

Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Mecatrônica

Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Mecatrônica

Impressora 3D com duas extrusoras

Fabrício Muche Schiavo - Número USP: 7521539

Orientador: Celso Massatoshi Furukawa

São Paulo

2015

Fabrício Muche Schiavo

Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Mecatrônica
Impressora 3D com duas extrusoras

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecatrônica**

Este relatório é apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É produto do meu próprio trabalho, exceto onde indicado no texto. O relatório pode ser livremente copiado e distribuído desde que a fonte seja citada

Fabrício Muche Schiavo

Catalogação-na-publicação

Schiavo, Fabrício

IMPRESSORA 3D COM DUAS EXTRUSORAS / F. Schiavo -- São Paulo, 2015.
38 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.IMPRESSORA (PROTÓTIPO) 2.PROTOTIPAÇÃO DE SOFTWARE
3.POLÍMEROS (MATERIAIS) 4.ANALISE TÉRMICA 5.EXTRUSÃO
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Celso Massatoshi Furukawa e Douglas Santana pela orientação e incentivo. Ao professor Marcos Barreto por mostrar que um simples trabalho de conclusão de curso pode representar mais do que apenas uma entrega. Um agradecimento especial à Marcelo Borges Alencar de Carvalho, Lucas Prado, Benjamin Teng Lin e todos os membros do Projeto ABRA que me ajudaram a construir um ambiente de criação e estudo aberto para toda a comunidade politécnica. Ao instituto TIM e à todos os organizadores da AWC - Academic Working Capital

Resumo

O objetivo deste projeto foi construir uma impressora 3D com dois extrusores de plástico a quente. Essa configuração tem como objetivo inicial contornar as limitações geométricas estabelecidas pelo método tradicional de impressão com material de suporte e de acabamento com peças de apenas uma cor. Para tanto utiliza-se uma das cabeças de impressão para depositar o polímero da peça e a outra para depositar material de suporte solúvel, ou cada um dos extrusores para depositar polímeros de cores diferentes.

Este relatório contém uma descrição do processo de desenvolvimento do equipamento em todas as suas etapas. Passando inicialmente pelo desenvolvimento da ideia e dos requisitos, em seguida pela escolha dos materiais e peças. O processo de fabricação ocorreu primeiramente no ambiente virtual, onde (com o auxílio de softwares de CAD/CAM) as peças foram desenhadas e testadas. Em seguida as mesmas foram fabricadas e a montagem teve início.

A interface eletrônica da máquina, bem como os softwares Host e Firmware foram adotados da comunidade open-source, de forma que o trabalho de criação ficasse concentrado na estrutura mecânica.

Após a montagem, a calibragem e configuração do software são os últimos passos aqui descritos. Como se trata de uma máquina que exige relativa precisão para gerar peças com qualidade, tanto a calibragem quanto a configuração do software exigiu diversos testes e experimentos práticos baseados na experiência do usuário e na sua opinião com relação ao produto final.

Por último, apresenta-se aqui um pequeno manual de operação e manutenção da máquina. Como proposto, sua operação é simples e acessível à qualquer usuário com pouco conhecimento técnico.

Abstract

The goal of this project is to build a 3D printer with two molten polymer extruder. This configuration allows severe geometric limitations to be ignored, and therefore increase the possibility range in comparison to the traditional 3D printing method, which is based in support material and limited to one colored printed parts.

This report contains a general description of all the phases of the development process. Starting with the idea incubation and the establishment of the minimum requirements, followed by the parts sizing and material choice. The fabrication process started with a virtual mechanical simulation with the help of CAD/CAM softwares. All the parts were designed and tested before the fabrication and assembly take place.

The electronic interface for the machine, as well as the host and firmware softwares were adopted from the open-source environment so that the creative focus stay at the mechanical structure design and fabrication.

After the assembly, calibration and software configuration are the last steps described in this report. the main goal for the machine is to produce precise and well finished parts, because of that, the calibration and test phases required a considerable amount of tests and experiments based in the final consumer opinion and experience.

And in the last part this report presents a brief operation and maintenance manual. As proposed, this machine's operation process is simple and accessible to almost every user, even those with little or no technical knowledge at all.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Projeto RepRap - Impressora	9
Figura 2 - Exemplo de utilização - material de suporte	10
Figura 3 - Fatia do mercado por fabricante	12
Figura 4 - Esboço - Eixo X com extrusores	16
Figura 5 - Esboço - Eixo Z	17
Figura 6 - Esboço - Eixo Y	17
Figura 7 - Esquema de funcionamento da extrusora	18
Figura 8 - Interface do programa Slic3r	19
Figura 9 - Interface do programa Repetier Host	20
Figura 10 - Diagrama de blocos com os componentes eletrônicos	21
Figura 11 - Camada de Raft para aumentar a área de aderência	22
Figura 12 - Modelo virtual de montagem Teste de encaixes e conexões	25
Figura 13 - Acumulo de Polímero na saída do tubo de TEFLON	28
Figura 14 - Variação de temperatura no tubo do extrusor paletado	29
Figura 15 - Imagem da máquina já em operação	29
Figura 16 - Modelos em duas cores	30
Figura 17 - Suporte para Smartphone impresso em 3D	30
Figura 18 - Componentes mecânicos impressos	31
Figura 19 - Botão Home Z e Parafuso de ajuste de altura	32
Figura 20 - Interface do Repetier - Slice e Executar	33
Figura 21 - Trava do extrusor	34
Figura 22 - Parafusos para nivelamento dos bicos	35

Sumário

Introdução	9
Estado da Arte.....	11
Análise de Requisitos.....	15
Metodologia.....	16
Recursos Necessários.....	23
Planejamento do Projeto.....	24
Sumário Executivo.....	25
Resultados.....	27
Um pequeno manual de operação.....	31
Conclusão.....	35
Referências Bibliográficas.....	36

Introdução

Impressão 3D, também conhecida como prototipagem rápida é uma forma de fabricação aditiva na qual um modelo tridimensional é criado pela deposição de sucessivas camadas de material (em geral polimérico) (BARNATT, 2013, p.4). Esse tipo de processo vem aparecendo em evidência nos últimos anos, devido tanto ao avanço na tecnologia quanto à popularização da mesma. O principal fator de disseminação da impressão 3D foi o desenvolvimento de projetos open source, estes possibilitam que pessoas do mundo inteiro construam máquinas de uso pessoal a custo relativamente baixo e exigindo conhecimento não muito avançado. Como exemplo podemos citar o projeto RepRap (BUBACK, 2014), um exemplo de máquina baseada nesse projeto pode ser observado na figura 1, e em especial o modelo Prusa Mendel (DEVIJVER, 2011), que possui custo de produção muito inferior aos modelos de marcas tradicionais.

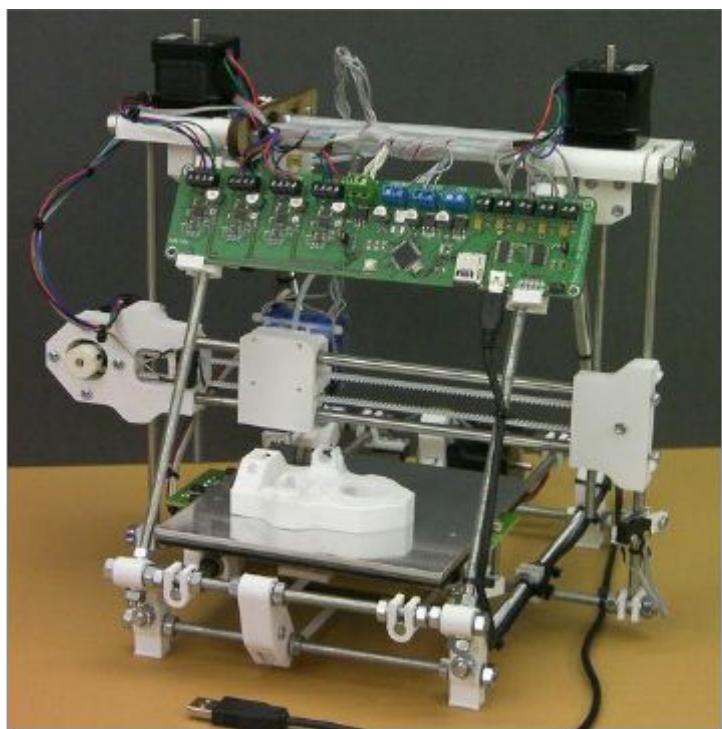


Fig 1 - Projeto RepRap - Impressora Open Source - Fonte: reprap.org

Entretanto esse método de fabricação ainda apresenta falhas severas. Talvez a falha que mais limite a produtividade seja a utilização de material de suporte (CANESSA, FONDA, ZENNARO, 2013, p.47) . Ao imprimir sucessivas

camadas em um modelo tridimensional as vezes é necessário depositar material em regiões sem apoio de camadas previamente depositadas. Isso acontece geralmente em modelos que possuem partes que se destacam da estrutura principal da peça. Para sanar tal dificuldade deposita-se matéria-prima desde a base do modelo até a parte que se destaca, dessa forma pode-se depositar material na posição correta, removendo-se ao final da impressão o excesso. Este apoio é chamado material de suporte. Um exemplo de como o material de suporte é utilizado pode ser observado na figura 2. Entretanto por ser feito do mesmo material do resto da peça, em geral existe uma grande dificuldade em sua retirada, o que gera danos a peça e limitações geométricas séveras para o processo como um todo.

