depois dessa análise, foram feitos testes de impressão 3D em ambas as mesas, onde utilizou-se do método de aferição para comprovar o descolamento da impressão ou mudanças bruscas de temperatura.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do presente trabalho foi dividida em 6 capítulos. Logo após este capítulo introdutório, o segundo capítulo trata da fundamentação teórica, onde são mostradas as Leis da física aplicada utilizadas, como as Leis de Ohm e a Lei de Joule. Ainda é tratado nesse capítulo a evolução e o funcionamento das impressoras 3D, mostrando as diferenças dos modelos mais conhecidos.

No terceiro capítulo faz-se uma abordagem sobre o que é, como se instala e configura, para que é utilizada, o funcionamento e descreve-se qual foi a mesa aquecida utilizada para as comparações aferidas no presente trabalho.

O capítulo quatro demonstra os circuitos das mesas MKBlack e MK2b, mostrando e comparando as principais diferenças entre os dois circuitos.

O quinto capítulo demonstra os testes de aquecimento e impressão, assim como as análises dos resultados obtidos, verificando a comparação do processo de aquecimento e da impressão do modelo de teste.

Por fim o capítulo seis disserta sobre as considerações finais do presente trabalho, relatando as dificuldades encontradas e os trabalhos futuros.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO PARA O DESENVOLVIMENTO DA MESA AQUECIDA

Nesse capítulo será abordado todo o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento de uma mesa aquecida, referente a física aplicada, como as Leis de Ohm e a Lei de Joule, que foram necessárias para a construção do circuito da mesa aquecida. Além do funcionamento da tecnologia de impressão 3D e os modelos de impressoras 3D mais famosas, mostrando assim as principais diferenças entre esses modelos.

2.1 LEI DE OHM

2.1.1 História

O alemão Georg Simon Ohm nascido na Bavária no dia 16 de março de 1789 e morreu em Munique no dia 6 de julho de 1854, foi o descobridor dos fundamentos da eletro cinética, onde se estuda as correntes elétricas em movimento. Ele deu o seu nome à lei e foi denominada em sua homenagem a unidade de resistência elétrica.

O referido autor, formou-se físico pela Universidade de Erlangen. Ohm em meados de 1820 realizou um trabalho de pesquisa para ser professor universitário, onde foi necessário fabricar os seus próprios equipamentos. Nesse período ele desenvolveu a teoria matemática da condução elétrica nos circuitos, tendo como base o estudo sobre a condução de calor de Fourier (SÓMATEMÁTICA, 1998).

Só Matemática (1998) diz que por volta de 1827, Ohm conseguiu desenvolver o enunciado que ficou conhecido como a Lei de Ohm. Esse enunciado contém o envolvimento das grandezas e da diferença de potencial: “A intensidade da corrente elétrica que percorre um condutor é diretamente proporcional à diferença de potencial e inversamente proporcional à resistência do circuito” (COSTA, 2013, p.7).

2.1.2 Primeira lei de ohm

A Primeira Lei de Ohm consiste na razão entre a diferença de potencial e a corrente elétrica em um condutor, que é igual a resistência elétrica desse condutor com uma resistência constante (COSTA, 2013), como mostrado na Formula (1). Onde esses tipos de condutores são chamados de condutores ôhmicos. Onde: R é a resistência elétrica, i é a corrente elétrica, U é a diferença de potencial.

$$R = \frac{U}{i} \quad (1)$$

2.1.3 Segunda lei de ohm

A Segunda Lei de Ohm mostra quais os fatores que influenciam a resistência elétrica. De acordo com essa lei, a resistência depende da espessura e do comprimento, ou seja, da geometria do condutor e de qual material ele é feito (COSTA, 2013).

A Fórmula (2) ainda segundo Costa (2013), também mostra a razão entre o comprimento e a área do condutor, multiplicado pela sua resistividade. Caso seja aumentado o comprimento do condutor, a sua resistência elétrica será aumentada e caso a sua área seja aumentada, haverá uma diminuição da sua resistência elétrica. L é o comprimento do condutor, A é a área de sua secção reta, ρ é resistividade do condutor, que depende do material do qual o mesmo é fabricado e também de sua temperatura.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

2.2 LEI DE JOULE

2.2.1 História

James Prescott Joule nasceu em 24 de dezembro de 1818. Foi um Físico inglês que teve seu trabalho baseado em conservação de energia e temperatura. Suas descobertas tiveram uma grande contribuição em máquinas industriais movidas a vapor do sec. 19, também com motores elétricos e transmissão de energia em longa distância (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2016).

De acordo com a Encyclopaedia Britannica (2016), conforme a concepção de Joule, as energias mecânica, elétrica e calorífica são basicamente as mesmas, e podem ser transformadas entre si. Com isso em mente, ele formulou a lei da conservação de energia. Também mostrou que calor é uma forma de energia e sua unidade de medida hoje em dia é adotada no Sistema Internacional como Joule (J).

Só Física (2008) diz que Joule também estudou a corrente elétrica. Depois de muitas experiências descobriu que, assim que um condutor é aquecido após ter sido percorrido por uma corrente elétrica, dá-se a transformação da energia elétrica para a energia térmica. Esse fenômeno foi nomeado em sua homenagem, sendo assim chamado de Efeito Joule (SÓ FÍSICA, 2008).

2.2.2 Lei de joule

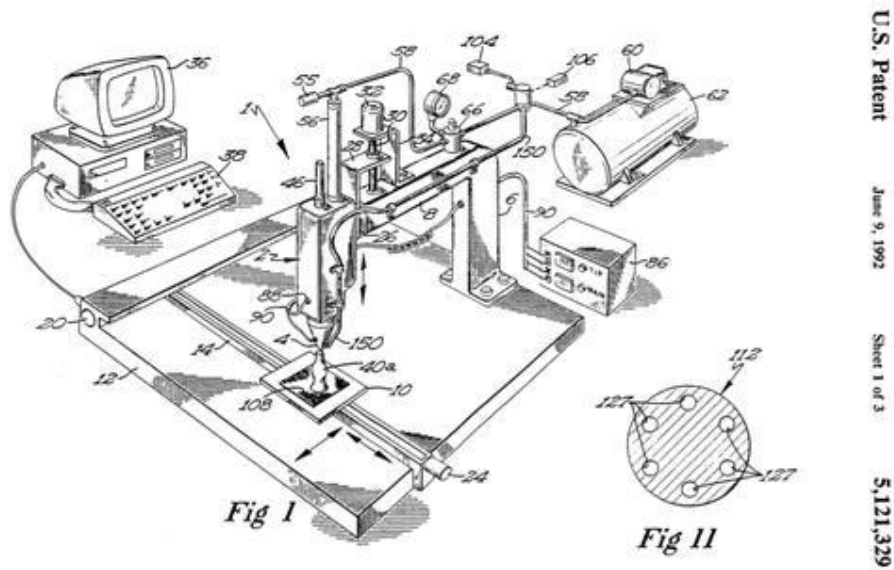
A lei de joule diz que o calor produzido em um condutor por uma corrente elétrica é proporcional ao produto da resistência do condutor e o quadrado da corrente, como mostrado na Formula (3) (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2017). Onde: Q é o calor gerado, I é a corrente elétrica, R é a resistência, t é a duração ou intervalo de tempo em que a corrente elétrica percorreu no condutor.

$$Q = I^2 . R . t \quad (3)$$

2.3 EVOLUÇÃO DAS IMPRESSORAS 3D

O invento do primeiro protótipo de uma impressora 3D *Fused Deposition Modeling* (FDM), ocorreu no final da década de 80 por Scott Crump (1992), engenheiro que adaptou uma *Plotter 2D*, com o objetivo de otimizar a prototipagem rápida (ROCHA, 2017).

Figura 1 – Primeira Impressora 3D FDM chamada de *hot glue Project*

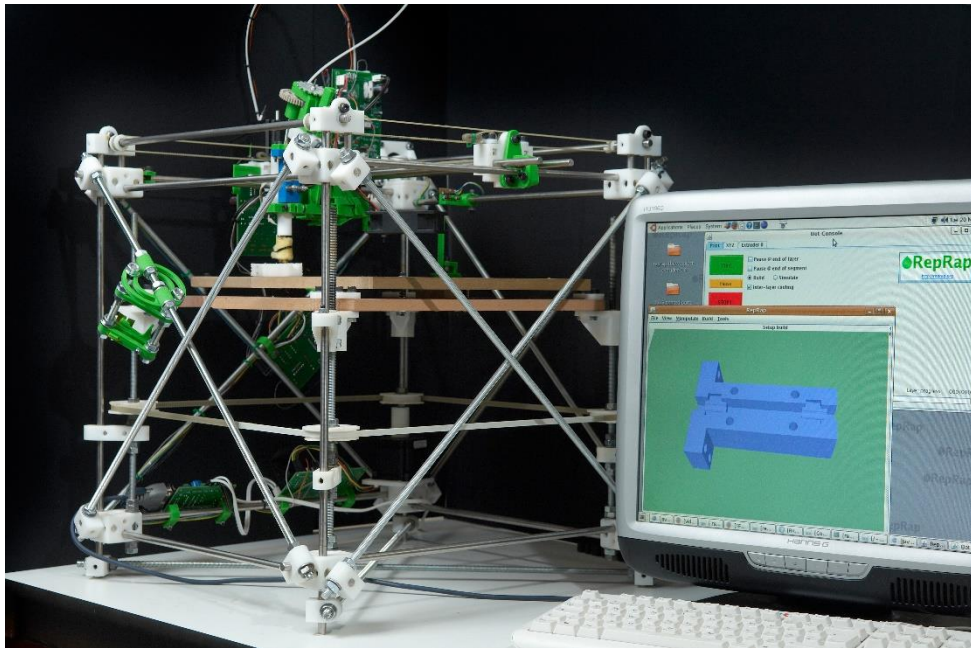


Fonte: Crump (1992, p.1)

O projeto de Crump (1992) que ficou popularmente conhecido como *Hot Glue Project* extrudia uma mistura de cera de vela com polietileno através de uma pistola de cola quente em um processo automatizado, como demonstra a Figura 1. Além do objetivo de otimizar a prototipagem rápida (ROCHA, 2017).

As impressoras 3D se popularizaram por meio do movimento RepRap criado por engenheiros no início dos anos 2000 com intuito em disseminar a tecnologia DIY (*Do It Yourself*), O projeto desenvolveu o primeiro modelo de impressora 3D *Open Source* chamada Darwin como mostra a Figura 2, a qual extrusava polímeros e utilizava um sistema de código aberto por meio de programação de Controle Numérico (NC), também conhecido como G-Code (REPRAP, 2011).

Figura 2 – Impressora Darwin



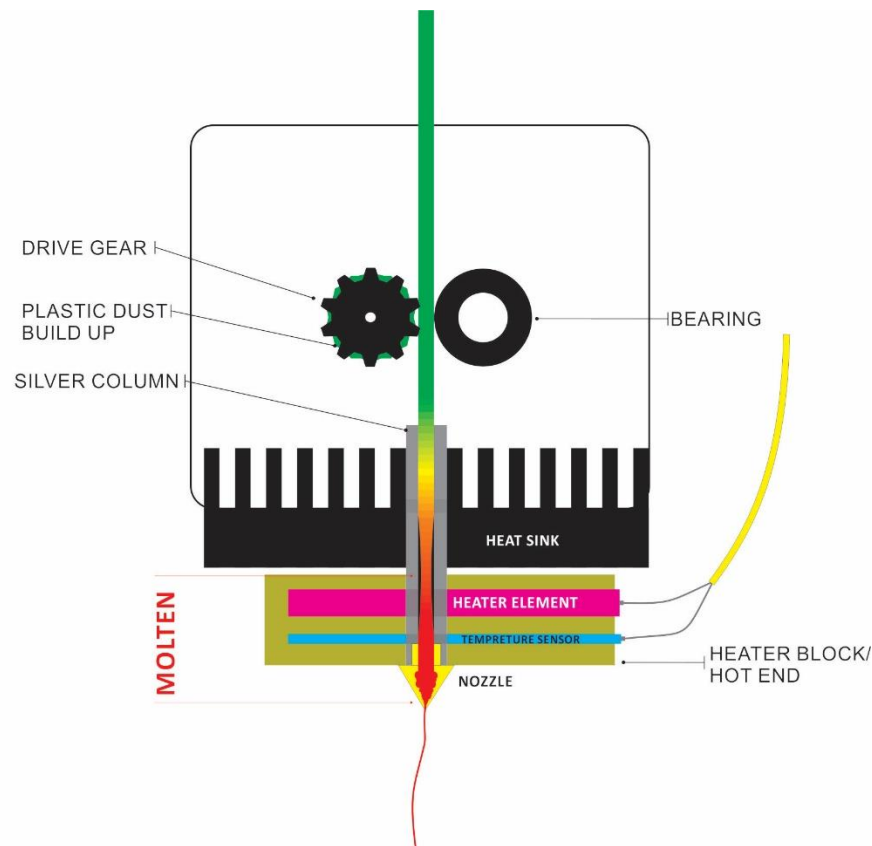
Fonte: REPRAP (2014, Online)

Com a evolução da tecnologia de impressão 3D FDM, novas utilidades foram propostas de modo com que componentes mais modernos passaram a ser produzidos.

