

Universidade de Brasília – UnB
Campus Gama – FGA
Engenharia Eletrônica

MODERNIZAÇÃO DE UMA IMPRESSORA STRATASYS

ANDRÉ FELIPE PEREIRA DE ARAÚJO

Orientador: Dr. SÉBASTIEN ROLAND MARIE JOSEPH RONDINEAU



UNB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FGA – FACULDADE GAMA

ENGENHARIA ELETRÔNICA

MODERNIZAÇÃO DE UMA IMPRESSORA STRATASYS

ANDRÉ FELIPE PEREIRA DE ARAÚJO

ORIENTADOR: SÉBASTIEN ROLAND MARIE JOSEPH RONDINEAU

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ENGENHARIA ELETRÔNICA

BRASÍLIA/DF, DEZEMBRO DE 2019

UNB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FGA – FACULDADE GAMA
ENGENHARIA ELETRÔNICA

MODERNIZAÇÃO DE UMA IMPRESSORA STRATASYS

ANDRÉ FELIPE PEREIRA DE ARAÚJO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO À FACULDADE UNB GAMA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

APROVADA POR:

Sébastien Roland Marie Joseph Rondineau

(Orientador)

Dr. Artem Andrianov

(Examinador interno)

Dr. Rhander Viana

(Examinador externo)

FICHA CATALOGRÁFICA

ARAÚJO, ANDRÉ FELIPE PEREIRA

Modernização de uma Impressora Stratasys,

[Distrito Federal], 2019.

83p., 210 × 297 mm (FGA/UnB Gama, Bacharelado em Engenharia Eletrônica, 2018).

Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade UnB Gama, Engenharia Eletrônica

1. Automação

2. Controle

3. Controle e Automação

4. Impressoras 3D

I. FGA UnB/UnB.

II. Título (série)

REFERÊNCIA

ARAÚJO, ANDRÉ FELIPE PEREIRA (2019). Modernização de uma Impressora Stratasys. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Eletrônica, Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: André Felipe Pereira de Araújo

TÍTULO: Modernização de uma Impressora Stratasys

GRAU: Bacharel em Engenharia Eletrônica

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

andreoficio15@gmail.com

Brasília, DF – Brasil

Vivemos em uma sociedade extremamente dependente da ciência e tecnologia, na qual pouquíssimos sabem alguma coisa sobre ciência e tecnologia.

Carl Sagan

Este trabalho é dedicado a todos os promotores da ciência e tecnologia, entusiastas da criação e construção de novas ideias.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, primeiramente, por ter me concedidos todas as oportunidades que me possibilitaram o desenvolvimento da minha vida, que me permitiram alcançar o nível onde estou.

À minha mãe Ana Paula Pereira de Araújo e à minha avó Aluisia de Oliveira Araújo por nunca perderem a fé em mim e na minha capacidade, por me apoiarem, por me incentivarem nos estudos, por me criarem, por nunca desistirem de mim.

Aos meus amigos de graduação Helton Alves de Azevedo e Rafael Gomes da Silva, amigos de confiança que sempre estiveram presentes, desde o início da graduação, mesmo nos períodos mais difíceis, sempre me apoiando, colaboradores diretos na minha formação da graduação.

Ao meu orientador por ter aceito a minha proposta de trabalho de conclusão de curso, por ser justo, paciente e compreensivo com este projeto ao longo da execução, sempre honesto, direto e objetivo.

Aos professores Artem Andrianov e Rhander Viana por me permitir trabalhar em seus projetos ao longo da graduação, por me ensinar maneiras de lidar com projeto. Ao professor Marcelino Andrade por me ceder a primeira oportunidade de trabalhar com prototipagem de impressoras 3D na Universidade de Brasília.

Aos técnicos da Universidade de Brasília Jackson Paz, Algenor Silva, Micael Noronha, Henrique Oliveira, Danilo Oliveira, Diogo Costa e os outros, por me ajudarem a desenvolver as minhas capacitações e a executar este projeto, desde idéias até construção.

RESUMO

As impressoras 3D de deposição de polímeros por fusão, desde o ano de 2010, estão se tornando comuns com um vasta variedade de impressoras no mercado sendo até mesmo prototipadas. A impressora 3D SST 1200es, produzida pela *Stratasys*, tornou-se obsoleta quando comparada com as impressoras da *Prusa* e *Makerbot*, pois não há mais atualizações disponíveis e os seus materiais têm custo elevados. Por esses motivos e para que a mesma não seja descartada, este projeto tem como objetivo modernizá-la, substituindo todo o seu sistema eletrônico utilizando somente tecnologias com licença gratuita. Com a implementação do *firmware Marlin* e componentes da *Reprap* e *Makerbot*, foi possível atualizar a impressora SST 1200es aproveitando as suas melhores características, permitindo a extensão de sua vida útil com baixíssimo custo, possibilitando o uso de materiais genéricos para impressão. Este trabalho apresentará de forma detalhada todas as melhorias que proporcionam à SST 1200es a impressão com os materiais PLA, PETG e ABS, superando as capacidades do sistema original projetada pela *Stratasys* em relação a qualidade, velocidade de impressão e flexibilidade.

ABSTRACT

The 3D printers of fused polymer deposition, since 2010 are being common with a large variety in the market, even being prototyped. The 3D printer SST 1200es, manufactured by Stratasys, has become outdated which compared with other printers, like Prusa and Makerbot models because updates are not more available, and the print inputs are expensive. For these reasons, and not to discard this printer, this work has the goal the upgrade it, changing all embedded electronic systems, using only free license technologies. Using the Marlin firmware, RepRap and Makerbot parts, it was possible to update the SST 1200es printer utilizing the best parts and features, allowing extend the useful time of this model and the use of cheap materials to print. This work will show in detail all the upgrades which allow the SST 1200es printer uses PLA, PETG, and ABS materials, showing better results than Stratasys's original system design which compared quality, speed, and flexibility.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivo Geral	3
1.2.1	Objetivos Especificos	3
1.3	Justificativa	4
1.4	Organização do Trabalho	5
2	Modernização da Impressora	6
2.1	Análise de Características	6
2.2	Decisões de Modificações	9
3	Arduino Mega 2560 e Ramps 1.4	11
3.1	Introdução ao Arduino Mega 2560 e a Ramps 1.4	11
3.2	Mapeamento e Componentes da Ramps 1.4	12
3.2.1	Pinos para o Módulo A4988	12
3.2.2	Pinos para o <i>Driver</i> Policomp	13
3.2.3	Pinos e Conexões da Ramps 1.4	14
3.2.4	PIN e Funções: Arduino Mega 2560	18
4	Componentes Aquecidos e Controle Proporcional, Integrativo e Derivativo	21

4.1	Chaveamento com MOSFETs	21
4.2	Extrusora	22
4.3	Mesa Aquecida	23
4.4	Aquecedor do Ambiente Interno	23
4.5	Controle Proporcional, Integrativo e Derivativo	24
4.6	Descrições dos Componentes Utilizados	26
4.6.1	Modelo da Mesa aquecida	26
4.6.2	Modelo da Extrusora	26
4.6.3	Modelo de Termistores	28
4.7	Aquecimento Ambiente	29
5	Firmware Marlin	30
5.1	Introdução ao Marlin	30
5.1.1	Configuração da aba Configuration.h	32
6	Desenvolvimento de Projeto	41
6.1	Metodologia de Desenvolvimento do Trabalho	41
6.2	Etapas de Projeto	42
6.2.1	Avaliação das Operações da Impressora com o Sistemas Originais	42
6.2.2	Avaliação do Sistema Embarcado Original	43
6.2.3	Avaliação dos Problemas da impressora 3D com o Sistema Original	43
6.2.4	Decisão de Modificações	44
6.2.5	Decisão dos Componentes Reaproveitados	44
6.2.6	Descarte dos Componentes não Aproveitados	44
6.2.7	Início da Montagem do Novo Sistema	44

6.2.8	Configuração do Firmware Marlin	45
6.2.9	Primeiros testes de impressão	46
6.2.10	Substituição dos motores de passo dos eixo X e Y	46
6.2.11	Teste de Impressão	46
6.2.12	Precisão dos eixos	47
6.2.13	Teste de Impressão	47
6.2.14	Instalação do Módulo do Display no Painel	47
6.2.15	Sistema de Aquecimento do Ambiente	48
6.2.16	Mesa aquecida	49
6.2.17	Sistema de Cartuchos	50
6.2.18	Octoprint	50
6.2.19	Ajustes na Mesa Aquecida MK2A	54
6.2.20	Extrusora Dupla	54
7	Resultados	56
7.1	Impressões em ABS: Cubos	56
7.2	Impressões em PLA: Cubos	57
7.3	Resultados em PETG: Cubos	58
7.4	Impressões de Vasos Genéricos em PLA	59
7.5	Impressões das Engrenagens em ABS	61
8	Conclusão	62
9	Trabalhos Futuros	63
10	Apêndices	66

10.1	Apêndice A- Octoprint	66
10.2	Apêndice B- Cura	67
10.2.1	Introdução ao Cura	67
10.2.2	Configurações do Cura	68
10.3	Apêndice C- Conograma do Trabalho de Conclusão de Curso 2	83

LISTA DE TABELAS

3.1	Configuração de pinos do <i>driver</i> A4988.	13
3.2	Configuração de pinos da <i>Ramps</i> 1.4 em conexão com o Arduino Mega 2560, fins de curso.	19
3.3	Configuração de pinos da <i>Ramps</i> 1.4 em conexão com o Arduino Mega 2560, <i>drivers</i> dos motores de cada eixo.	19
3.4	Configuração de pinos da <i>Ramps</i> 1.4 em conexão com o Arduino Mega 2560 e as conexões D8, D9 e D10.	20
3.5	Configuração de pinos da <i>Ramps</i> 1.4 em conexão com o Arduino Mega 2560 e as conexões T0, T1 e T2.	20
4.1	Relações entre os ganhos K_u e as constantes para cada tipo de controle. .	26

LISTA DE FIGURAS

1.1	Exemplar da impressora SST 1200es [4].	2
2.1	Exemplar da impressora <i>Makerbot</i>	6
2.2	Eixos X e Y em destaque da impressora <i>Stratasys</i>	7
2.3	Eixos X e Z em destaque da impressora <i>Stratasys</i>	7
2.4	Cartucho de material para impressora <i>Stratasys</i>	9
2.5	Novo motor para o eixo X da impressora <i>Stratasys</i>	9
2.6	Novo motor para o eixo Y da impressora <i>Stratasys</i>	10
3.1	Plataforma de desenvolvimento Arduino, modelo Mega 2560 [7].	12
3.2	Exemplo comumente encontrado no mercado da placa <i>Ramps</i> 1.4 usada neste trabalho [9].	12
3.3	Esquema elétrico comumente encontrado do <i>driver</i> A4988 [9].	13
3.4	<i>Driver</i> de motor de passo bipolar DM542A da Policomp [10].	14
3.5	Esquemático da placa de circuito impresso da <i>Ramps</i> 1.4 destacando as conexões para os <i>drivers</i> dos motores de passo [9].	14
3.6	Esquemático de placa de circuito impresso do <i>driver</i> A4988 [9].	15
3.7	Conexões de fins de curso na <i>Ramps</i> 1.4 em destaque [9].	15
3.8	Conexões dos componentes aquecidos na <i>Ramps</i> 1.4 em destaque [9]. . .	16
3.9	Conexões dos sensores de temperatura, termistores, na <i>Ramps</i> 1.4 em destaque [9].	16
3.10	Exemplo do modelo do <i>display</i> usado [9].	17

3.11	Conexões do <i>display</i> na <i>Ramps</i> 1.4 em destaque [9].	17
3.12	Módulo de cartão SD.	18
3.13	Conversor lógico bidirecional.	18
3.14	Conexões do EXP2.	18
3.15	Diagrama de conexões entre a <i>Ramps</i> 1.4 e o Arduino Mega 2560.	20
4.1	Esquemático de chaveamento com com transistores NPN.	22
4.2	Esquemático de chaveamento para a mesa aquecida.	23
4.3	Diagrama do circuito de controle do aquecimento do ambiente.	24
4.4	Modelo da mesa aquecida MK2b [8].	27
4.5	Extrusora de filamento escolhida para esse projeto, modelo de bico único [19].	27
4.6	Modelo do injetor de filamento escolhido para esse projeto, modelo MK8 Extrusora [19].	28
6.1	Fluxograma resumido para execução do trabalho.	42
6.2	Adaptador construído para o motor do eixo X.	46
6.3	Módulo ponte H utilizado, modelo L298N.	48
6.4	Suporte de aço ajustável para mesa aquecida.	49
6.5	Diagrama de entradas e saídas em relação a <i>Raspberry PI</i> 3.	54
6.6	Extrusora dupla usada no projeto.	55
7.1	Resultado de impressão dos cubos de 20 mm usando ABS.	57
7.2	Resultado de impressão dos cubos de 20 mm usando PLA.	58
7.3	Resultado de impressão dos cubos de 20 mm usando PETG.	59
7.4	Resultado de impressão dos vasos com diferentes padrões de qualidade.	59

7.5	Comparação de impressão da engrenagem, sistema antigo em relação ao novo.	61
10.1	Listas de ajustes.	69
10.2	Ajustes de qualidade.	70
10.3	Ajustes de perímetro.	70
10.4	Ajustes de preenchimento.	71
10.5	Cubo com porcentagem de preenchimento de 15%.	72
10.6	Pirâmide com porcentagem de preenchimento de 15%.	72
10.7	Padrão grade.	73
10.8	Padrão triangular.	73
10.9	Número de filetes.	74
10.10	Parâmetros de material.	75
10.11	Parâmetros de velocidade.	76
10.12	modelo 3D de um cubo com Brim de 8 mm de largura.	78
10.13	<i>Raft</i> de 8 mm de perímetro.	79
10.14	Janela de ajustes para extrusão dual.	79
10.15	Configurações da impressora.	80
10.16	Configurações do <i>Extruder</i>	82
10.17	Configurações dos materiais.	82
10.18	Cronogramas de atividades para o Trabalho de Conclusão de Curso 2.	83

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

<i>ABS</i>	–	<i>Acrilonitrila butadieno estireno</i>
<i>AC</i>	–	<i>Alternative Current</i>
<i>CNC</i>	–	<i>Computer Numerical Control</i>
<i>CMOS</i>	–	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
<i>DC</i>	–	<i>Direct current</i>
<i>DIR</i>	–	<i>Direção de rotação</i>
<i>DLP</i>	–	<i>Direct Light Processing</i>
<i>EEPROM</i>	–	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
<i>FDM</i>	–	<i>Fused deposition Modeling</i>
<i>GPIO</i>	–	<i>General Purpose Input/Output</i>
<i>GND</i>	–	<i>Ground</i>
<i>IDE</i>	–	<i>Integrated Development Environment</i>
<i>LCD</i>	–	<i>Liquid Crystal Display</i>
<i>LED</i>	–	<i>Light Emitting Diode</i>
<i>MOSFET</i>	–	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
<i>NMOS</i>	–	<i>nFET Metal Oxide Silicon</i>
<i>NTC</i>	–	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
<i>OLED</i>	–	<i>Organic Light Emitting Diode</i>
<i>PCB</i>	–	<i>Printed Circuit Board</i>
<i>PETG</i>	–	<i>Polietileno tereftalato glicol</i>
<i>PID</i>	–	<i>Proporcional Integrativo Derivativo</i>
<i>PIN</i>	–	<i>Pino</i>
<i>PLA</i>	–	<i>Ácido Poliláctico</i>
<i>PVA</i>	–	<i>Álcool Polivinílico</i>
<i>PWM</i>	–	<i>Pulse Width Modulation</i>
<i>RISC</i>	–	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
<i>SPI</i>	–	<i>Serial Peripheral Interface</i>
<i>STL</i>	–	<i>Stereolithography</i>
<i>SRAM</i>	–	<i>Scott, Ray, and Sam</i>
<i>UART</i>	–	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
<i>USB</i>	–	<i>Universal Serial Bus</i>
<i>UV</i>	–	<i>Ultra Violeta</i>
<i>VDD</i>	–	<i>Tensão de Alimentação Positiva</i>
<i>VMOT</i>	–	<i>Alimentação Positiva Motor</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A primeira impressora 3D foi desenvolvida em 1984, inventada por *Chuck Hull*, engenheiro físico norte-americano do estado da Califórnia, em que a tecnologia utiliza a estereolitografia utilizando materiais fotossensíveis, como resinas que na presença de luz se solidificam. As primeiras impressoras 3D comerciais foram desenvolvidas em 1989 por *S. Scott Crump*, utilizando o método de deposição de material por fusão, tecnologia idêntica à tecnologia das impressoras atuais. Em 2010, com a expiração das patentes, as primeiras impressoras 3D *open source* foram desenvolvidas pela *Makerbot* e *RepRap*. Em 2014 as últimas patentes referentes as impressoras 3D que utilizam o método de deposição de polímeros por fusão foram expiradas, passando totalmente para domínio público.

As impressoras mais comuns, como *Makerbot*, *Prusa* e a SST 1200es da *Stratasys* são CNCs, *Computer Numerical Control*, cartesianas de três eixos, que utilizam a tecnologia de deposição de polímeros por fusão. Essa tecnologia é idêntica a tecnologia de usinagem por extrusão e ao mesmo tempo a tecnologia de usinagem por fresamento. O que muda é que a extrusão não forma mais a peça de forma direta, passa a ser a ferramenta para deposição de material da peça, e a usinagem por fresamento não retira matéria de um bloco, mas passa a depositar material. Esse tipo de impressão 3D é denominada também como manufatura aditiva, classificadas como FDM, *Fused Deposition Modeling*, fabricação com filamento fundido. Há outros tipos de impressoras 3D comerciais no mercado [2] e que podem ser prototipadas. A impressora de estereolitografia, que geralmente utiliza o material SLA, *Stereolithography Apparatus*, é uma impressora a *laser* que solidifica o material fotossensível de acordo com as dimensões da peça a ser impressa, ponto-a-ponto. A impressora 3D DLP, *Direct Light Processing*, possui processo de impressão que é idêntico ao por estereolitografia, porém a solidificação do material é por camada. Também há impressoras de tecidos orgânico, de ossos, de titânio de gesso, de vidro, de cerâmica, ou seja, uma variedade enorme de tecnologias de impressora.

Os materiais mais utilizado pelas impressoras comerciais são os polímeros ABS, PLA,



Figura 1.1. Exemplar da impressora SST 1200es [4].

PETG e o solúvel [12]. O ABS, *Acrylonitrile Butadiene Styrene*, é derivado do petróleo, sendo bastante utilizado na indústria na produção de eletrodomésticos, interiores de carros e na constituição de produtos eletrônicos. O PETG é a mistura de PET, *Polyethylene Terephthalate*, com glicol, também derivado do petróleo. O PET é bastante utilizado na indústria alimentícia como recipiente de líquidos. O PLA, *Polylactic Acid*, é um plástico orgânico, produzido a partir do ácido láctico obtido do milho ou da cana-de-açúcar. O material solúvel tem bastante variedade, o mais comum é o PVA, *Polyvinyl Alcohol*, é utilizado como material de suporte em impressões 3D, é insolúvel em água e exige que a impressora possa imprimir com no mínimo dois materiais diferentes ao mesmo tempo. Há outros polímeros que podem ser usados, mas geralmente são de alto custo e utilizados em projetos muito específicos.

A impressora 3D SST 1200es mostrada na figura 1.1, foi produzida em 2005, pela *Stratasys*. A *Stratasys* é uma empresa norte-americana, que atua neste segmento de mercado desde 1988. Esta impressora tornou-se obsoleta e de alto custo quando comparado as impressoras 3D atuais. O custo do ABS, vendido exclusivamente pela companhia, custa duzentos dólares americanos em média, o que é bastante caro quando comparado ao material de impressão genérico, que custa em média cem reais. A sua eletrônica não permite atualização para novas tecnologias de impressão por ser fechada. Porém, a impressora apresenta uma excelente qualidade na execução da impressão, o que não a torna descartável. Para não inutilizar a impressora e sucateá-la, será feito a modernização da mesma.

A modernização da impressora 3D SST 1200es consiste em substituir toda a eletrônica embarcada original e implementar componentes *RepRap* para impressoras 3D, Arduino

MEGA 2560 e *Raspberry PI 3* utilizando o *firmware Marlin*, a distribuição de Linux *Octoprint* e o *host Cura*. A mecânica e a estrutura da impressora são mantidas, com exceção dos motores dos eixos X e Y, uma vez que a mecânica e a estrutura são excelentes e extremamente bem fabricadas, produzidas em aço galvanizado ou pintado e em alumínio, com sistemas de correias no eixos X e Y e de fuso no eixo Z, sistema de ventilação integrado à estrutura e suas carenagens com espumas para isolamento térmico e vedação, equivalente à um forno elétricos doméstico.