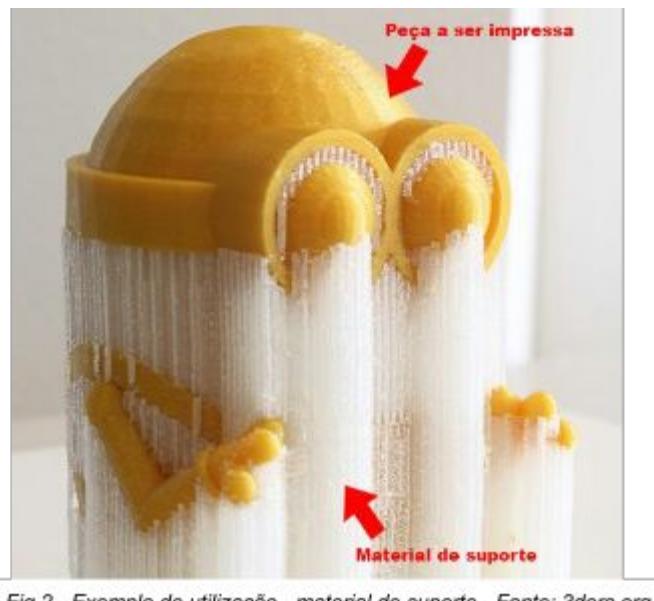


Fig 2 - Exemplo de utilização - material de suporte - Fonte: 3ders.org

O objetivo é construir uma máquina de impressão 3D open source com duas cabeças de extrusão, uma que imprima material da peça, e outra que deposite apenas uma substância de suporte. O modelo é então mergulhado em um solvente que retira apenas o material de suporte, eliminando assim o risco de danos ao produto final.

Atualmente, já estão disponíveis no mercado polímeros (HIPS - High Impact Polystyrene e PVA - Polyvinyl alcohol) com alta solubilidade em substâncias de fácil acesso, como limoneno (substância utilizada na industria para dar odor cítrico a alimentos e essências) e até mesmo água (NAQUEEF,

2014). Esses polímeros podem ser utilizados em conjunto com os polímeros tradicionais (ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene e PLA - Polylatic Acid e Nylon) (STRATASYS, 2015) para gerar peças de geometria consideravelmente mais complexa, aumentando assim o espectro de possibilidades do sistema de impressão 3D.

Além disso o uso de duas extrusoras possibilita a utilização de dois filamentos do mesmo material, mas de cores diferentes, tornando possível imprimir peças com duas cores.

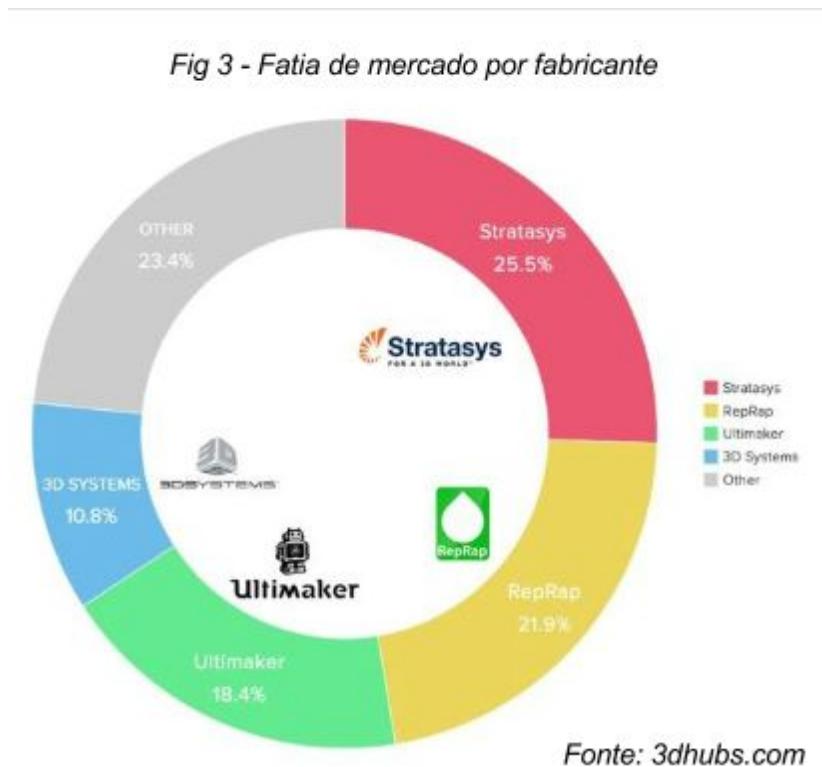
Outro objetivo do projeto foi o de incrementar o volume de trabalho da máquina, permitindo assim a produção de modelos maiores do que aqueles produzidos nos equipamentos vendidos comercialmente.

Estado da Arte

A tecnologia de extrusão a quente de polímeros é a técnica mais difundida atualmente. Especialmente devido ao sucesso de projetos open-source como a reprap e as primeiras makerbots. O mercado de impressoras é atualmente dividido entre um seletivo grupo de grandes empresas. As principais são: Stratasys, 3D Systems e Ultimaker (KIRA, 2041) e suas participações no mercado podem ser observadas na figura 3. A maior marca de impressoras entretanto continua sendo a Makerbot, fabricante fundada em 2009 e incorporada pela Stratasys em 2013. Devido à força que a Makerbot desenvolveu em seus anos de independencia, a Stratasys decidiu continuar a utilizar a marca para máquinas de uso doméstico e de baixo custo, e reservar o nome Stratasys para equipamentos de uso industrial.

O projeto RepRap merece uma atenção especial. Esse trata-se de uma iniciativa para desenvolver impressoras 3D que possam imprimir a maior parte de seus próprios componentes, daí deriva seu nome (Replicating Rapid Prototyper). Esse modelo de desenvolvimento auto-replicável foi fundamental para criar uma comunidade de desenvolvimento aberta e ativa e que hoje representa uma das maiores referências em impressão 3D para qualquer modelo de impressora ou método de impressão. Baseados na licença de

software livre (GNU, General Public License), muitos projetos de impressoras RepRap bastante rudimentares estão disponíveis na internet para pesquisa e desenvolvimento. Entretanto esse tipo de máquina apresenta uma estrutura pouco robusta. Essa característica se deve especialmente ao fato de ela utilizar barras de aço com área de sessão transversal pequena e juntas feitas com o próprio polímero de impressão. Isso torna a estrutura frágil e muito suscetível a vibrações. Porém pelo pioneirismo e pela experiência, muitas informações valiosas foram utilizadas no desenvolvimento desse projeto.



Atualmente, a tecnologia de impressão 3D abrange diversas áreas do conhecimento, lançando mão de uma grande gama de equipamentos e materiais de impressão. Os materiais de uso mais comum ainda são os polímeros termoplásticos, sendo os mais comuns o ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), o PLA (Polylactic Acid), HIPS (High Impact Polystyrene) e Nylon. Entretanto outros materiais já são utilizados em processos de impressão 3D, como metais, cerâmicos, resinas, materiais de construção civil e até mesmo material biológico (ATALA, 2014).

É possível citar uma grande variedade de aplicações atuais dessa tecnologia. A empresa Suéca Koenigsegg apresentou recentemente seu modelo One:1, um veículo cujas peças foram em sua maioria produzidas com diversas técnicas de impressão 3D tanto em metal quanto em polímeros (DAVIES,2014).

Na área da construção civil, já estão sendo utilizadas impressoras que depositam sucessivas camadas de concreto para construir casas de baixo custo a uma velocidade bastante elevada. Atualmente já é possível construir um edifício de 700 metros quadrados em apenas 24 horas utilizando tal equipamento (CROFI, 2014).

Outra área com grande potencial para essa tecnologia é área médica e biológica. Inicialmente utilizada para produzir próteses, já foi registrado com sucesso implantes de titânio de uma pelvis em um paciente britânico (MOORE, 2014) e de uma mandíbula para um paciente belga (DYBUNCIO, 2012), além de uma traqueia plástica em uma criança americana (STEIN, 2014). Essas aplicações se estendem para uso veterinário. Diversas próteses já foram criadas para animais mutilados, como o caso da águia americana que recebeu um bico impresso em 3D depois de ser vítima de um tiro na face (STARR, 2012).

Cientistas na Universidade de Hangzhou Dianzi, na China, foram capazes de imprimir amostras de tecido humano, mais especificamente de fígado e de um tipo de tecido cartilaginoso da orelha humana (QUIGLEY, 2013).

A possibilidade de produção on-site tem interessado também as grandes agências e empresas de exploração espacial. Em setembro de 2014 a empresa Space-X enviou a primeira impressora 3D de gravidade zero para a estação espacial internacional (ISS). Em dezembro do mesmo ano a NASA enviou para os astronautas o projeto em CAD de uma chave inglesa que então a imprimiram. A agência espacial europeia planeja enviar para a estação sua própria impressora portátil em breve (BRABAW, 2015).

Do ponto de vista artístico e do design, a impressão 3D trouxe muitas possibilidades de inovação. Desde 2005, publicações especializadas

começaram a apontar diversas possibilidades de aplicação para essa tecnologia (SÉQUIN, 2005).

A tecnologia tem se mostrado também como uma grande influência nas tendências dos modelos de produção. Manufatura aditiva combinada com computação em nuvem possibilita produção decentralizada e de distribuição geograficamente independente (VANCE, 2011). O grau de customização também é incrementado devido a alta flexibilidade comum desses equipamentos. Um exemplo clássico são os periféricos para gadgets e aparelhos eletrônicos que podem ser facilmente impressos atendendo às necessidades de cada usuário. A empresa finlandesa Nokia liberou os modelos tridimensionais de seus aparelhos para que usuários possam projetar seus acessórios e periféricos customizados, produzindo-os com manufatura aditiva de baixo custo (HARPER, 2013).

A prototipagem rápida tem sido a grande área de interesse para impressoras 3D no mundo. Entretanto, avanços nessa técnica já possibilitam a produção de peças com acabamento satisfatório para comercialização como produto final (HOPKINSON, 2006).

No ambiente acadêmico essa tecnologia pode ser particularmente útil, uma vez que possibilita a concepção de peças não disponíveis no mercado, agilizando assim a produção de protótipos referentes a técnicas ainda em desenvolvimento (BOWMAN, 2012).

Impressoras 3D tem mostrado cada vez mais participação em salas de aula. Especialistas apontam a prototipagem rápida como uma revolução sem precedentes da educação STEM (science, technology, engineering and mathematics) (ANZALONE, 2015). Essa opinião vem não apenas da possibilidade de criar protótipos de forma ágil no ambiente acadêmico, mas também da grande quantidade de projetos de equipamentos científicos open-source de alta qualidade disponibilizados por laboratórios ao redor do mundo (ANZALONE, 2013).