2.4 FUNCIONAMENTO

De acordo com Rocha (2017), a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM) de impressão 3D desenvolve peças através do aquecimento do bloco aquecedor e logo depois é feita a extrusão do polímero (filamento termoplástico) aquecido, que é despejado pelo bico, de baixo para cima camada por camada até a formação do objeto como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Modelo de Extrusor FDM



Fonte: 3dprintingsystems (2014, Online)

Existem três etapas nas quais a tecnologia de impressão 3D FDM se baseia, que são o pré-processamento, a produção e o acabamento (ROCHA, 2017).

A primeira etapa é o pré-processamento, onde são feitas as configurações e o fatiamento do modelo 3D, e é utilizado um software no qual se insere especificações da impressora 3D como o tamanho da área de impressão, espessura do bico, espessura do filamento e outras especificações que dependem do *hardware*. A partir dessas especificações é feito um cálculo que determina a quantidade do material utilizado, o método de fatiamento e o tempo de produção.

A produção é a segunda etapa, que é a execução das configurações da etapa anterior, junto com o movimento dos eixos e a extrusão do polímero aquecido em camadas na formação da peça.

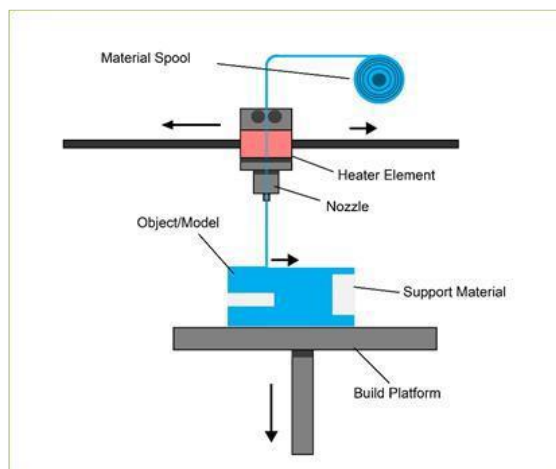
O acabamento é a terceira e última etapa, que envolve finalização da peça, a retirada de suportes, o lixamento da peça caso necessário e pintura. Esses acabamentos podem depender do fatiamento e da qualidade de impressão.

O funcionamento de uma impressora 3D pode ser observado na Figura 4, a qual mostra a direção que os eixos se movimentam e caminho que o filamento termoplástico percorre, como é descrito por Rocha et al. (2017, p. 26):

A tecnologia FDM funciona com um fio de plástico ou fio de metal que é desenrolado de uma bobina e fornece material para um bocal de extrusão podendo ligar e desligar o fluxo. O bico é aquecido para derreter o material e pode ser movido em direções horizontais e verticais por um mecanismo controlado numericamente, diretamente gerenciado por um pacote de software de fabricação assistida por computador (CAM). O objeto é produzido por extrusão de material derretido para formar camadas quando o material se endurece imediatamente após a extrusão do bico.

Ainda de acordo com Rocha et al. (2017), a tecnologia de impressão 3D FDM utiliza muitos tipos de materiais de filamentos, que podem variar as suas propriedades, como materiais flexíveis e até materiais condutores. Porém os filamentos mais utilizados são dois do tipo plástico: PLA (ácido polilático) e o ABS (acrilonitrilo butadieno estireno).

Figura 4 – Estrutura de impressão FDM



Fonte: Rocha (2017, p. 26)

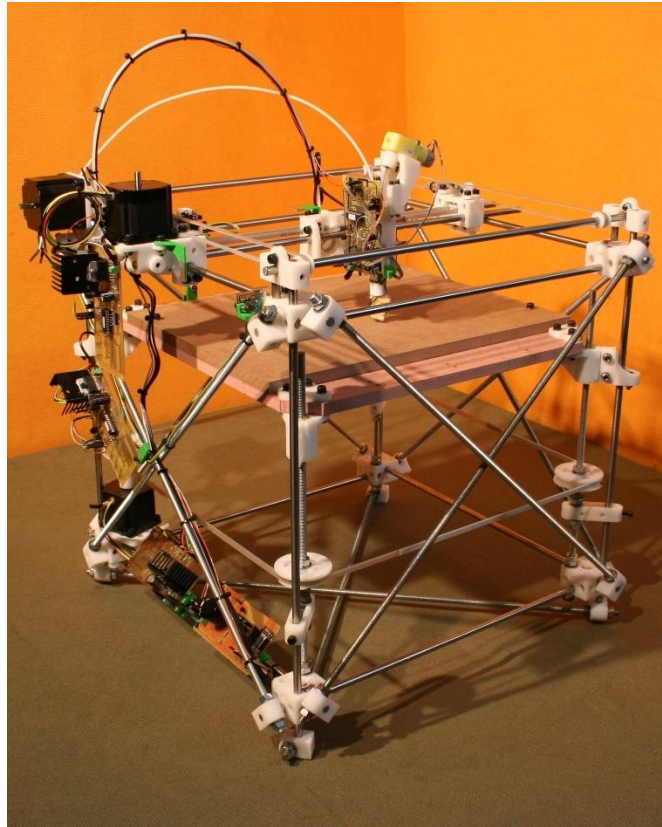
2.5 MODELOS DE IMPRESSORAS 3D

Na atualidade existem vários modelos de impressora que foram feitas tendo como base as impressoras *open source* como a Darwin e a Mendel que foram desenvolvidas pelo movimento RepRap, e Prusa que foi desenvolvida por Josef Prusa, que é uma das mais conhecidas e que serviu como base para a criação de muitos outros modelos de impressoras 3D FDM.

2.5.1 Darwin

A Darwin também conhecida como RepRap 1.0 “Darwin”, foi a primeira impressora 3D *Open Source* na tecnologia DIY desenvolvida pela RepRap, como ilustrado na Figura 5 (REPRAP, 2007).

Figura 5 – Darwin



Fonte: RepRap (2007, Online)

Darwin é uma impressora de prototipagem rápida, que tem a capacidade de imprimir em PCL (polycaprolactone), podendo imprimir a maioria de seus próprios componentes. Seus arquivos de descrição, configuração e montagem podem ser encontrados no próprio site da RepRap (REPRAP, 2007).

Ainda segundo a RepRap (2007), a sua estrutura é composta por barras lisas com suas junções impressas, assim formando um cubo com dimensões de 600 mm de largura x 520 mm de profundidade x 650 mm de altura, com a sua dimensão para área de impressão de 230 mm (X) x 230 mm (Y) x 100 mm (Z). Sua mesa é feita de MDF, que se move verticalmente por uma barra roscada que é acionada por um motor

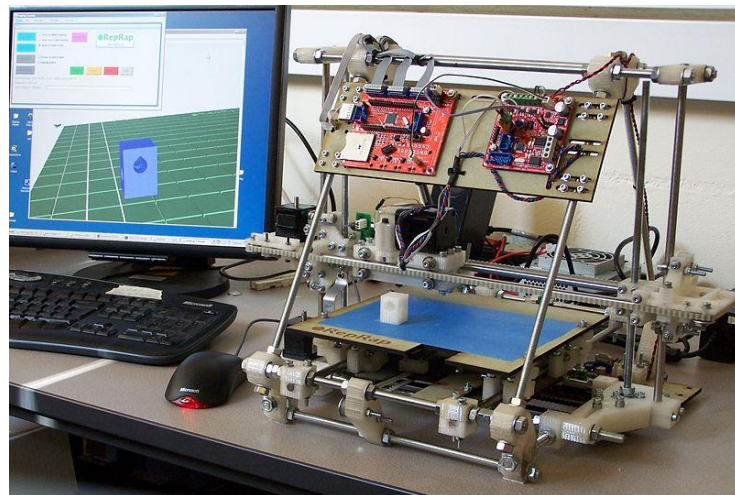
de passo. Na parte superior fica o bico, que se locomove horizontalmente com a ajuda de dois rolamentos que estão envoltos por correias dentadas que também são acionadas por um motor de passo.

Na parte eletrônica foi utilizado uma placa de controle, feita pelos próprios desenvolvedores da RepRap, onde o seu sistema foi baseado no *microchip* PIC. Porém, é preciso de conhecimento sobre a tecnologia para a configuração do *firmware*. Para ajudar na identificação do ponto inicial dos eixos, foi utilizado chaves de fim de curso óticas (REPRAP, 2007).

2.5.2 Mendel

De acordo com a RepRap (2015), a Mendel é a segunda impressora 3D *Open Source* desenvolvida pela mesma entidade que desenvolveu a Darwin, como ilustrado na Figura 6. Ela foi desenvolvida com base na mesma estrutura inicial da Darwin, tendo algumas modificações para diminuir o seu tamanho para caber em uma mesa e aperfeiçoando o seu desempenho.

Figura 6 – Mendel



Fonte: RepRap (2015, Online)

Algumas dessas modificações foram a utilização de barras rosqueadas na estrutura para facilitar sua montagem e na reconfiguração física de suas partes impressas, oferecendo ainda a possibilidade de imprimir em vários tipos de filamentos como o PLA e o ABS. Porém ainda utiliza os motores de passo, as correias dentadas juntamente com os rolamentos (REPRAP, 2015).

Sua estrutura foi desenvolvida para ser menor e mais estável que a da Darwin, com as dimensões de 500 mm de largura x 400 mm de profundidade x 360 mm de altura, com a sua área de impressão de 200 mm (X) x 200 mm (Y) x 140 mm (Z). A mesa continua sendo em MDF, porém agora se movendo horizontalmente, através da correia dentada que envolve um rolamento que é ativado por um motor de passo. O seu bico se move horizontalmente, também através de um rolamento que também está envolto por uma correia dentada que também é acionada por um motor de passo, ele também se move verticalmente por uma barra rosqueada que é ativada por um motor de passo (REPRAP, 2015).

Em sua parte eletrônica, foi utilizada uma nova placa de controle que foi desenvolvida pela RepRap, que teve como base o chip ATMEGA 644 da Atmel Corp. com o objetivo de ser *plug and play* e também facilitar a configuração do *firmware*. Outra mudança foi a substituição das chaves de fim de curso óticas para as chaves de fim de curso mecânicas (REPRAP, 2018).

2.5.3 Prusa

Segundo a RepRap (2017), a Prusa foi uma impressora criada por Josef Prusa em conjunto com a RepRap, como ilustrado na Figura 7. Ela teve como base para a seu desenvolvimento a Mendel, tendo em vista manter o tamanho e a estabilidade da estrutura.

Figura 7 – Prusa i3 MK2



Fonte: RepRap (2017, Online)

Não houve grandes modificações na geometria da impressora, e sim nos materiais utilizados na estrutura, onde passou a ser empregada uma folha única de alumínio para melhorar na estabilidade da estrutura. Porém, as barras rosqueadas só passaram a ser utilizadas na base e as barras lisas nos eixos de apoio da mesa e do bico e ainda mantendo algumas peças impressas, só que adaptadas para o modelo (REPRAP, 2017).

Com as mudanças feitas na estrutura, o seu tamanho ficou um pouco menor que a Mendel com as dimensões de 420 mm de profundidade x 420 mm de largura x 380 mm de altura, porém com uma área de impressão um pouco maior, ficando com 200 mm (X) x 200 mm (Y) x 200 mm (Z). A mesa também foi modificada, agora sendo utilizado uma mesa aquecida feita em PCB (*Printed Circuit Board*), desenvolvida pelo próprio Josef Prusa, com o intuito de ajudar a melhorar a qualidade de impressão e assim se tornando uma das primeiras impressoras a usar esse tipo de tecnologia. A movimentação da mesa e do bico continuou igual a da Mendel, como foi explicado anteriormente (REPRAP, 2018).

De acordo com a RepRap (2018), a placa de controle utilizada foi a RAMBo, que foi desenvolvida pela Ultimachine, tendo como base o chip da Atmel Corp. o ATMEGA 2560 ou 32u2, com isso foi mantida a facilidade de configuração do *firmware* que já tinha na Mendel.