Na modernização as funções do sistema original foram mantidas ou copiadas, modificando e desenvolvendo, respetivamente, formas para implementá-las de modo compatível com os novos sistemas, mantendo assim os cartuchos, iluminação e aquecimento do ambiente, acesso remoto pela rede interna e a impressão com dois materiais diferentes. O espaço traseiro da impressora era utilizado para armazenar o sistema embarcado original, o mesmo espaço armazena o novo sistema. Em uma percepção inicial a impressora como novo sistema se mantém como a mesma com o original, porém com possibilidades superiores de trabalho e de funções.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo a construção de um novo sistema embarcado da Impressora 3D *Stratasys*, modelo *Dimension SST 1200es*, mantendo minimamente as mesmas funções providas pelo sistema embarcado original, reformando a mesma. O novo sistema embarcado utiliza o Arduino Mega 2560 Rev3, com a *Shield Ramps 1.4* que é *open source*, e permitirá atualizações e adaptações futuras, de acordo com as necessidades do operador e competência do mesmo. Este sistema é implementado também na maioria das impressoras 3D de baixo custo disponíveis no mercado atual, o que facilita encontrar peças de reposição para manutenção e atualização. O novo sistema permite a utilização de plásticos além do ABS, como o PETG e o PLA, sem a necessidade de algum material solúvel de impressão para aderência, devido a mesa aquecida com temperatura controlada, componente inexistente no antigo sistema.

1.2.1 Objetivos Especificos

Como objetivo específico implementar um novo sistema embarcado na impressora 3D da *Stratasys* para diminuir os custos para a aquisição de material para impressão, manutenção, atualização e de licenças para *software*, uma vez que o sistema embarcado com Arduino Mega 2560 Rev3, com a *Shield Ramps 1.4* é *open source*. Proporcionando flexi-

bilidade da impressora para alterações, porém perdendo assistência técnica da *Stratasys*.

O sistema embarcado deve ser compatível com *host* livre para fatiar arquivos STL, uma abreviação do inglês *stereolithography*, como o *Cura* fornecido de forma livre pela *Makerbot* e com o *Repetier-Host*, disponível gratuitamente *Hot-World GmbH & Co. KG*. O *firmware* utilizado no Arduino Mega 2560 deve ser o *Marlin Firmware* fornecido pela *Marlin*, licenciado sob a GPLv3, gratuito para todas as aplicações. A impressora deve manter as funções idênticas às originais, uma vez substituídas ou aprimoradas, para que este trabalho seja coerente.

Possibilitar futuras atualizações e modificações, conforme as necessidades do usuário, para que possa aumentar o tempo de vida da impressora. As modificações devem ser reversíveis, no caso da existência da necessidade de retornar ao sistema original da impressora. Além do material original da *Stratays* para impressão, o sistema deve permitir a impressão com ABS, PETG, PLA e solúvel genéricos, por meio da adição de uma mesa aquecida controlada que tenha área útil minimamente maior que a mesa original. A extrusora deve permitir a impressão de dois materiais diferentes utilizando somente um bico com dois motores para empurrar cada material.

Os motores dos eixos X e Y devem ser substituídos por outros de maior torque para aumentar a velocidade de trabalho, em que nesta substituição inclui os *drivers* referentes aos motores. Possibilitar operação e acesso remoto via rede interna, por meio do *Raspberry PI 3*, com o sistema operacional *Octoprint*, sob a *Affero General Public License* (AGPL). A impressora deve dispor de um painel com *display* gráfico que permita o usuário operá-la sem utilizar o *Octoprint*. Os sistemas de aquecimento do ambiente interno, de cartucho e de iluminação devem ser mantidos e utilizados no novo sistema. A impressora deve permitir atualizações flexíveis, tanto no *software* tanto no *hardware*.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com necessidade de manter a impressora 3D *Stratasys* SST 12000es funcionando e de diminuir os gastos com materiais para impressão, por apresentar boa qualidade de impressão, excelente mecânica e estruturas, foi necessário modernizá-la. Seu sistema embarcado antigo apresentava características obsoletas quando comparada com as atuais impressoras 3D e também é um sistema fechado, o que impede alterações para adicionar novas tecnologias.

Desta forma este trabalho emprega um novo sistema embarcado totalmente aberto, aproveitando a mecânica e estrutura da impressora, permitindo o uso de materiais de im-

pressão paralelos mais baratos que os exclusivos da *Stratasys*, viabilizando as impressões. Com consequência deste trabalho, a impressora permite a introdução de novas tecnologias para impressoras, manutenção pelo próprio usuário e aquisição de peças disponíveis no mercado além da própria *Stratasys*.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para uma melhor organização desse trabalho o mesmo foi dividido em três partes: Considerações Iniciais, Fundamentação Teórica e Considerações Finais. A Parte I, trata da introdução, objetivos gerais e específicos e justificativa. A Parte II trata do referencial teórico para esse trabalho e a Parte III trata sobre o projeto, metodologia e da conclusão. A seguir serão mostrados a listagem de capítulos e um pequeno resumo do que tratam.

Capítulo 1 - Este capítulo trata da introdução, objetivos gerais específicos e justificativa, itens fundamentais do texto;

Capítulo 2 - Este capítulo trata da modernização da impressora, análises do sistema original e decisões de modificação;

Capítulo 3 - Este capítulo trata do hardware do Arduino Mega2560 e da Ramps 1.4, mapeamento de GPIO, componentes eletrônicos periféricos;

Capítulo 4 - Este capítulo trata dos componentes aquecido, controle por chaveamento e método de ajustes do controle PID;

Capítulo 5 - Este capítulo trata do *firmware Marlin*, das configurações da aba Configuration.h e explicações das do parâmetros inseridos nesta aba;

Capítulo 6 - Desenvolvimento do trabalho;

Capítulo 7 - Resultados;

Capítulo 8 - Conclusão sobre o trabalho;

Capítulo 9 - Trabalhos futuros;

Apêndice A - *Octoprint*;

Apêndice B - *Cura*;

Apêndice C - Cronograma de atividades do Trabalho de Conclusão de Curso II.

2 MODERNIZAÇÃO DA IMPRESSORA

Neste capítulo serão abordados aspectos sobre as características da impressora 3D da Stratasys, críticas e comparações e modificações.

2.1 ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS

A impressora da *Stratasys* é acompanhada de um manual que fala como se operar a impressora, em relação a conectividade, instalações, troca de material de impressão, manutenção e limpeza da extrusora e troca de algumas peças. Não há nenhum aprofundamento sobre a forma como a máquina funciona de fato. Fazer uma avaliação da forma como o seu sistema funciona levaria bastante tempo ou talvez não seria possível, por estar se tratando de um projeto fechado, em que há chance mínima de abertura do seu projeto pela *Stratasys* ao público. O manual colaborou para entender como a impressora funcionava, que pode-se resumir a uma impressora 3D da *Makerbot* com extrusora dupla como mostrado na figura 2.1, adicionando um ambiente com temperatura controlado, com volume de trabalho maior e com uma estrutura e mecânica mais robusta. A princípio toda impressora 3D de deposição de polímeros trabalhando de forma idêntica.



Figura 2.1. Exemplar da impressora *Makerbot*.

Assim como a impressora 3D da *Makerbot*, a estrutura da *Stratasys* é de uma CNC de 3 eixos, onde o eixo X está fixo no eixo Y, em que este está fixado na chassi da impressora,

como uma máquina plotadora, porém no suporte do cabeçote da plotadora se encontra a extrusora. No eixo Z está a mesa aquecida, em que esta mesa se afasta e se aproxima em um eixo ortogonal ao plano de deslocamento da extrusora, em que o plano da mesa é paralelo ao da extrusora. Na figura 2.2 se encontram as indicações das posições dos eixos X e Y, visualizando a impressora aberta por cima. Na figura 2.3 encontram-se as indicações das posições dos eixos X e Z, visualizando o interior da impressora frontalmente com porta aberta.



Figura 2.2. Eixos X e Y em destaque da impressora *Stratasys*.

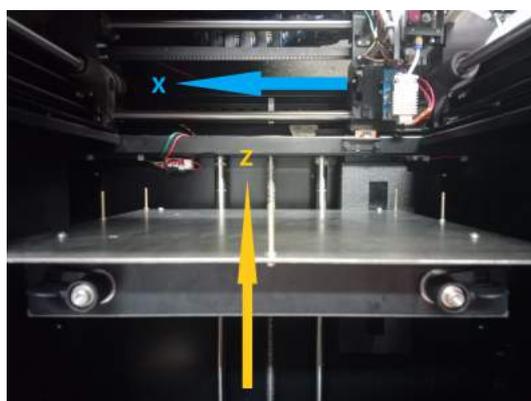


Figura 2.3. Eixos X e Z em destaque da impressora *Stratasys*.

A impressora da *Stratasys* tem um *host* próprio para fatiar o STL do modelo 3D a ser impresso, este é idêntico ao *Cura* e ao *Repetier*, porém é somente funcional ao próprio sistema da *Stratasys*. Não houve uma análise mais profunda deste *software*, já que não foi encontrado a mídia do programa para instalação. Também não seria aproveitado neste projeto devido a sua exclusividade.

A forma de execução da impressão é idêntica às demais impressoras, porém só imprime com o polímero ABS, juntamente com o material de suporte solúvel. Como originalmente a impressora não tem mesa aquecida, é obrigatório utilizar o material solúvel para aderir a impressão à mesa e também o ambiente deveria ser aquecido 80 °C. Essa forma de

impressão não permite imprimir a peça inteira juntamente com o suporte de impressão somente com um material, mesmo que só tenha ABS disponível não seria possível imprimir pela falta de material solúvel no sistema original.

O ambiente aquecido da impressora é uma característica bastante positiva, principalmente para peças em ABS que ocupam bastante volume de trabalho da máquina. Ter um ambiente aquecido, fechado e controlado evita o empenamento do modelo impresso ou que esse modelo se solte da mesa, devido ao gradiente de temperatura da região próxima a mesa em relação a temperatura das últimas camadas impressas, uniformizando a temperatura ao longo da peça impressa por convecção. No sistema original, o aquecimento do ambiente interno era responsável por aquecer a mesa por convecção, que é um método ineficiente para aquecimento uniforme da mesa, podendo resultar na má aderência da peça à mesa e na inviabilização de impressão com outro material.

A extrusora da impressora é idêntica a utilizada nas impressoras do mercado, inclusive a espessura do filamento utilizado é de 1.75 mm. A extrusora original é dupla, com um bico para cada material e compartilham o mesmo motor. Por a extrusora ser dupla, há a dificuldade na calibragem dos bicos, um em relação ao outro, que devem estar no mesmo nível, e obrigatoriamente o plano de liberdade de movimento dos dois bicos deve ser paralelo ao plano da mesa. Outro problema crítico são os entupimentos difíceis de desobstruir, e escapadas do filamento na polia dentada do motor responsável por injetar o material. Para adquirir peças para manutenção da extrusora, somente com a fabricante.

A utilização de cartuchos, um exemplar pode ser visto na figura 2.3, para armazenar os material de impressão é uma característica positiva, assim pode-se armazenar o material dentro de um recipiente protegido contra raios UV, Ultra Violeta, e umidade, o que aumenta bastante a validade do material de impressão. O lado negativo dos cartuchos é que nele se encontra um circuito integrado registrador da quantidade do material consumido, uma vez que a impressora sabe o valor da quantidade de filamento gasto, este valor é registrado no *chip*. Isso impede do cartucho de ser recarregado. Logo é obrigatório consumir apenas o material de impressão original.

A impressora conta com isolamento térmico, uma característica que permite maior independência em relação ao ambiente externo, o que traz maior economia no consumo de energia para manter a impressora aquecida. O isolamento térmico também colabora para atenuar os ruídos produzidos pelos motores da impressora, deixando-a mais silenciosa, diminuindo os estresses de indivíduo que estiver no mesmo local que a impressora.

A estrutura da impressora é bastante rígida, alinhada, feita com materiais de qualidade. A estrutura está alinhada, contendo esquadro perfeito em todos os ângulos retos.



Figura 2.4. Cartucho de material para impressora *Stratasys*.

O rolamento não apresentam folga ou fricção em relação ao guias lineares. As polias dentadas e as correias dentadas, padrão GT3, se encontram em ótimo estado e estão otimizadas à estrutura.

2.2 DECISÕES DE MODIFICAÇÕES

Partindo das características positivas e negativas da impressora original, pode-se definir o que seria modificado, adicionado ou retirado. Com objetivo imposto há este projeto, todas as modificações deste projeto são reversíveis, permitindo que a impressora possa funcionar como projetada originalmente. Quase todas as peças retiradas da impressora não foram modificadas ou danificadas, apenas o motor de passo do eixo X foi modificado e adaptado para a introdução de um novo a este eixo. A figura 2.5 ilustra o novo motor do eixo X já adaptado e instalado na máquina. Antes de fazer qualquer modificação,

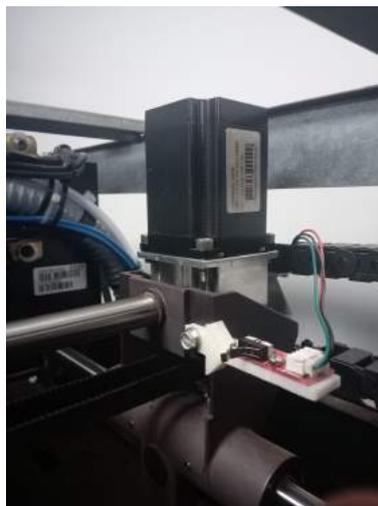


Figura 2.5. Novo motor para o eixo X da impressora *Stratasys*.

todas as peças foram catalogadas com fotografias, em que mostram como todas as peças

estavam posicionadas, ligadas e encaixadas. Desta forma, há maior facilidade na reversão da impressora para a forma original, caso seja necessário. Partindo das características negativas, foi retirado o que não seria possível ser utilizado. O sistema embarcado inteiro, os *drivers*, os motores dos eixos X e Y, as fontes, extrusora e o painel frontal foram retirados. Estes componentes não poderiam ser reaproveitados, por não existir *datasheet* disponível ao público. No caso dos motores, foi feito observando o erro de passo nas impressões de teste de um cubo de 20 mm de aresta, por isso foram substituídos. A Figura XX ilustra o novo motor do eixo Y já instalado na máquina. Os cartuchos foram reaproveitados,



Figura 2.6. Novo motor para o eixo Y da impressora *Stratasys*.

apenas para armazenar o material para impressão, porém não são mais utilizados para registrar a quantidade de material consumido. Na recarga do cartucho, basta a abri-lo, trocar o rolo de material e fechá-lo novamente. Não é necessariamente o rebobinamento para o carretel original do cartucho. No lugar da mesa original, foi adicionado uma mesa aquecida de 300 mm por 300 mm definitivamente. A mesa é fixada em cima da plataforma original, aproveitando os encaixes para parafusar o suporte.

Os aquecedores de ar, responsáveis por aquecer o ambiente interno da impressora foram mantidos. Apenas o sistema que faz o controle e o sensor de temperatura foram trocados, já que estes têm *datasheet* de domínio público. Os aquecedores não tem *datasheet*, mas têm os parâmetros de operação gravados neles, 400 W de potência, 110 V de tensão, cada aquecedor. O sistema de iluminação por barras de LEDs foi mantido. Está em boas condições, não há necessidades de trocá-los.

Todos os componentes estruturais foram reaproveitados. Não há problemas e nem necessidade de manutenção ou reposição de peças. A extrusora foi retirada, deixando apenas o carro do eixo X. A extrusora original precisava de manutenção, é obsoleta e pesada. Também não havia como fazer uma adaptação efetiva de fácil manuseio.

3 ARDUINO MEGA 2560 E RAMPS 1.4

Neste capítulo serão abordados aspectos sobre o microcontrolador Arduino Mega 2560, divididos em introdução, parâmetros técnicos, GPIOs e funções e outros padrões.

3.1 INTRODUÇÃO AO ARDUINO MEGA 2560 E A RAMPS 1.4

O Arduino Mega 2560, figura 3.1, de acordo com [7] é uma plataforma de desenvolvimento, com o circuito integrado ATmega2560, um microcontrolador CMOS, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*, de 8 bits de baixa potência baseado no AVR, *Automatic Voltage Regulator*. Possui arquitetura RISC, *Reduced Instruction Set Computer*, 256 kB de memória *flash* para armazenar código, em que 8 kB para o *bootloader*, 8 kB de SRAM, *Static Random Access Memory*, e 4 kB de EEPROM, *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*. O Arduino Mega 2560 Possui 54 GPIOs, *General Purpose Input/Output*, digitais, 16 GPIOs analógicas, totalizando em 70 pinos, 4 pares de GPIO para comunicação UART, *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*, um oscilador de cristal de 16 MHz, um conversor UART-USB, *Universal Serial Bus*, embutido, conector de alimentação um conector ICSP, *In-Circuit Serial Programming*.

O Arduino Mega 2560 é um *hardware open source* [7]. A placa pode ser programada com o *software* Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), em linguagem C++ e *Assembly*, já vem pré-programado com um *bootloader*, em que de acordo com [7] permite *upload* de códigos sem o uso de programador de *hardware* externo, o protocolo de comunicação é o STK500. O motivo da escolha do Arduino Mega 2560 é por ser utilizado nas impressoras 3D dos principais fabricantes, como a *Prusa* e a *Makerbot* desde 2010, e por haver vários desenvolvedores que a utiliza, como o *Marlin*, *Repetier* e a *Reprap*. A quantidade de *firmwares*, atualizações e adaptações para esta placa é vasta, além de permitir personalização de funcionamento. Outro motivo é por ser compatível com a *shield Ramps*, versões 1.3 e 1.4.

A *Ramps* 1.4, figura 3.2, é uma *sheild* desenvolvido para o Arduino Mega 2560, pela *Reprap* [8], em que possibilita o desenvolvimento prático de uma impressora 3D. A *sheild*



Figura 3.1. Plataforma de desenvolvimento Arduino, modelo Mega 2560 [7].

permite até 5 módulos *drivers* A4988, ou outro com o mesmo *layout* segundo [9], 6 fins de curso, chaveamento para duas *hotend* um *heatbed*, 3 termistores, um módulo com *display* LCD, *Liquid Crystal Display*, ou OLED, *Organic Light-Emitting Diode*, com leitor de cartão SD, *Secure Digital*, e uma fonte de alimentação de 12 V.

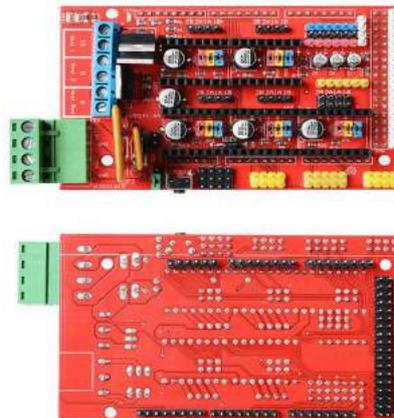


Figura 3.2. Exemplo comumente encontrado no mercado da placa *Ramps* 1.4 usada neste trabalho [9].

3.2 MAPEAMENTO E COMPONENTES DA RAMPS 1.4

3.2.1 Pinos para o Módulo A4988

O módulo *driver* A4988, figura 3.3, controlado pelo circuito integrado Allegro A4988, tem função de controlar motores de passo bipolares. O controle do motor é feito por meio de 3 pinos, *DIR* para o sentido de rotação, *STEP* para os passos e o *ENABLE* para desabilitar os motores. Os pinos *MS1*, *MS2* e *MS3* são para configuração de micropasso, variando a quantidade de passos por revolução do motor. Os pinos *RESET* e *SLEEP* não são utilizados. Os pinos de alimentação *GND*, *VMOT* e *VDD* são alimentados em 0 V,

12 V e 5 V respectivamente. Há um potenciômetro para ajuste de corrente de saída, em que a corrente varia entre 0 A até 2 A, no sentido horário. A configuração de micropasso

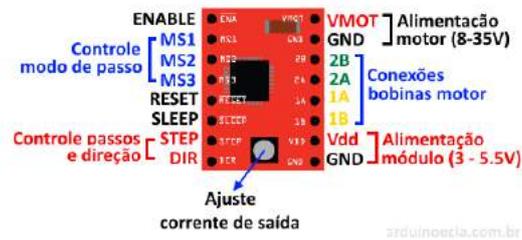


Figura 3.3. Esquema elétrico comumente encontrado do *driver* A4988 [9].

a tabela 3.1, em que na *Ramps* 1.4 basta conectar um *jumper* para ligar em VDD e sem *jumper* para GND, devido a configuração *pull-up* do *driver* [9].

MS1	MS2	MS3	Micropasso
GND	GND	GND	Passo completo
VDD	GND	GND	1/2 de passo
GND	VDD	GND	1/4 de passo
VDD	VDD	GND	1/8 de passo
VDD	VDD	VDD	1/16 de passo

Tabela 3.1. Configuração de pinos do *driver* A4988.

Este módulo *driver* é utilizado apenas para as extrusora E0 e E1, porque estes possuem motores de passo de 1,5 A. Para os eixos X, Y e Z, são utilizados drives de 4 A, da *Policomp*, modelo DM542A, porque é necessário fornecer 2 A para os motores dos eixos X e Z e 3 A para o motor do eixo Y.