Outro uso que deve ser comentado é a produção de armas impressas em 3D. Em 2012 o grupo americano Defense Distributed liberaram o projeto de uma arma feita de plástico com capacidade para uma bala que poderia ser

baixado e produzido em uma impressora 3D de uso doméstico. Em 2013 esse mesmo grupo liberou os projetos de um rifle semelhante ao AR-15 e de outro semelhante à uma AK-47, ambos feitos de plástico, capazes de disparar mais de 600 vezes antes de apresentarem falhas. Pouco tempo depois o departamento de estado dos Estados Unidos ordenou a retirada dos arquivos da página do grupo. Essas armas foram enquadradas sob a legislação de armamentos nos Estados Unidos, entretanto um memorando liberado pela mesma instituição declara que: “Os grandes avanços nas técnicas de impressão 3D e na disponibilidade de arquivos de projetos de componentes de armamentos, juntamente com a dificuldade na regulação do compartilhamento dos mesmos, podem tornar este um problema real a segurança pública” e que “A legislação proposta para banir armas impressas em 3D pode inibir, mas não prevenir completamente sua produção. O controle de compartilhamento desses arquivos digitais é tão difícil quanto o controle de qualquer outro tipo de arquivo, seja de música, filme ou software” (WINTER, 2013).

Análise de requisitos - Objetivos

Os objetivos básicos da máquina são:

- Ser capaz de imprimir com cada bico separadamente, com apenas um plástico, como uma impressora comum de uma única extrusora.
- Deve ser capaz de imprimir com os dois bicos juntos, seja para imprimir um objeto com duas cores ou com materiais diferentes.
- Deve ser capaz de se comunicar com o software host em qualquer computador.
- Deve poder ser utilizada por um usuário com pouco conhecimento técnico sobre o assunto.
- Deve conseguir produzir objetos com volume de pelo menos 200 x 200 x 200 mm.
- Deve ser capaz de imprimir com os polímeros mais comuns disponíveis no mercado (ABS, PLA, HIPS, PVA e Nylon).

Metodologia

Uma máquina de impressão 3D pode ser construída de diversas formas. Estruturas open-source diferentes já foram propostas e verificadas eficientes empiricamente por muitos entusiastas dessa tecnologia. Entretanto, a forma escolhida foi através de um sistema de 3 eixos cartesianos, com uma carenagem fechada, sendo que o eixo X se move ao longo do eixo Y, e o eixo Z se move de forma independente. Como o eixo Z sempre apresenta movimentos muito mais lentos e graduais do que os demais, esse modelo se adequa melhor, uma vez que reduz vibrações no eixo mais sensível. Essa estrutura é comum para equipamentos CNC, e portanto apresenta bastante robustez. Esquemas básicos dos 3 eixos estão ilustrados nas figuras 4, 5 e 6.

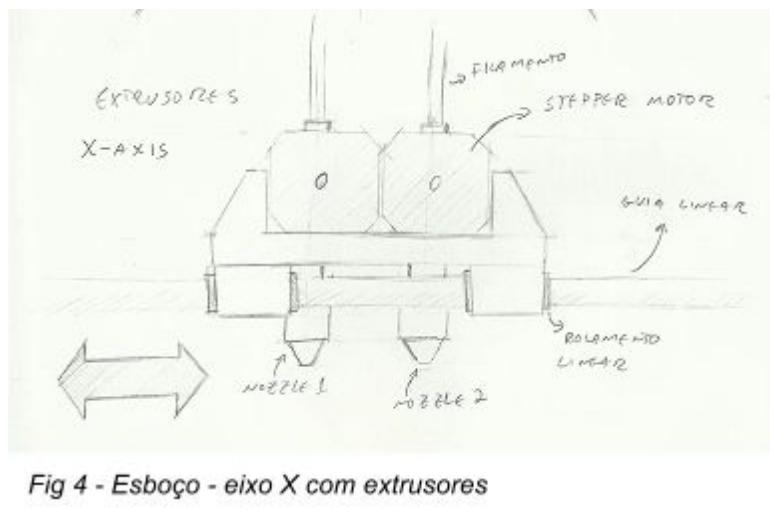


Fig 4 - Esboço - eixo X com extrusores

Os eixos são controlados por 4 motores de passo (dois motores para o eixo y para evitar torção por uma força aplicada em um único extremo) e o movimento de translação é feito utilizando correias sincronizadoras. O movimento do eixo coordenado Z é feito através um fuso simples para maior precisão entre camadas.

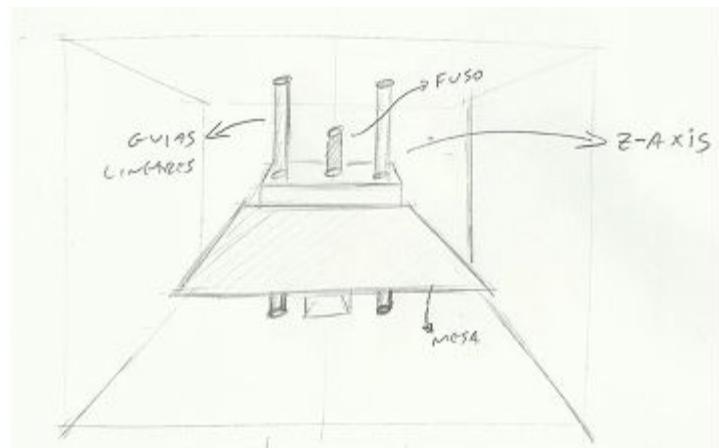


Figura 5 - Esboço - eixo Z

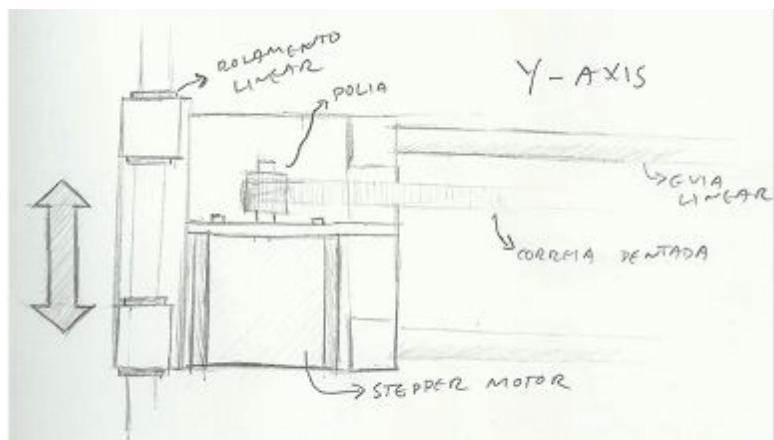


Figura 6 - Esboço - eixo Y

Já os extrusores funcionam com motores de passo com transmissão por rodas de atrito. Essas rodas empurram o filamento em direção ao tubo aquecido, que aumenta a temperatura do polímero, e por consequência diminui sua viscosidade, e posteriormente em direção ao bico extrusor que diminui o diâmetro do filamento de forma que seu tamanho seja pequeno em comparação com as dimensões finais da peça (seu funcionamento pode ser observado na figura 7. O diâmetro de saída varia para cada equipamento mas em geral fica entre 0.2 e 0.5 mm.

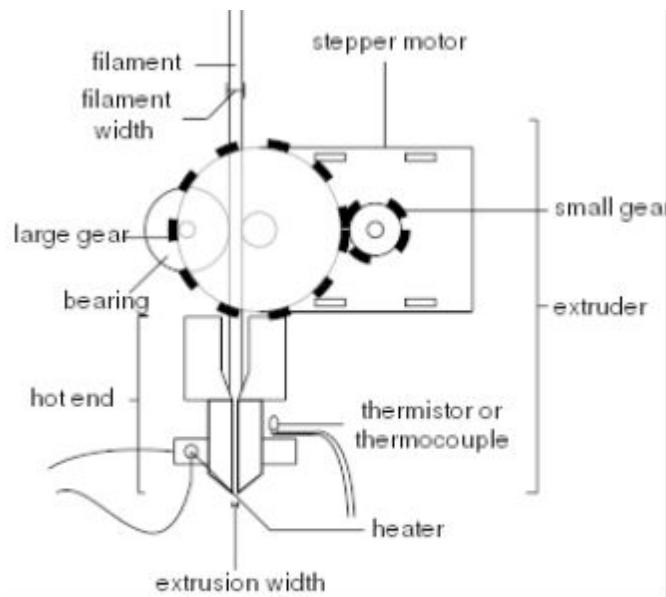


Figura 7 - Esquema de funcionamento da extrusora - Fonte: reprap.org

Os materiais utilizados para cada componente dependem da sua função na operação da máquina. Peças que exigem pouca precisão e resistência mecânicas são feitas de plástico no processo de impressão 3D. Peças que exigem precisão, mas não resistência elevada são feitas de acrílico cortado a laser em uma máquina CNC. E as peças que exigem tanto resistência quanto precisão são feitas de aço e alumínio, embora a maioria dessas são componentes comuns de engenharia e estão disponíveis no mercado, com guias lineares, fusos e rolamentos.

A impressora é controlada via computador utilizando-se um software gerador de código G. Esse software, conhecido como fatiador, divide o modelo em diversas camadas formando curvas semelhantes a curvas de nível, essas curvas são então interpoladas com uma certa resolução e esses pontos e trajetórias, bem como os parâmetros de impressão (como temperatura de extrusão, espessura da camada, etc...) são traduzidos em um algoritmo. O código G é então interpretado por um firmware que roda numa placa microcontrolada na impressora 3D. Atualmente existem diversos softwares fatiadores disponíveis gratuitamente, sendo os principais o Simplify3D, o ReplicatorG e o Cura. Entretanto o fatiador escolhido foi o Slic3r. Devido ao seu

massivo uso com os equipamentos comercializados no Brasil e nos Estados Unidos, a comunidade em torno do desenvolvimento do mesmo é mais presente e atuante, gerando maior compartilhamento de informações e soluções. A imagem a seguir mostra a interface básica do Slic3r. É possível observar que uma grande gama de propriedades de impressão está disponível, o que torna o processo bastante flexível para diversos requisitos de fabricação e geometrias.