Todo esse embasamento teórico da física aplicada e das impressoras 3D, serve como suporte para o início do desenvolvimento da mesa aquecida. Na próxima etapa do presente trabalho, passa-se ao estudo feito sobre o componente que nos dias de hoje é um dos mais fundamentais pra a impressora, que é a mesa aquecida.

3 OPERAÇÃO COM A MESA AQUECIDA

Neste capítulo serão apresentadas informações necessárias para o entendimento do que vem a ser uma mesa aquecida, a teoria que dá suporte para o desenvolvimento do circuito PCB da mesma, assim como a sua montagem e seu funcionamento, e também a sua utilidade para as impressões 3D.

3.1 O QUE É UMA MESA AQUECIDA?

A mesa aquecida é um dos mais importantes componentes de uma impressora 3D. Funcionando como uma resistência, nos moldes de um chuveiro elétrico. Sendo assim desenvolvida para ajudar a evitar perdas nas impressões 3D (REPRAP, 2017).

3.2 TEORIA DAS MESAS AQUECIDAS

Primeiramente é necessário decidir a potência da mesa aquecida. Por padrão da maioria das mesas do mercado é utilizado 120W a 140W, tendo em vista que, conforme comprovado por testes, o consumo médio de uma mesa aquecida é de 10A a 11A. Logo, a potência almejada é de 120W (REPRAP, 2013).

O componente físico que caracteriza a resistência dos protótipos dependerá da potência almejada e da tensão fornecida. Como mostrado na Formula (4). Sendo que, V é a tensão aplicada, P é a potência almejada e R é a resistência da placa (REPRAP, 2013).

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (4)$$

Reprap (2013) diz que nesse caso será necessário preencher a mesa aquecida com trilhas paralelas conectadas em zig-zag até o fim da placa, tendo em vista que a Formula (5) mostra o cálculo do comprimento da trilha. Onde: l_{tr} é o comprimento da trilha, l_b é o comprimento da placa e o n_{tr} é o número de trilhas paralelas. Com o detalhe de que o sistema contínuo de trilhas representa a efetiva resistência elétrica do componente MESA.

$$l_{tr} = l_b \times n_{tr} \quad (5)$$

Ainda segundo a Reprap (2013), a Formula (6) mostra o cálculo necessário para descobrir o número de trilhas paralelas (n_{tr}). w_b é a largura da placa, w_{tr} é a largura da trilha e w_i é a largura do isolamento entre duas trilhas. Porém, é essencial calcular mesma antes de fazer a Formula (5).

$$n_{tr} = \frac{w_b}{w_{tr} + w_i} \quad (6)$$

Entretanto, segundo a referência citada acima, para a Formula (6) ser utilizada é necessário encontrar primeiro a largura da trilha (w_{tr}), a qual está sendo mostrada na Formula (7). Onde: $R_{s,cu}$ é a resistência específica do cobre e o t_{cu} é a espessura do cobre.

$$w_{tr} = \frac{-w_i + \sqrt{w_i^2 + 4 \times \frac{R_{s,cu} \times l_b \times w_b}{R \times t_{cu}}}}{2} \quad (7)$$

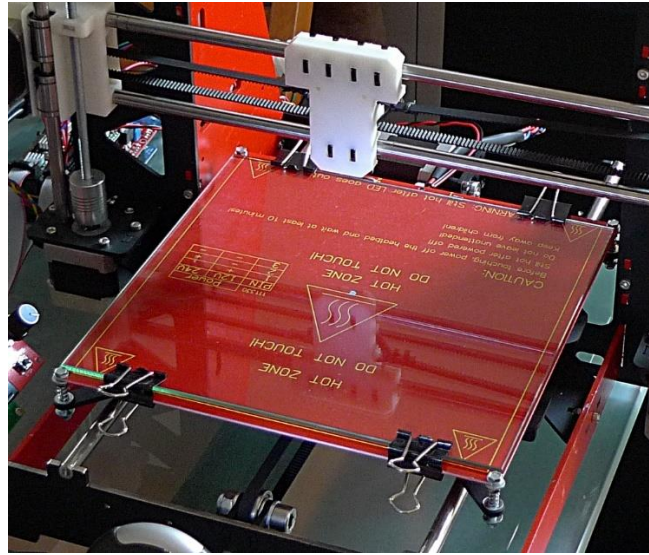
Essas formulas são essenciais para a fabricação de uma mesa aquecida PCB, pois todas as variáveis envolvidas influenciam diretamente na corrente que vai passar na placa e conseqüentemente influencia na potência da mesma.

3.3 MESA AQUECIDA PCB

As mesas aquecidas PCB, são mesas desenvolvidas em placas de circuito impresso, sendo necessário a utilização das formulas citadas anteriormente. Tendo em vista que um dos lados da placa tem trilhas de cobre e o outro não contem nada. As versões mais antigas das mesas, continham uma serigrafia apenas do lado oposto às trilhas de cobre. Porém, atualmente a serigrafia vem em ambos os lados da mesma (REPRAP, 2018).

De acordo com a RepRap (2018), anteriormente era utilizado o lado sem trilhas de cobre para as impressões, devido ser considerado mais seguro para a mesa, pois, caso o bico não estiver calibrado corretamente em relação a mesma, pode acontecer uma colisão entre os dois, assim danificando as trilhas do circuito. A Figura 8 mostra que atualmente o lado utilizado nas impressões é o que contém as trilhas de cobre. Contudo, passou a ser utilizando um pedaço de vidro como superfície de impressão, assim servindo como proteção para as trilhas e também ajudando na transferência de calor. Com isso diminui o tempo de aquecimento da mesa.

Figura 8 – Mesa aquecida com vidro



Fonte: RepRap (2018, Online)

Ainda segundo a RepRap (2018), esse processo de desenvolvimento dos modelos das mesas aquecidas *Open Source* feitas em PCB, teve como base o modelo MK1 original, que foi desenvolvida por Josef Prusa. Um exemplo de modelo *Open Source* é a MK2b, como ilustrada na Figura 9.

Figura 9 – Mesa aquecida MK2b



Fonte: RepRap (2018, Online)

O modelo MK2b tem algumas pequenas diferenças, se comparado com o modelo MK1 original, como por exemplo, o tamanho das conexões dos cabos de energia é maior, no meio da mesa contém um pequeno furo onde é colocado o termistor, além da possibilidade da alimentação em 12V ou 24V (REPRAP, 2018). Esse modelo foi escolhido para os testes de comparação com a mesa aquecida desenvolvida nesse trabalho.

3.4 MONTAGEM E FUNCIONAMENTO

De acordo com a RepRap (2017), o primeiro passo para a montagem da mesa aquecida é a escolha da fiação adequada, pois a mesma, requer 6 A para a sua operação, sendo assim os cabos precisam aguentar essa corrente, sendo que a espessura mínima recomendada é 2 mm.

A fiação pode ser feita com fios utilizados em redes elétricas residenciais, automotivos e alguns fios para alto-falante. Contudo, independente do tipo de cabos que forem utilizados, o mesmo tem que ser bastante flexível e resistente, assim podendo ser manipulado livremente e exposto a uma temperatura acima de 100° C, sem que sofra degradação. Pois, caso a fiação da mesa aquecida não seja adequada, ou tenha as conexões malfeitas, corre o risco de danificar o equipamento, causar incêndio e choques elétricos.

A Figura 10 mostra o esquema de montagem da mesa aquecida, mostrando como e onde ligar a fiação de alimentação. Os LEDs são utilizados para ver se a mesa esta ligada, porem são opcionais (REPRAP, 2018).

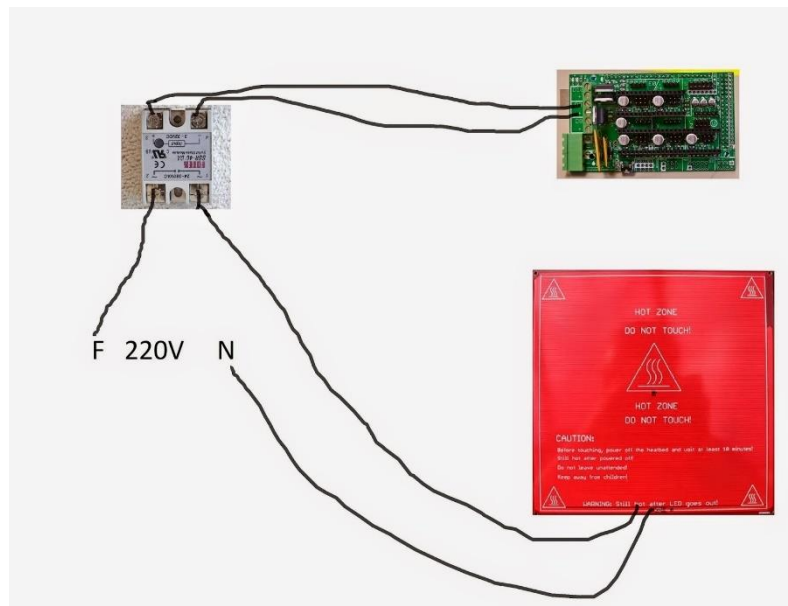
Figura 10 – Esquema de montagem



Fonte: RepRap (2018, Online)

Para ligar a mesa na placa controladora, é necessário um relé pra fazer o chaveamento do circuito. Assim, basta ligar uma das pontas da fiação nos pinos de ligação da mesa aquecida na placa controladora e a outra ponta nos pinos de alimentação do relé. O fio conectado na polaridade positiva da mesa é conectado no pino normalmente aberto (NO) do relé, enquanto isso o fio conectado na polaridade negativa da mesa é ligado no pino negativo da fonte de energia; já o pino comum do relé é conectado no pino positivo da fonte. Assim como ilustrado na Figura 11. Para a aferição da temperatura da mesa é necessário um sensor de temperatura (termistor), sendo fixado com fita na parte de baixo da mesa, e conectado na placa controladora (BLOGREPRAPBR, 2015).

Figura 11 – Esquema de ligação



Fonte: Blog RepRapBr (2015, Online)

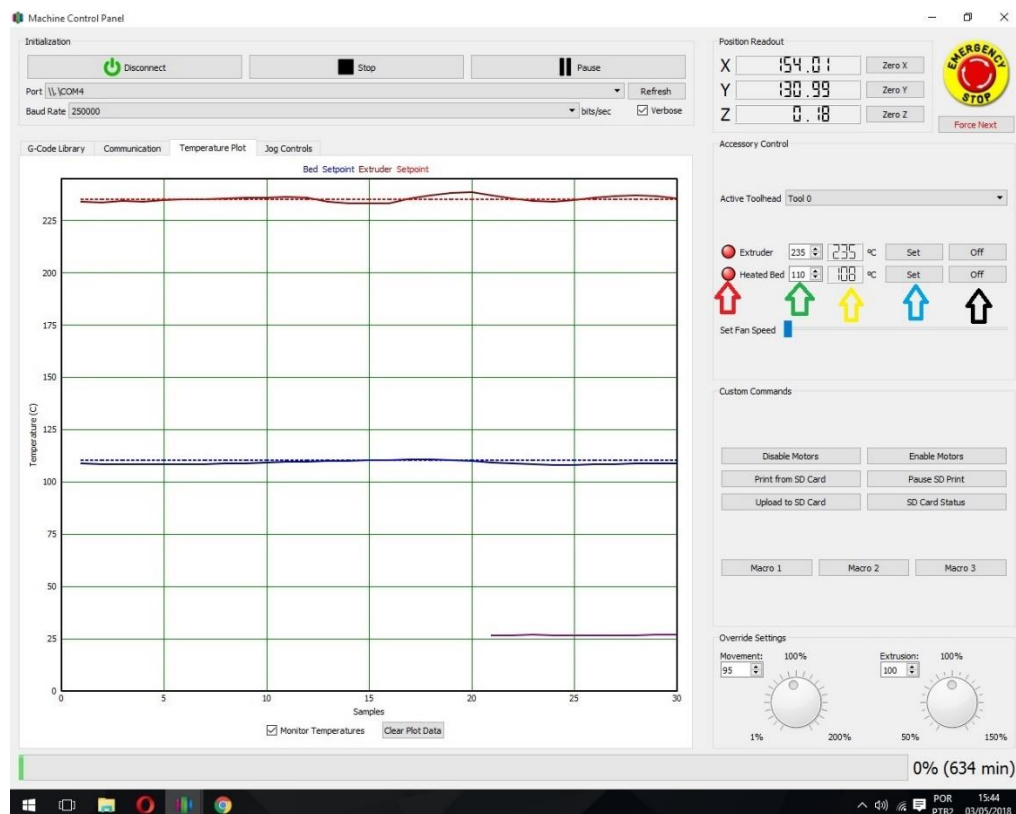
A partir desse ponto a mesa é controlada e configurada pelo *firmware* que está instalada na placa controladora e pelo *software* instalado no computador.