3.2.2 Pinos para o Driver Policomp

O *driver* DM542A da *Policomp* [10], assim como o módulo *driver* A4988, tem a função de controlar motores de passo bipolares. Os pinos GND, *STEP*, DIR e *ENABLE* deste *driver* têm as mesmas funções do módulo *driver* A4988. A forma o *driver* DM542A é inserido no sistema é idêntica à do módulo *driver* A4988. O nível lógico de tensão do *driver* DM542A é de 5 V também [10]. A diferença é que a configuração do micropasso e do limitador de corrente é feita de forma direta no próprio *driver*. É necessário alimentar o *driver* com um fonte de pelo menos 18 V DC de acordo com [10] e possa fornecer corrente de pico de operação de 4,2 A. No *driver* DM542A se encontram 8 chaves para configuração, em que as chaves de SW1 até SW4 são responsáveis por configurar a limitação de corrente e as outras chaves são responsáveis por configurar o micropasso. A tabela com todas as configurações por meio das chaves se encontra impressa no próprio *drivers* e no *datasheet*. O motivo da escolha destes *drives* é por estarem disponíveis para o projeto e por suportar



Figura 3.4. *Driver* de motor de passo bipolar DM542A da Policomp [10].

os motores de passo dos eixos X, Y e Z. Os motores operam com a tensão 24 V DC. Os motores do eixo X e Y suportam até 2 A, já o motor do eixo Z suporta até 1,5 A.

3.2.3 Pinos e Conexões da Ramps 1.4

Os pinos marcados em azul na imagem 3.5 são para configurações de passo do módulo *driver* A4988, seguindo o *datasheet* do *driver*, com os pinos MS1, MS2 e MS3 [9]. Os pinos marcados em vermelho na imagem são as saídas de alimentação dos motores de passo dos eixos e das extrusoras, 2B, 2A, 1A e 1B. Destes pinos marcados, apenas os relacionados

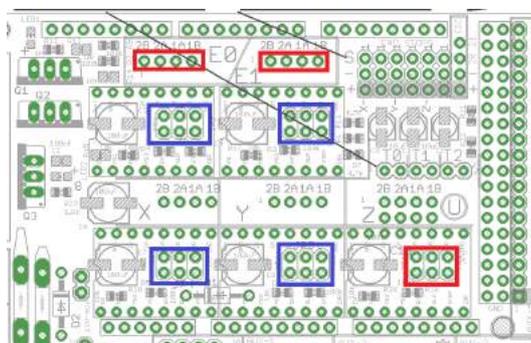


Figura 3.5. Esquemático da placa de circuito impresso da Ramps 1.4 destacando as conexões para os *drivers* dos motores de passo [9].

às extrusoras serão utilizados, já que para os eixos X, Y e Z é utilizado o *driver* Policomp [10]. A ligação dos *driver* Policomp é idêntica à ligação do módulo *driver* A4988, mas usando apenas os pinos DIR, *STEP*, *ENABLE* e GND, isso separadamente para cada conjunto de pinos para cada eixo. Desta forma, pode-se ligar qualquer *driver* com que opere com sinal lógico compatível com o sinal do Arduino Mega 2560. O conjunto de DIR, *STEP* e *ENABLE* dos eixos X, Y e Z estão marcados em verde, amarelo e laranja, respectivamente na figura 3.6. Os fins de curso, *end-stop*, dos eixos X, Y e Z estão marcados em azul, em que há o conjunto de pinos para o fim mínimo e máximo de cada,

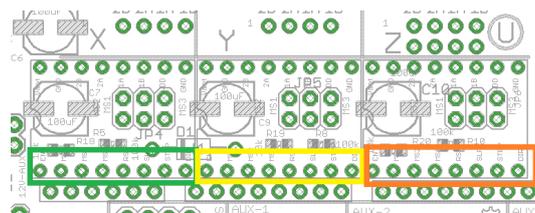


Figura 3.6. Esquemático de placa de circuito impresso do *driver* A4988 [9].

respectivamente, da esquerda para a direita. Cada conjunto contém um VCC, um GND e um *INPUT* para os final do sensor. O sensor funciona como um botão, pode ser do tipo *pull-up* ou *pull-down*, já que pode ser configurado no código *firmware Marlin*.

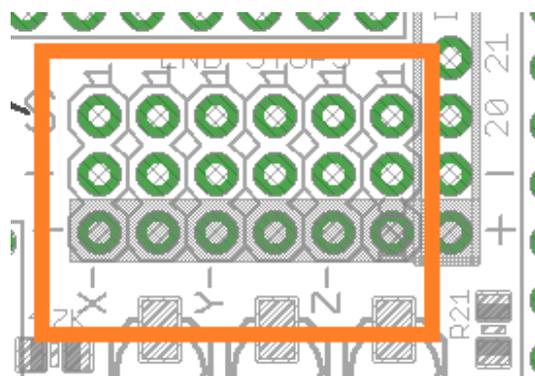


Figura 3.7. Conexões de fins de curso na Ramps 1.4 em destaque [9].

Não é obrigatório utilizar os fins de curso o máximo e mínimo para todos os eixo, apenas um é o suficiente, já que a máquina é pré-limitada em suas dimensões de trabalho no *firmware*. Para este projeto, para os eixos X, Y e Z foram utilizados os fins de curso, do tipo *pull-up*, máximo e mínimo, respectivamente. O motivo para os eixos X e Y é por ser mais fácil de fixar na impressora e também o usar um cabo menor, o que evita falha do sinal por causa do comprimento do cabo do sensor. Para o eixo Z, com o fim de curso no mínimo, permite maior facilidade para calibragem do nível da mesa aquecida em relação ao bico da extrusora.

As saídas dos D8, D9 e D10, marcados em azul na figura 3.8, são responsáveis por ligar à mesa aquecida, à extrusora E1 e à extrusora E0 [9], em que cada saída é chaveada por um MOSFET, *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, de potência Irlb3034, NMOS, *Negative Metal Oxide Semiconductor*. Esse MOSFET vem soldado à Ramps 1.4. Não é obrigatório usar esse MOSFET, pode-se usar outros transistores tipo n, como o IFR540. A extrusora E1 não é utilizada, por causa do modelo utilizado neste projeto, em que permite dois filamentos diferentes com apenas um bico. A mesa aquecida é chaveada de forma secundária por um relé. Na parte sobre componentes aquecidos é explicado melhor. Os pinos nos termistores, T0, T1, T2, marcados em vermelho na figura 3.9, são responsáveis pelos termistores da extrusora E0, da mesa aquecida e da extrusora E0



Figura 3.10. Exemplo do modelo do *display* usado [9].

cabos, do EXP1 e EXP2, foram alterados, aumentando comprimento para 1,5 metros de comprimento, devido a localização do módulo na parte frontal da impressora e a localização da *Ramps 1.4* na parte traseira da impressora. O comunicação do leitor de cartão é do tipo barramento *Serial Peripheral Interface* (SPI). Neste módulo, o leitor de

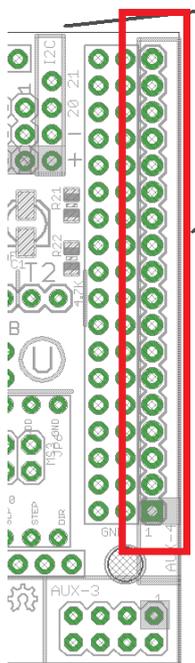


Figura 3.11. Conexões do *display* na *Ramps 1.4* em destaque [9].

cartão SD, figura 3.12, se encontra na lateral e por causa disso não é utilizado, devido às características do painel original, só é possível inserir um padrão de forma frontal ao painel. É utilizado um módulo para leitura de cartão SD a parte, que utiliza o mesmo protocolo

de comunicação do leitor do módulo com o *display*, SPI. Este módulo é conectado nos mesmos pinos do leitor do módulo com o *display*, MOSI, SCK, MISO e CS, em que se encontra um conversor lógico bidirecional, figura 3.13, de quatro canais de 5 V para 3,3 V, o cartão SD opera com nível lógico alto de 3,3 V e o Arduino Mega 2560 opera com 5 V. As conexões MOSI, SCK, MISO e CS são os pinos, respectivamente, 6, 2, 1 e 4 da conexão EXP2, figura 3.14. Uma característica importante do conversor lógico é a semelhança com o *buffer*, o que permite a comunicação com o cabo de 1,5 m utilizado na conexão do EXP2, o que não seria possível com o leitor do módulo com o *display*.

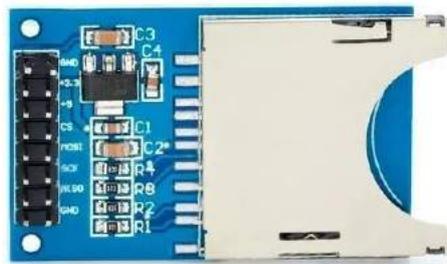


Figura 3.12. Módulo de cartão SD.



Figura 3.13. Conversor lógico bidirecional.

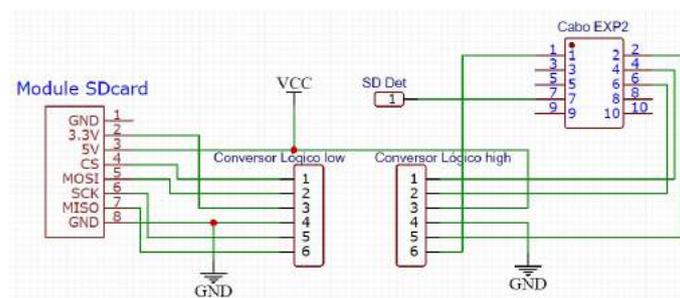


Figura 3.14. Conexões do EXP2.

3.2.4 PIN e Funções: Arduino Mega 2560

Nas tabela 3.2 e 3.3 há a relação do pino com sua função por meio da *shield Ramps* 1.4, em que contém apenas o que será útil para ligações diretas dos módulos. A divisão

em várias tabelas facilita o agrupamento de funções idênticas das GPIOs. Quanto a barra de pinos responsáveis pelo módulo *Full Graphic Smart Bigtreetech*, não há necessidades de mapeá-los, não estão sujeitos a modificações neste projeto.

Relacionando apenas os fins de curso máximos e mínimos dos eixos X Y e Z com os pinos do Arduino Mega 2560.

Arduino Mega 2560	<i>Ramps 1.4</i>
PIN 3	Fim de curso do eixo X (mínimo)
PIN 2	Fim de curso do eixo X (máximo)
PIN 14	Fim de curso do eixo Y (mínimo)
PIN 15	Fim de curso do eixo Y (máximo)
PIN 18	Fim de curso do eixo Z (mínimo)
PIN 19	Fim de curso do eixo Z (máximo)

Tabela 3.2. Configuração de pinos da *Ramps 1.4* em conexão com o Arduino Mega 2560, fins de curso.

Relacionando apenas os *drivers* de motor de passo dos eixos X, Y e Z e das extrusoras E0 e E1 com os pinos do Arduino Mega 2560.

Arduino Mega 2560	<i>Ramps 1.4</i>
PIN 54	Passo <i>driver</i> eixo X
PIN 55	Direção <i>driver</i> eixo X
PIN 38	<i>Enable driver</i> eixo X
PIN 60	Passo <i>driver</i> eixo Y
PIN 61	Direção <i>driver</i> eixo Y
PIN 56	<i>Enable driver</i> eixo Y
PIN 46	Passo <i>driver</i> eixo Z
PIN 48	Direção <i>driver</i> eixo Z
PIN 62	<i>Enable driver</i> eixo Z
PIN 26	Passo <i>driver</i> extrusora E0
PIN 28	Direção <i>driver</i> extrusora E0
PIN 24	<i>Enable driver</i> extrusora E0
PIN 36	Passo <i>driver</i> extrusora E1
PIN 34	Direção <i>driver</i> extrusora E1
PIN 30	<i>Enable driver</i> extrusora E1

Tabela 3.3. Configuração de pinos da *Ramps 1.4* em conexão com o Arduino Mega 2560, *drivers* dos motores de cada eixo.

Relacionando, tabela apenas as saídas D8, D9 e D10 com os pinos do Arduino Mega 2560.

Relacionando apenas os pinos dos termostatos com os pinos do Arduino Mega 2560, tabela 3.5. A figura 3.15 ilustra o diagrama que contém os componentes conectados à *Ramps 1.4* com o Arduino Mega 2560. *Raspberry PI 3* está conectado diretamente ao

Arduino Mega 2560	Ramps 1.4
PIN 8	D8
PIN 9	D9
PIN 10	D10

Tabela 3.4. Configuração de pinos da *Ramps* 1.4 em conexão com o Arduino Mega 2560 e as conexões D8, D9 e D10.

Arduino Mega 2560	Ramps 1.4
PIN 13	D8
PIN 14	D9
PIN 15	D10

Tabela 3.5. Configuração de pinos da *Ramps* 1.4 em conexão com o Arduino Mega 2560 e as conexões T0, T1 e T2.

Arduino pelo USB. Os demais componentes estão conectados diretamente à *Ramps* 1.4. Os sentidos das setas indicam a direção dos sinais.

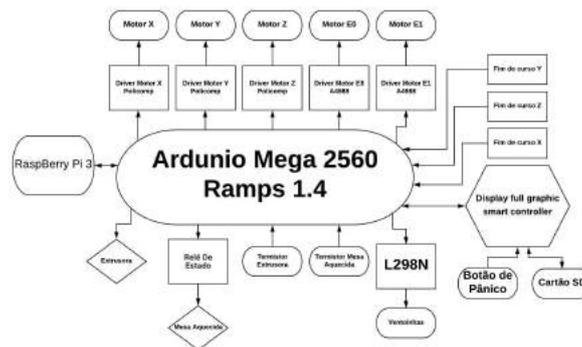


Figura 3.15. Diagrama de conexões entre a *Ramps* 1.4 e o Arduino Mega 2560.

4 COMPONENTES AQUECIDOS E CONTROLE PROPORCIONAL, INTEGRATIVO E DERIVATIVO

4.1 CHAVEAMENTO COM MOSFETs

Neste projeto há cargas de aquecimento que precisam ser controladas pelo sistema embarcado da impressora 3D. Tais cargas demandam valores de corrente de unidades de ampères e operam com tensão acima da capacidade de operação do sistema embarcado. Dessa forma são necessários um circuito de chaveamento de potência.

Na *Ramps* 1.4, é utilizado o MOSFET IRLB3034, que já vem anexado na placa. Não é obrigatório utilizar sempre o IRLB3034, pode-se utilizar qualquer outro MOSFET, desde que atenda às exigências dos aquecedores instalados e que seja acionável como o próprio IRLB3034, fazendo o dimensionamento correto.

Os MOSFETs são componentes ativos de três terminais a quatro, onde se controla a corrente entre dreno e fonte a partir da aplicação de tensão na ponta [18], são dispositivos de efeito de campo, em que o canal de condução é formado pela atração de cargas pelo campo elétrico criado entre o substrato e a porta [18]. O transistor possui três regiões de operação, que são: corte, triodo e saturação. Na região de corte, o transistor encontra-se desligado devido a falta de tensão entre dreno e fonte, V_{ds} . Já na região de triodo, em que o componente se comporta de forma similar a um resistor, em que a tensão de dreno e fonte, é menor que a de porta e fonte, V_{gs} , menos uma tensão limiar (V_{th}) a corrente I_{ds} é dada como mostrado na equação abaixo [18]:

$$I_{ds} = \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu C_{ox} (V_{gs} - V_{th}) (V_{ds} - V_{ds}^2) \quad (4.1)$$

E quando a tensão V_{ds} é maior que a tensão V_{gs} menos um limiar V_{th} , o transistor trabalha na região de saturação, em que a equação da corrente é dada por:

$$I_{ds} = \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu C_{ox} (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (4.2)$$

Desta forma a corrente depende das tensões aplicadas nos terminais do dispositivo e das suas dimensões, onde W e L são a largura e o comprimento do canal respectivamente, μ a mobilidade de portadores de carga, lacunas ou elétrons, e C_{ox} a capacitância de óxido.

Sendo assim, esses dispositivos podem operar como chaves eletrônicas, aplicação principal neste trabalho, de alta velocidade em sistemas de acionamento pois saem da região de corte para saturação em microsegundos com baixa dissipação de potência, dependendo da frequência do sinal aplicado ao componente e de outras variáveis físicas como as dimensões do dispositivo e impedância entre os terminais de dreno e fonte. Devido à corrente de porta ser desprezível, os transistores MOS também garantem um isolamento entre o sinal de entrada de baixa potência, aplicado ao terminal de porta para ativar o transistor, e as cargas de alto consumo a serem acionadas, diminuindo a necessidade de circuitos de proteção dependendo da potência demandada pela carga [18].

4.2 EXTRUSORA

A forma como o IRLB3034 é utilizado para chavear o aquecedor da extrusora é como qualquer outro circuito utilizando um MOSFET NMOS como chave é mostrada na figura 4.1. As principais características do IRLB3034 para chavear o aquecedor são a tensão V_{ds}

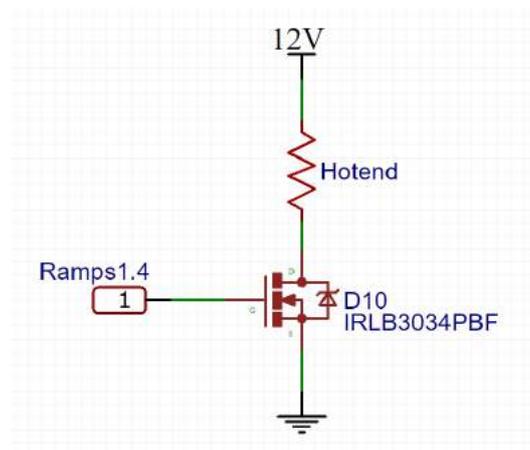


Figura 4.1. Esquemático de chaveamento com com transistores NPN.

máxima de 90 V e corrente de pico de 135 A, com V_{gs} de 10 V. Qualquer outro transistor que tenha tensão V_{ds} acima de 12 V e corrente acima 5 A, com V_{gs} de 10 V, serve para chavear o aquecedor da extrusora, já que o aquecedor tem 40 W de potência e opera à 12 V. Fazer um super dimensionamento de um novo transistor para substituição do IRLB3034 não tem problema, já que ainda suportará as condições mínimas de operação. Como neste projeto o transistor está trabalhando como um simples aquecedor, não há a necessidade de preocupação com a frequência máxima de operação do transistor, sendo a frequência

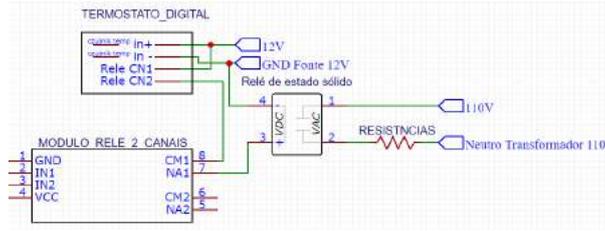


Figura 4.3. Diagrama do circuito de controle do aquecimento do ambiente.

4.5 CONTROLE PROPORCIONAL, INTEGRATIVO E DERIVATIVO

Na forma usual do controle de sistemas por meio do método PID, deve-se ter como principal decisão a escolha das formas de utilizar o proporcional, a integral e a derivada, ou a combinação destes. Ao definir o procedimento dos ajustes, em que neste projeto a ordem de ajuste é ajustando o proporcional, a integral e por último a derivada [15]. A calibração do controle do sistemas limita-se em deduzir determinados valores de K_p , K_i e K_d , que são as constantes proporcional, integrativa e derivativa respectivamente, a partir das respostas dos sistema [15].

Com este procedimento, não há necessidade de ter total conhecimento do modelo do sistema, em que no caso deste projeto não foi feita nenhuma modelagem de distribuição de calor em 3 dimensões na mesa aquecida ou a modelagem de fluidos da extrusora, mesmo que estas características estejam relacionadas com o sistema. Este procedimento é somente recomendado quando o custo para calibragem do do controlador do sistema for menor que o custo em relação à análise do sistema e projeto do controlador.