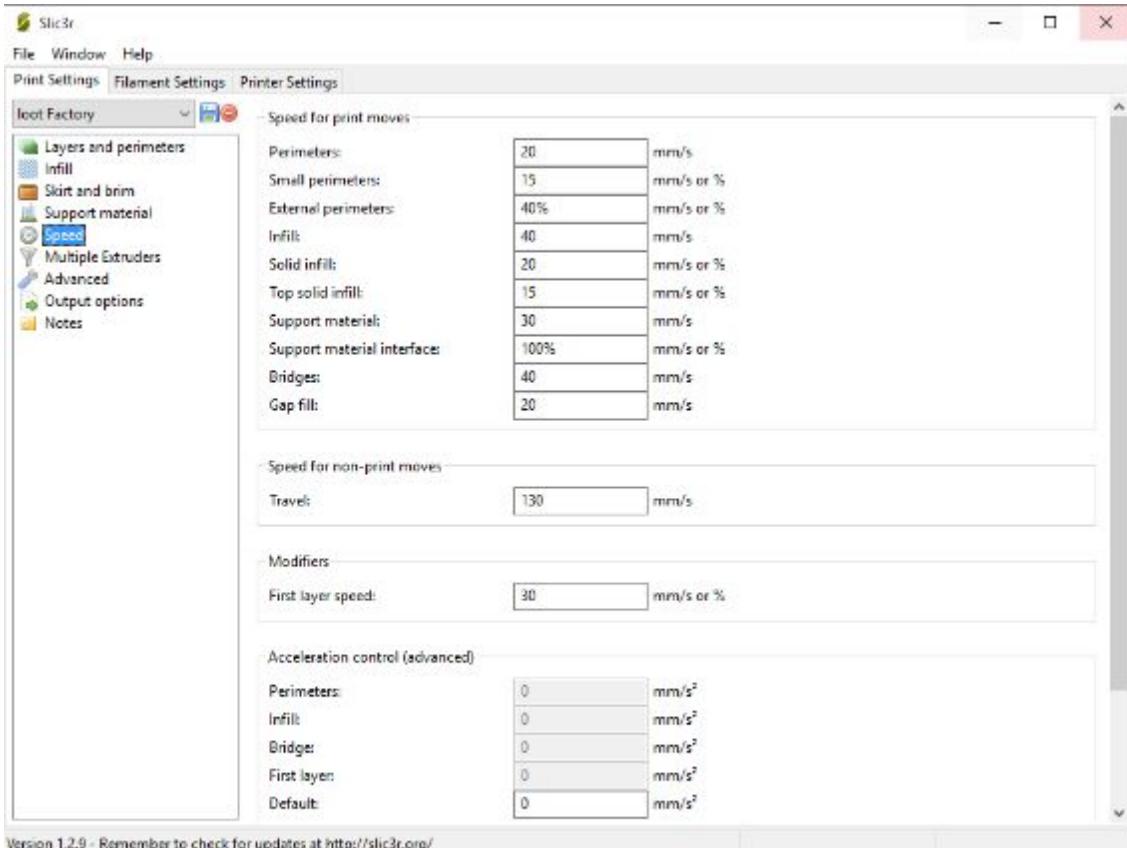


Figura 8 - Interface básica do programa Slic3r- Fonte: imagem própria

Já o software Host escolhido foi o Repetier. Essa decisão foi tomada devido a diversos fatores, sendo os principais: Integração com o fatiador. O Repetier possui integração nativa com o fatiador e portanto não exige adaptações na interface; O Repetier é um programa open-source, isso possibilita que adaptações sejam feitas no código fonte de forma que ele melhor se integre com o projeto; O grupo que oferece esse programa criou também uma versão compatível do firmware que irá rodar no microcontrolador, portanto pouca adaptação será necessária entre ambos os softwares. A

interface básica do Repetier pode ser observada na imagem a seguir, com as principais ferramentas dispostas de forma intuitiva para o usuário.

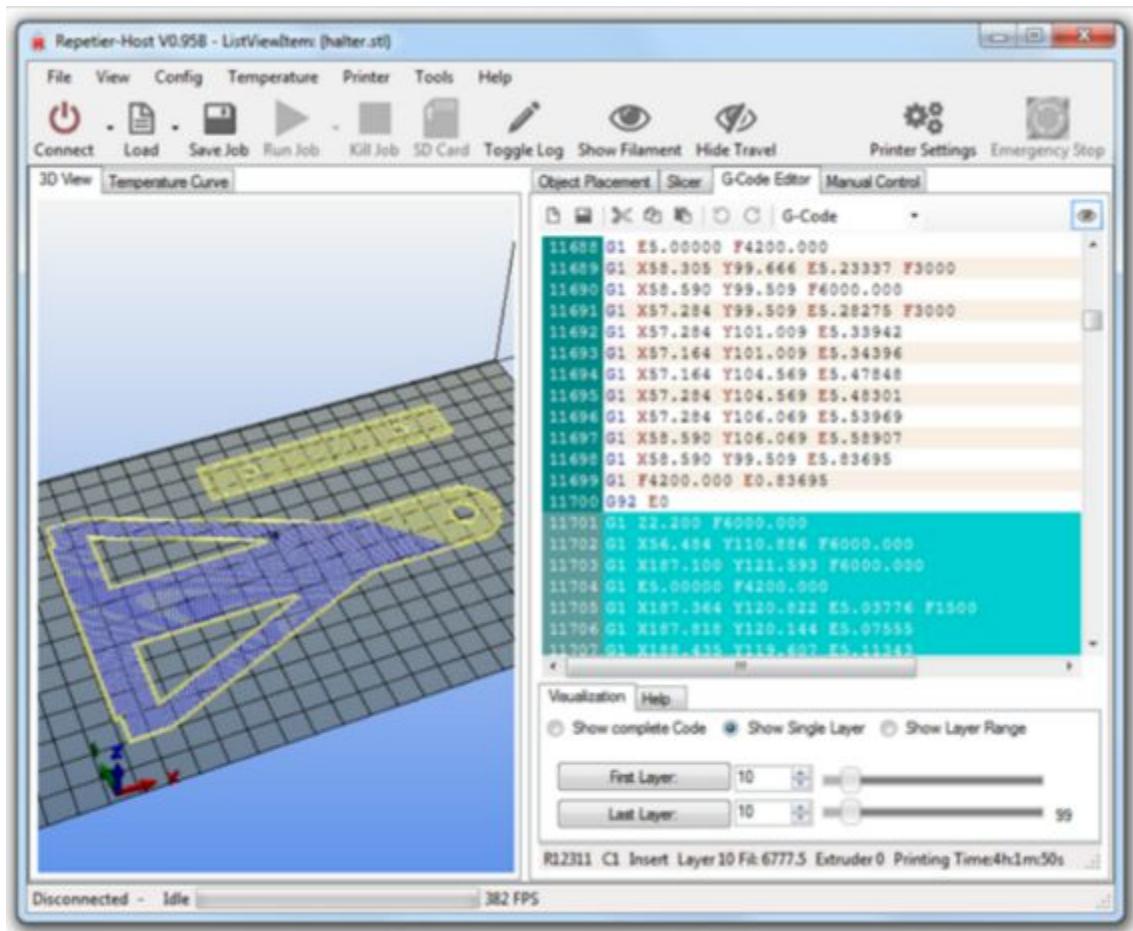


Figura 9 - Interface básica do programa Repetier Host - Fonte: imagem própria

Para fazer a interface entre o computador e a máquina é utilizado um circuito eletrônico composto por alguns componentes. O componente principal é o microcontrolador, responsável por rodar o firmware e processar o código G, transformando-o em sinais para os atuadores da máquina. Para executar essa tarefa foi escolhido o Arduino Mega 2560, com microcontrolador ATmega2560. Ligado no arduino estará o shield RAMPS 1.4, uma placa de interface entre o microcontrolador e os drivers de potência para os motores de passo. A RAMPS possui também MOSFETs para controlar o aquecimento da mesa aquecida e dos extrusores. Para os drivers de potência foi escolhido o modelo da POLOLU. Esses drivers possuem potência suficiente para a maior parte dos motores de passo utilizados nas impressoras 3D tradicionais, e são facilmente integrados na placa RAMPS, não exigindo portanto adaptações. Para os

motores de passo escolhidos (padrão nema 17) os drivers da POLOLU oferecem bastante segurança uma vez que a corrente máxima fornecida pelos drivers (2.5A) é o dobro da corrente máxima exigida pelos motores (1.2A).

Para alimentar a máquina foi utilizada uma fonte bivolt de 360W com saída de 12v e corrente máxima de 30A. A imagem abaixo ilustra em um diagrama de blocos os componentes básicos de eletrônica.

