

THOMÁS MONTEIRO MARCKA / VÍTOR MATOSINHO MARTINS

MONOGRAFIA PMR2550 IMPRESSORA-3D

São Paulo
2014

THOMÁS MONTEIRO MARCKA / VÍTOR MATOSINHO MARTINS

MONOGRAFIA PMR2550 IMPRESSORA-3D

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

São Paulo
2014

THOMÁS MONTEIRO MARCKA / VÍTOR MATOSINHO MARTINS

MONOGRAFIA PMR2550 IMPRESSORA-3D

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

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Celso Massatoshi Furukawa

São Paulo
2014

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de de 2014

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

, Thomás Monteiro Marcka / Vítor Matosinho Martins
Monografia PMR2550 Impressora-3D / T. M. M. / V. M.
M. -- São Paulo, 2014.

43 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de
Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Impressora 2. Sistemas embutidos 3. Extrusão 4. Motores
de passo I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas
Mecânicos II. t.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos Professores Celso Massatoshi Furukawa e Oswaldo Horikawa, Douglas Santana, Pedro Cardozo de Mello, Fidel Vicente de Paula, José César, Adilson Fernandes Felix Filho, Carlos Alberto de Souza Lima, Raphael Oliveira Ferreira, Victor Valvezan, Denis Okawa, Rafael Meneses de Souza, Lucas Prado, Fabrício Schiavo, Marcelo Borges Alencar de Carvalho, Fillipe Esteves, Benjamin Teng Lin, Maryana Song e à ANP (Agência Nacional de Petróleo).

RESUMO

O objetivo deste projeto é construir uma impressora 3D, com extrusão de plástico a quente, montada com perfis de prototipagem rápida. A monografia é um memorial do projeto e também um passo a passo sobre como montar uma impressora 3D. As seções da monografia estão divididas em: cálculo estrutural das peças (as partes estruturais da máquina são compostas, em sua maioria, de alumínio); usinagem das peças (além das peças de alumínio, temos peças de latão, peças impressas em uma impressora 3D, e algumas peças compradas, tais como rolamentos, correias, motores e outras); montagem das peças (foram quantificadas as peças e todos os insumos necessários ao projeto); a seção da especificação dos motores (o modelo dessa impressora conta com cinco motores de passo, e o cálculo desses motores é apresentado usando a carga nas mesas de impressão e de extrusão como requisitos para o cálculo dos torques); a escolha do hardware (no caso, a plataforma de hardware Arduíno, que é conectada a uma placa de acionamento para os motores. Há também uma interface entre o Arduíno e outros subsistemas da impressora, como por exemplo a conexão com os sensores de fim-de-curso); a adaptação do hardware (o uso de um shield para a placa de acionamento, que não possui padrão Arduino de interfaceamento, para que possa realizar tal interfaceamento); a escolha do software (será utilizado a Repetier-Host, que é um programa de software livre de controle de impressoras 3D. Essa seção trata de como escolher o software adequado e ajustá-lo para se adequar ao sistema); a adaptação do hardware de controle de atuação (o conjunto de hardware utilizado em outras impressoras, disponível como projeto open source, é adaptado para controlar motores de passo com torques mais elevados, dado o maior volume de impressão do equipamento); a configuração do sistema (são vários os parâmetros que devem ser ajustados pelo usuário para a configuração da máquina. Sendo assim, é necessário explicar como escolher os valores mais adequados); a manutenção da máquina (explica-se quais os procedimentos de manutenção, tais como a troca da fita de plástico e as soluções para os problemas que ocorrem com maior frequência). Os desenhos técnicos ilustram quais as peças compõem o equipamento assim como quais são suas respectivas posições na montagem do conjunto. O memorial contém fotos e resultados de testes. Por fim, são citados projetos interessantes de outros autores sobre o tópico.

Palavras-chave: Impressora. Sistemas embutidos. Extrusão. Motores de passo.