O modelo análico basea-se em sistonizar os modos PID em relação à aplicação específica de forma a determinar critérios de performance verificados, determinando os valores de K_p , K_i e K_d . A ação proporcional, determinado pelo valor de K_p , é a amplificação do sinal na saída. Desta forma o sistema de comporta como sistema de liga e desliga, *on-off*. O sinal de saída é proporcional ao erro da amostra anterior, um erro residual não nulo, erro de *off-set*. O valor do erro *off-set* é inversamente proporcional ao ganho K_p . Para valores K_p altos, a sinal de saída tem ganhos muito altos, causando desabilitabilidade do sistema. Para valores K_p de baixos, o sistema tem dificuldades em corrigir o sinal de saída. No equação a seguir, $u(t)$ é a função do sinal de saída, K_p é o valor do ganho proporcional e $e(t)$ é o erro entre o valor atual e o valor desejado [15]:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.3)$$

A ação integral [15], determinada pelo valor K_i , é a magnitude do tempo de duração do erro, é o acúmulo dos erros. Desta forma pode-se corrigir o erro de *off-set* proveniente

da ação K_p , diminuído o tempo de resposta do sistema, em que o sistema torna-se mais efetivo em atingir o valor desejado [15]. Esta ação corrige o tempo integral, que é o valor de amplitude do sinal corrigido em períodos regulares. O componente integral atribui um pólo na origem de função de transferência do controlador, analisando no domínio de s de Laplace, eliminando o erro estacionário de posição [15]. O tempo integral é o inverso do ganho integral K_i . Caso o ganho K_i seja baixo, o sistema levará muito tempo para chegar a estabilidade no valor desejado. Se o ganho de K_i for alto, o sistema torne-se instável. Na equação a seguir, $u(t)$ é a função do sinal de saída, K_i é o valor do ganho integral e $e(T_i)$ é o erro entre o valor atual, o valor desejado, T_i é o tempo integral [15]:

$$u(t) = K_i \int_0^T e(T_i) dT_i \quad (4.4)$$

A ação derivativa, determinada pelo valor de K_d , é a magnitude da velocidade de variação do erro produzido pela ação proporcional [15]. Desta forma pode-se corrigir o erro antes que ele aconteça, de acordo o padrão dos erros passados, melhorando a resposta do sistema, diminuindo o tempo para atingir a estabilidade em relação ao valor desejado. Da mesma forma que na ação integral há o tempo integral, na ação derivativa há o tempo derivativo, que também é inversamente proporcional a sua referente ação [15]. A atuação da ação derivativa ocorre em períodos regulares, em que estes períodos é o tempo derivativo. Ou seja, o tempo derivativo é inversamente proporcional à velocidade da variação do erro. Esta ação não é recomendada em sistema em que há processos que devem ter respostas muito rápidas em relação a uma perturbação inesperada. Também não é recomendado para sistemas que há muito ruído em relação à média do sinal, caso contrário o sistema torna-se instável, a ação derivativa é descrita pela seguinte equação [15]:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.5)$$

Usando o método de ajuste do sistema PID de *Ziegler-Nichols* [16], os valores de K_p , K_i e K_d podem ser ajustados de forma experimental [16]. Os sistemas de aquecimento da impressora são sistemas de malha fechada e o código para o controle PID dos sistemas de aquecimento já está implementado na linguagem C++ no *firmware Marlin* [11], onde é somente necessário entender os conceitos do controle PID e inserir os valores das constantes. Caso o operador da impressora não entenda nem mesmo os conceitos sobre controle PID, há valores para as constantes K_p , K_i e K_d já sugeridos no próprio *firmware Marlin*, basta descomentar no código.

O método de ajuste *Ziegler-Nichols* para malha fechada é bastante simples. Primeiramente deve-se adicionar zero para o valores de K_i e K_d , ajustando o sistema apenas com o valor de K_p , de forma que os sistema comece a oscilar próximo do valor desejado.

Conseguido o valor de K_p próximo do ideal desejado [16], este valor do ganho de K_p determina o valor do ganho crítico K_u . Por meio dos períodos aferidos da oscilação do sinal do sistema, obtém-se valor do período crítico T_u . Encontrados estes valores, basta utilizar a tabela de sintonia *Ziegler-Nichols*, tabela 4.1 para encontrar os valores dos ganhos do sistema.

Tipo de Controlador	K_p	K_i	K_d
Proporcional	$0.5K_p$		
Proporcional-integrativo	$0.45K_p$	$0.5T_u$	
Proporcional-integrativo-derivativo	$0.6K_p$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

Tabela 4.1. Relações entre os ganhos K_u e as constantes para cada tipo de controle.

Desta forma, pode-se implementar qualquer outro sistema de aquecimento na impressora, até mesmo o sistema desenvolvido pelo operador da impressora, tornando a não obrigatoriedade de se usar somente os sistemas de aquecimento disponíveis no mercado. O método de ajuste *Ziegler-Nichols* foi utilizado para ajuste da mesa aquecida, quanto para o da extrusora.

4.6 DESCRIÇÕES DOS COMPONENTES UTILIZADOS

4.6.1 Modelo da Mesa aquecida

A mesa aquecida é uma PCB, *Printed Circuit Board*, em que a própria trilha é a resistência responsável pelo efeito Joule de aquecimento. A mesa é fixada em uma placa rígida de aço por parafusos, espaçada por molas, permitindo ajuste de nivelamento da mesa em relação ao plano de deslocamento do bico da extrusora. O modelo da mesa aquecida de 300 mm por 300 mm é a PCB *Heatbed MK2a 300 mm* [8] mostrada na figura 4.4. O modelo da mesa para testes de 200 mm por 200 mm é a PCB *Heatbed MK2b 200 mm* [8]. Em cima da mesa aquecida se encontra uma placa de vidro, fixada e aquecida pela mesa sendo responsável por aderir a impressão. Com placa de vidro fixada sobre a mesa aquecida, a mesma torna rígida. Mesmo que ela seja empenada, com a placa de vidro a mesa ficará plana, já que é plana.

4.6.2 Modelo da Extrusora

A extrusora é de bico único, em que o pode se colocado bicos de 0.06 mm até 0.8 mm de diâmetro [19]. Ela permite o uso de dois materiais diferentes, em que nela se encontra



Figura 4.4. Modelo da mesa aquecida MK2b [8].

duas entradas para os tubos por onde transitam os filamentos. O trajeto interno da extrusora por onde passa o filamento tem o formato em "Y", em que para fazer a troca de filamento, o atual é retraído e o outro é injetado [19]. Só pode ser usado um material por vez, não há possibilidade de mistura de materiais, porque o projeto físico do componente não permite. O tipo da extrusora é o tipo ciclope mostrado na figura 4.5. O filamento é



Figura 4.5. Extrusora de filamento escolhida para esse projeto, modelo de bico único [19].

injetado e retraído por sistema mecânico, que contém um motor de passo com uma polia dentada, responsável por mover o filamento. Há um sistema desse para cada um dos dois filamentos da extrusora. O modelo deste sistema é MK8 Extrusora como mostrado na figura 4.6.



Figura 4.6. Modelo do injetor de filamento escolhido para esse projeto, modelo MK8 Extrusora [19].

4.6.3 Modelo de Termistores

O sensores adotados pelo fabricantes de extrusoras e mesa aquecidas, em sua maioria, é o termistor NTC, *Negative Temperature Coefficient*, EPCOS 100 k Ω b57560g1104f, ou outro NTC de 100 k Ω com os mesmas características [19]. Pela suas dimensões, que são bem pequenas, e pela faixa de temperaturas de operação, de -55 °C até 300 °C, são ideais para ser utilizados na extrusora. Na mesa aquecida, podem ser utilizados outros NTCs, como o NTC de 10 k Ω , mas o NTC EPCOS 100 k Ω pode ser utilizado [19].

O parâmetros de tensão NTC de 100 k Ω já vem implementado no *firmware Marlin*, não há necessidade de criar o parâmetro novamente. Em seu *datasheet*, há a tabela dos valores de impedância em relação a temperatura. O NTCs são resistores não lineares, em que a impedância varia em relação a ação da temperatura, são semicondutores que conduzem melhor a corrente elétrica em temperaturas elevadas [19]. Desta forma, a impedância de tais materiais se reduz com a elevação da temperatura, possuindo coeficiente de temperatura negativo.

Matérias-primas e formas construtivas: Os resistores NTC são fabricados a partir de óxidos semicondutores, com uma mistura de óxido metálico, como por exemplo Fe_3O_4 com Zn_2TiO_4 ou CoO com Li_2O (óxido de ferro com óxido de titânio e zinco ou óxido de cobalto com óxido de lítio respectivamente) [19].

4.7 AQUECIMENTO AMBIENTE

Os aquecedores do ambiente interno originais da impressora estão em perfeitas condições e as ventoinhas dos aquecedores também. Diferente dos outros sistemas de aquecimento deste projeto, apenas o fluxo é controlado pelo Arduino MEGA2560, por meio da placa *Ramps* 1.4 usando a saída D9, um vez que o controle de fluxo de ar está presente no *Marlin*. A temperatura dos aquecedores é controlado pelo termostato digital, modelo W1209.

A modificação será em relação ao sensor do sistema de controle de temperatura, a forma de chaveamento e a forma como é alimentada. As resistências dos aquecedores de ar operam com tensão de 110 V AC, com potência real de 400 W, cada. Na impressora se encontram duas resistências, uma do lado direito e outro do lado esquerdo. Para alimentá-las, será utilizado um estabilizador de 2 kVA de potência, com transformador abaixador de 220 V para 110 V AC. O motivo da escolha deste estabilizador é por ser o único já disponível para uso, e por conseguir suprir a potência dos dois aquecedores. Para chaveamento, será utilizado um relé de estado sólido SSR-25 DA, da *Fotek*, com tensão de acionamento de 3 V até 32 V DC e controle de 24 V até 380 V AC, 25 A. O controlador de temperatura é o termostato digital modelo W1209, pronto para uso, basta selecionar a temperatura desejada.

As ventoinhas são controladas pelo Arduino Mega 2560, pela pino digital 9, que controla a chave do aquecedor da segunda extrusora, saída D9. O *firmware Marlin* permite a configuração dessa saída para o controle de rotação das ventoinhas por PWM. O controle desses componentes é feito por meio de um módulo ponte H L298N, em que a entrada dos quatro canais deste módulo é conectado ao pino digital 9 do Arduino e cada saída dos quatro canais controlam uma ventoinha.

5 FIRMWARE MARLIN

Neste capítulo serão abordados aspectos sobre o *firmware Marlin*, divididos em introdução, configurações, calibragem e outros padrões.

5.1 INTRODUÇÃO AO MARLIN

O *Marlin* é um *firmware open source*, desenvolvido para impressoras 3D *RepRap* e réplicas. Ele foi derivado do *Sprinter* e do *grbl* e em 12 de agosto de 2011 tornou-se um projeto independente. *Marlin* é licenciado sob a GPLv3. O *firmware* é utilizado por várias impressoras comerciais 3D como a *Ultimaker*, *Printrbot*, *AlephObjects (Lulzbot)* e *Prusa Research*. As principais características do *Marlin Firmware* são [11]:

- Código G completo com mais de 150 comandos;
- Suíte completa de movimento com código G, incluindo linhas, arcos e curvas de *Bézier*;
- Sistema de movimento inteligente com movimento à frente, baseado em interrupções, aceleração linear;
- Suporte para cinemática Cartesiana, Delta, SCARA e *Core / H-Bot*;
- Controle de aquecedor PID de ciclo fechado com ajuste automático, proteção térmica, corte de segurança;
- Suporte para até 5 extrusoras, além de uma impressão aquecida;
- Interface do usuário do controlador de LCD com mais de 20 traduções de idiomas;
- Impressão baseada em *host* e cartão SD com início automático;
- Compensação de nivelamento de leito - com ou sem sonda de leito;
- Avanço Linear para extrusão baseada em pressão;

- Suporte para extrusão volumétrica;
- Suporte para mistura e multi-extrusoras (*Cyclops*, *Chimera*, *Diamond*);
- Suporte para Sensores de *Runout* /Largura de Filamento;
- *Print Job Timer* e *Print Counter*;

O *Marlin* é executado no Arduino Mega 2560 [7] da impressora 3D, gerenciando todas as atividades em tempo real da máquina. Ele coordena os aquecedores, motores de passo, sensores, luzes, *display* LCD, botões e tudo que envolve no processo de impressão 3D. De acordo com [11]:

[...]A linguagem de controle para *Marlin* é um derivado do código-G. Para imprimir um modelo com *Marlin*, ele deve ser convertido para código G usando um programa chamado um "*slicer*". As impressoras 3D têm configurações diferentes, desta forma não encontrará arquivos *G-code* para *download*.

O *Marlin* recebe comandos de movimento, os adiciona a uma fila de movimento a ser executada na ordem recebida. A "interrupção de passo" processa a fila, convertendo movimentos lineares em pulsos eletrônicos com tempo definido para os motores de passo. Mesmo em velocidades baixas, *Marlin* precisa gerar milhares de pulsos de passo a cada segundo. (por exemplo, $80 \text{ passos/mm} * 50 \text{ mm/s} = 4000 \text{ passos/s}$).

Os aquecedores e sensores são gerenciados em uma segunda interrupção que é executada em velocidade muito mais lenta, enquanto o circuito principal lida com o processamento de comandos, atualizando a exibição e os eventos do controlador. Por razões de segurança, *Marlin* vai realmente reiniciar se a CPU ficar muito sobrecarregada para ler os sensores.[...]

O *Marlin* pode ser operado por meio de um *host* por meio de uma conexão USB ou no modo independente de um cartão SD, contendo o código-G, conectado [11]. Mesmo sem um controlador LCD, uma impressão SD autônoma ainda pode ser iniciada a partir de um *host*, para que o computador possa ser desconectado da impressora.

O *software host* está disponível para várias plataformas, incluindo sistemas *desktop*, *Raspberry PI* e *tablets Android*. Os *softwares host* recomendados são o *Pronterface*, o *Repetier* [13], *OctoPrint* [14], o *Cura*, *Simplify3D*.

5.1.1 Configuração da aba `Configuration.h`

A configuração necessária do *Marlin Firmware* estão está toda na aba **Configuration.h** [11]. Para poder editar a aba e carregar o *Marlin Firmware* no Arduino Mega 2560 deve-se utilizar a IDE do Arduino. Pode ser utilizado outro compilador compatível com o Arduino Mega 2560 [7], mas não é necessário.

A aba *Configuration.h* é dividida em partes, como tópicos, em que cada parte há a configuração das definições, parâmetros e características da impressora 3D. Algumas funções são comentadas, descomentadas e ou apenas alteradas. As definições não citadas, não devem ser alteradas para este projeto. As seguintes definições de cada parte devem ter a configuração respectiva, em seguida sua observação.

5.1.1.1 HANGPRINTER

Nesta parte estão presentes as configurações gerais da impressora, velocidade da taxa de comunicação, nome da impressora, quantidade de extrusoras, espessura do filamento e o tipo de estrusora utilizado.

- Velocidade de comunicação serial [11];

```
#define BAUDRATE 115200;
```

A taxa de 115200 é a mais comum, já pré configurada na maioria dos *Software Host* [11].

- Definição do nome da impressora [11];

```
#define CUSTOMMACHINE_NAME "Imp.UnB.FGA";
```

- Definição do diâmetro do filamento utilizado [11];

```
#define DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA 1.75;
```

O filamento utilizado neste projeto tem diâmetro de 1.75mm.

- Definição da quantidade de extrusoras [11];

```
#define EXTRUDERS 2;
```

Há apenas um extrusora, porém é dupla, um motor para cada filamento.

- Definição do tipo de extrusora, *hotend*;

```
#define SINGLENOZZLE;
```

Apenas descomentar a definição, declarando o tipo de extrusora utilizada.

5.1.1.2 Configurações Térmicas

Nesta parte estão presentes as configurações do tipo de termistor utilizado e limite de temperatura dos componentes aquecidos.

- Definição do tipo de termistor [11];

```
#define TEMP_SENSOR_0 1;  
#define TEMP_SENSOR_1 0;  
#define TEMP_SENSOR_2 0;  
#define TEMP_SENSOR_3 0;  
#define TEMP_SENSOR_4 0;  
#define TEMP_SENSOR_BED 1;  
#define TEMP_SENSOR_CHAMBER 0;
```

A lista de sensores compatíveis com o *Marlin Firmware* está comentado no próprio código [11]. O primeiro definição é para o sensor da extrusora e a definição do `TEMP_SENSOR_BED` é para o sensor da mesa aquecida.

- Definições de temperatura máxima na escala Celsius [11];

```
#define HEATER_0_MAXTEMP 280;  
#define HEATER_1_MAXTEMP 275;  
#define HEATER_2_MAXTEMP 275;  
#define HEATER_3_MAXTEMP 275;  
#define HEATER_4_MAXTEMP 275;  
#define BED_MAXTEMP 120;
```

A definição `HEATER_0_MAXTEMP` limita a temperatura da extrusora E0, a definição `BED_MAXTEMP` limita a temperatura da mesa aquecida [11].

5.1.1.3 Configurações de Controle PID

Nesta parte estão presentes as configurações dos parâmetros do controle PID e limite de corrente fornecido ao aquecedor das extrusoras.

- Limite de corrente fornecida para as extrusoras [11];

```
#define BANGMAX 255;
```

Controla a corrente fornecida para todas as extrusoras, 255 é o valor máximo, em uma escala de 0 até 255, como parcelas da corrente real fornecida à extrusora, o motivo do valor é que a eeprom do Atmega 2560 é de 8 bits [11].

- Definições do controle PID;

```
#define DEFAULT.Kp 13.32;  
#define DEFAULT.Ki 0.87;  
#define DEFAULT.Kd 51.00;
```

As definições correspondem a K_p , K_i e K_d , proporcional, integral e derivada, respectivamente do controle PID. As outras configurações idênticas presentes no *firmware* devem ser comentadas [11].

5.1.1.4 Controle PID da Mesa Aquecida

Nesta parte estão presentes as configurações dos parâmetros do controle PID e limite de corrente fornecido ao aquecedor da mesa aquecida [11].

- Limite de corrente fornecida para a mesa aquecidas;

```
#define MAXBEDPOWER 255;
```

Controla a corrente fornecida para a mesa aquecida, 255 é o valor máximo, em uma escala de 0 até 255, como parcelas da corrente real fornecida, o motivo do valor é que a EEPROM do Atmega 2560 é de 8 bits [11].

- Definições do controle PID;

```
#define DEFAULT_bedKp 122.53;
#define DEFAULT_bedKi 2.03;
#define DEFAULT_bedKd 1844.42;
```

As definições correspondem a K_p , K_i e K_d , proporcional, integral e derivada, respectivamente do controle PID. As outras configurações idênticas presentes no *firmware* devem ser comentadas [11].

5.1.1.5 Configurações de Fins de Curso

Nesta parte estão presentes as configurações da posição, habilitação e tipo lógico entre *pull up* e *pull down* do fim de curso.

- Definições dos fins de curso máximo e mínimo [11];

```
#define USE_XMIN_PLUG;
#define USE_YMIN_PLUG;
#define USE_ZMIN_PLUG;
#define USE_XMAX_PLUG;
#define USE_YMAX_PLUG;
#define USE_ZMAX_PLUG;
```

- Desabilitação dos fins de curso;

```
#define ENDSTOPPULLUP_XMAX;
#define ENDSTOPPULLUP_YMAX;
#define ENDSTOPPULLUP_ZMAX;
#define ENDSTOPPULLUP_XMIN;
#define ENDSTOPPULLUP_YMIN;
#define ENDSTOPPULLUP_ZMIN;
#define ENDSTOPPULLUP_ZMIN_PROBE;
```

Para desabilitar os pinos para os fins de curso não utilizados deve-se descomentar, os outros permanecem comentados [11].

- Configuração do nível lógico do sensor fim de curso [11];

```
#define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING true;
#define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING true;
#define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING true;
```

```
#define X_MAX_ENDSTOP_INVERTING true;
#define Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING true;
#define Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING true;
#define Z_MIN_PROBE_ENDSTOP_INVERTING true;
```

Todos os sensores trabalham de forma idêntica, do tipo *pull up*, assim definido como *true* [11].

5.1.1.6 Configurações dos Movimentos

Nesta parte estão presentes as configurações de passos por milímetro, velocidade e aceleração de todos os motores da impressora.