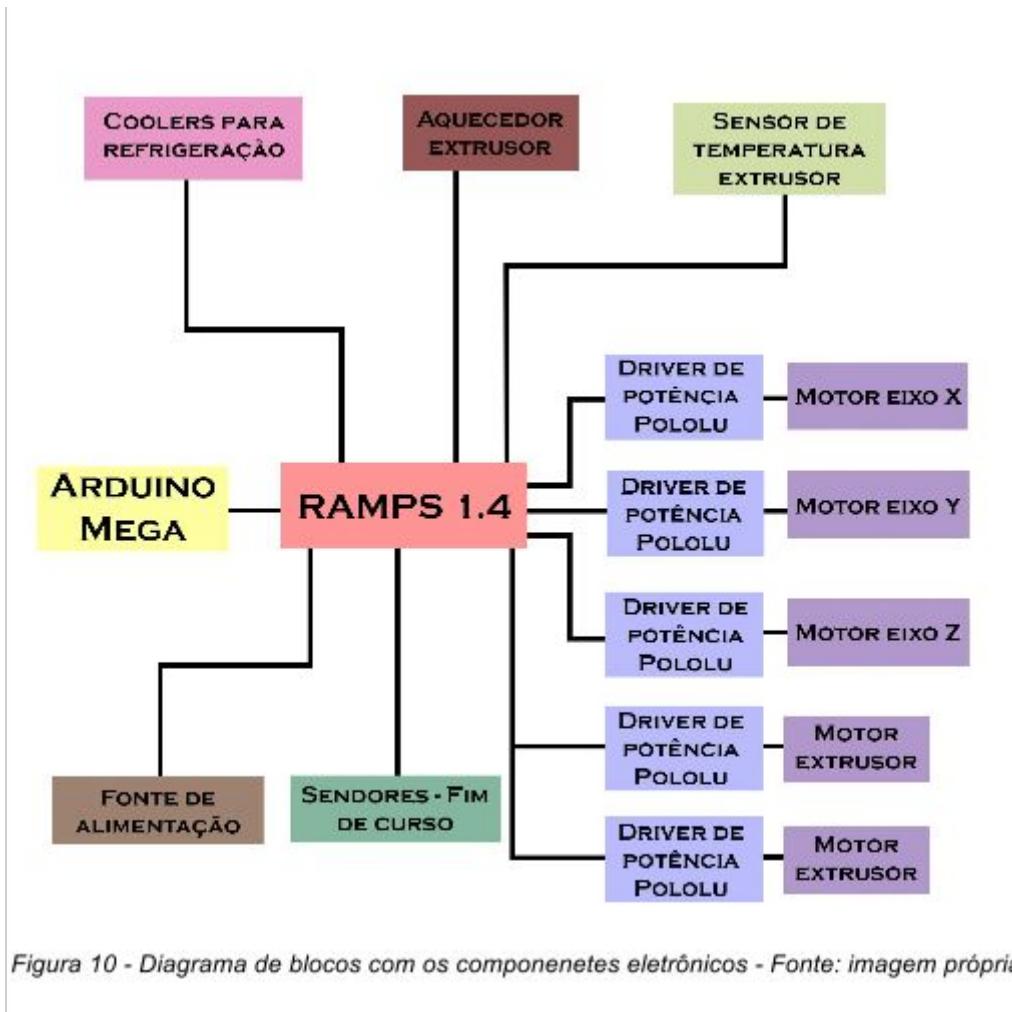


Figura 10 - Diagrama de blocos com os componentes eletrônicos - Fonte: imagem própria

É comum que, durante uma impressão de grandes dimensões, haja empenamento da peça em sua base ou nas camadas mais próximas a mesa de impressão. Isso ocorre devido à diferença de temperatura da camada que está sendo depositada em relação às camadas inferiores. Uma vez que o polímero é depositado, ele perde calor rapidamente para o ambiente, fazendo com que suas dimensões, antes dilatadas, diminuam. Com esse processo ocorrendo repetidas vezes enquanto a máquina deposita as diversas camadas,

existe uma tendência de formação de deformações e irregularidades no corpo da peça, especialmente próximo a base. Afim de evitar tal fenômeno, é foi incorporado no projeto uma mesa aquecida que mantém as camadas inferiores em temperaturas próximas a 130°C, o que diminui a diferença de temperatura entre o polímero recem depositado e o restante da peça e consequentemente a variação das dimesões ao longo do processo de impressão. Outra possível solução é a utilização de uma base de material polimérico chamada *raft*. Para tanto utiliza-se a própria extrusora para imprimir uma camada extra na base da peça afim de aumentar a área de contato da mesma com a mesa de impressão. Isso aumenta a adesão das camadas inferiores e reduz sua deformação conforme o processo se desenrola. Na imagem abaixo é possível observar a utilização de uma camada extra na base da peça com o objetivo de aumentar sua adesão à mesa aquecida.



Figura 11 - Camada de *raft* para aumentar a área de aderência - Fonte: wiki.cac.washington.edu

Um equipamento de impressão 3D reúne todos os elementos de uma máquina de comando numérico genérica. Dessa forma passa desde o estudo de desenvolvimento de software, conhecimentos de eletrônica e experiência de construção mecânica. Além disso o desenvolvimento de sistemas open source

sempre contribuem com o avanço dessa tecnologia como um todo incitando iniciativas de desenvolvimento coletivo.

Recursos necessários

Os recursos necessário para a construção da máquina são numerosos, entretanto a maior parte deles está disponível a venda no mercado. Como se trata de uma máquina de comando numérico, os atuadores e as peças dos eixos coordenados são de uso comum na industria e portanto são de fácil acesso.

Outro fator que colabora na obtenção das peças é o tamanho da comunidade de impressoras 3D Open-source. Por contar com muitos entusiastas, essa área possui muitos fabricantes de componentes tanto mecânicos quanto eletro-eletrônicos, que executam vendas em varejo.

Uma listagem dos componentes principais foi feita e sua disponibilidade no mercado foi verificada. Deu-se prioridade para os componentes que precisaram ser importados, afim de evitar problemas com prazos de entrega.

Assim que as peças importadas mais importantes (extrusores, motores e rolamentos lineares) chegaram, deu-se início ao processo de desenvolvimento da máquina. A prioridade passou então a ser as peças que precisavam ser fabricadas.

Após a montagem mecânica foi feita a compra dos materiais elétricos, sua instalação foi simples uma vez que todos os compnêntes principais já estava montados e todas as conexões já haviam sido previstas no projeto mecânico.

Planejamento do Projeto

As tarefas do projeto foram divididas em quatro grandes áreas para melhor planejamento do mesmo. Elas estão relacionadas com os componentes da máquina e com a ordem cronológica do desenvolvimento. São elas:

- Componentes mecânicos.
- Componentes elétrico-eletrônicos.
- Elementos de software.
- Documentação e monografia.

As tarefas para cada área já foram divididas e alocadas ao longo do período de trabalho de dois semestres.

Por se tratar de um mecanismo complexo com diversas peças, foi criado também um sistema de código para as mesmas. Dessa forma facilitando tanto o projeto quanto futuras manutenções no equipamento. O código atribuído para cada peça tem relação com sua posição na máquina e com sua função. Isso facilita a reproduzibilidade do mecanismo, seja para reposição de partes ou para a construção de uma nova impressora.

Os componentes mecânicos foram projetados inicialmente com a ajuda de softwares de CAD/CAM. Como a fabricação de algumas peças é cara (especialmente as cortadas a laser) e afim de evitar possíveis erros que só seriam percebidos no momento da montagem, foi utilizado um software de montagem virtual (o modelo da montagem pode ser observado na figura 8). Dessa forma foi possível verificar o encaixe das peças antes de serem fabricadas.

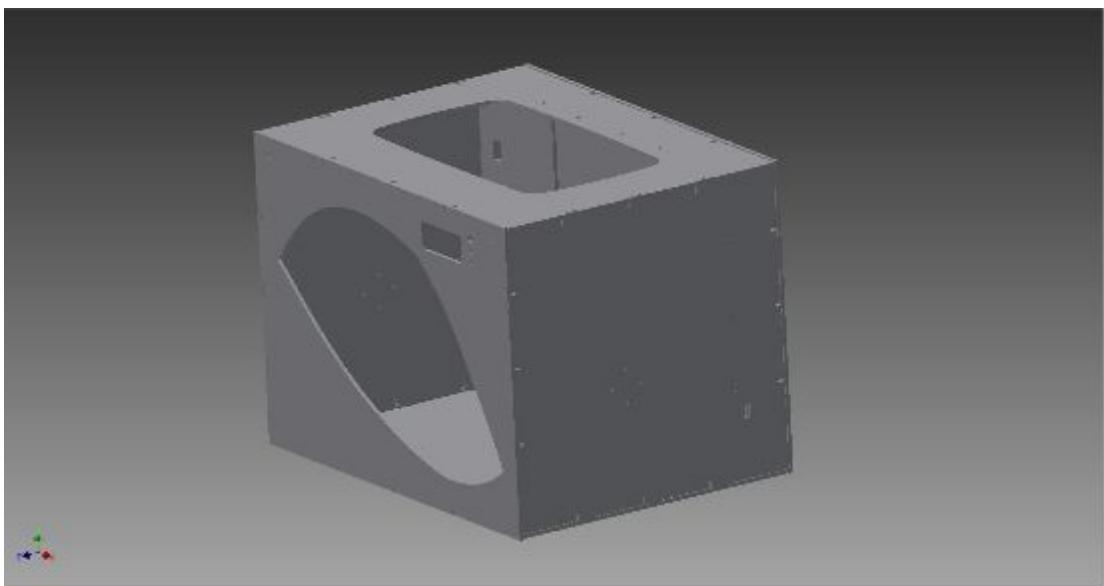


Figura 12 - *Modelo virtual de montagem - Teste de encaixes e conexões*

Após a montagem, os componentes eletrônicos foram instalados. Todas as conexões já haviam sido previstas no processo de desenho mecânico, o que reduziu bastante a carga de trabalho associada a essa etapa.

O software Firmware (que roda na placa microcontroladora) foi configurado e instalado na máquina. A primeira conexão foi estabelecida entre o equipamento e o computador. Inicou-se então o processo de configuração e calibragem to software e dos componentes mecânicos, bem como os testes e as adaptações aos pequenos problemas encontrados durante os mesmos.

Sumário Executivo

Algumas reuniões foram feitas para que o orientador pudesse acompanhar o progresso do projeto. Na primeira reunião, executada no fim do ano de 2014, criou-se diretrizes básicas para o projeto. O escopo do projeto foi determinado e algumas idéias simples para o leiaute da estrutura foram levantadas.

Desde o início do ano de 2015 três reuniões já foram realizadas. Na primeira (realizada no início de março) foi decidido o modelo estrutural da máquina. No período entre a primeira e a segunda reunião, uma lista preliminar

de compras foi levantada, com o intuito de acelerar o processo de importação de algumas peças

Na segunda reunião, realizada em meados de março, foi discutido alguns procedimentos de fabricação e montagem, bem como foram trazidos à tona diversos conselhos com relação a redação do relatório intermediário e da monografia como um todo.

Na terceira reunião, realizada no início de abril, foram acertados detalhes com relação à parte escrita. Dúvidas com relação a referência bibliográfica e quanto a formatação do texto foram sanadas. Os parâmetros principais do projeto já estavam decididos ou em fase final de discussão. O sistema de interface computador-máquina foi aprovado pelo orientador nesse encontro. Os métodos de fabricação das peças também já foram discutidos e foram considerados viáveis.

Em meados de junho e nas férias de julho as peças relacionadas aos eixos coordenados foram projetadas e fabricadas. Devido à alta flexibilidade dos métodos de fabricação digital como impressão 3D e corte a laser, peças que apresentaram erros de projeto e fabricação puderam ser rapidamente repostas. Entretanto, de modo geral, a estratégia de desenho e modelagem tridimensional seguida da montagem digital mostrou-se muito eficiente para a finalidade de evitar erros despercebidos de projeto.