A configuração no *firmware*, consiste em dizer se a impressora 3D utiliza ou não uma mesa aquecida. Caso a mesma esteja sendo utilizada, é necessário fazer a configuração da variação máxima e mínima da sua temperatura, servindo assim, para a sua ativação e desativação. Por exemplo, caso a temperatura desejada para a mesa for 110° C e a variação foi configurada pra 3° C, então, a mesma é desativada quando

alcançar 113°C e ativada quando a sua temperatura baixar para 107° C. Essa configuração ajuda a manter a estabilidade térmica da mesa aquecida.

No *software* é possível verificar e fazer a ativação e desativação da mesa, além de algumas configurações, como mostrado na Figura 12. Na seta vermelha é possível verificar se a mesa está ligada ou desligada. Na seta verde pode-se configurar a temperatura que a mesa tem que alcançar. A seta amarela mostra a sua temperatura atual. Já na seta azul o botão tem duas funções, caso a mesa esteja desligada, o botão aparece como “On”, que nesse caso é para ligar a mesma; no entanto, caso ela esteja ligada, é possível modificar a sua temperatura. A seta preta é onde se desliga a mesa (SIMPLIFY3D, 2018a).

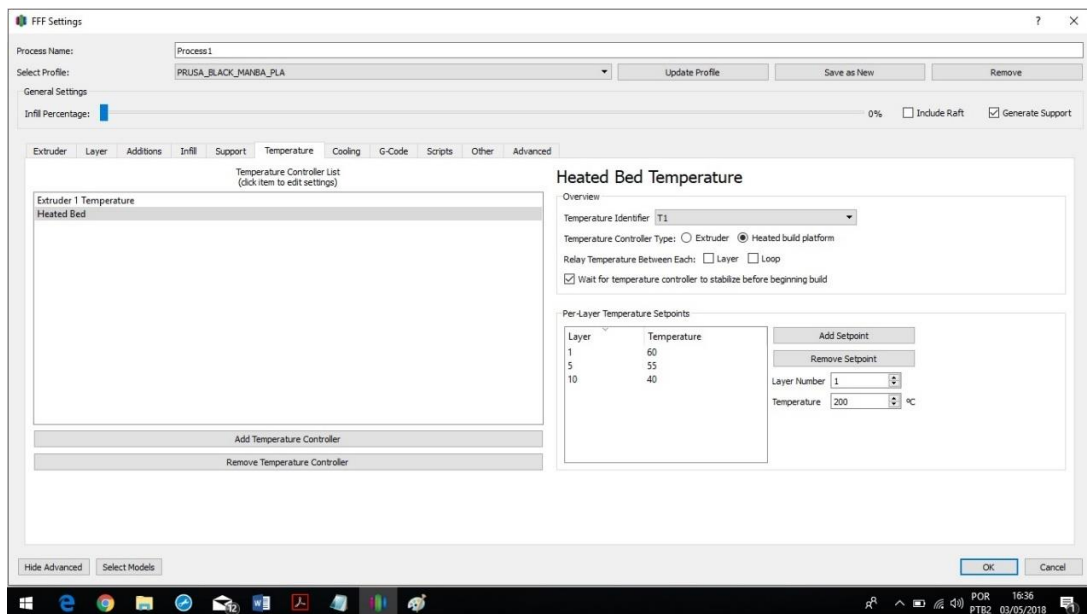
Figura 12 – Configuração e análise da temperatura



Fonte: Autor (2018)

Simplify3D (2018a) ainda diz, que existe outro tipo de configuração que é o controle da temperatura da mesa, feito pelo *software*. Essa configuração pode ser feita de modo que a mesa espere que a sua temperatura se estabilize para começar a impressão. Outra opção que pode ser feita é escolher e manter a sua temperatura, nas camadas desejadas, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Configuração do controle de temperatura



Fonte: Autor (2018)

Assim que a mesa for instalada e configurada no *firmware* e no *software*, ela vai estar pronta para ser usada.

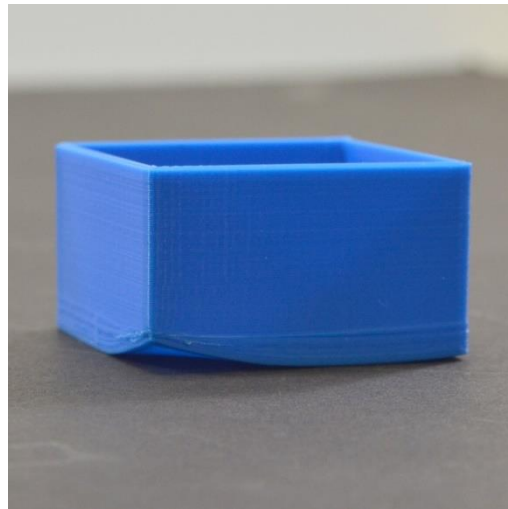
3.5 PORQUE USAR MESA AQUECIDA

As mesas foram desenvolvidas para ajudar a evitar ou diminuir as perdas de impressão através das mudanças bruscas de temperatura (*warping*) e quando a peça não adere na mesa aquecida, o que será explicado a seguir.

3.5.1 Warping

Segundo Simplify3D (2018 B), o *warping* (referenciado como uma mudança brusca de temperatura) é bem comum em peças grandes e largas, que utilizam filamentos que exigem uma alta temperatura, como o ABS. Mesmo que as primeiras camadas tenham aderido com sucesso, pode ocorrer que depois de um tempo, se consiga notar que a peça comece a deformar e enrolar, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Impressão com Warping



Fonte: Simplify 3D (2018, Online)

Esse comportamento acontece devido ao encolhimento do plástico quando esfria. Por exemplo, se uma peça que está sendo impressa, com um filamento que requer uma alta temperatura como 230°C e ao chegar à mesa o mesmo esfria bruscamente até chegar na temperatura ambiente. Esse ocorrido pode diminuir a peça em quase 1,5%, que para a maioria das grandes impressões, pode ser o equivalente a vários milímetros de retração (SIMPLIFY3D, 2018 B).

Segundo Nazan et al. (2017, p. 155), a porcentagem de deformação pode ser calculada com a diferença do comprimento total da impressão com o comprimento da peça deformada, sobre o comprimento total, como mostrado na Formula (8). Onde: y é a porcentagem da deformação, y_1 é o comprimento total da impressão e y_2 comprimento da peça deformada, y_1 e y_2 está ilustrado na Figura 15.

$$y = \left(\frac{y_1 - y_2}{y_1} \right) \times 100\% \quad (8)$$

Figura 15 – Medidas de y_1 e y_2



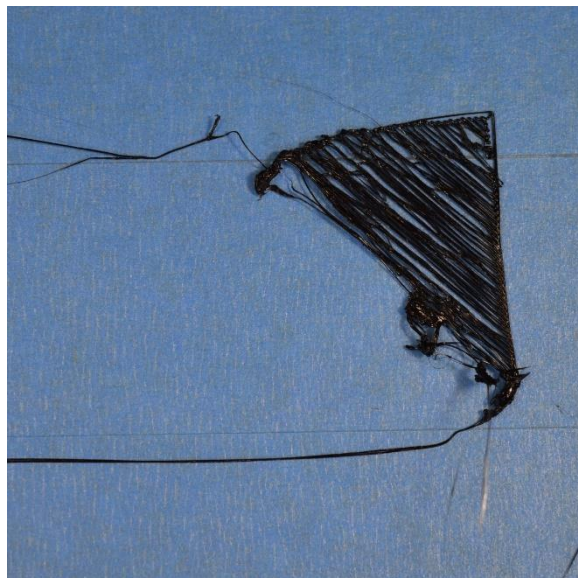
Fonte: Nazan et al. (2017, p. 155)

Existem algumas soluções para evitar ou tentar amenizar a ocorrência do *warping*. Uma delas é a utilização da mesa aquecida, que ajuda manter a temperatura das camadas inferiores da peça e assim podendo reduzir significativamente a retração do plástico nas camadas iniciais (SIMPLIFY3D, 2018 B).

3.5.2 Impressão não aderindo na mesa

A Figura 16 mostra a não aderência da impressão na mesa aquecida, que pode ocorrer em qualquer peça de qualquer forma e tamanho. Esse problema pode acontecer tanto no início da impressão quanto no meio (SIMPLIFY3D, 2018 C).

Figura 16 – Impressão que não aderiu na mesa



Fonte: Simplify 3D (2018, Online)

A imagem mostrada aparece com deformidade exatamente devido ao efeito de não aderência. Ainda segundo Simplify3D (2018 C), esse comportamento acontece

quando a primeira camada não fica perfeitamente colada na mesa, pois a primeira camada serve de base para as outras. Porém, em alguns casos isso pode ocorrer devido a uma grande deformação causado pelo *warping*.

De acordo com a referência citada acima, há várias soluções para evitar que a impressão não cole na mesa, como a aplicação de fitas ou colas na superfície da mesma que ajuda na aderência da peça, o uso de certas configurações no *software*, a calibragem da distancia do bico com a mesa, junto com a configuração da sua temperatura. Outro fator que pode ajudar a evitar esse problema é a utilização da mesa aquecida junto com a configuração da sua temperatura.

A próxima etapa deste trabalho é mostrar e comparar a mesa aquecida proposta com o modelo mencionado anteriormente.

4 COMPARAÇÃO DOS CIRCUITOS

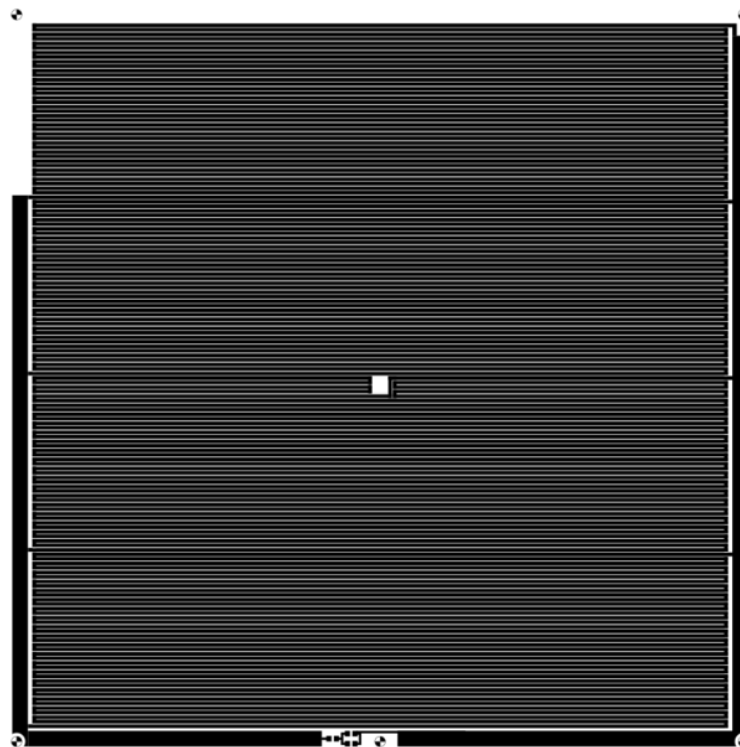
Neste capítulo será apresentado e explicado o circuito da mesa aquecida proposta no presente trabalho, a MKBlack, e da mesa utilizado para a comparação a MK2b, mostrando também as suas principais diferenças.

4.1 COMPARAÇÃO DOS CIRCUITOS

4.1.1 Circuito MK2b

O circuito do modelo MK2b foi desenvolvido tendo como base o modelo MK1 original, com as dimensões de 214mm x 214mm. Com algumas pequenas diferenças, das quais, já foram citadas no capítulo anterior. A Figura 17 mostra o circuito da MK2b.