- Configuração da quantidade de passos por milímetro [11];

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 211, 158, 639, 200};
```

Da esquerda para a direita tem a quantidade de passos de cada motor dos eixos X, Y e Z das extrusoras, respectivamente.

- Configuração da velocidade máxima em mm/s [11];

```
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {500, 500, 1.5, 45}
```

Da esquerda para a direita tem o valor máximo da velocidade de cada motor dos eixos X, Y e Z das extrusoras, respectivamente [11].

- Configuração da aceleração máxima em mm/s²;

```
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {3000, 3000, 100, 300};
```

Da esquerda para a direita tem o valor máximo da aceleração de cada motor dos eixos X, Y e Z das extrusoras, respectivamente [11].

- Configuração da aceleração máxima em operação;

```
#define DEFAULT_ACCELERATION 3000;
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 3000;
#define DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION 3000;
```

O valor de `DEFAULT_ACCELERATION` é a aceleração máxima no momento da impressão. O valor de `DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION` é a aceleração máxima para a retração do filamento na extrusora. O valor de `DEFAULT_TRAVE_ACCELERATION` é a aceleração máxima para o movimento livre, somente deslocamento, dos eixos [11].

5.1.1.7 Opções Referentes ao Eixo Z

Nesta parte estão presentes as configurações da referência do fim de curso dos eixo X, Y e Z, sentido de rotação de todos os motores de passo, posição do *homing* e limitações do volume de trabalho [11].

- Declaração da forma de referência dos eixos X e Y em relação ao eixo Z [11];

```
#define Z_MIN_PROBE_USES_Z_MIN_ENDSTOP_PIN;
```

Para este projeto, o sensor do fim de curso do eixo Z é fixo, apenas a função citada deve ser descomentada, as outras permanecem comentadas [11].

- Configuração de inversão dos eixos X, Y e Z;

```
#define INVERT_X_DIR true;  
#define INVERT_Y_DIR true;  
#define INVERT_Z_DIR true;
```

Essa configuração é necessária apenas caso o eixo esteja trabalhando de forma invertida, para reverter basta alterar para *false* ou então inverter a ligação do motor de passo responsável pelo movimento do eixo [11].

- Configuração de inversão das extrusoras;

```
#define INVERT_E0_DIR true;  
#define INVERT_E1_DIR true;  
#define INVERT_E2_DIR true;  
#define INVERT_E3_DIR true;  
#define INVERT_E4_DIR true;
```

Essa configuração é necessária apenas caso a extrusora esteja trabalhando de forma invertida, para reverter basta alterar para *false* ou então inverter a ligação do motor de passo responsável pelo movimento da extrusora [11].

- Configuração do sentido do fim de curso para *homing*;

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

Para declarar a posição do fim de curso para *homing* no limite máximo deve-se usar '1', no limite mínimo deve-se usar '-1' [11].

- Configurações do limite físico de volume útil de trabalho [11];

```
#define X_MIN_POS 0
#define Y_MIN_POS 0
#define Z_MIN_POS 0
#define X_MAX_POS 300
#define Y_MAX_POS 300
#define Z_MAX_POS 300
```

As dimensões são em milímetros. São dadas as coordenadas dos limites mínimos e máximos da mesa em relação aos fins de curso. Para este projeto, os limites mínimos recebem o valor de zero, porque o *homing* está declarado nos limites máximo dos eixos X e Y, Z sempre será zero [11]. Caso os *homing* esteja declarado nos limites mínimo dos eixos X e Y, será necessário compensar a distância do pico da extrusora no *homing* em relação aos limites mínimos da mesa aquecida e tais valores devem ser declarados nos limites mínimos do *firmware* e somados no valor dos limites máximos dos eixos X e Y [11].

5.1.1.8 Configurações Adicionais

Nesta parte estão presentes as configurações das temperatura de operação dos materiais ABS e PLA para pré aquecimento [11].

- Configuração de pré aquecimento manual;

```
#define PREHEAT_1_TEMP_HOTEND 180;
#define PREHEAT_1_TEMP_BED 70;
#define PREHEAT_1_FAN_SPEED 0; // Value from 0 to 255

#define PREHEAT_2_TEMP_HOTEND 240;
#define PREHEAT_2_TEMP_BED 110;
#define PREHEAT_2_FAN_SPEED 0; // Value from 0 to 255
```

As definições para `PREHEAT_1` e `PREHEAT_2` são para os materiais PLA e ABS, respectivamente. Nas definições estão as temperatura da mesa e da extrusora para operação dos trabalho [11]. São importantes para serem selecionadas manualmente por meio dos *display*, para manutenção e troca de material. Quando carregado um arquivo com o gcode da peça a ser impressa, prevalece a temperatura declarada no *Host* onde o *gcode* foi gerado [11].

5.1.1.9 Suporte ao uso de Display LCD e Cartões SD

Nesta parte estão presentes as configurações do tipo de módulo de *display*, idioma do menu e declaração da função do cartão SD.

- Configuração do idioma do menu do *display* [11];

```
#define LCDLANGUAGE pt-br;
```

Há outros idiomas, para configurar o *display* para português, na forma brasileira, deve-se inserir 'pt-br' logo após 'LCD_LANGUAGE', o mesmo vale para os outros idiomas [11].

- Configurando o modelo do módulo *display*;

```
#define DOGLCD;
```

O módulo adotados neste projeto é o *Full Graphic Smart Bigtreetech*, que contém um *display* gráfico LCD 128x64. Para este modelo de *display*, a biblioteca correta é o DOGLCD. Deve-se verificar se a biblioteca DOGLCD está incluída na IDE do Arduino [7], caso não esteja inclusa, deve-se adicioná-la [11].

- Declarando o leitor de cartão SD;

```
#define SDSUPPORT;
```

Deve-se penas descomentar a definição.

- Definições de velocidade da taxa de comunicação SPI;

```
#define SPI_SPEED SPI_HALF_SPEED;  
#define SPI_SPEED SPI_QUARTER_SPEED;  
#define SPI_SPEED SPI_EIGHTH_SPEED;
```

Somente caso seja necessário diminuir a velocidade da taxa de comunicação SPI do cartão SD em relação ao Arduino Mega 2560, deve-se descomentar apenas umas da função, de acordo com a necessidade. Isso é para dar prioridade ao trabalho de impressão. Normalmente, como neste projeto, não é necessário [11].

- Checagem de do cartão SD;

```
#define SD_CHECK_AND_RETRY
```

Se esta definição estiver comentada, deve-se descomentar. Assim é mais uma forma do *firmware* verificar se o cartão SD está realmente conectado [11].

- Configuração do *speaker*;