Os eixos coordenados dependem da carenagem para serem fixados e para serem testados. Por essa razão, o desenho das peças feitas de acrílico foi o foco do mês de agosto. Devido a necessidade de que algumas partes fossem encaixadas por interferência, antes da fabricação das peças da carenagem de fato algumas peças de teste foram cortadas para verificação da precisão e das tolerâncias. Todo esse processo de testes, planejamento e simulações de montagem teve um resultado bastante significativo: todas as peças foram cortadas em uma única vez e a montagem foi perfeita, com todos os componentes mecânicos e elétricos previstos.

Poucos ajustes foram necessários, a maioria teve relação com incrementos na facilidade de uso e manutenção da máquina. Para tanto houve o cuidado no projeto de peças que podem ser repostas facilmente.

A seguir a montagem do sistema elétrico foi o foco. Primeiramente os componentes eletrônicos foram instalados, em meados do mês de setembro o restante dos insumos elétricos foram comprados e usados para integrar os sistemas principais da máquina. Os atuadores já instalados na montagem mecânica foram testados e integrados com a interface computador-máquina. Os primeiros testes de conectividade do equipamento foram realizados e bem sucedidos.

Na ultima semana do mês de setembro os primeiros testes foram realizados. Embora ainda pouco satisfatórios, está claro que os problemas estão relacionados a problemas de calibração e configuração de software. Esses ajustes ocorreram no decorrer o mês de outubro através de um processo iterativo.

No decorrer do ultimo trimestre de 2015 um cuidado especial foi dispensado à monografia. Testes de impressão foram realizados para determinar as limitações da máquina. Os resultados atenderam os requisitos propostos no início do projeto.

Atualmente a máquina está em operação. Em uma parceria com a empresa holandesa 3D Hubs, mais de 20 projetos de terceiros foram fabricados para as mais diversas finalidades, desde utensílios domésticos, protótipos de produtos e objetos de cena para filmagem.

Resultados

Os primeiros testes foram feitos assim que a montagem foi concluída. A estrutura mecânica da máquina mostrou-se estável e confiável em todos os testes. Entretanto os primeiros testes mostraram graves problemas no sistema de extrusão. Devido a uma pequena distância entre o bico de extrusão e o tubo de TEFLON e a pressão exercida pelo extrusor o polímero já viscoso era forçado contra as paredes do tubo e preenchia o espaço formado entre o bico e o tubo. Isso aumentava consideravelmente a fricção gerada pelo polímero viscoso de tal maneira que as rodas de atrito do extrusor passavam a patinar

sobre o filamento, impedindo assim a extrusão do mesmo. Na imagem abaixo é possível observar a posição do plástico acumulado na situação descrita.

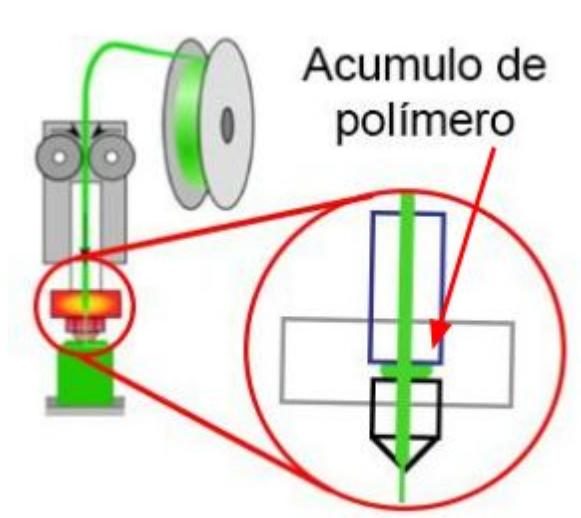


Figura 13 - Acumulo de Polímero no espaço entre o Bico e o tubo de TEFLON

Outro problema gerado pelo mecanismo de extrusão inicial foi a condução de calor entre o bico aquecido e o corpo do extrusor. Como diversos componentes estão fixos no corpo do extrusor, como os próprios motores de passo tratores e o sistema eletrônico de controle de temperatura, é fundamental que, embora ligados mecanicamente ao bico aquecido, eles permaneçam em uma temperatura de operação próxima à ambiente. A geometria da primeira versão do tubo extrusor gerava uma condução alta para o corpo do mesmo, fazendo com que a superfície externa do motor de passo atingisse 90°C. Ambos os problemas descritos anteriormente levaram a decisão de substituir completamente a estrutura de etrusão. Foi adotado um novo extrusor com tubos paletados (A variação de temperatura devido a estrutura paletada pode ser observada na imagem abaixo) para evitar condução de calor e com ajuste de pressão entre o tubo e o bico de extrusão afim de evitar a formação de espaços entre os dois.

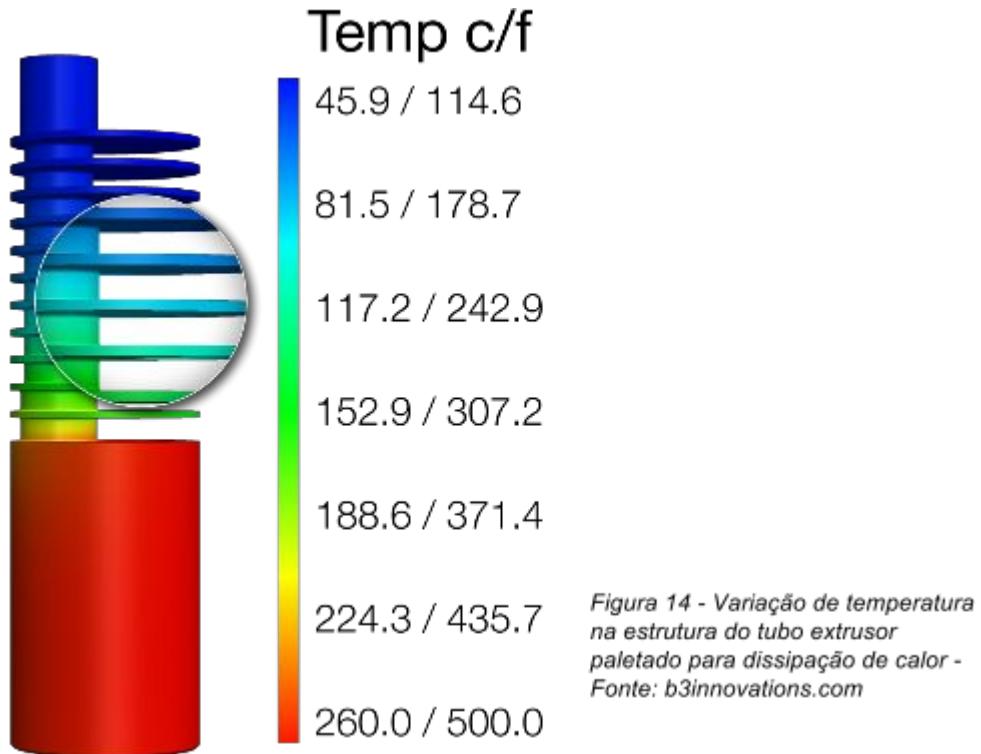


Figura 14 - Variação de temperatura na estrutura do tubo extrusor paletado para dissipação de calor -
Fonte: b3innovations.com

Após a substituição do extrusor os testes e ajustes foram realizados sem maiores problemas. Pequenos ajustes de software e hardware foram necessários, mas nenhuma grande alteração estrutural foi feita.

Desde o término do projeto a máquina está em operação produzindo peças com um e dois extrusores. A imagem abaixo mostra a máquina no momento em que este relatório é escrito.



Figura 15 - Imagem da máquina já em operação

Em parceria com uma empresa holandesa chamada 3D Hubs, a máquina está sendo usada para produzir protótipos e modelos de terceiros. Desde o término do projeto, mais de 30 peças já foram produzidas, com geometrias e dimensões bastante variadas, mostrando que a flexibilidade e a agilidade desejadas foram alcançadas. Abaixo é possível observar algumas peças produzidas em parceria com a 3D Hubs.



Figura 16 - Modelos em duas cores



Figura 17 - Suporte para Smartphone impresso em 3D



Figura 18 - Componentes mecânicos impressos

Com o objetivo de transformar esse projeto em um produto, eu formei com mais dois colegas uma equipe e juntos submetemos meu projeto para participar do AWC (Academic Working Capital) do Instituto TIM. Após o desenvolvimento tanto de aspectos técnicos quanto de modelo de negócio, já estamos na terceira versão da máquina, e temos um produto com potencial de aceitação no mercado.

Um pequeno manual de operação

Desde o princípio o objetivo na construção dessa máquina era produzir um equipamento facilmente operável por qualquer usuário com um mínimo de conhecimento de informática e de modelagem tridimensional. Esse objetivo foi alcançado. A operação dessa máquina exige apenas alguns passos simples que serão descritos a seguir.

A partir de um modelo tridimensional em formato .stl (stereolithography), a maior parte do procedimento de impressão se divide em dois momentos: Ajuste da máquina e criação do código G no computador. Antes de mais nada a máquina deve estar conectada à rede elétrica e ligada ao computador via USB. Para conectar o software da máquina ao software Repetier no

computador basta pressionar o botão conectar no canto superior esquerdo da interface do Repetier.

Para ajustar a máquina basta utilizar a aba de *controle manual* no Repetier Host, levando a mesa para a posição zero com o botão de *Home Z*, a altura dos bicos de impressão deve ficar a uma distância de aproximadamente 0.3mm dos bicos extrusores. Para esse ajuste pode-se utilizar a espessura de um cartão de visitas padrão como referência para a distância desejada. Caso a distância esteja maior ou menor do que a descrita acima, basta utilizar o parafuso de ajuste ilustrado na figura abaixo para aumentar ou reduzir a distância de origem do eixo Z. A cada novo ajuste no parafuso deve-se testar a distância entre os bicos e a mesa através do botão de *Home Z* (que pode ser visualizado na imagem abaixo).