Figura 17 – Circuito do modelo MK2b



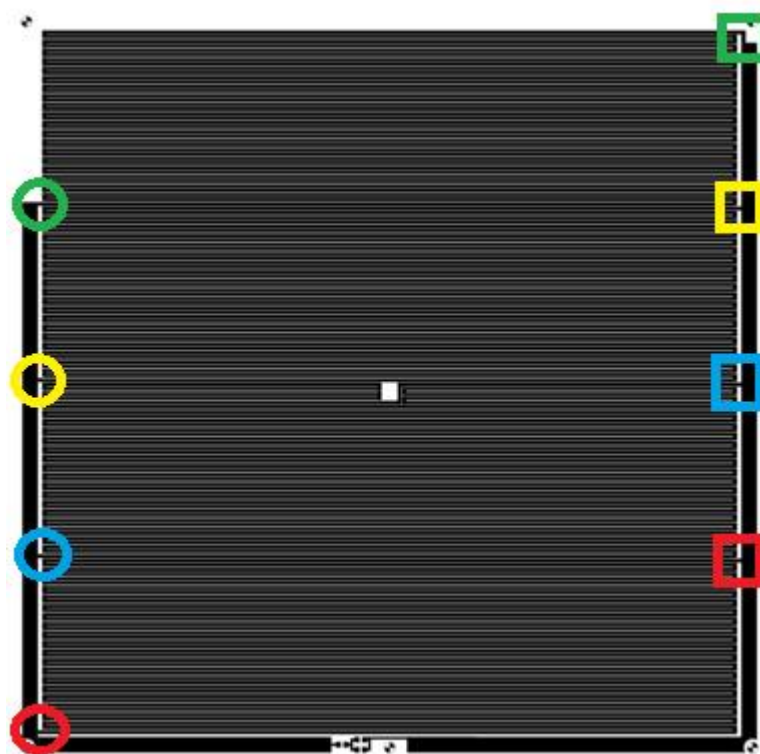
Fonte: RepRap (2018, Online)

A Figura 17 também mostra a forma em que a área central do circuito principal foi projetada, com trilhas paralelas, que são conectadas em zig-zag, onde vão do início ao final do circuito. Sendo energizado pelo circuito de alimentação, através de quatro

pontos, localizados à esquerda do circuito principal. À direita, também existem quatro pontos, que são ligados no *ground* (GND) do mesmo.

Esses pontos são devidos ao fato do circuito principal ser dividido em quatro circuitos menores em paralelo e projetados de forma sequencial, sendo todos completamente iguais. A Figura 18 mostra o começo e o final de cada um desses circuitos. Sendo que os círculos mostram o início e os quadrados o final com as suas respectivas cores.

Figura 18 – Pontos do início e final de cada circuito



Fonte: Adaptado de RepRap (2018, Online)

Segundo as especificações da mesa aquecida MK2b, disponibilizadas pela RepRap (2018), a resistência do circuito pode variar entre 1,0 – 1,2 ohm, caso a alimentação do circuito esteja em 12V; caso esteja em 24V, pode variar entre 3,0 – 3,4 ohms. Essas variações fazem com que a potência do circuito seja alterada em ambos os casos de alimentação, podendo assim, afetar o aquecimento da mesa aquecida. As especificações técnicas estão sendo mostradas no Quadro 1.

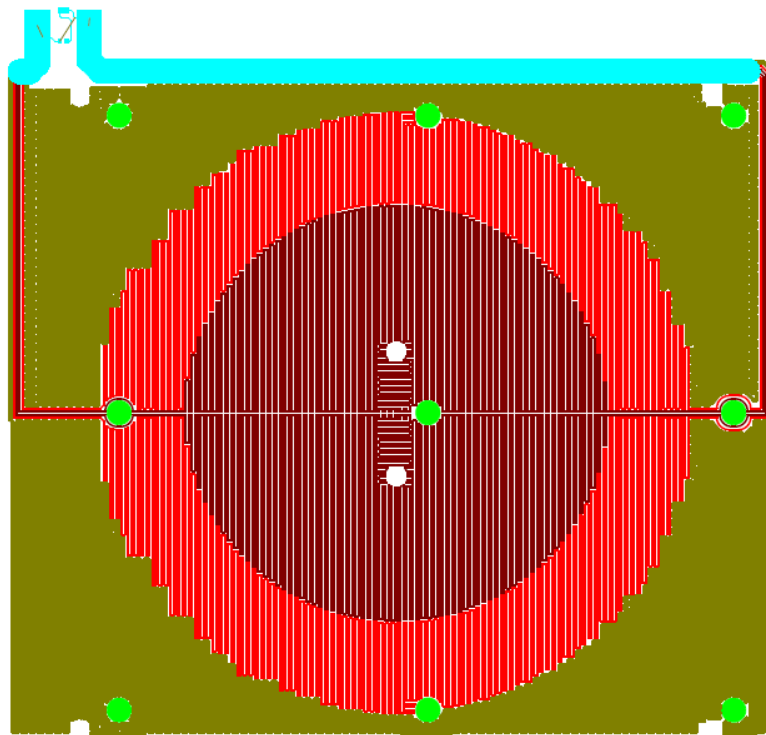
Quadro 1 – Especificações técnicas da mesa aquecida MK2b

Dimensões	214mm x 214mm
Camadas	2 camadas, 0,035mm de cobre
Alimentação de entrada	12V ou 24V
Resistência	1,0 – 1,2 ohm (12V) ou 3,0 – 3,4 ohms (24V)

Fonte: RepRap (2018, Online)

4.1.2 Circuito MKBlack

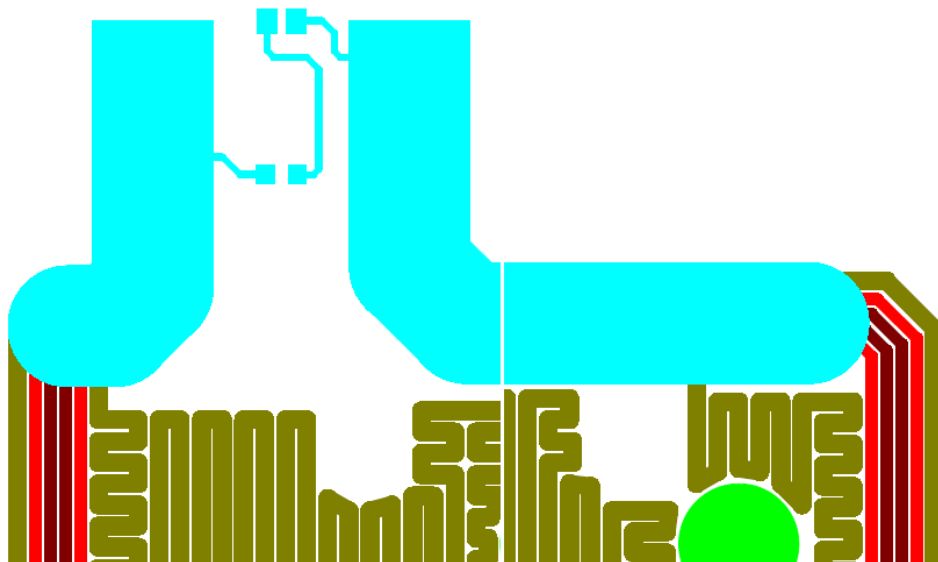
O circuito da MKBlack, foi desenvolvido tendo como base as teorias da física aplicada e a teoria que dá suporte para o desenvolvimento do circuito PCB da mesa aquecida, as quais foram comentadas nos capítulos 2 e 4 respectivamente neste trabalho. Ainda para o seu desenvolvimento, foi utilizado como base o circuito da mesa MK2b, com o seu projeto feito no *software* EAGLE da AUTODESK. A Figura 19 mostra o circuito da MKBlack.

Figura 19 – Circuito da MKBlack

Fonte: Autor (2018)

A Figura 16 ainda mostra a forma em que o circuito principal foi projetado, com trilhas paralelas que se conectam em zig-zag, que percorrem o circuito do início ao fim. Porém, existem algumas diferenças, se comparado ao circuito do modelo MK2b mostrado acima. A primeira diferença, é o circuito de alimentação menor e mais largo, tendo como objetivo alimentar o circuito principal em seis pontos. Esta última configuração é, na verdade a segunda diferença. Os seis pontos estão localizados à esquerda do circuito, sendo que, à direita do circuito, também existem seis pontos, os quais estão ligados no GND. Na Figura 20 é possível ver com mais clareza os respectivos pontos, onde à esquerda ilustra a alimentação e à direita o GND do circuito.

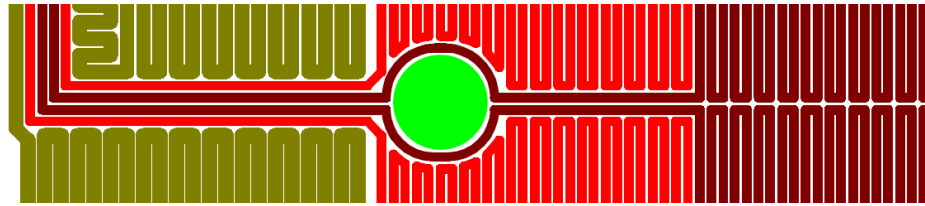
Figura 20 – Pontos de alimentação do circuito



Fonte: Autor (2018)

Outra diferença é o posicionamento de cada circuito, que está representado em três pares, tendo pequenas diferenças entre eles. Os circuitos externos superior e inferior estão em amarelo, sendo eles os que tem as trilhas mais largas, com o objetivo de diminuir as suas resistências, assim fazendo com que necessitem de mais corrente elétrica que os outros circuitos. A cor vermelha representa os circuitos centrais superior e inferior, nos quais, são aproximadamente iguais aos internos superior e inferior, que estão na cor vinho. A Figura 21 mostra a divisão de cada um dos circuitos.

Figura 21 – Divisão dos circuitos

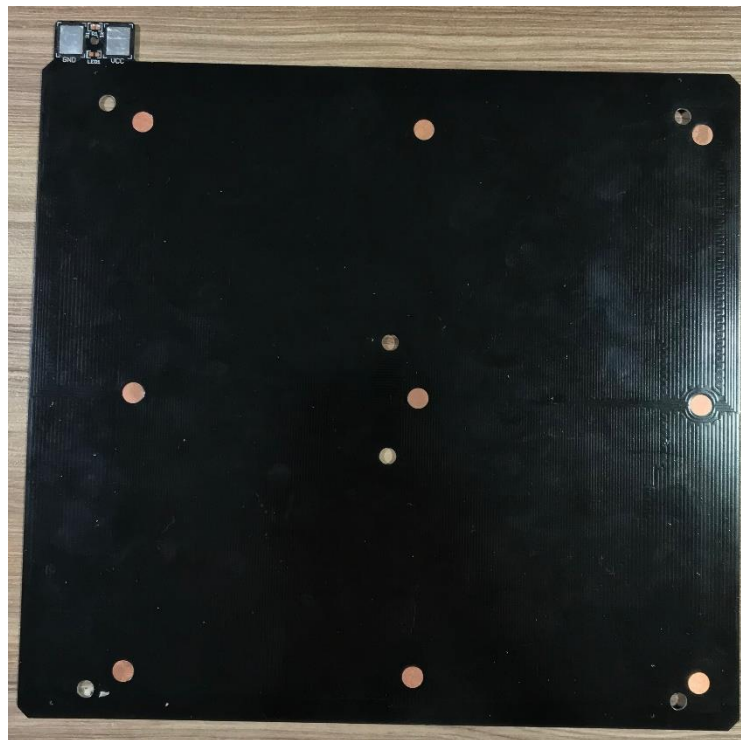


Fonte: Autor (2018)

Os círculos verdes mostrados na Figura 19, não tem nenhuma ligação com o circuito principal. Ele (o circuito principal) foi projetado para os modelos de impressora que usam a auto calibração com sensor indutivo, para calibrar a distância da mesa aquecida em relação ao bico.

A Figura 22 mostra a mesa aquecida MKBlack pronta para uso, sendo que na sua fabricação foi utilizada uma placa de fibra de vidro cobreada, com duas camadas de 0,035mm de cobre e uma máscara preta para a proteção do circuito. A fabricação foi feita por uma empresa terceirizada que tem experiencia em fabricar placas PCB.

Figura 22 – Mesa aquecida MKBlack



Fonte: Autor (2018)

As especificações técnicas do circuito da mesa MKBlack foram estruturadas, tendo como base os dados obtidos pelas formulas dos capítulos 2 e 3, assim como por medição via multímetro. Tendo apresentado resultados satisfatórios, os quais, se aproximaram dos valores projetados. O Quadro 2 a seguir mostra as especificações técnicas da mesa proposta no presente trabalho.

Quadro 2 – Especificações técnicas da mesa aquecida MKBlack

Dimensões	250mm x 250mm
Camadas	2 camadas, 0,035mm de cobre
Alimentação de entrada	12V
Resistência	1,2 ohm

Fonte: Autor (2018)

Para fins de comprovação do funcionamento e da mesa aquecida proposta, foram feitos testes de aquecimento e de impressão, cujos resultados obtidos serão demonstrados no capítulo seguinte.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão demonstrados os testes de aquecimento feitos na mesa MKBlack e na MK2b, assim como os testes de impressão feitas em ambas as mesas, mostrando os resultados dos respectivos testes.