```
#define SPEAKER;  
#define LCD_FEEDBACK_FREQUENCY_DURATION_MS 100;
```

Apenas uma configuração simples do *speaker*, documentando `#define SPEAKER` está habilitando e a segunda função é o tempo de duração do toque. O *speaker* é apenas o som da seleção dos ícones do menu [11].

6 DESENVOLVIMENTO DE PROJETO

Neste capítulo serão apresentados o desenvolvimento do projeto, etapa por etapa e resultados.

6.1 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Para estes trabalho, foi escolhido a metodologia *top-down*, pois se encaixa perfeitamente ao projeto da impressora *Stratasys*, em que de acordo com [6], uma vez este trabalho parte da modificação de um produto final de engenharia, permitindo verificações e ajustes dos blocos de projeto, de uma forma mais simples.

Na metodologia *top-down*, os blocos individuais, antes de projetados, são analisados e dimensionados, a fim de garantir as especificações exigidas pelo sistema como um todo, o que evita superdimensionamento dos blocos individuais, uma vez que todos os componentes referentes aos blocos são produtos comerciais existentes no mercado. Desta forma é possível aumentar a velocidade de execução do projeto, em que, obrigatoriamente, há a necessidade de versatilidade e uma comunicação apropriada, em que deve-se afirmar simulações entre modelos dos blocos ou até com blocos previamente implementados.

O projeto foi executado por atividades entregáveis, ou seja, pequenos blocos do sistema eram construídos com prazos de execução, em que no decorrer da construção de cada bloco avaliações, comparações, verificações entre o sistema atual e o antigo e testes de funcionamento eram realizados gradualmente. A forma como seria feito as modificações não eram certas, todo o projeto foi executado em possibilidade, em avaliações previamente e posteriormente das decisões adotadas.

Em diversas etapas houve fracassos nos resultados das execuções das etapas, proporcionando na reformulação das soluções de cada etapa. Algumas etapas exigiram retorno de mais de uma vez. A ordem das etapas declaradas é de forma sequencial conforme suas execuções e seus retornos para novas soluções, com seus problemas e soluções comentados. Na figura 6.1 ilustra o diagrama das etapas da execução do projeto.

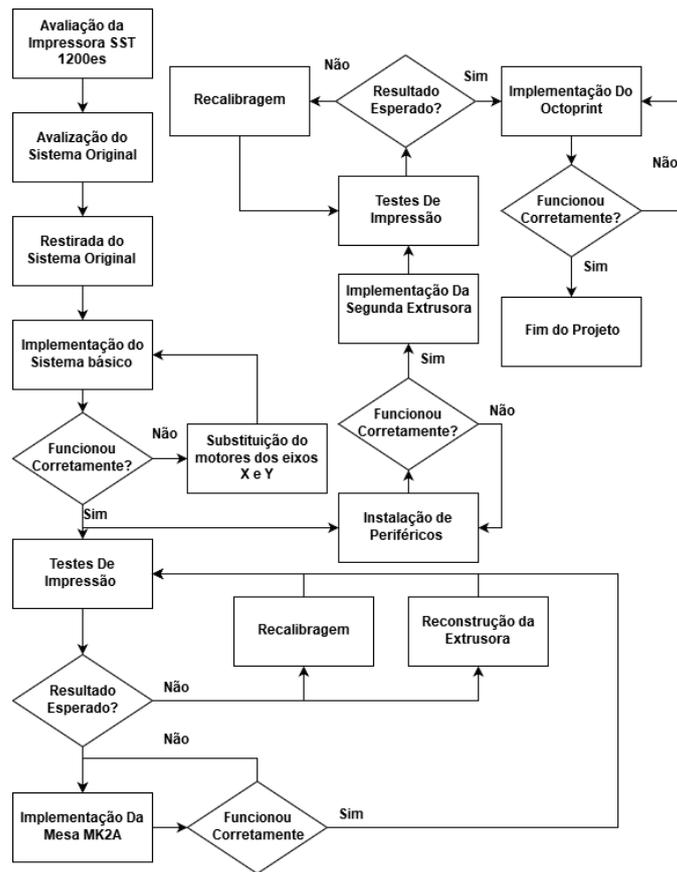


Figura 6.1. Fluxograma resumido para execução do trabalho.

6.2 ETAPAS DE PROJETO

Nesta seção serão listados as etapas desenvolvidas do projeto, conforme foram executadas e encontrados seus resultados.

6.2.1 Avaliação das Operações da Impressora com o Sistemas Originais

Conforme as funções da impressora 3D com o sistema original, estes foram listados para inserir ao novo. Tais funções são:

- Acesso remoto por rede interna;
- Sistema de aquecimento do ambiente interno;
- Sistema de iluminação interna;
- Sistema de cartuchos;

- Extrusora dupla;
- unções de impressão idênticas às funções das impressora convencionais do mercado, como a *Makerbot*;
- Informações de operações descritas em seu manual.

6.2.2 Avaliação do Sistema Embarcado Original

O sistema relativamente antigo, próximo do ano de 2005, ano que está gravado no circuito de seu painel. O ano de aquisição da impressora é de 2008. O sistemas embarcado é fechado, dificultando a possibilidade de modificação ou aproveitamento no novo sistema. Em especial, é impossível de recarregar os cartuchos, por mais que fossem rebobinados, os seus registradores declaram que estão vazios ao sistema original.

6.2.3 Avaliação dos Problemas da impressora 3D com o Sistema Original

Os problemas são diversos, incluindo operação, reposição de insumos e peças de manutenção e recursos humanos, como:

- A impressora mostrava entupimentos constantes e difíceis de serem resolvidos, o material derretia fora da extrusora e solidificada em cima dos parafusos de fixação da própria extrusora;
- Descalibragem constante dos bicos, um em relação ao outro, difíceis de recalibrar;
- Empenamentos deformações na impressão por má aderência à mesa, uma vez que mesa não é aquecida;
- A impressora dependia de um transformador de 110 V AC, não havia presença de uma chave seletora para 220 V AC;
- Seus cartuchos não são recarregáveis, o que impede de usar materiais de impressão de fornecedores paralelos;
- Dificuldade de aquisição de materiais de impressão;
- Dificuldade de aquisição de peças para manutenção.

6.2.4 Decisão de Modificações

Apresentado as características e os problemas da impressora com sistema original, foi apresentado a troca do sistema para o implementado nas impressoras convencionais. Partindo disso, foi permitido a modernização da impressora.

6.2.5 Decisão dos Componentes Reaproveitados

A decisão do reaproveitamento de componentes teve como base a possibilidade de integrar à um sistema de impressora convencional. Os componentes estão na listados a seguir:

- Sistema de aquecimento do ambiente, sua estrutura, suas ventoinhas e seu aquecedores. O sistema de controle foi descartado;
- Sistema de iluminação, são uma barra de led 24 V DC;
- Sistema de cartuchos, somente como compartimentos para armazenar o material para impressão, os seus registradores foram descartados;
- A mecânica e estrutura, descartando somente sua extrusora.

6.2.6 Descarte dos Componentes não Aproveitados

Antes dos componentes descartados serem extraídos da impressora, foi realizada uma seção de fotos dos mesmos para permitir a instalação novamente se necessário. As conexões entre os componentes na impressora, o que impede a conexão errada. Tudo o que foi retirados da impressora foi de forma cuidadosa para não danificar. Os componentes foram descartados do projeto, mas foram guardados. Em exceção, os cabos foram mantidos, mas não foram reaproveitados.

6.2.7 Início da Montagem do Novo Sistema

Foi montado o sistema de uma impressora convencional incluindo, a decisão dos componentes tem como base o que é utilizado nas impressoras convencionais que utilizam componentes da *Reprap* e da necessidade para reaproveitar os componentes originais como:

- Uma *Ramps* 1.4 com o Arduino Mega 2560;
- Uma extrusora;
- Quatro *drivers*, um para cada motor de passo;
- Uma mesa aquecida MK2A de 200 mm por 200 mm de área útil;
- Três ventoinhas para refrigeração dos transistores da *Ramps* 1.4, para os *drivers* e para a extrusora;
- Três *drivers Policomp* para o eixos X, Y e Z como diferencial em relação ao que é utilizado nas impressões convencionais;
- Uma fonte chaveada 12 V 30 A para alimentar o sistema, com exceção dos *drivers* dos motores de cada eixo;
- Uma fonte chaveada 24 V 20 A para alimentar os motores de cada eixo e seus *drivers*.
- Um módulo *full graphic smart controller*.

Foi utilizado uma das mesas originais impressora, que são de plástico e descartáveis, dá para poder fixar a mesa MK2A. Desta forma era possível trocar a mesa aquecida sem a necessidade de parafusos, porque há um sistema de encaixe rápido para fixar a mesa original.

Na fixação dos componentes na parte traseira da impressora foi utilizado chapas de aço galvanizados, em que os componentes são fixado à chapas e estas são parafusadas no mesmo local onde as placas originais eram fixadas. Desta forma é possível evitar de fazer furos na estrutura da impressora e passar cabos por de trás das chapas por estas serem espaçadas em relação a estrutura da impressora.

6.2.8 Configuração do Firmware Marlin

A configuração foi feita para o sistema descrito anteriormente na seção 5, já com as dimensões da impressora, de forma que permitisse o uso da mesa aquecida de 200 mm por 200 mm. Para cada modificação da sistema, o *Marlin* foi atualizado durante a execução do trabalho.

6.2.9 Primeiros testes de impressão

A impressora apresentou pequenos problemas nas dimensões das impressões. Os motores dos eixo X e Y apresentaram saltos de passo indesejados para velocidade de impressão superiores a 40 mm/minuto devido ao baixo torque para micropassos configurados nos *drivers*, provocando a impressão em locais indesejados.

6.2.10 Substituição dos motores de passo dos eixo X e Y

O motores foram dimensionados para os *drivers* da *Policomp* já instalados e que suas dimensões físicas permitisse a instalação na impressora. Não foi possível retirar as polias dentadas dos motores originais sem danificá-las e o motor do eixo X apresenta um eixo específico para sua instalação. Os motores novos, assim como os originais, são do padrão de acoplamento Nema 23. Para o motor do eixo X foi feita uma adaptação, mostrada na figura 6.2, usando o motor original, para permitir a instalação de qualquer outro motor, incluindo outro modelo semelhante original, mantendo a polia existente e parte do eixo do motor original, mantendo o acoplamento específico desta polia. Para essa adaptação



Figura 6.2. Adaptador construído para o motor do eixo X.

um acoplado de 10mm para 8mm foi utilizado e uma flange foi usinada em alumínio. Para o motor do eixo Y, apenas uma polia idêntica à original foi usinada em alumínio.

6.2.11 Teste de Impressão

Novamente foram feitos novos testes, foram corrigidos o problema de dimensão, a impressora consegue imprimir em até 70 mm por minuto. Para velocidades de impressão a impressora se agita de forma que causa bastante estresse nas correias podendo até saltar dentes e ameaça cair de sua bancada.

6.2.12 Precisão dos eixos

Inicialmente os motores trabalhavam com um dezesseis avos de passo. Para essa configuração de micropasso, as impressões apresentavam leve rugosidade, além da normal de uma impressão. Com o objetivo diminuir essa rugosidade, o micropasso dos eixos foram aumentados, aumentando a precisão, diminuindo o torque. Para o eixo X a configuração do *driver* subiu para um sessenta e quatro avos de passo. Para o eixo Y subiu para um trinta e dois avos de passo. Para o eixo Z subiu para um trinta e dois avos de passo. Não foi necessário subir o micropasso dos eixos Y e Z, há redução mecânica por polia de 1:10 no eixo Y e o fuso trapezoidal de passo de 4 mm.

6.2.13 Teste de Impressão

Apresentaram problemas de calibragem dos motores. Após a correção, o resultados das impressões foram satisfatórias, não apresentaram rugosidade e suas dimensões estavam corretas.

6.2.14 Instalação do Módulo do Display no Painel

Inicialmente o módulo *full graphic smart controller* era utilizado na parte de trás da impressora, ligado à *Ramps 1.4* por meio de um cabo de 30 cm de comprimento. Para utilizar este módulo na parte frontal da impressora, é necessário utilizar um cabo de 1,60 m. Devido ao comprimento deste cabo ao utilizar o cartão SD no módulo, o Arduino Mega 2560 não era capaz de receber as informações do cartão. O sinal da comunicação SPI, *Serial Peripheral Interface*, na direção do cartão SD para o Arduino estava sendo perdido, porque a impedância do cabo era suficiente para impedir a comunicação. Foram feitos mais 2 pares de cabos e utilizado outro módulo *full graphic smart controller* para realizar o mesmo teste. O sistema apresentou o mesmo problema de perda de sinal.

Os pinos no conector EXP2 responsáveis pelo leitor de cartão foram mapeados e interceptados para utilizar um módulo de leitor de cartão SD para Arduino para fazer novos testes de comunicação, a perda de sinal se manteve. Foi decidido utilizar um conversor lógico de 4 canais bidirecionais de 3,3 V para 5 V como *buffer* para o módulo de leitor de cartão SD, amplificando os sinais dos pinos MOSI, SCK, MISO e CS, em que a sua tensão de operação é de 3,3 V. Com o conversor lógico não houve perda de sinal, utilizando o cabo de 1,6 m de comprimento. Para a tensão de referência de 3,3 V do conversor foi utilizado o regulador de tensão presente no próprio módulo leitor de

cartão SD, para a tensão de referência de 5 V foi utilizado um dos pinos de mesma tensão presentes no *full graphic smart controller*, este mesmo pino foi utilizado para alimentar o módulo leitor de cartão SD.

6.2.15 Sistema de Aquecimento do Ambiente

Foi utilizado um termostato digital W1209 para controlar as resistências para aquecimento e o seu sensor foi posicionado na região após a passagem fluxo de ar pelo resistor. Na impressora há dois aquecedores idênticos e o termostato só mede a temperatura do aquecedor da direita. No sistema original só o aquecedor da direita tinha sensoriamento. As resistências são de 400 W e 110 V AC cada, e para alimentá-los foi utilizado um transformador de 220 V para 110 V AC de 2kVA de potência. Para chavear as resistências e o termistor digital, um relé de estado sólido que está ligado em série entre o transformador e o par de resistência em paralelo foi usado. Foi ligado em série um relé controlado pela *Raspberry PI 3* entre o relé de estado sólido e o relé do termostato digital para habilitar e desabilitar o sistema de aquecimento.

O Arduino Mega 2560 é o responsável por fazer o controle PWM das quatro ventoinhas caracol do sistema de aquecimento por meio da saída D9 da *Ramps 1.4*. Inicialmente foi utilizado as ventoinhas originais que operam com 24 V, usando somente um transistor IRF540 para chavear depois da saída D9. Das quatro ventoinhas, três queimaram depois de 30 minutos ligadas com *dutycycle* de 80%. Não foi verificado o motivo por ter queimado essas ventoinhas. As quatro ventoinhas originais foram substituídas por quatro ventoi-

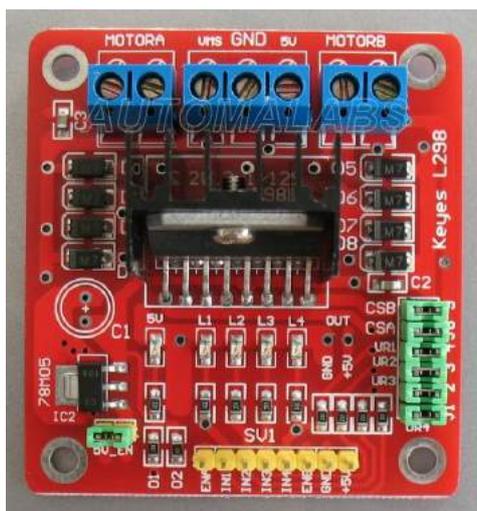


Figura 6.3. Módulo ponte H utilizado, modelo L298N.

nhas caracol da *ADDA South America Corp.* modelo 12032dv-hp. As novas ventoinhas operam com 12 V, tem vazão de 23,70 CFM e pressão de 15,77 mmAq. O módulo ponte H

L298N foi utilizados para chavear as ventoinhas, um canal para cada ventoinha. O sinal de PWM da saída D9 foi interceptado no pino 9 do Arduino Mega 2560 e ligado nos 4 pinos de entrada de controle do módulo ponte H L298N, mostrado na figura 6.3. As novas ventoinhas foram testadas com *dutycycle* de 80% durante 30 horas aproximadamente e não apresentaram problemas. Para a instalação dessas ventoinhas foram imprimidas adaptadores para o acoplamento no mesmo local das ventoinhas originais.

6.2.16 Mesa aquecida

A mesa aquecida de 200 mm por 200 mm MK2B foi substituída pela mesa aquecida de 300 mm por 300 mm MK2A. O chaveamento da mesa aquecida continuou sendo feita pela *Ramps* 1.4 na saída D8. A mesa apresentou problemas de aquecimento, atingindo somente até 65 °C. A temperatura da mesa para impressão em ABS deve ser entre 100 °C até 110 °C, como recomenda a maioria dos fabricantes.

É recomendado alimentar esta mesa com 12 V. Foi decido alimentar a mesa com a fonte de 24 V presente na impressora e atingiu até 120 °C. Para chavear a mesa foi utilizado um relé WJQX-59F, dá *XHUI*, com bobina de 12 V e contato de 40 V 80 A. O sistema funcionou por um mês como esperado, mas depois apresentou problemas de aquecimento, ocorrendo efeito Joule no contato da mesa e contatos do relé. A mesa é fixada em uma

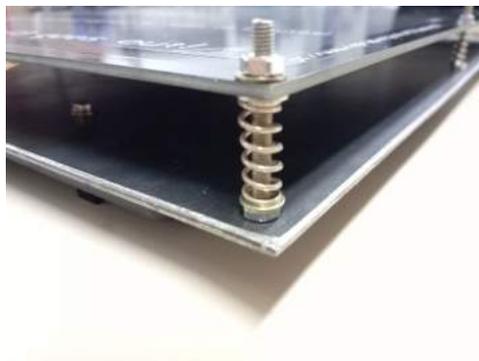


Figura 6.4. Suporte de aço ajustável para mesa aquecida.

placa rígida de aço por parafusos, figura 6.4, espaçada por molas, permitindo ajuste de nivelamento da mesa em relação ao plano de deslocamento do bico da extrusora. Está chapa de aço está parafusada à plataforma da mesa da impressora, aproveitando os furos existentes na própria plataforma.

6.2.17 Sistema de Cartuchos

O controle do sistema de cartuchos, seu diagrama de funcionamento é mostrado foi feito por botoeiras alimentadas com 24 V. O sistema é composto por dois solenoides para travar os componentes, uma para cada, por dois solenoides para engate do motor ao cartucho, um para cada, e somente um motor para empurrar o filamento até a extrusora.

Os cartuchos se encontram na parte de baixo da impressora. O filamento passa por um tubo que ligam os cartuchos até as extrusoras. Seria possível utilizá-los sem o sistema, porém é complicado empurrar o filamento pelos tubos até a extrusora e os cartuchos poderiam cair da impressora durante a impressão, porque a mesma balança. O sistema de cartuchos funciona da seguinte forma:

- Para travar o cartucho é necessário empurrá-lo, pressionar o botão de trava e manter pressionado e soltar depois que parar de empurrar o cartucho;
- Para soltar o cartucho, basta empurrar o cartucho e soltar;
- Para empurrar o filamento até a extrusora, uma vez que o cartucho está fixo, basta manter o botão referente ao cartucho até que chegue na extrusora.

O sistema é separado do restante da impressora e não tem controle remoto, porque é somente utilizado quando há a necessidade de trocar o cartucho.

6.2.18 Octoprint

O *Octoprint* foi pré-configurado em uma *Raspberry PI 3* externa antes de inserir o cartão SD com o próprio sistema instalado na impressora. Ao executar o *Octoprint* pela primeira vez, antes de iniciar o menu de controle, há uma pequena etapa para criar um perfil da impressora, contendo explicações sobre o que se trata. No perfil da impressora deve ser declarados as mesmas informações declarada no *Host Cura*, como dimensões e número de bico.

Para acessar o *Octoprint* é necessário conectar a *Raspberry* à uma rede e por meio de um computador ou *smartphone* conectados à mesma rede deve-se procurar o ID da *Raspberry* e digitá-lo na busca do navegador. Se a *Raspberry* não estiver em uma porta fixa da rede com ID fixo, a mesma estará com ID dinâmico. Criado um perfil de impressora, é importante declarar a mesma taxa de comunicação UART de 115200 declarado no *firmware Marlin*, e determinar qual porta USB está conectada com o Arduino Mega 2560. Caso essas configurações não sejam feitas, não será possível conectar à impressora.

Para a instalação da *webcam* da *Logitech*, precisou-se somente conectar na porta USB que o *Octoprint* reconheceu. Para a instalação dos botões para comando por meio da GPIO da *Raspberry* é foi instalado o pacote *Enclosure Plugin* desenvolvido por apoiadores do *Octoprint*. Para baixar este pacote basta ir em configurações, *Plugin Manager*. No *Enclosure Plugin* foi declarados três GPIOs como saída e três como entrada. Para cada saída foi dado o nome conforme sua função. As configurações de cada função foram feitas da seguinte forma, seguindo a organização do pacote:

- *On/Off*, ligar e desligar: esta função desliga somente a impressora e seu *label* possui o mesmo nome. Não desliga a *Raspberry*, a função é idêntica ao modo de espera. A fonte da *Raspberry* está ligada antes da contatora responsável por desligar a impressora, permitindo ligar a impressora novamente remotamente;
- *IO number 27*, é o número do pino da *Raspberry*, foi declarado como saída. Sua função é ativar um relé responsável por acionar a contatora;
- Foi marcado *Start with server*. Ao ligar a *Raspberry* o relé é acionado;
- Foi marcado *Active Low*. Para acionar o relé, o sinal é de nível lógico baixo;
- Foi marcado *Show Button on Navbar*. Para mostrar o ícone do botão no *Octoprint* com o nome *On/Off*.

Declarando pinos de entrada:

- *Label On/Off*, é o nome da função de entrada;
- *Input IO Number 21*, é o número do pino da *Raspberry* declarada como entrada. O botão responsável por ligar e desligar a impressora foi conectado à este pino;
- *Input Pull Resistor* como *Input Pullup*, a função é somente executada após receber o sinal de nível lógico baixo;
- *Event Trigger* como *Fall*, a função só ocorre no momento que o nível lógico da entrada migra do nível alto para o nível baixo;
- *Controlled IO* com *On/Off*, selecionada a função referente a saída que deseja controlar com esta entrada;
- *Set Controlled IO Value* como *Toggle*, a condição da saída muda toda vez que o botão for pressionado.

Para controle luz e iluminação interna, usando um relé para ativar uma coluna de LEDs, possui a seguinte configuração de saída:

- *IO number 23*, é o número do pino da *Raspberry* foi declarado como saída;
- *Label Luz*, é o nome da função de saída;
- Foi marcado *Start with server*. Ao ligar a *Raspberry* o relé é acionado.
- Foi marcado *Active Low*. Para acionar o relé, o sinal é de nível lógico baixo;
- Foi marcado *Show Button on Navbar*. Para mostrar o ícone do botão no *Octoprint* com o nome Luz.

Declarando pinos de entrada:

- *Label Luz*, é o nome da função de entrada;
- *Input IO Number 20*, é o número do pino da *Raspberry* declarado como entrada. O botão responsável por ligar e desligar a iluminação interna foi conectado à este pino;
- *Input Pull Resistor* como *Input Pullup*, a função é somente executada após receber o sinal de nível lógico baixo;
- *Event Trigger* como *Fall*, a função só ocorre no momento que o nível lógico da entrada migra do nível alto para o nível baixo;
- *Controlled IO* com Luz, selecionada a função referente a saída que deseja controlar com esta entrada. Set *Controlled IO Value* como *Toggle*, a condição da saída muda toda vez que o botão for pressionado.

A função que habilita e desabilita o sistema de aquecimento do ambiente é a "Aquecer Ar, Sistema que aquecimento", controlando um relé usado como chave entre o termostato digital e o relé de estado sólido, ela configurada da seguinte maneira para entrada de sinais:

- *IO number 18*, é o número do pino da *Raspberry* foi declarada como saída;
- *Label Aquecer A*, é o nome da função de saída;
- Foi marcado *Active Low*. Para acionar o relé, o sinal é de nível lógico baixo.

- Foi marcado *Show Button on Navbar*. Para mostrar o ícone do botão no *Octoprint* com o nome Luz.

Para configurações de entrada:

- *Label* Aquecer Ar, é o nome da função de entrada;
- *Input IO Number* 16, é o número do pino da *Raspberry* declarada como entrada. O botão responsável por habilita e desabilita o sistema de aquecimento foi conectado à este pino;
- *Input Pull Resistor* como *Input Pullup*, a função é somente executada após receber o sinal de nível lógico baixo;
- *Event Trigger* como *Fall*, a função só ocorre no momento que o nível lógico da entrada migra do nível alto para o nível baixo;