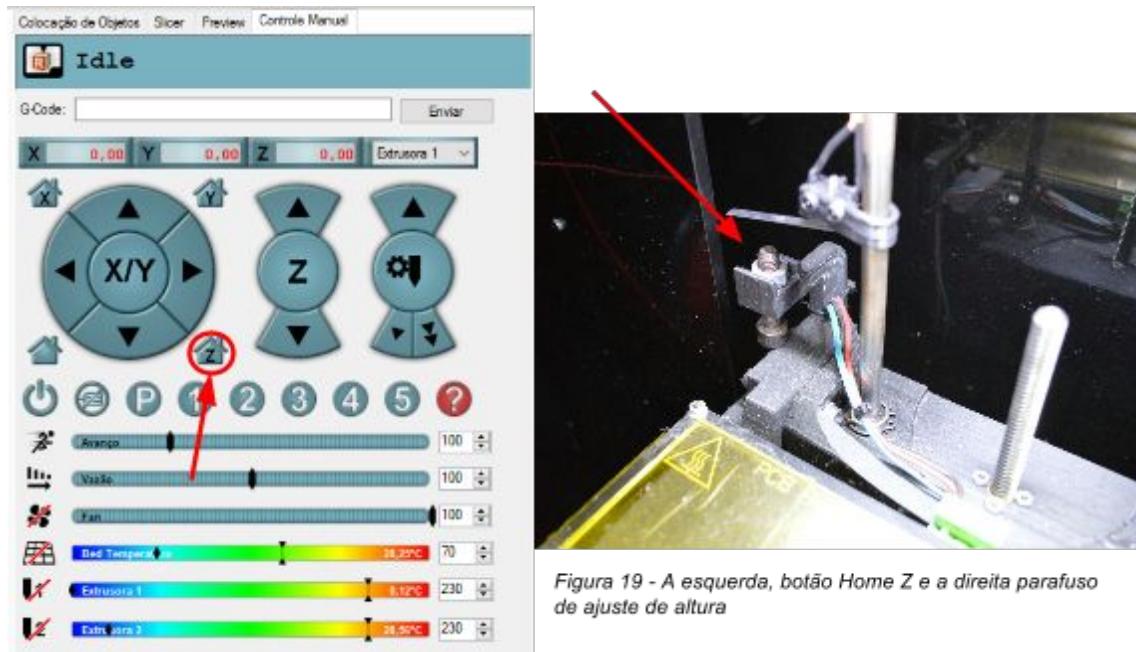


Figura 19 - A esquerda, botão *Home Z* e a direita parafuso de ajuste de altura

Após o ajuste da mesa, basta abrir ou simplesmente arrastar o arquivo do modelo 3D na área de trabalho do repetier. Após ajustar a escala e a orientação de impressão nos botões superiores da aba *Colocação de Objetos*, basta clicar no botão *Slice com Slic3r* na aba *Slicer*. Esse comando faz o fatiamento e gera o código G a ser executado pela máquina. Após esse processo basta iniciar a impressão pressionando o botão *executar* na parte superior da interface do Repetier. Esses atalhos podem ser observados na imagem a seguir.

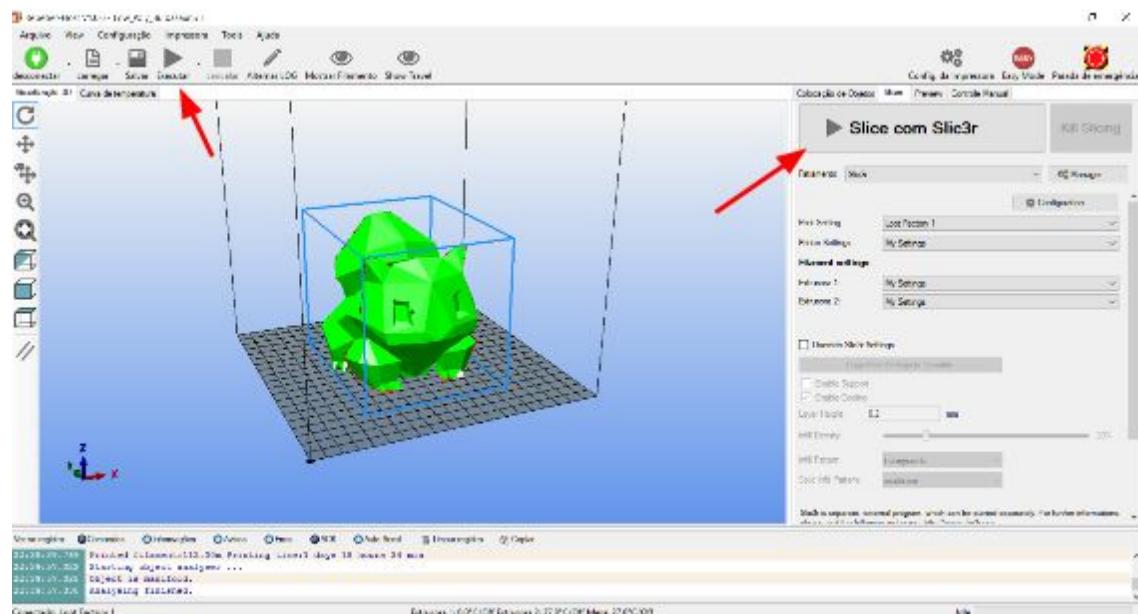


Figura 20 - Interface do Repetier - Slice e Executar

Alguns procedimentos de manutenção são recomendados para garantir a qualidade de impressão e aumentar a vida útil do equipamento. É comum que após diversos ciclos de impressão a mesa aquecida fique desalinhada em relação ao plano X-Y, isso se deve em geral a deformações causadas pela mal utilização do equipamento e por movimentação da máquina para limpeza ou mudança de local. Para alinhar a mesa, basta escolher posicionar um dos bicos de impressão próximo à um dos cantos da mesa (a cerca de 20mm do canto) e regular a altura como descrito anteriormente. Repete-se então o mesmo processo nos quatro cantos da mesa aquecida, mas ajustando os parafusos localizados nas respectivas extremidades ao invés do parafuso de ajuste de altura padrão.

Com tempo de uso é normal que o revestimento da mesa aquecida se deteriore e comece a descolar. É importante evitar que os bicos aquecidos entrem em contato com a mesa aquecida diretamente, e portanto o revestimento de Kapton (revestimento polimérico de coloração amarela) deve ser substituído. Esse tipo de fita adesiva, de uso comum em sistemas térmicos, pode ser facilmente adquirido em lojas online ou algumas lojas de material de construção. Para sua aplicação basta retirar a mesa aquecida soltando-se os quatro parafusos de alinhamento nos extremos da mesa e soltar

o cabo de potência localizado abaixo da mesma. O revestimento deve ser aplicado evitando-se a formação de bolhas e dobras.

De acordo com dados do fabricante os rolamentos lineares são pré-lubrificados com graxa de alta performance LGEP2. Esse tipo de material em geral dispensa relubrificação pois o tempo de vida útil do equipamento é menor do que o tempo de relubrificação ideal teórico. Entretanto, caso o equipamento apresente barulhos ou vibrações inesperadas, recomenda-se a aplicação de óleo lubrificante. O tipo de lubrificante mais adequado depende do fabricante e pode ser encontrado nos catálogos dos principais fornecedores de lubrificantes do mercado, em geral para uso industrial em equipamentos de usinagem e de automação.

Para substituição dos rolos de filamento basta aquecer o bico extrusor na aba *Controle Manual* até a temperatura de extrusão, retirar a trava do extrusor (marcada na imagem a seguir) no topo do extrusor e trocar o filamento antigo pelo atual, não esquecendo de encaixar novamente a trava do extrusor ao final do processo.