5.1 COMPARAÇÃO DO AQUECIMENTO

Foram feitos dois testes, para que fosse efetuada a comparação entre as duas mesas aquecidas. Um deles consiste na utilização de uma câmera térmica, para que se possa verificar, como o aquecimento das duas mesas acontece. No outro teste foi feito a aferição do tempo em que as mesas chegam da temperatura ambiente para uma temperatura elevada. A Figura 23 mostra a câmera térmica utilizada.

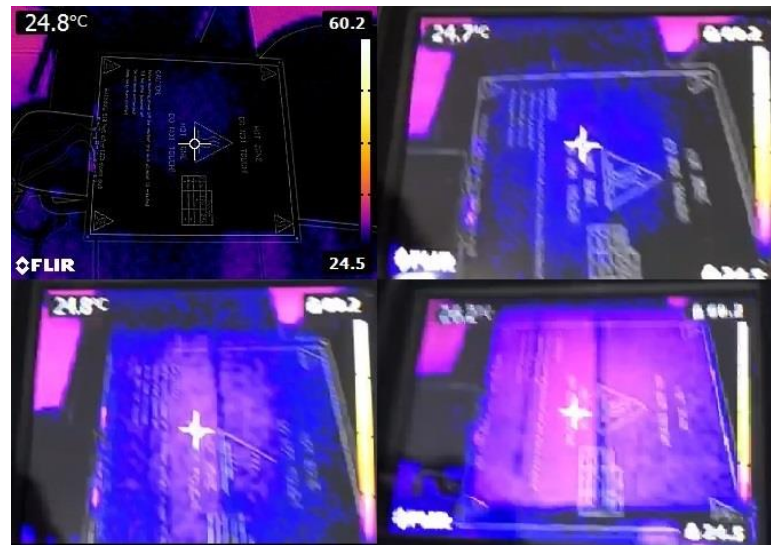
Figura 23 – Termovisor FLIR E4



Fonte: Steiner (2018, Online)

No primeiro teste, foi utilizado uma câmera térmica (termovisor) FLIR série Ex, modelo E4. A utilização desse equipamento possibilitou a visualização do processo de aquecimento das mesas aquecidas. Na ilustração da Figura 24, é possível visualizar o processo de aquecimento do modelo MK2b, o qual começa do centro da mesa para as extremidades.

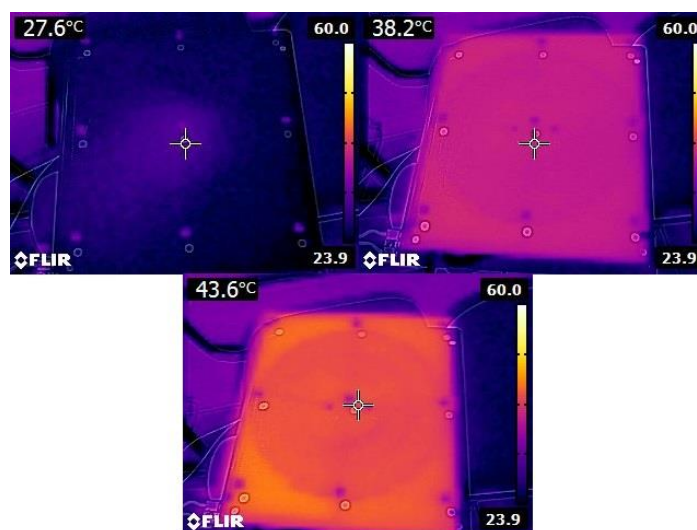
Figura 24 – Processo de aquecimento do modelo MK2b



Fonte: Autor (2018)

O modelo proposto no presente trabalho, a MKBlack, mostrou um resultado diferente do modelo acima citado, devido ao seu processo de aquecimento acontecer de maneira totalmente diferente. A Figura 25 mostra que esse processo de aquecimento consegue ser praticamente uniforme, devido as suas extremidades aquecerem mais rápido. Assim, pode-se observar a formação de um círculo no centro da mesa aquecida. Isso provavelmente aconteceu, por causa dos circuitos externos superior e inferior, os quais necessitam de mais corrente elétrica como citado anteriormente.

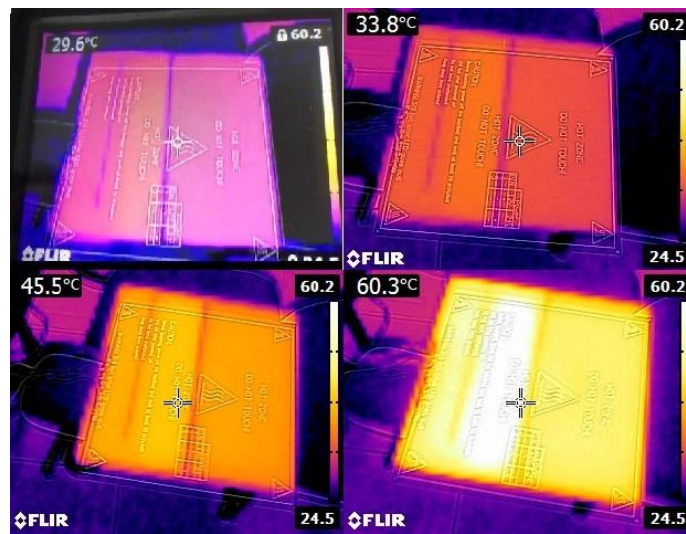
Figura 25 – Processo de aquecimento do modelo MKBlack



Fonte: Autor (2018)

Nesse teste, foi possível avaliar também se o aquecimento se manteve uniforme, da temperatura ambiente até chegar na temperatura de 60°C, que é a temperatura ideal para fazer impressão de peças, com o polímero PLA. A Figura 26, quando analisada conjuntamente à Figura 24, mostra que o modelo MK2B, consegue chegar na temperatura de 60°C, porém, não consegue manter um aquecimento uniforme em toda a sua área, mantendo o seu aquecimento em 60°C nas proximidades do centro da mesa aquecida.

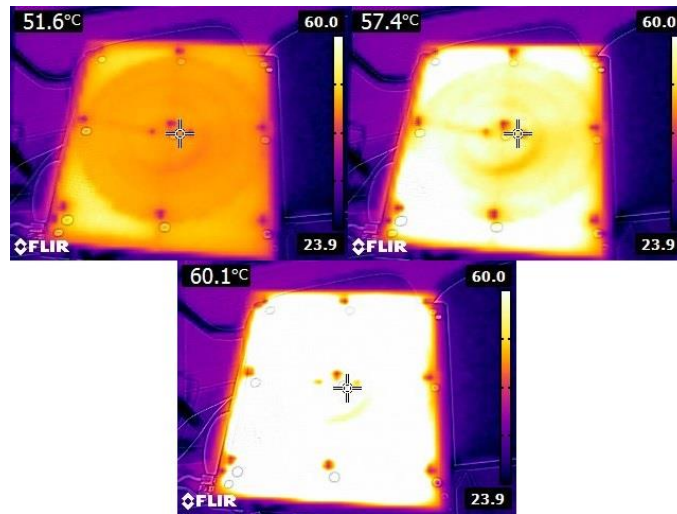
Figura 26 – Processo de Aquecimento não uniforme do modelo MK2b



Fonte: Autor (2018)

Já no caso da mesa MKBlack, a Figura 27 em associação com a 25, mostram que, com o passar do tempo, a mesa conseguiu manter a sua temperatura de forma uniforme em toda a sua área. Conseguindo assim, chegar e manter a temperatura de 60°C, mesmo com uma pequena diferença de temperatura nas extremidades da base aquecida.

Figura 27 – Processo de Aquecimento uniforme do modelo MKBlack

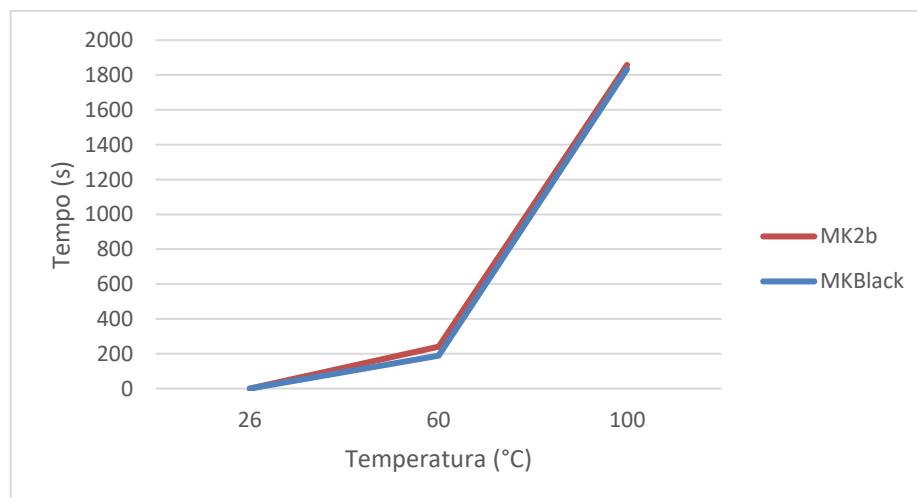


Fonte: Autor (2018)

O segundo teste foi feito com a intenção de comparar o tempo em que as mesas aquecidas levam para aquecer, partindo da temperatura ambiente até os 100°C, que é a medida recomendada para a impressão de peças, com o polímero ABS. Para tanto, foi utilizado um sensor de temperatura no centro da mesa.

A Figura 28 mostra o resultado do segundo teste, assim fazendo a relação do tempo em segundos, com a temperatura em graus célsius. É possível observar que em temperaturas mais baixas a MKBlack aquece mais rápido que a MK2b; no entanto, em altas temperaturas, as mesas praticamente se igualam.

Figura 28 – Gráfico tempo X temperatura



Fonte: Autor (2018)

Essa aproximação mostrada na Figura 28, pode ter ocorrido por causa do processo de aquecimento das mesas, que no caso da MK2b é concentrado nas proximidades do seu centro, facilitando a leitura do sensor, que é posto no centro das mesas. Esse processo ocorre de forma diferente na MKBlack, na qual, as extremidades aquecem primeiro que o centro, assim dificultando a leitura do sensor.

5.2 TESTES DE IMPRESSÕES 3D

Foram feitos teste de impressão para verificar a ocorrência ou não de *warping* e descolamento parcial ou total das peças impressas na mesa aquecida MKBlack. Nas impressões, foi utilizado o filamento do tipo PLA, devido ser o material com melhor disponibilidade. Nos testes foram feitas impressões de vários modelos de peças, com diferentes tamanhos e formas, podendo assim, variar a complexidade das peças.

A Figura 29 mostra uma impressão com múltiplas peças, que foi concluída sem erros. Nessa impressão foi utilizado uma configuração com estruturas de suporte. Segundo Rocha et al. (2017), essa configuração é utilizada em peças mais complexas, e se faz necessária em modelos com ângulos maiores que 45° na sua construção.