- *Controlled IO* com Aquecer Ar, selecionada a função referente a saída que deseja controlar com esta entrada;
- *Set Controlled IO Value* como *Toggle*, a condição da saída muda toda vez que o botão for pressionado.

Na figura 6.5 é ilustrado o diagrama do circuito em relação aos pino de entrada e saída da *Raspberry*. Os botões e o termostato digital se encontram na parte frontal da impressora, no painel. Já a *Raspberry*, os relés, o relé de estado sólido e a contatora se encontram na parte traseira da impressora. Os LEDs e os aquecedores se encontram na parte interna da impressora. O Arduino Mega 2560 e a *webcam* estão conectados à *Raspberry PI 3* pelas saídas USB.

A fonte independente é uma fonte responsável por alimentar a *Raspberry PI 3*, esta fonte é a parte da impressora, ela não desliga quando o contator é desarmado pela própria *Raspberry PI 3*, desta forma a impressora consegue se manter em estado de hibernação para economizar energia e evitar desgaste desnecessário do sistema elétrico da impressora. Esta característica permite a impressora ser desligada e ligada remotamente, uma vez que a *Raspberry PI 3* nunca será desligada. Só é possível desligar a impressora por completo caso a sua chave geral que está posicionada na parte traseira da impressora seja desligada.

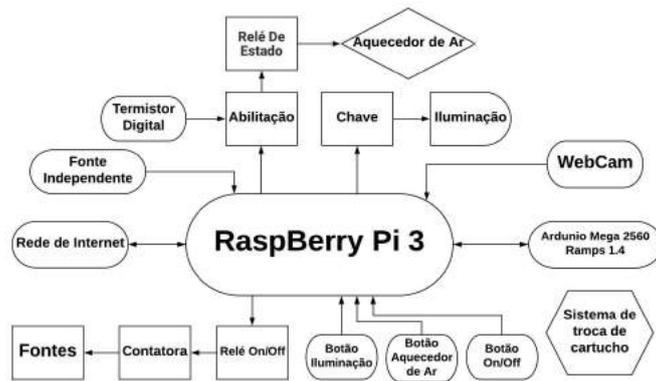


Figura 6.5. Diagrama de entradas e saídas em relação a *Raspberry PI 3*.

6.2.19 Ajustes na Mesa Aquecida MK2A

Depois que a mesa aquecida apresentou problemas de aquecimento a mesma foi mantida, porém o relé WJQX-59F foi substituído por uma chave com isolamento elétrico com o transistor IRFP250. Para alimentar a mesa aquecida foi introduzida mais uma fonte chaveada 24 V 20 A dedicada exclusivamente para alimentar a mesa aquecida.

Nos primeiros testes com a mesa alimentada com 24 V foi percebido que a fonte aquecia o suficiente para acionar o seu sistema de segurança e parar o processo de impressão. A impressora passou a comportar três fontes chaveada, uma de 12 V 30 A e duas de 24 V 20 A. O motivo de utilizar uma mesa aquecida para impressora é que a distribuição de calor ao longo da mesa tende a ser uniforme devido à configuração da resistência que preenche toda a superfície da placa.

6.2.20 Extrusora Dupla

A extrusora é constituída por uma *hotend* com dissipador contendo somente um bico e duas entradas para filamento, que o sistema se assemelha á um Y. Com o esse sistema é possível usar um bico com dois materiais e facilita a calibragem da impressora em relação à mesa aquecida quando comparado com o sistema com dois bicos. Desta forma este sistema resulta em melhor acabamento e evita entupimento por carbonização do material dentro do bico, como aconteceria em um sistema de dois bicos, em que no momento que um dos bico é utilizado, o outro se mantém aquecido. Porém esse sistema gasta mais material de impressão por necessitar de limpeza do bico para utilizar o material depois da troca, expurgando o restante do material anterior antes de retornar ao modelo a ser impresso.

O mesmo sistema que é utilizado para injetar o filamento no bico em uma extrusora de um filamento foi utilizado para esta extrusora, em que são utilizadas dois injetores, com uma pequena diferença que um injetor é a versão espelhada da outro para permitir a construção mais compacta da extrusora. Assim como os injetores são espelhadas, a rotação dos seus motores de passo também trabalham de forma espelhada para empurrar o filamento para a mesma direção.

Para integrar as partes da extrusora, foi utilizada uma placa de alumínio 3 mm, em que foram feitos furos para para fixação das parte conforme é Ilustrado na figura 6.6. Foram utilizados os furos e parafusos da extrusora original para a fixação desta placa ao carrinho do eixo X, com o objetivo de evitar novos furos na estrutura do carrinho. A placa é fixada ao carrinho por 3 parafusos. Para refrigeração da extrusora foi acoplado uma ventoinha, que está ligada diretamente à fonte 12 V.

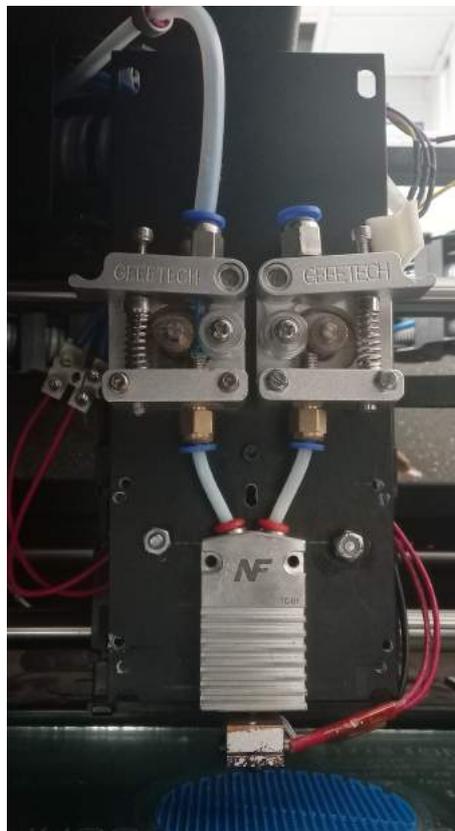


Figura 6.6. Extrusora dupla usada no projeto.

Na montagem da extrusora, a *hotend* é montada independente dos injetores e os mesmos são independentes. Não é obrigatório os dois injetores estarem operacionais ou instalados para imprimir com somente um filamento, é necessário somente declarar a impressão com apenas uma dos injetores.

7 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados de impressão de cubo de com arestas de 20 mm de comprimento, impressos cinco vezes com cada material, ABS, PLA e PETG. Também serão comprados com impressões de algumas partes de um projeto de uma CNC *Ciclone* feita com o sistema original em ABS e estas mesmas peças impressas em ABS com o sistema novo. Cada objeto foram impressos separadamente para evitar qualquer tipo de alteração por causa do deslocamento entre peças, quando impressas ao mesmo tempo.

7.1 IMPRESSÕES EM ABS: CUBOS

Os cubos impressos em ABS usaram os seguintes parâmetros relevantes:

- Velocidade de impressão de preenchimento de 70 mm/min;
- Velocidade de impressão cde parede externa de 30 mm/min
- Temperatura do bico de 225 °C;
- Temperatura da mesa de 100 °C;
- Preenchimento de 15 %;
- Preenchimento em grade;
- Aderência à mesa em brim com 8 mm;
- Bico de 0,4 mm;
- Espessura da camada de 0,2 mm.

A figura7.1 ilustra os 5 cubos impressos em ABS com os mesmo parâmetros.



Figura 7.1. Resultado de impressão dos cubos de 20 mm usando ABS.

7.2 IMPRESSÕES EM PLA: CUBOS

Cubos impressos em PLA branco com os seguintes parâmetros relevantes:

- Velocidade de impressão de preenchimento de 70 mm/min;
- Velocidade de impressão cde parede externa de 30 mm/min
- Temperatura do bico de 200 °C;
- Temperatura da mesa de 60 °C
- Preenchimento de 15 %;
- Preenchimento em grade;
- Aderência à mesa em brim com 8 mm;
- Bico de 0,4 mm;
- Espessura da camada de 0,2 mm;

A figura 7.2 ilustra os 5 cubos impressos em PLA branco com os mesmos parâmetros.



Figura 7.2. Resultado de impressão dos cubos de 20 mm usando PLA.

7.3 RESULTADOS EM PETG: CUBOS

Cubos impressos em PETG natural com os seguintes parâmetros relevantes:

- Velocidade de impressão de preenchimento de 70 mm/min;
- Velocidade de impressão cde parede externa de 30 mm/min
- Temperatura do bico de 255 °C;
- Temperatura da mesa de 60 °C;
- Preenchimento de 15 %;
- Preenchimento em grade;
- Aderência à mesa em brim com 8 mm;
- Bico de 0,4 mm;
- Espessura da camada de 0,2 mm;

A figura 7.3 ilustra os 5 cubos impressos em PETG natural com os mesmos parâmetros.



Figura 7.3. Resultado de impressão dos cubos de 20 mm usando PETG.

7.4 IMPRESSÕES DE VASOS GENÉRICOS EM PLA

Um modelo de vaso genérico foi impresso duas vezes para fazer o comparativo entre a impressão visando menor tempo de impressão possível e outra visando qualidade no acabamento externo da peça. O vaso impresso visando menor tempo de impressão possível demorou 1 hora e 30 minutos de impressão, incluindo o tempo de pré-aquecimento de 8 minutos. O vaso impresso visando qualidade no acabamento externo demorou 3 horas e 40 minutos. Essa diferença no tempo de impressão é resultado da diferença da quantidade de camadas devido à espessura das mesma e das velocidade de impressão. A figura 7.4 ilustra os dois vaso impressos em que o da esquerda é o vaso com menor tempo de impressão e o da direita é o vaso com maior qualidade.



Figura 7.4. Resultado de impressão dos vasos com diferentes padrões de qualidade.

Vaso com menor tempo de impressão impresso em ABS branco com os seguintes parâmetros relevantes:

- Velocidade de impressão de preenchimento de 100 mm/min;
- Velocidade de impressão de parede externa de 40 mm/min
- Temperatura do bico de 225 °C;
- Temperatura da mesa de 100 °C;
- Preenchimento de 15%;
- Preenchimento em grade;
- Aderência à mesa em brim com 8 mm;
- Bico de 0,4 mm;
- Espessura da camada de 0,3 mm;

Vaso com qualidade de acabamento impresso em ABS branco com os seguintes parâmetros relevantes:

- Velocidade de impressão de preenchimento de 55 mm/min;
- Velocidade de impressão de parede externa de 30 mm/min
- Temperatura do bico de 225 °C;
- Temperatura da mesa de 100 °C;
- Preenchimento de 15 %;
- Preenchimento em grade;
- Aderência à mesa em brim com 8 mm;
- Bico de 0,4 mm;
- Espessura da camada de 0,1 mm;

7.5 IMPRESSÕES DAS ENGRENAGENS EM ABS

Uma engrenagem *road gear XY* de uma *kit* de peças para impressão da CNC *Cyclone*. O motivo de ter escolhido essa peça para fazer a comparação entre a impressão com o sistema original com o atual é por ser uma das poucas peças que foram impressas com o sistema antigo e que não deve defeito. As engrenagens foram impressas em ABS. Na figura 7.5 a engrenagem da esquerda foi impressa com o sistema original e a engrenagem da direita foi impressa com o sistema atual.



Figura 7.5. Comparação de impressão da engrenagem, sistema antigo em relação ao novo.

Engrenagem com o sistema atual em ABS branco com os seguintes parâmetros relevantes:

- Velocidade de impressão de preenchimento de 55 mm/min;
- Velocidade de impressão cde parede externa de 30 mm/min
- Temperatura do bico de 225 °C;
- Temperatura da mesa de 100 °C;
- Preenchimento de 15%;
- Preenchimento em grade;
- Aderência à mesa em brim com 8 mm;
- Bico de 0,4 mm;
- Espessura da camada de 0.2 mm;

8 CONCLUSÃO

A impressora 3D SST 1200es da *Stratasys* com o novo sistema embarcado apresenta potencial para se manter a sua plena operação, mantendo qualidades superiores e novas funções em relação ao sistema original. A impressora passou a depender exclusivamente menos dos componentes e insumos fornecidos pela *Stratasys*, em que mesmo que sejam de excelente qualidade, também são de custo elevado e de difícil aquisição.

Assim como originalmente, a impressora ainda possibilita a impressão utilizando o material de impressão fornecido pela *Stratasys* assim como utilizando o material paralelo, como o material fornecido pela 3D Fila. A impressora não utiliza os registradores de quantidade de material presentes nos cartuchos, desta forma não importa se os cartuchos são originais ou recarregados. Tanto o material original quanto o paralelo, o filamento tem 1,75 mm de diâmetro, por esse detalhe assim é possível utilizar o material original sem ter que alterar a extrusora.

Para a execução das impressões, além do ABS, a impressora passou a permitir a impressão com PLA e PETG, sem a necessidade de utilizar obrigatoriamente um material solúvel como suporte ou para fixação à mesa. Uma vez que a mesa da impressora é uma resistência que se aquece, o modelo pode ser fixado diretamente à mesa e dispensa a obrigatoriedade de aquecimento do ambiente. Assim como na extrusora original, a extrusora permite utilizar dois materiais diferentes, porém com apenas um bico, o que facilita a calibragem do nível da mesa em relação ao bico e possíveis erros na alternância de seleção de material.

Com o auxílio deste trabalho e com a flexibilidade de deste sistema, possibilitou-se a manutenção e atualização dependentes somente do usuário da impressora por perder qualquer garantia devido às alterações. Como todo o conteúdo desta impressora ser acessível em detalhes, há a possibilidade de manutenção e atualização por meio do usuário. Em sua operação em longo prazo, a impressora apresentará problemas crônicos normais, como aquecimento da mesa ou da *hotend*, assim como ocorria no seu sistema original e entupimento da *hotend*. Como em qualquer impressora 3D, esta exigirá ao usuário manutenção periódica para manter o bom funcionamento.

9 TRABALHOS FUTUROS

Durante a execução deste trabalho, novas ideias e o novas tecnologias no mercado surgiram. Porém, para ser possível concluir este trabalho e não entrar em um ciclo vicioso de implementação de novas tecnologias, juntamente com seus problemas, essas ideias foram deixadas para serem executadas posteriormente em relação à entrega deste trabalho.

Ao reaproveitar os cartuchos da impressora, os rolos de filamento de alguns fornecedores não encaixam ou não cabem dentro do cartucho e os que cabem embolaram o filamento algumas vezes quando já dentro do cartucho. Para solucionar este problema será necessário construir uma bobinadeira para enrolar o filamento no carretel original do cartucho. A bobinadeira seria um equipamento separado. A impressora permite ser operada remotamente, porém só por meio da rede interna de *internet*. Para permitir sua operação fora da rede interna, um servidor com um domínio de *internet* seria implementado, como em qualquer outro *site*.

É possível dar início a uma impressão desde que a impressora esteja vazia. Para isto um sistema de troca de mesa por meio de um manipulador robótico será implementado, em que uma vez retirado a mesa com a peça já impressa, poderá dar início a uma nova impressão. Em que esse sistema permite o gerenciamento automático de impressões, sem a necessidade de um operador para isso. Este sistema exige um sistema de mesa aquecida com encaixe rápido e auto-nivelamento ou mesas pré-niveladas. A impressora se assemelha á uma plotadora. Devido a esta característica, será implementado um laser para gravações e cura de material fotossensível, permitindo gravar imagem em superfícies. Com este laser é possível participar na etapa de cura do *dryfilm* na produção de impressão de placa de circuitos eletrônicos.

Referências Bibliográficas

- [1] Makerbot. Makerbot store, Dezembro 2018.
- [2] Wishbox. Wishbox technologies, Dezembro 2018.
- [3] Ultimaker Software. Ultimaker materials, Março 2019.
- [4] Stratasy Corporation. Arduino mega, Dezembro 2018.
- [5] Fórum da Construção. Retrofit:o que significa e qual sua importância, Dezembro 2018.
- [6] Ken Kundert e Olaf Zinke. *The designer's guide to Verilog-AMS*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [7] Arduino Store. Arduino mega, Dezembro 2018.
- [8] RepRap Wiki. Reprap project, Janeiro 2019.
- [9] RepRap Wiki. Ramps 1.4, Janeiro 2019.
- [10] Policomp Componentes Industriais. Driver para motor de passo 4.2a ac, Fevereiro 2019.
- [11] Marlin Project. What is marlin?, Janeiro 2019.
- [12] Ultimaker Software. Ultimaker, Janeiro 2019.
- [13] Repetier Software. Repetier, Janeiro 2019.
- [14] Octoprint Organization. Octoprint, Março 2019.
- [15] K. Ogata. *Engenharia de controle moderno*. PRENTICE HALL Brasil, 2011.
- [16] Cintia A. Kagueyama. Sintonia do controlador pid: Método ziegler-nichols modificado, 2011.
- [17] Cura Software. Ultimaker cura, Janeiro 2019.

[18] Behzad Razavi. *Fundamentals of microelectronics*. Wiley, 2008.

[19] Geetech Comporation. Geetech, Março 2019.

10 APÊNDICES

10.1 APÊNDICE A- OCTOPRINT

O *Octoprint* é uma versão de Linux, o *Raspbian*, desenvolvida para *Raspberry Pi 3*, com uma interface pronta e reconfigurável para controle de impressoras 3D, por meio de conexão por rede interna de *internet*, utilizando qualquer navegador em qualquer sistema operacional. Sua distribuição é gratuita sob a *Affero Genneral Public License* (AGPL), de código aberto, desenvolvida pela *Lulzbot*. Com o *Octoprint* será possível o uso e o monitoramento remoto da impressora 3D. Esse sistema operacional é compatível com a IDE do Arduino e com o *firmware Marlin*.

O motivo da escolha do *Octoprint* é pela facilidade proporcionada ao usuário para integrar à impressora 3D da maioria dos fabricantes e para integrar componentes não convencionais para impressora como câmera, iluminação e alarmes. O usuário pode optar por criar suas rotinas de programação assim como em outras distribuições de Linux ou pode optar por utilizar pacotes disponíveis na internet para personalizar. As funções para monitoramento e controle da impressora 3D inicialmente proporcionados são:

- Acesso a vídeo por meio de *webcam* USB instala a *Raspberry*;
- Monitoramento de pressão da impressão que está sendo executada;
- Monitoramento da execução do *gcode* da impressão atual;
- Monitoramento das temperaturas da mesa quecisa e da extrusora;
- Comando manual do eixos X, Y e Z e das extrusoras E0 e E1 da impressora;
- Inicialização de impressão e *upload* dos *gcode* do modelo 3D remotamente.

O *Octoprint* permite adicionar periféricos que utilizam suas GPIOs ou que utilize alguma conexão multimídia disponível na *Raspberry PI 3*. É possível baixar pacotes de programas desenvolvidos pelos apoiadores da *Lulzbot* ou o usuário pode desenvolver o seu próprio

programa ou modificar algum pacote já disponível. Os pacotes disponíveis para baixar são gratuitos, porém sem garantia e sem suporte.

10.2 APÊNDICE B- CURA

10.2.1 Introdução ao Cura

O programa *Cura* é um *host* gratuito desenvolvido pela *Ultimaker*, contendo pré-configurações de impressoras da *Ultimaker* e de outros fabricantes. O *Cura* tem como objetivo principal fatiar o modelo 3D, gerar o *gcode* a partir do STL, em que este *gcode* é exatamente a forma de como a impressora deverá trabalhar.

No *Cura* há a possibilidade simular o *gcode* da impressão, visualizando a forma como a impressora irá depositar o material em cada camada da impressão. Outra função principal do *Cura* é a de monitorar a impressora, uma vez que a impressora esteja conectado ao computador via USB, onde é possível dar comando manual e dar início a uma impressão.

O *Cura* é compatível com o *firmware Marlin* e com outros *firmwares*, como o *firmware Repetier*. A compatibilidade do *Cura* com o *Marlin* já está pré-configurada, sem necessitar de qualquer modificação, basta definir em Preferências, Impressora. O que é necessário configurar no *Cura* são os parâmetros físicos e de funcionamento desejados em relação à impressora utilizada.

O perfil da impressora pode ser configurada do início, em um perfil virgem, ou pode-se adotar um perfil pré-definido de uma marca de impressora e personalizá-lo de forma que atenda as exigências para o bom funcionamento da impressora adotada. recomenda-se não configurar a impressora do início, pode-se acarretar em um trabalho cansativo e às vezes desnecessário.

Nas configurações dos ajustes da impressora se encontram parâmetros recomendados para os materiais de impressão, qualidade, perímetro, preenchimento, material, velocidade, percurso, refrigeração, suporte, aderência à mesa, extrusão dual, correções de malha, modos especiais e experimental. Cada um desses tópicos interferem diretamente na forma como a máquina trabalha. E como configurações indiretas à impressão, estão presentes as configurações gerais e ajustes de impressoras. O *Cura* é uma ferramenta completa e flexível, ideal para impressoras 3d e para este projeto. O suporte para atualizações são constantes e gratuitos.

10.2.2 Configurações do Cura

As configurações necessárias, contida em Preferências, do *Cura* é dividida em cinco partes: Geral, Ajustes, Impressoras, Materiais e Perfis. As configurações dos ajustes leva maior atenção, uma vez que é onde se encontram as configurações de operação da impressora e são constantemente alteradas de acordo com a necessidade para a impressão de determinado modelo 3D. As demais configurações são importantes, porém não há necessidade de reconfigurações constantes.

A ordem de explicação da configuração dos tópicos segue a ordem que se encontra no próprio *Cura*. O que não for citado a seguir não precisa ser alterado, caso seja alterado, que as decisões fiquem a critério e responsabilidade de quem está alterando. As seguintes configurações de cada parte serão mencionadas e em seguida serão explicadas. Todos os as configurações são determinados para este projeto, ocorrendo a possibilidade de diferenciar-se das configurações para outras impressoras. Ao abrir Preferências será permitindo identificar facilmente os tópicos e subtópicos para configuração.

10.2.2.1 Geral

Em Preferências, no tópico Geral se encontram as configurações básicas do Cura, que são idioma, tema de janela, moeda e outros. É bem auto explicativo, sem a necessidade para muitos detalhes. Esta parte interfere na experiência visual e de uso do usuário.

10.2.2.2 Ajustes

Em Preferências, no tópico de Ajustes se encontram as configurações dos parâmetros de funcionamento da impressoras, interferindo na forma como a impressão será executada, ou seja, no próprio *gcode* da impressão. Os parâmetros interferem na qualidade, velocidade de impressão e no funcionamento correto da impressoras. No caso de uma má configuração, em casos críticos, pode-se danificar a impressoras e resultar em acidentes.

Neste tópico serão abordados somente os subtópicos qualidade, perímetro, preenchimento, material, velocidade, percurso, refrigeração, suporte, aderência à mesa, extrusão dual. Os subtópicos correções de malha, modos especiais e experimental não são relevantes para este trabalho.

Para alteração dos parâmetros dos subtópicos, deve-se marcar os parâmetros necessários. Para inserir os valores ou selecionar o modo de cada parâmetro, deve voltar

à lista de customização. Na figura 10.1 ilustra a janela referente à Ajuste, visualizando o subtópico Qualidade primeiramente. Neste espaço deve marcar quais parâmetros apareceram em customização na tela inicial do Cura para alterações. Não a necessidade de marcada todos os parâmetros, caso contrário a lista de customização ficaria poluída visualmente, o que poderia causar confusão e possíveis erros humanos. Uma vez que o parâmetro é selecionado, ele irá aparecer na lista de customização, como ilustrado na figura 10.1. No momento em que se alterar os parâmetros visíveis na lista, os outros parâmetros ocultos se ajustam automaticamente. Uma observação importante é

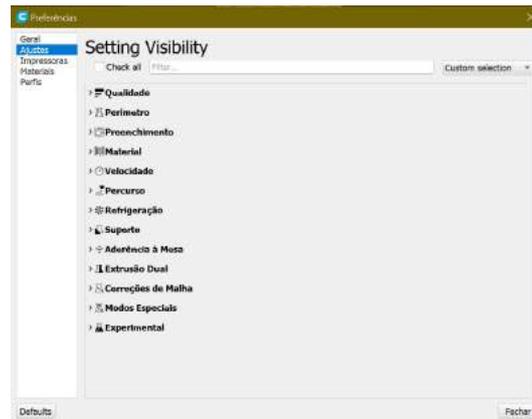


Figura 10.1. Listas de ajustes.

que ao posicionar o mouse sobre o parâmetro irá aparecer uma breve explicação sobre o parâmetro e recomendações, que podem ser ignoradas.

10.2.2.3 Qualidade