ABSTRACT

The goal of this project is to build a 3D printer, with hot plastic extrusion profiles, assembled with rapid prototyping pieces. The monograph is a memorial of the project and also a step-by-step guide on how to assemble a 3D - Printer. The sections of the monograph are divided into: structural calculation of parts (the structural parts of the machine are composed, in their majority, by aluminum); machining of parts (in addition to the aluminum parts, we have brass pieces, parts printed on a 3D printer, and some purchased parts, such as bearings, belts, motors, and others); assembling the parts (were quantified the parts and all the required inputs to the project; the section of the motors's specification (the printer's model has five stepper motors, and the calculation of these engines is presented using the load on tables for printing and extrusion as requirements in order to make the calculation of torques); the hardware choice (in this case, the Arduino hardware platform was chosen, which is connected to a drive plate for the engines. There is also an interface between the Arduino and other subsystems of the printer); The adaptation of the hardware (the drive plate does not have standard Arduino of interfacing, making it necessary to adapt it for this purpose); the choice of software (there are several open source programs for the control of 3D printers. This section explains how to choose the appropriate software and adjust it to suit the system) ; the adaptation of the software (the software used in other printers, available as open source project, is adapted to control stepper motors with higher torques, given the greater volume of the printer) ; The configuration of the system (there are several parameters that must be adjusted by the user to the machine configuration. Therefore, it is necessary to explain how to choose more appropriately these values) ; the maintenance of the machine (explains which are the maintenance procedures, such as the change of plastic tape and the solutions to the problems that occur with greater frequency). Technical drawings illustrate which parts make up the equipment as well as which are their respective positions in the assembly. The memorial contains pictures and results of tests. Finally, are cited interesting projects from other authors on the topic.

Keywords: embedded systems. 3-D Printer. Extrusion. Arduino. Stepper Motor

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Funcionamento da extrusora	11
Figura 2 -	Ilustração dos Locais de Possível Empenamento da Peça	12
Figura 3 -	Ilustração da RepRap Impressora 3D	13
Figura 4 -	Ilustração da Impressora 3D Makerbot Replicator 2	14
Figura 5 -	Ilustração da Impressora 3D Makerbot Thing-O-Matic	14
Figura 6 -	Ilustração da Impressora 3D Metamaquina	15
Figura 7 -	Esboço de concepção da parte mecânica da máquina	18
Figura 8 -	Perfil Bosch	19
Figura 9 -	Protótipo da Impressora	20
Figura 10 -	Placa ATmega 2560	21
Figura 11 -	Ilustração do programa Repetier-Host	22
Figura 12 -	Impressora em Vista isométrica	23
Figura 13 -	Ilustração do Arduino Mega e do driver Pololu	27
Figura 14 -	Ilustração do driver TB6560AHQ	28
Figura 15 -	Ilustração da Pinagem do Driver TB6560AHQ	29
Figura 16 -	Ilustração das Ligações da Placa RAMPS	30
Figura 17 -	Vista Frontal da Impressora	31
Figura 18 -	Vista Lateral da Impressora	33
Figura 19 -	Moeda impressa	34
Figura 20 -	Repetier Controle Manual	35
Figura 21 -	Repetier Configuração	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Tabela de Requisitos de Projeto	17
Tabela 2 -	Tabela dos Motores de Passo	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	10
1.1.1 Extrusora	10
1.1.2 Mesa Aquecida	10
1.2 IMPRESSORAS NO MERCADO	11
1.2.1 RepRap	12
1.2.2 Makerbot	13
1.2.3 Metamaquina	14
1.3 ESTADO DA ARTE	15
2 REQUISITOS DE PROJETO	17
3 MATERIAS E MÉTODOS	20
3.1 FUNCIONAMENTO	20
3.1.1 Repetier	21
3.2 MONTAGEM MECÂNICA	22
3.2.1 Montagem da Impressora	24
3.2.1.1 <i>Desenhos de Conjunto</i>	25
3.3 MONTAGEM ELETRÔNICA	27
3.3.1 Problemas encontrados	28
4 RESULTADOS	31
5 CONCLUSÕES	36
REFERÊNCIAS	37
APÊNDICE A – CALCULOS DE ESFORÇOS SOLICITANTES	39