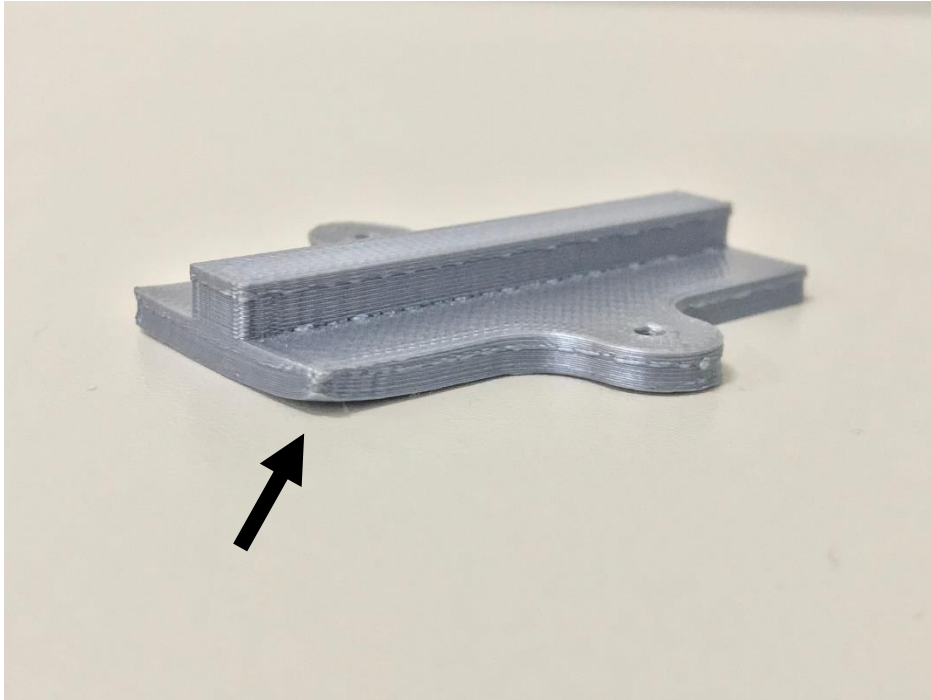
Figura 29 – Impressão com múltiplas peças



Fonte: Autor (2018)

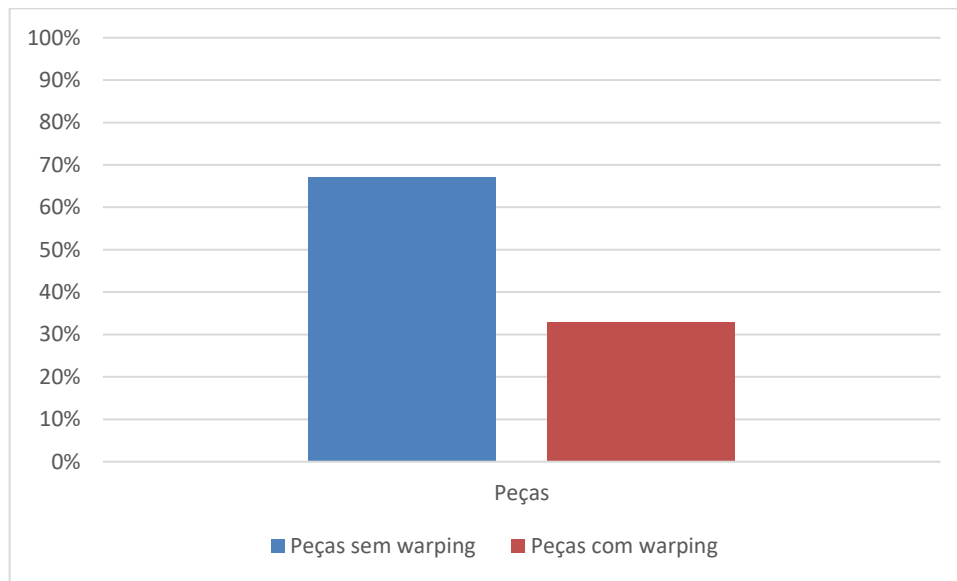
Algumas das peças impressas que também foram concluídas sem erros não foram tão complexas quanto a citada anteriormente. Porém, mesmo algumas das peças tendo uma certa simplicidade, registrou-se a ocorrência de *warping* em alguns desses modelos. A Figura 30 ilustra uma dessas peças impressas, que apresentaram *warping*, mas mesmo assim a impressão foi totalmente concluída.

Figura 30 – Peça com warping



Fonte: Autor (2018)

Os resultados obtidos pelos testes de impressão da mesa MKBlack, foram considerados satisfatórios, devido que 33% das impressões terminaram com *warping* e 67% finalizaram em perfeito estado, como mostrado na Figura 31.

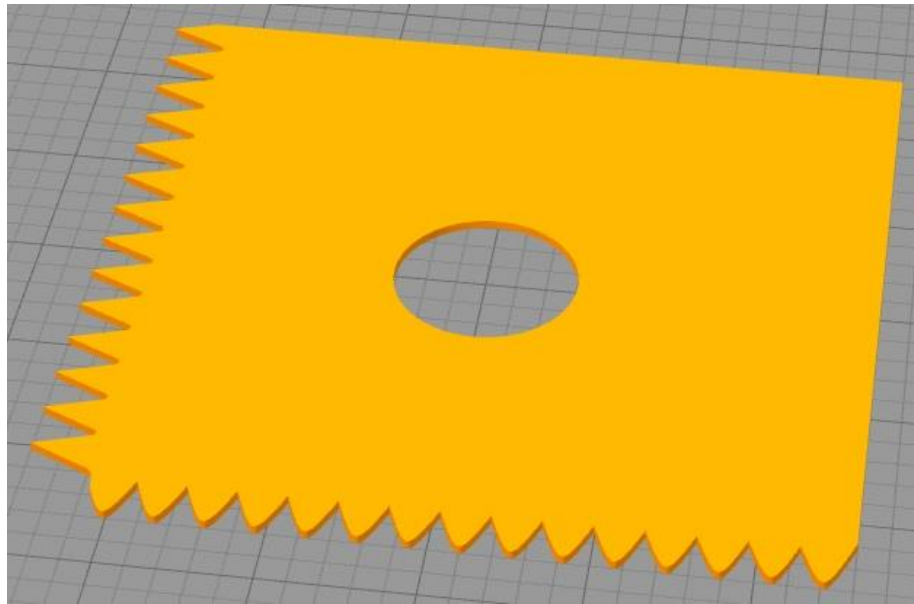
Figura 31 – Testes de impressões com e sem warping

Fonte: Autor (2018)

5.3 COMPARAÇÃO DE IMPRESSÃO

Esse teste teve como objetivo comparar a mesa MKBlack com a MK2b, através da impressão de um modelo 3D, sendo que o modelo desenvolvido é trabalho próprio do autor, o qual tem o objetivo de testar se ocorre ou não o *warping* na impressão. Por isso, o modelo consiste em quatro lados, sendo que dois deles com dentes de serra, onde em um deles cada dente forma ângulos fechados e no outro as pontas dos dentes são boleadas. Os dois últimos lados são retos formando um ângulo de 90° ao se encontrarem e por fim o centro da peça tem uma área vazada formando um círculo, como ilustrado na Figura 32. O modelo tem as dimensões de 130mm de largura X 130mm de profundidade X 1,5mm de altura.

Figura 32 – Modelo de teste



Fonte: Autor (2018)

De acordo com a simulação feita pelo *software* Simplify3D, o tempo de impressão com todas as configurações necessárias, levaria em torno de duas horas e trinta minutos para ser finalizada nas duas as impressões. Tendo em vista que as configurações, mostradas no Quadro 3, foram as mesmas utilizadas em ambas as peças.

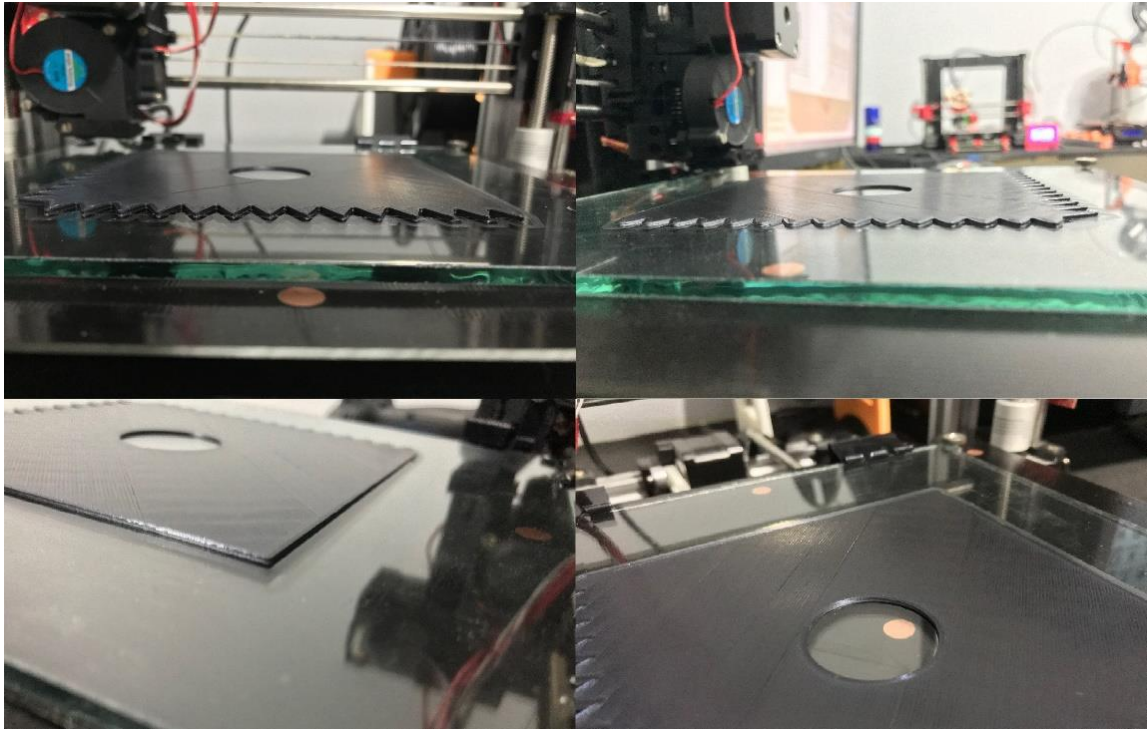
Quadro 3 – Configuração utilizadas no teste

Diâmetro do bico	0.30mm
Largura da extrusão	0.40mm
<i>Primary layer height</i>	0.2mm
Camadas Sólidas	4
Linhas de contorno	3
<i>Infill</i>	5%
Velocidade de impressão	3200 mm/min

Fonte: Autor (2018)

O teste de impressão feito na mesa MKBlack teve resultados satisfatórios, devido a impressão ter sido completada sem que a peça tenha sofrido nenhum *warping*, em nenhum dos lados do modelo. A Figura 33 mostra todos os lados do modelo, assim como a parte vazada do centro da peça.

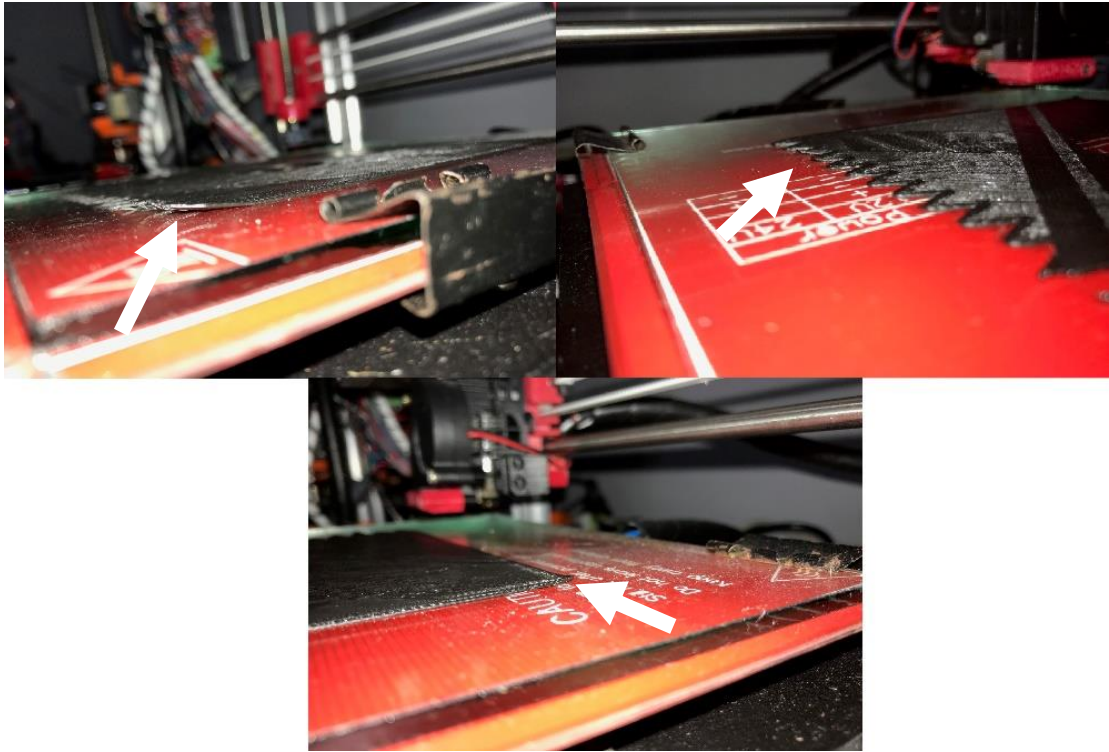
Figura 33 – Modelo impresso na MKBlack



Fonte: Autor (2018)

Já o teste com o modelo feito na mesa MK2b não foi considerado bom, por dois motivos. O primeiro, é que a peça sofreu de *warping* em quatro pontos do modelo, os quais foram nos lados com dentes de serra com ângulo fechado, no lado dos dentes com pontas boleadas e na união com os dois lados retos, como ilustrado na Figura 34.