Neste subtópico se encontram os parâmetros das dimensões do filamento extrusado, em relação a altura das camadas e largura de extrusão. A altura das camadas é definida pela necessidade de cada impressão, não há a necessidade de ser exatamente igual ao diâmetro adotado ou declarado. A largura de extrusão é exatamente o diâmetro do bico adotado para impressão, porém pode-se adotar bico de uma determinado diâmetro e declará-lo com um diâmetro menor ou maior. Recomenda-se declarar um bico com 1mm maior no diâmetro em relação ao bico adotado, isso garante a compressão do material do dentro da extrusora, evitando bolha de ar devido a possibilidade de entrada de ar.

Na figura 10.2 encontra-se quais parâmetros são necessários de serem alterados, em que a altura das camadas são de 0,2 mm e largura de extrusão declarada são de 0,4 mm, os bicos utilizados neste projeto são todos de 0,25 mm. Para poupar tempo de impressão, pode-se aumentar a altura das camadas, resultando em menos camadas necessárias para a impressão do modelo, porque isso resulta na diminuição da quantidade de movimentos

necessários na impressão. Como ponto negativo no aumento da altura das camadas, a qualidade de impressão diminui. Neste caso o usuário da impressora deve decidir entre priorizar tempo ou qualidade.



Figura 10.2. Ajustes de qualidade.

10.2.2.4 Perímetro

Neste subtópico se encontra os parâmetros das dimensões do contorno do modelo 3D. De modo grosseiro se encontra os parâmetros das dimensões das paredes, do piso e do teto da impressão do modelo 3D. Em relação ao contorno, pode-se determinar a espessura por meio da quantidade de linhas de extrusão, em relação às paredes, e por meio da quantidade de camadas, em relação ao piso e ao teto. Outra forma de determinar a espessura do contorno é simplesmente determinado a espessura em milímetros. Recomenda-se determinar as espessuras pela quantidade de camadas e de filetes, uma vez que ao imprimir meias camadas e meios filetes podem causar má aderência entre os filamentos.

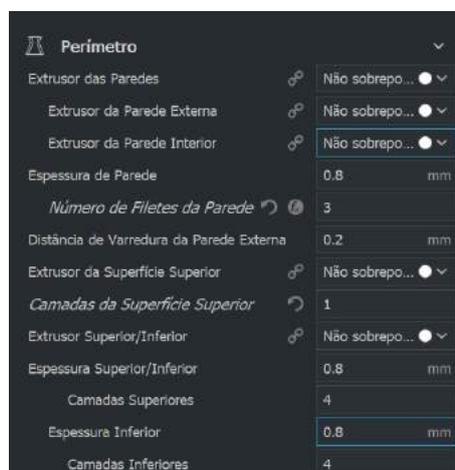


Figura 10.3. Ajustes de perímetro.

Na figura 10.3 encontra-se quais parâmetros são necessários de serem alterados. Em relação aos valores encontrado na figura 10.3, 4 camadas para o teto e para piso e 4 filetes para as paredes, isso evita possível furos e garante uma boa rigidez para o modelo, mesmo que seja oco, garantindo um bom acabamento externo da impressão. Para modelos impressos com preenchimento maciço, apenas 2 camadas e 2 filetes são o suficiente para montar a qualidade de acabamento externo da impressão.

10.2.2.5 Preenchimento

Neste subtópico se encontra os parâmetros do preenchimento do modelo 3D. Os parâmetros importantes para a maioria dos modelos 3D são a densidade de preenchimento, o padrão de preenchimento e contagem de parede de preenchimento extra. Na figura 10.4 encontra-se quais parâmetros são necessários de serem alterados.

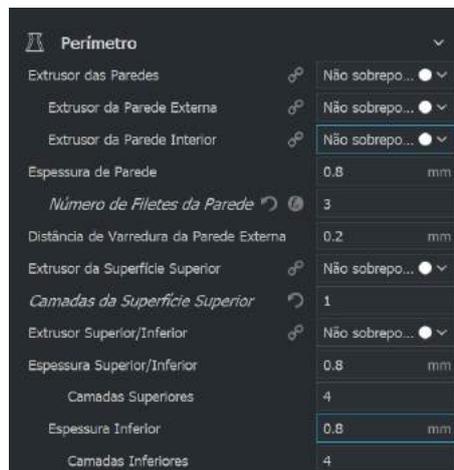


Figura 10.4. Ajustes de preenchimento.

10.2.2.6 Densidade

A densidade de preenchimento é auto-explicativo, em que pode ser de 0% resultando em uma peça oca até 100% resultando em uma peça maciça. Para a maioria das peças deve ter 15% no mínimo de preenchimento, por mais que o Cura permita fazer um modelo 3D com uma porcentagem menor não significa que será possível imprimir ou que resultará em um bom acabamento do teto o modelo 3D. Quanto maior for a porcentagem do material, maior será o tempo de impressão e maior será resistência.

Como um exemplo um modelo 3D de um cubo, assim como em uma construção de uma laje de uma casa se precisar de escoras, na impressão do teto do cubo precisa de

escoras, que são o preenchimento. Na figura 10.5 é ilustrado um cubo simulado no cura com o seu preenchimento exposto de 15 % de densidade.

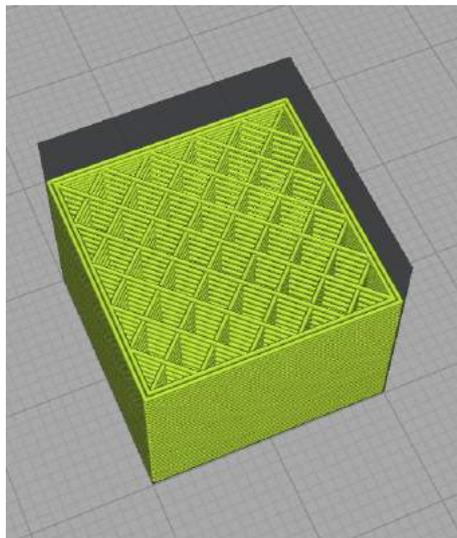


Figura 10.5. Cubo com porcentagem de preenchimento de 15 %.

Como segundo exemplo um modelo 3D de uma pirâmide, em que o ângulo interno entre as suas faces em relação a base seja maior que 45° . É possível imprimir com 0 % de densidade, porque o filamento da camada superior não se afasta muito da camada inferior das parde do modelo e o seu teto não é paralelo à base, assim não à necessidade de escoras se fosse uma construção. Na figura 10.6 é ilustrado uma pirâmide simulada no cura com o seu preenchimento exposto de 0 % de densidade.

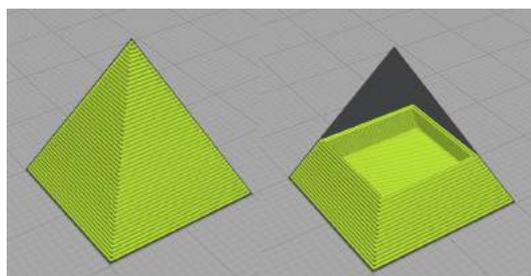


Figura 10.6. Pirâmide com porcentagem de preenchimento de 15 %.

As comparações anteriores são analogias, umas vez que a impressora trabalha com pequenas escalas se comparadas com a construção civil, em que na impressão é descartado diversos fatores que influenciam na construção civil.

10.2.2.7 Padrão de preenchimento

O padrão de preenchimento é a forma do preenchimento, em que no geral pode ser uma grade quadrada ou triangular. A definição do padrão fica a critério do usuário. O

padrão escolhido pode influenciar na resistência da peça, no tempo de impressão e no acabamento. No *Cura* há 13 padrões de preenchimento, para ver o resultado com cada padrão, basta simular. Na figura 10.7 e 10.8 são ilustrados os padrões de preenchimento grande e triangular, respectivamente, com densidade de 15% em um modelo 3D de um cubo.

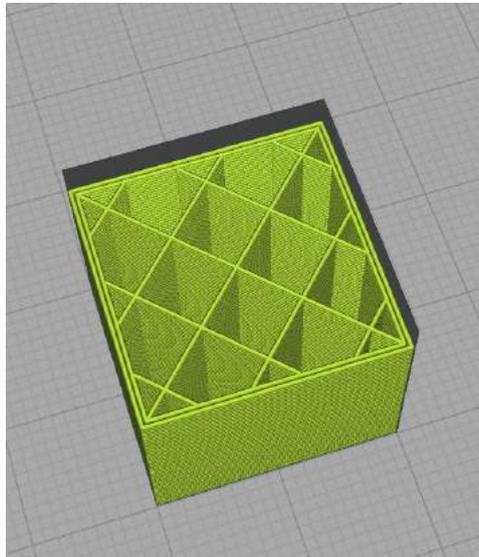


Figura 10.7. Padrão grade.

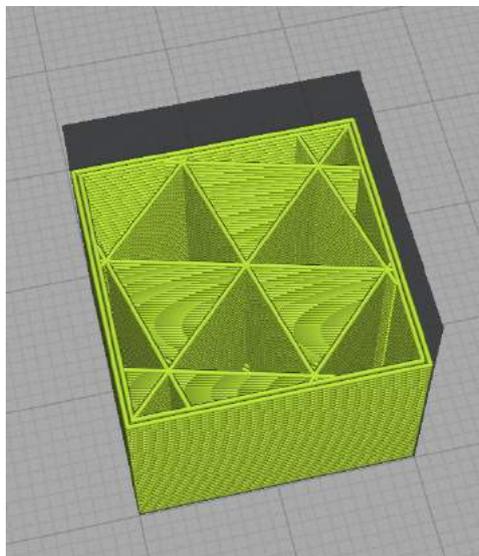


Figura 10.8. Padrão triangular.

Em um caso particular com a densidade de preenchimento de 100% o melhor padrão é o de linha, que inclusive o Cura faz esta alteração assim que é se declara essa densidade. Os outros padrões não são utilizados neste projeto, uma vez que os padrões grade e triangular atendem as necessidades.

10.2.2.8 Multiplicador de Filetes de Paredes

O multiplicador de filetes de paredes se refere à espessura da parede do preenchimento. Quanto maior for o número de filetes, maior será o tempo de impressão e maior será a resistência. A quantidade mínima do número de filetes é de um, que é o próprio preenchimento. Recomenda-se usar uma quantidade de de até 3 filetes para porcentagens de preenchimento de até 30%. Para densidades superiores não faz muito sentido usar o multiplicador, uma vez que as paredes estarão muito próximas ou até sobrepostas.

Neste projeto não foi feito um comparativo de resistência entre uma impressão com baixa densidade com maior número de filetes e uma impressão com densidade maior densidade com apenas um filete, uma vez que tais comparações fogem do escopo deste projeto. Na figura 10.9 é ilustrado o comparativo entre dois preenchimento com 15% de densidade com o padrão de grade, em que o da esquerda tem apenas um filetes e o da direita tem três filetes de parede.

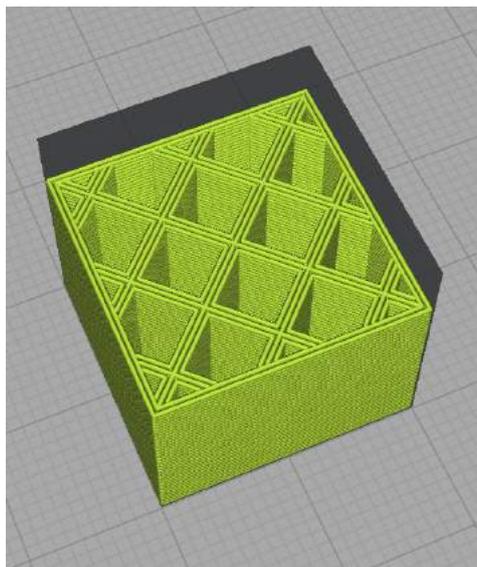


Figura 10.9. Número de filetes.

10.2.2.9 Material

Neste subtópico se encontra os parâmetros de aquecimento do bico da extrusora e da mesa, fluxo inicial de camada e retração. Na figura 10.9 ilustra a lista de parâmetros para o material de impressão ABS.

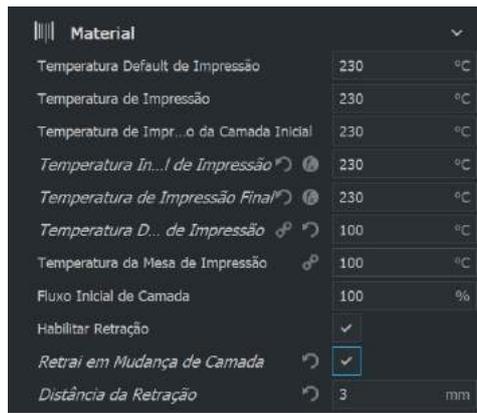


Figura 10.10. Parâmetros de material.

10.2.2.10 Temperatura da Mesa de Bico da Extrusora

As definições em relação ao aquecimento da mesa e do bico são dadas pelo fabricante do material. Para a temperatura de aquecimento do bico deve ser a mesma para todos os parâmetro referentes. Para a temperatura de aquecimento a da mesa também deve ser a mesma para todos os parâmetros referentes.

10.2.2.11 Fluxo Inicial de Camada

O fluxo inicial de camada raramente é alterado, este parâmetro altera a quantidade de material extrusado na primeira camada da impressão. É importante para alguma impressões em que o material utilizado tem uma má aderência a mesa aquecida. Para obter uma boa aderência da impressão a mesa, o material deve ser extrusado de forma que seja espremido contra a mesa aquecida na primeira camada. Ao aumentar o valor do fluxo para um valor maior que 100 %, estará aumentando a quantidade de material extrusado em relação à quantidade normal para o diâmetro do bico e para a espessura da camada declarados. Distância de retração

10.2.2.12 Distância de Retração

A distância de retração se refere à quantos milímetros o filamento da extrusora será puxado no sentido contrário à extrusão. Para a maioria dos materiais 3mm de retração é o suficiente. A retração impede a saída de material indesejada pelo bico durante o deslocamento do mesmo, no momento em que o material não está sendo extrusado. Para retrações pequenas, a retração pode não ser efetiva, e para retrações grandes, a retrações pode provocar entupimento da extrusora, uma vez que na retração o material estará

voltando para a parte fria da extrusora.

10.2.2.13 Velocidade

Neste subtópico se encontra os parâmetros de velocidade de impressão. As velocidades referentes às impressões das parede externas e internas, preenchimento, suporte e deslocamento. As velocidades interferem diretamente no tempo de impressão, na qualidade de impressão e na durabilidade da impressora e o seu com funcionamento. Na figura 10.11 é ilustrado a lista de parâmetros do subtópicos Velocidade, em que se encontra quais parâmetros são importantes para a execução da maioria das impressões.



Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade de Impressão	70	mm/s
Velocidade de Preenchimento	70	mm/s
Velocidade da Parede	30.0	mm/s
Velocidade da Parede Exterior	30.0	mm/s
Velocidade da Parede Interior	60.0	mm/s
Velocidade da Superfície Superior	30.0	mm/s
Velocidade Superior/Inferior	30.0	mm/s
Velocidade do Suporte	70	mm/s
Velocidade do P...ento do Suporte	70	mm/s
Velocidade da Torre de Purga	70	mm/s
Velocidade de Percurso	120	mm/s
Velocidade da Camada Inicial	30.0	mm/s

Figura 10.11. Parâmetros de velocidade.

Para facilitar o entendimento desses parâmetros, é listado cada velocidade, valores recomendados e explicação sobre o mesmo:

- Velocidade de impressão: valor máximo de 70 mm/s. É a velocidade de impressão de preenchimento junto com a velocidade de impressão da parede interna. Partindo desse valor o Cura determina automaticamente as outras velocidades para a impressão;
- Velocidade de preenchimento: Valor máximo de 70 mm/s;
- Velocidade de parede: valor máximo de 30 mm/s. É a velocidade de impressão da parede externa da impressão. Partindo desse valor o Cura determina automaticamente a velocidade de impressão da parede interna;
- Velocidade da parede exterior: velocidade máxima de 30 mm/s. É a velocidade de impressão parede externa da impressão, pode-se aumentar a velocidade, mas diminuirá o acabamento da impressão;

- Velocidade da parede interior: velocidade máxima de 70 mm/s. É a velocidade de impressão parede interna da impressão. Neste caso não a necessidade de um bom acabamento, uma vez que essa parte da parede não fica exposta;
- Velocidade superior/inferior: velocidade máxima de 30 mm/s. É a velocidade de impressão das camadas do piso e do teto do modelo. Caso a velocidade seja aumentada, pode ocorrer a má aderência da impressão à mesa aquecida e no mau acabamento da camada exterior do teto. Pode-se alterar cada velocidade de forma separada como a velocidade da parede, mas não há necessidade para este projeto;
- Velocidade do suporte: velocidade máxima de 70 mm/s;
- Velocidade de percursos: velocidade máxima de 120 mm/s. É a velocidade de deslocamento do pico quando não está imprimindo, como não influencia em nada diretamente na impressão, somente em relação ao tempo, pode-se manter essa velocidade alta;
- Velocidade da camada inicial: velocidade máxima de 25 mm/s. É a velocidade da primeira camada, que é a camada responsável pela aderência da impressão à mesa, em velocidade maior pode ocorrer má aderência à mesa.

10.2.2.14 Percurso

Neste subtópico se encontra os parâmetros de percurso, o mesmo percurso citado anteriormente em Velocidade. Os dois parâmetros que devem ser habilitados são: Retrair Antes da Parede Externa e Evitar Partes Impressas nas Viagens. Esse dois parâmetros são auto-aplicativos, não há a necessidade alterar os outros parâmetros.

10.2.2.15 Refrigeração

Neste subtópico se encontra os parâmetros de refrigeração, habilitando as ventoinhas internas e controlando a porcentagem do fluxo de ar. No caso deste projetos, essas ventoinhas são responsáveis também pelo sistema de aquecimento. Para usar as ventoinhas como um sistema de refrigeração, basta desabilitar os aquecedores. Os aquecedores são utilizados em especial somente para impressoras em ABS. A refrigeração é mais importante para impressoras em PLA e PETG. A necessidade de refrigeração e de aquecimento fica a critério do usuário. Não há uma certeza para as impressões devido à enorme variedade das peças impressas.

10.2.2.16 Suporte

Neste subtópico se encontra os parâmetros de impressão do suporte. O suporte serve para dar as parte da impressão que não tem a própria estrutura como suporte. Para incluir o suporte deve habilitar. Assim como no preenchimento, no suporte se encontra a densidade, padrão de suporte que se equivale ao de preenchimento e número de filetes. O único parâmetro diferente do preenchimento é o ângulo para caracterizar secções pendentes.

O ângulo para caracterizar secções pendentes é o ângulo interno entre a parede externa e a mesa aquecida, em que só será gerado suporte para a parede caso este ângulo seja menos que o declarado. No *Cura* já é declarado 50° , não há necessidade de alterá-lo e é recomendado declara somente valores superiores à 45° .

10.2.2.17 Aderência à Mesa

Neste subtópico se encontra os parâmetros de aderência do modelo 3D à mesa. A aderência à mesa serve para definir a forma como será a aderência da impressão. Neste projeto se utiliza duas estratégias de aderência que são o *Brim* e o *Raft*. Para cada uma destas estratégias há parâmetros diferentes. Para escolher entre as estratégia deve escolher em Tipo de Aderência da Mesa de Impressão. Não é recomendado desabilitar a aderência ou usar a estratégia de *Skirt*. A escolha da forma de aderência fica à critério do usuário e à exigência da impressão. O *Brim* é uma faixa de impressão que contorna a primeira impressão e o suporte. A largura da faixa pode ser determinada em milímetros em Largura do *Brim*. A largura da faixa recomendada é de 8 mm. Na figura 10.12 é ilustrados o modelo 3D de um cubo com *Brim* de 8 mm de largura.

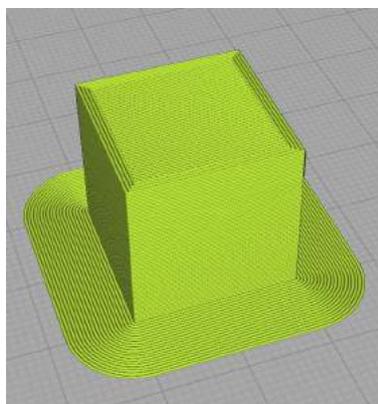


Figura 10.12. modelo 3D de um cubo com *Brim* de 8 mm de largura.

O *Raft* é uma mesa impressa com 3 camadas de espessuras e que seu perímetro se

comporta como a faixa do Brim. Assim como no Brim, recomenda-se que a largura da faixa do perímetro do *Raft* de 8 mm. O uso do *Raft* é recomendado somente no uso de material solúvel para imprimí-lo, porque a estrutura do *Raft* não se solta facilmente da peça, podendo danificar a peça. Na figura 10.13 é ilustrado o modelo 3D de um cubo com *Raft* de 8 mm de largura de perímetro.

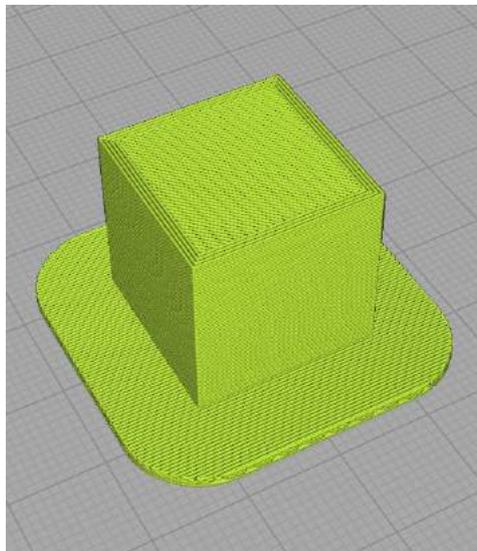


Figura 10.13. *Raft* de 8 mm de perímetro.

10.2.2.18 Extrusão Dual

Neste subtópico se encontram os parâmetros da forma como o extrusora dupla trabalha. Para fazer a troca de material usando somente um bico a impressora retira um dos filamento e introduz o outro, porém fica um pouco de maneira derretido do filamento dentro do bico ao retirar o filamento. Para limpar o bico o cura permite a criação automática de um modelo de torre de purga, que serve para depositar o material indesejado que fica dentro do bico. Na figura 10.14 é ilustrado o subtópico de Extrusão Dual com os seu parâmetros.



Figura 10.14. Janela de ajustes para extrusão dual.

Para trabalhar com a torre de purga deve-se habilitar antes. Os parâmetros são bem auto-explicativos, onde se encontram a coordenada de onde a torre será feita, o volume de material descartado na torre.

10.2.2.19 Impressoras

Em Preferências, no tópico de Impressoras se encontram a lista de perfis de impressoras declaradas, podendo selecionar, adicionar um novo perfil, renomear e excluir os perfis. Ao selecionar um perfil de impressora da lista, pode-se ajustar o perfil para o modelo da real da impressora e atualizar o *firmware* da impressora.

A função de atualização do *firmware* da impressora não é importante para este projeto, uma vez que para atualizar o *firmware Marlin* as atualizações são feitas diretamente no código, pela IDE do Arduino e que já foi descrito como isso é feito anteriormente neste trabalho. Na função de Ajustes de Máquina, referente à impressora selecionada, se encontram as abas das configurações da impressora, das configurações da extrusora esquerda E0 e das configurações da extrusora direita E1.

10.2.2.20 Aba Impressora

Na aba Impressora se encontram as configurações do volume de trabalho, ajustes de posição inicial da extrusora, declaração do uso de mesa aquecida, declaração do *firmware* utilizado, o número de extrusoras, *gcode* inicial e *gcode* final. Na Figura XX ilustra a janela Ajustes de Máquina, Impressora.



Figura 10.15. Configurações da impressora.

Para facilitar o entendimento desses ajustes, cada ajuste é listado e explicado:

- Ajustes da Impressora: são os parâmetros do volume de trabalho, referentes ao valor

máximo do Z e às dimensões da mesa, que não é necessariamente o comprimento útil total dos eixos X e Y. Os valores declarados para este trabalho são X de 300 mm, Y de 260 mm e Z de 300 mm. Nota-se que as dimensões do volume útil não são necessariamente os mesmos declarados no código do Marlin;

- Ajuste da Cabeça de Impressão: são os parâmetros de posição do deslocamento do bico da extrusora em relação à mesa aquecida quando o mesmo se encontra na origem do limite máximo ou do limite mínimo. Para estes parâmetros deve-se apenas colocar como zero, uma vez que o ponto zero da coordenada da mesa se encontra com o ponto zero da coordenada com referência aos fins de curso posicionados nos limites máximos de X e Y. Isso só é válido quando os fins de curso se encontram no limite máximo. Não há a problema para falta de exatidão da sobreposição dos dois pontos zeros, só precisam estar próximos, o máximo que pode ocorrer é o deslocamento da impressão inteira para um dos lados nos eixos X e Y . Na Figura XX ilustra um exemplo da sobreposição do ponto zero da mesa e do ponto zero dos fins de curso;
- Altura do eixo: uma vez que a impressora encontra os limites para dar início à impressão, o eixo Z desloca 55 mm para começar a impressão;
- Forma da plataforma: existem mesas aquecidas circular e retangulares no mercado, a mesa deste projeto retangular, por se tratar de uma impressora cartesiana. Para impressoras em delta usa-se mesas circulares, conhecidas como mesas elípticas;
- Tipo de *gcode*: é a seleção de qual tipo de *firmware* utilizado na impressora. O *gcode* para um *firmware* não é necessariamente igual para outros *firmware*. O *Marlin* é o *firmware* utilizado neste projeto. Existe o *Marlin Volumetric*, mas não é o mesmo *Marlin* deste projeto;
- G-code inicial e g-code final: são comando em *gcode* que são executados antes e depois da impressão que podem ser alterados manualmente. Esses comando serão executados toda vez que uma impressão for iniciada. Deve-se ter atenção para esses comandos, porque comandos errados podem danificar a impressora. Para este projeto não há a necessidade alterá-los.

10.2.2.21 Aba Extruder

Na aba *Extruder* se encontram as configurações para o diâmetro do bico, diâmetro do filamento utilizado e outras configurações que têm funções idênticas da aba Impressora. Os importantes somente são os diâmetro do bico e o diâmetro do filamento utilizado,

que são de 0,4 mm e 1,75 mm respectivamente. Na troca do filamento ou do bico para outro diâmetro, os novos tamanhos devem ser declarados. A forma com se configura a extrusora esquerda E0 é a mesma que a da extrusora direita E1. Na distância entre as extrusoras e a origem deve ser zero por compartilharem o mesmo bico. Na figura 10.16 ilustra a janela Ajustes de Máquina, *Left Extruder*.



Figura 10.16. Configurações do *Extruder*.

10.2.2.22 Materiais

Em Preferências, no tópico de Materiais se encontram as configurações para criar o perfil de um material ou simplesmente para editar. As configurações são referentes às características do material que são densidade do material, diâmetro do filamento e custo do material por quilo. Também se encontram os valores de condição de impressão. As configurações são bem simples e auto-explicativas, não há necessidade de explicar novamente, uma vez que no *Cura* já está bem fácil de entender cada configuração. Na figura 10.17 ilustra a janela Materiais.

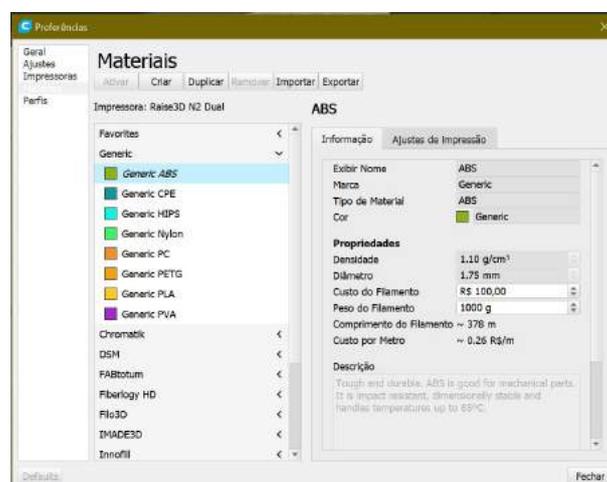


Figura 10.17. Configurações dos materiais.

10.2.2.23 Perfis

Em Preferências, no tópico de Perfis se encontram as configurações para criar o perfil dos ajustes feitos no subtópico Ajustes. Não há necessidade de se criar tais perfis, porque para cada projeto é necessário ajustes únicos, que podem ser parecidos. Quando se altera os parâmetros em Ajustes, os ajustes são salvos automaticamente. Essa função é mais útil quando um modelo 3D forma impressoras várias vezes em períodos aleatórias, com na impressão de peças de reposição do algum modelo de impressora 3D. Esses perfis não são o mesmos perfis de impressora, são perfis de impressão.

10.3 APÊNDICE C- CONOGRAMA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

Planejamento do TCC-2												
Estrutura do Texto / Tarefas	13/jul.	27/jul.	10/ago.	24/ago.	7/set.	21/set.	5/out.	19/out.	2/nov.	16/nov.	30/nov.	9/dez.
Implementação da segunda extrusora	█	█	█									
Testes de impressão	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		
Sevidor Octoprint e periféricos	█	█	█	█	█	█	█	█	█			
Mesa aquecida							█	█	█	█		
Aquecimento do ambiente	█	█	█	█								
Painel da impressora					█	█	█					
Sistema dos cartuchos			█	█								
Produção de PCB	█	█	█	█	█	█	█					
Atualização do Marlin	█	█	█	█	█	█	█	█	█			
Calibrações	█	█	█	█	█	█	█	█	█			
Escrita do texto	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		
Montagem da Apresentação										█	█	
Apresentação para a Banca												█

Figura 10.18. Cronogramas de atividades para o Trabalho de Conclusão de Curso 2.