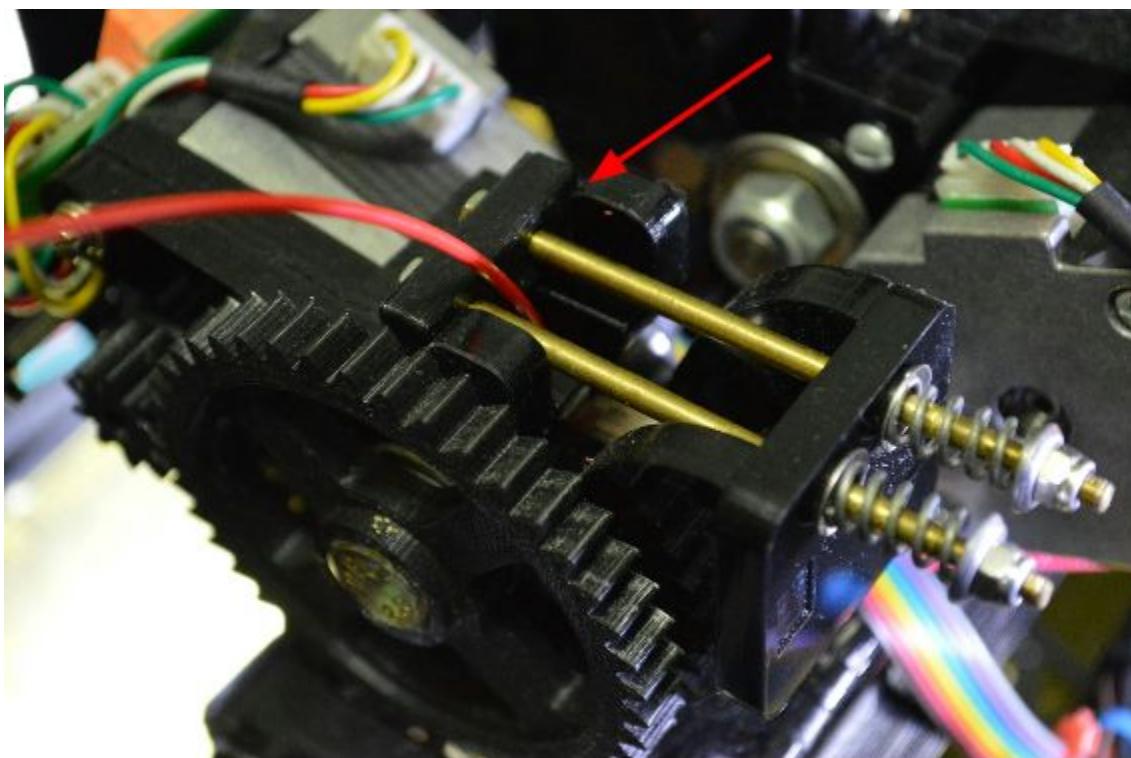


Figura 21 - Trava do extrusor

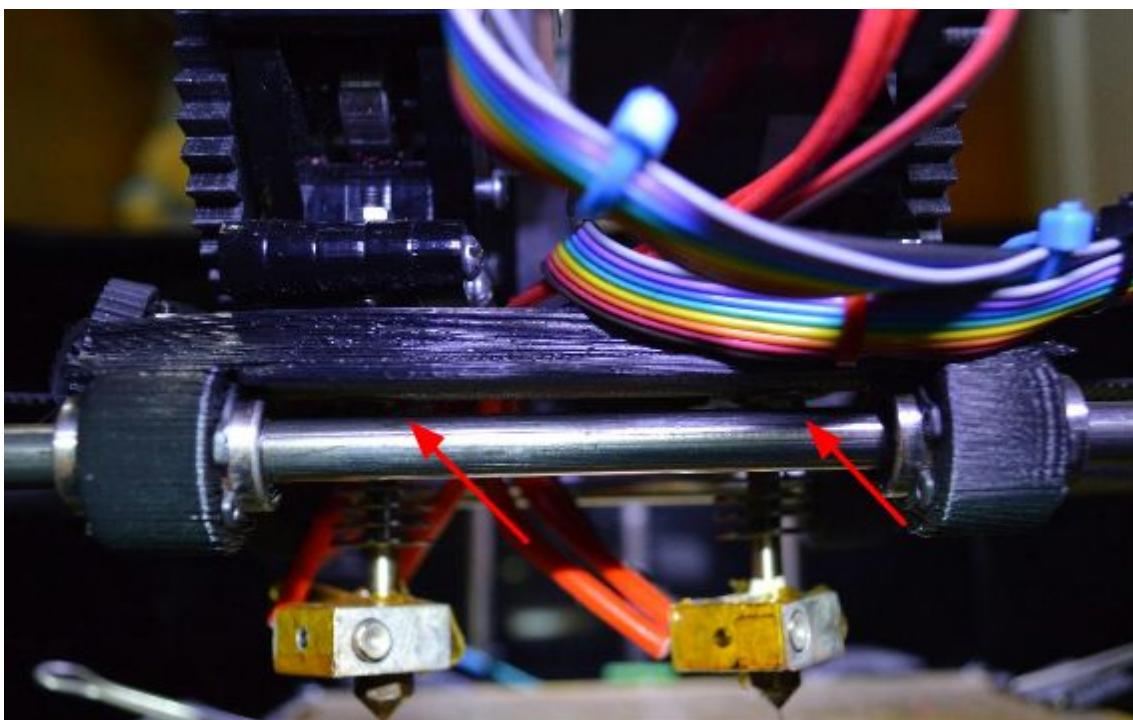


Figura 22 - Parafusos para nivelamento dos bicos

Conclusão

O objetivo desse projeto era construir uma máquina de impressão 3D de deposição de polímeros a quente. O processo de desenvolvimento passou por todas as etapas, desde a concepção da idéia, projeto, fabricação mecânica, montagem, calibragem e testes. O resultado foi uma máquina funcional que atende aos requisitos propostos no inicio do trabalho.

Além do que foi proposto, a máquina possui volume de impressão maior do que a maior parte dos modelos comerciais.

Foi possível observar desde o princípio do projeto que existia grande potencial na expansão deste trabalho para o desenvolvimento de um produto. Aproveitando-se de tal oportunidade, criamos um equipamento com potencial de comercialização, tomando cuidado com o acabamento e acessibilidade que usuários finais poderiam esperar de uma impressora 3D comercial. Entretanto, um estudo de viabilidade de mercado precisou ser feito, bem como a estruturação de um modelo de negócio. Inspirado pelos resultados obtidos e pelo incentivo de todos do Projeto ABRA e do Professor Celso M. Furukawa, o projeto foi inscrito no programa AWC (Academic Working Capital) do Instituto TIM. Esse projeto tem como objetivos transformar trabalhos de conclusão em produtos viáveis e educar seus autores em empreendedores com visão de negócio mais apurada. Estamos atualmente na fase final de construção de um segundo protótipo, ainda melhor adaptado à usuários finais com pouca ou nenhuma experiência com esse tipo de equipamento.

Referência Bibliográfica

ANZALONE, G; PEARCE, J. M; SCHELLY, C.; WIJNEN, B. 2015. Open-source 3-D printing Technologies for education: Bringing Additive Manufacturing to the Classroom. *Journal of Visual Languages & Computing*.

ANZALONE, G; FARIA, R. P; PEARCE, J. M; ZHANG, C. 2013. Open-Source 3D-Printable Optics Equipment. *Journal of Visual Languages & Computing*.

ATALA, Anthony; MURPHY, Sean; 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology* 32, p.779 - 785. publicado em 5 de agosto de 2014

BARNATT, Christopher. 3D Printing, The Next Industrial Revolution, primeira edição. Amazon, 2013. 276 p.

BOWMAN, R. W ; COOPER, G. J ; CRONIN, L ; KITSON, P. J ; RICHMOND, C. J ; SYMES, M. D ; RICHMOND, C. J ; VIILBRANDT, T ; YAN, J; Integrated 3D-printed reactionware for chemical synthesis and analysis. 2012. *Nature Chemistry* **4** (5): Pag. 349–354

BRABAW, Kasandra. Europe's 1st Zero-Gravity 3D Printer Headed for Space. 30 de janeiro de 2015. Disponível em:

<http://www.space.com/28418-european-3d-printer-in-space.html> Data de acesso: 10 de abril de 2015

BUBACK RepRap. Data: 19 de Julho de 2014. Acesso em 20 de março de 2015, disponível em RepRap.org:
http://reprap.org/wiki/Main_Page

CANESSA, Enrique; FONDA, Carlo; ZENNARO, Marco; Low Cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development, primeira edição, 2013. 202 p.

Croffi, Flávio. Impressora 3D gigante pode construir uma casa em 24 horas. Disponível em:
<<http://www.baboo.com.br/hardware/hardware-tecnologia/impressora-3d-gigante-pode-construir-uma-casa-em-24-horas/>> Data de acesso: 09/Abr/2015

DAVIES, Alex - A swedish automaker is using 3D printing to make the world's fastest car. 28 de fevereiro de 2014. Disponivel em:
<http://www.businessinsider.com/koenigsegg-one1-comes-with-3d-printed-parts-2014-2> Data de acesso: 10 de abril de 2015

DEVIJVER, S. RepRap – Build your own 3D Printer (An Introduction). Disponível em: <<http://reprapbook.appspot.com/>>. 2011. Acesso em 20 de março de 2015

DYBUNCIO, Monica - Woman gets world's first 3D printed jaw transplant
6 de fevereiro de 2012. Disponível em:
<http://www.cbsnews.com/news/woman-gets-worlds-first-3d-printed-jaw-transplant/> Data de acesso: 22 de março de 2015

HARPER, Michael. Nokia Releases 3D Print Files For Lumia Smartphone Cases. Disponível em:
<http://www.redorbit.com/news/technology/1112766604/nokia-releases-3d-print-files-for-lumia-smartphone-cases/> Data de acesso: 20 de março de 2015

HOPKINSON, N & Dickens, 'Emerging Rapid Manufacturing Processes', in Rapid Manufacturing; An industrial revolution for the digital age. 2006. Wiley & Sons Ltd, Chichester, W. Sussex

KIRA, 3ders - 3D hubs releases 3D printing trend report for november 2014. 20 de novembro de 2014.
Acesso em 10 de abril de 2015, disponível em 3ders.org:
<http://www.3ders.org/articles/20141120-3d-hubs-releases-3d-printing-trend-report-for-november-2014.html>, Data de acesso: 19 de março de 2015

MOORE, Galen. Surgeons have implanted a 3-D-printed pelvis into a U.K. cancer patient. 11 de fevereiro de 2014. Disponível em:
<http://www.fiercemedicaldevices.com/story/surgeons-have-implanted-3-d-printed-pelvis-uk-cancer-patient/2014-02-11> Data de acesso: 24 de março de 2015

NAQUEEF, Fahrис. 3ders. 12 de fevereiro de 2014.
Acesso em 20 de março de 2015, disponível em 3ders.org:
<http://www.3ders.org/> Data de acesso: 19 de março de 2015

QUIGLEY, J. T. Chinese Scientists Are 3D Printing Ears and Livers - With Living Tissue. 15 de Agosto de 2013. Disponível em:

<http://thediplomat.com/2013/08/chinese-scientists-are-3d-printing-ears-and-livers-with-living-tissue/> Data de acesso: 19 de março de 2015

SÉQUIN, H. Carlo. Rapid prototyping: a 3d visualization tool takes on sculpture and mathematical forms. *Communications of the ACM*. Edição de junho de 2005. Pag. 66 - 73.

STEIN, Rob. Doctors Use 3-D printing to Help a Baby Breathe. 17 de março de 2014. Disponível em: <http://www.npr.org/blogs/health/2014/03/17/289042381/doctors-use-3-d-printing-to-help-a-baby-breathe> Data de acesso: 21 de março de 2015

STARR, Benjamin. 3D Printing to the Rescue: Bald Eagle Gets A New Beak. 18 de setembro de 2012. Disponível em: <http://www.visualnews.com/2012/09/18/3d-printing-to-the-rescue-bald-eagle-gets-new-beak/> Data de acesso: 10 de março de 2015

STRATASYS. Acesso em 20 de março de 2015, disponível em stratasys.com: <http://www.stratasys.com/materials>

VANCE, Ashlee. The Wow Factor of 3-D Printing. 12 de janeiro de 2011. Disponível em: http://www.nytimes.com/2011/01/13/technology/personaltech/13basics.html?_r=2 Data de acesso: 13 de março de 2015

WINTER, Jana. Homeland Security bulletin warns 3D-printed guns may be 'Impossible' to stop. 23 de maio de 2013. Disponível em: <http://www.foxnews.com/us/2013/05/23/govt-memo-warns-3d-printed-guns-may-be-impossible-to-stop/> Data de acesso: 20 de março de 2015