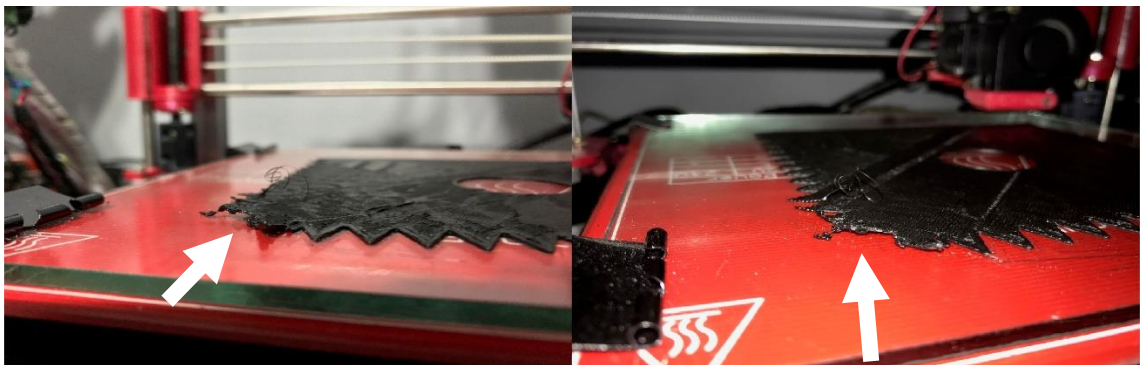
Figura 34 – Modelo impresso na MK2b



Fonte: Autor (2018)

O segundo motivo foi que a impressão não conseguiu ser completada, devido o bico da impressora ter ficado preso em uma das partes da peça que sofreu *warping*. Esse ocorrido fez com que o motor do eixo X da impressora perdesse passo, fazendo com que a impressora 3D imprimisse nas coordenadas erradas. A Figura 35 mostra o local do *warping* onde o bico foi preso.

Figura 35 – Local do warping que causou o erro de impressão



Fonte: Autor (2018)

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS ENTRE AS MESAS AQUECIDAS

As análises dos resultados dos testes de comparação do aquecimento, tempo de aquecimento e da comparação de impressão do modelo de teste estão expostas no Quadro 4. Através desses resultados é possível comprovar que a mesa aquecida MKBlack demonstrou ser melhor em comparação a mesa MK2b, devido ter um aquecimento mais eficiente e conseguindo manter a temperatura uniforme em toda a sua área, com isso conseguindo completar a impressão do modelo de teste sem nenhum ponto de *warping*.

Quadro 4 - Resultados obtidos nos testes de comparação

	MK2b	MKBlack
Processo de Aquecimento	Do centro para as extremidades	Quase que uniforme
Manter a temperatura uniforme em toda a sua área	Não	Sim
Tempo de aquecimento no nível 1 (até 60°C)	241s	188s
Tempo de aquecimento no nível 2 (até 100°C)	1858s	1834s
Impressão do modelo de teste	Incompleta e com diversos pontos de <i>warping</i>	Completa e sem nenhum ponto de <i>warping</i>

Fonte: Autor (2018)

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou, mediante testes comparativos de aquecimento dois modelos de mesas aquecidas: a MK2B, que tem um padrão de circuitos e aquecimento mais usado no mercado; e o modelo proposto por este trabalho, a MKBlack, na qual podemos perceber um tipo de padrão de circuitos diferente, com um perfil de aquecimento que não é comumente utilizado do mercado, justificado pelo fato de que o seu projeto visa diminuir falhas de impressão 3D causadas pela falta de aquecimento, ou aquecimento ineficiente na mesa aquecida (ou mesa de impressão).

Ainda nesse trabalho, pode-se verificar que o modelo mais utilizado no mercado ainda necessita de várias mudanças e afinações. Como o citado modelo MK2B é *Open Source*, foi possível utiliza-la como base para o desenvolvimento da mesa MKBlack, que efetivamente é a proposta deste trabalho, a qual, gerou resultados satisfatórios nos testes feitos.

Observa-se nos testes de aquecimento que a mesa MKBlack tem um processo totalmente diferente daquele referenciado para a mesa MK2b. Outro ponto importante aferido nos testes, foi que a MKBlack é capaz de manter a sua temperatura uniforme em toda a sua área. Além disso, a mesa proposta também demonstrou ser mais eficiente que a mesa MK2b, em relação ao tempo de aquecimento, conseguindo alcançar rapidamente a temperatura do nível 1, em torno de 60°C e praticamente se igualando em temperaturas por volta de 100°C no nível 2. Destaca-se que cada nível referência um tipo diferente de polímero trabalhado.

Do princípio da prototipação até a conclusão dos diversos testes realizados na mesa aquecida, foi construída uma cadeia de aprendizagem por meio do estudo bibliográfico dos modelos já existentes no mercado e as falhas que eram de senso comum relacionado ao seu desempenho. Assim, este conhecimento adquirido foi essencial para projetar o circuito e evitar o máximo de erros possíveis. Os testes aferidos na mesa prototipada apresentam resultados de aquecimento e *warping* que viabilizam uma futura produção em massa e aplicação direta na indústria após alguns ajustes finais no projeto.

A parceria feita com a empresa LAB3D, sediada nesta cidade de Belém - Pa, ajudou a proporcionar maturidade no processo de construção e melhorias de modelos

3D utilizados, visando assim, melhorar a produção, a qualidade, a eficiência e, portanto, diminuir possíveis falhas e problemas causados pelo *warping* e descolamento de objeto impressos em 3D.

Os testes de impressão na mesa aquecida MKBlack mostraram que foi possível imprimir peças com complexidade, tamanho e formas diferentes. Conseguindo imprimir uma grande variedade de peças sem que elas tenham sofrido *warping*, e assim comprovando os resultados obtidos nos testes de aquecimento.

O resultado do teste de comparação de impressão, também comprova que a mesa proposta consegue manter a sua temperatura constante, pelo fato de a impressão do modelo de teste ter sido concluída sem que a peça tenha sofrido *warping*. Ressalte-se que o mesmo modelo foi impresso na mesa MK2b, e o resultado foi a ocorrência de *warping* em diversos pontos e a não conclusão da impressão, devido o bico ter se prendido em um dos pontos. Deve-se considerar que para esse teste foram utilizadas as mesmas configurações de impressão que a mesa MKBlack.

Os conhecimentos obtidos sobre as mesas aquecidas das impressoras 3D foram sempre direcionados para a busca da qualidade e eficiência na adesão da primeira camada, a qual é a mais importante da impressão 3D. Assim, mantém-se o foco nas possíveis melhorias que acontecem constantemente nas mesas aquecidas utilizadas, para um melhor aproveitamento do filamento plástico e menor desperdício do mesmo, tanto para as empresas que utilizam a tecnologia ou para os usuários de impressoras 3D.

6.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Certas dificuldades foram encontradas no presente trabalho, em seu período de desenvolvimento:

- No desenvolvimento do circuito, devido à falta de referências técnicas, pois as grandes empresas não disponibilizam os seus trabalhos desenvolvidos para mesa aquecida.
- Durante o processo de fabricação da mesa, na utilização do ácido necessário para a corrosão da lâmina de cobre na placa de fibra de vidros, devido que nas

tentativas de fabricação o ácido corroía mais que o necessário em certas áreas e menos em outras.

- A não existência de um modelo de teste, para a verificação da ocorrência ou não de *warping* na peça impressa.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos listados a seguir estão em fase de planejamento, os quais tem o intuito de ajudar a comunidade da impressão 3D, que está em constante crescimento:

- A adaptação do circuito, para que seja possível a fabricação da mesa aquecida em diversos tamanhos.
- A fabricação de uma mesa aquecida com uma placa de alumínio, para melhorar o aquecimento da mesa.
- O desenvolvimento de uma mesa aquecida com propriedades magnéticas, para a utilização de uma base de metal maleável, assim facilitando a retirada da peça impressa.
- Desenvolvimento de uma máquina, para a ajudar na plotagem do circuito na fabricação da mesa aquecida.

7 REFERÊNCIAS

3D PRINTING SYSTEMS. **How does the UP 3D printer's print head (Extruder) work?**. 2014. Disponível em: <[https://3dprintingsystems.freshdesk.com/support/solutions/articles/4000003132-how-does-the-up-3d-printer-s-print-head-extruder-work->](https://3dprintingsystems.freshdesk.com/support/solutions/articles/4000003132-how-does-the-up-3d-printer-s-print-head-extruder-work-). Acesso em: 12 mar. 2018.

BLOGREPRAPBR. **Como ligar a mesa em 110V/220V**. 2015. Disponível em: <<http://blog.reprapbr.com.br/2015/05/como-ligar-mesa-em-110v220v.html>>. Acesso em 2 abr. 2018.

COSTA, Sónia Isabel Nunes. **Lei de Ohm**. 2013. 64 f. Tese (Mestrado de Ensino de Física e Química) – Universidade da Beira, Covilhã, Portugal. 2013.

CRUMP, S. S. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects**. 1992. US Patent, n. 5121329.

ENCYCLOPEADIA BRITANNICA. **James Prescott Joule**. 2016. Disponível em: <<https://www.britannica.com/biography/James-Prescott-Joule>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

_____. **Joule's Law**. 2017. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/James-law>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

NAZAN, M. A. et al. **Na investigation on applying diferente types of adhesive to reduce warping deformation in open source 3D printer**. In: Proceedings of mechanical engineering research, p. 155-157, 2017, Melaka: UTeM, 2017.

PRŮŠA, Josef. **Češka: Prusa3D-3D Printers from Josef Průša**. 2018. Disponível em: <<http://www.prusa3d.com/>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

REPRAP. **Darwin**. 2014. Disponível em: <<http://reprap.org/wiki/Darwin>>. Acesso em 26 mar. 2018.

_____. **Darwin**. 2007. Disponível em:< <http://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin>>. Acesso em 26 mar. 2018.

_____. **Generation 6 Electronics**. 2018. Disponível em:< http://reprap.org/wiki/Generation_6_Electronics>. Acesso em 29 mar. 2018.

_____. **Mendel**. 2007. Disponível em:< http://reprap.org/wiki/RepRap_Version_II_%22Mendel%22>. Acesso em 30 mar. 2018.

_____. **Prusa i3**. 2017. Disponível em:< <http://reprap.org/wiki/Prusa>>. Acesso em 31 mar. 2018.

_____. **Prusa i3 MK2**. 2018. Disponível em:< http://reprap.org/wiki/Prusa_i3_MK2>. Acesso em 31 mar. 2018.

_____. **G-code**. 2017. Disponível em:< <http://reprap.org/wiki/G-code>>. Acesso em: 24 mar. 2018.

_____. **Mendel**. 2015. Disponível em:< <http://reprap.org/wiki/Mendel>>. Acesso em: 24 mar. 2018.

_____. **RepRaps History**. 2011. Disponível em:<http://reprap.org/wiki/RepRap_history>. Acesso em: 24 mar. 2018.

_____. **Heated bed**. 2017. Disponível em:< <http://reprap.org/wiki/HBP>>. Acesso em 1 abr. 2018.

_____. **Heated bed theory**. 2013. Disponível em:< http://reprap.org/wiki/Heated_Bed_Theory>. Acesso em 2 abr. 2018.

_____. **PCB Heatbed.** 2018. Disponível em:< http://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed>. Acesso em 2 abr. 2018.

ROCHA, Raphael Souza et al. **Análise de desempenho de impressora 3D a partir de software de fatiamento utilizando técnicas de simulação e aferição por prototipagem.** 2017. 80 f. Monografia (Trabalho de curso) – Centro Universitário do Estado do Pará, Belém, Brasil. 2017.

SIMPLIFY3D. **Warping.** 2018 B. Disponível em:<<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#warping>>. Acesso em 1 abr. 2018.

_____. **Print not sticking to the bed.** 2018 C. Disponível em:<<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#print-not-sticking-to-the-bed>>. Acesso em 1 abr. 2018.

_____. **Simplify3D vídeo tutorials.** 2018 A. Disponível em:<<https://www.simplify3d.com/support/videos/>>. Acesso em 1 abr. 2018.

SÓ FÍSICA. **James Prescott Joule.** 2018. Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Biografias/james_joule.php>. Acesso em: 10 mar. 2018.

SÓ MATEMÁTICA. **Georg Simon Ohm.**1998. Disponível em: <<https://www.somatematica.com.br/biograf/ohm.php>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

STEINER. **Flir E4 thermal camera.** 2018. Disponível em:<<https://www.steinerelectric.com/p/flir-e4/813112>>. Acesso em 19 mai. 2018.