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D é um processo de prototipagem que anteriormente caracterizava-se pelo seu alto custo e longo tempo de confecção. Hoje reduziu-se a um processo de custo mais baixo e que consiste na definição de um modelo tridimensional, através do uso de ferramentas CAD, além de algumas horas de espera pela confecção da peça projetada. Trata-se de uma forma de tecnologia de fabricação aditiva, onde o modelo tridimensional é criado por sucessivas camadas de material. Oferece aos desenvolvedores de produtos a habilidade de, num simples processo, imprimir partes de alguns materiais com diferentes propriedades físicas e mecânicas. São geralmente mais rápidas, mais poderosas e de operação mais simples do que as outras tecnologias de fabricação aditiva. Tecnologias de impressão avançadas permitem inclusive imitar com precisão quase exata a aparência e funcionalidades dos protótipos dos produtos. Por esse motivo, a impressão 3D é também conhecida como prototipagem rápida. Dentre as tecnologias de funcionamento dessas impressoras, a mais comum é a de extrusão a quente com deposição de material.

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A impressora 3D é um robô cartesiano de três eixos e pode utilizar o material PLA ou ABS como matéria-prima. O material PLA necessita de resfriamento rápido após sair da extrusora, as impressoras que o utilizam tem um cooler acoplado à saída da extrusora.

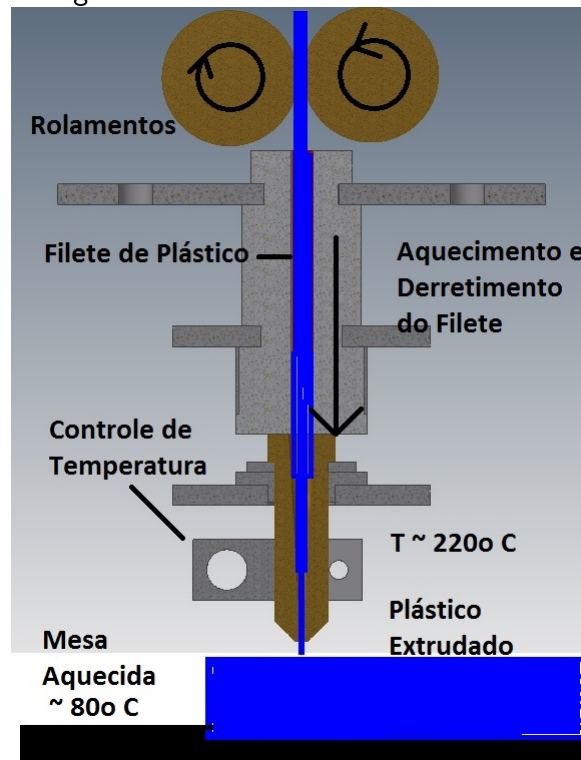
1.1.1 Extrusora

A Figura 1 ilustra o funcionamento do par extrusora-ponta quente. O filamento plástico é alimentado na extrusora, por dois rolamentos paralelos com atuação do motor de passo acoplado. Dentro da extrusora, o ABS é tracionado para baixo, em direção à ponta quente. Lá é aquecido a uma temperatura de aproximadamente 220 graus Celsius, assim, se tornando líquido. Este processo é realizado por um resistor, aquecendo-a pelo efeito Joule. Há também um termistor para controlar sua temperatura. A ponta quente tem formato cilíndrico que contribui para concentrar o calor em sua extremidade inferior.

1.1.2 Mesa Aquecida

O plástico é liberado pela ponta quente, para a mesa térmica, que deve ser mantida a uma temperatura de aproximadamente 85 graus Celsius, para o filamento aderir à mesa e solidificar

Figura 1 - Funcionamento da extrusora



o material. Sua utilidade é prevenir o empenamento da peça. A mesa aquecida melhora a qualidade de impressão, pois previne empenamento da peça devido a existência de gradientes de temperatura na peça. A mesa deve ser revestida com uma fita plástica Kapton, pois o ABS não adere ao metal e essa fita tem boa resistência em altas temperaturas. A impressão é feita em fatias, de baixo para cima.

O aquecimento também melhora a aderência da peça à mesa durante a impressão, e a primeira camada feita é crucial para a deposição das camadas subsequentes.

1.2 IMPRESSORAS NO MERCADO

As principais impressoras de custo acessível ao público geral e que utilizam essa tecnologia são:

- RepRap
- Makerbot
- Metamáquina

Figura 2 - Ilustração dos Locais de Possível Empenamento da Peça

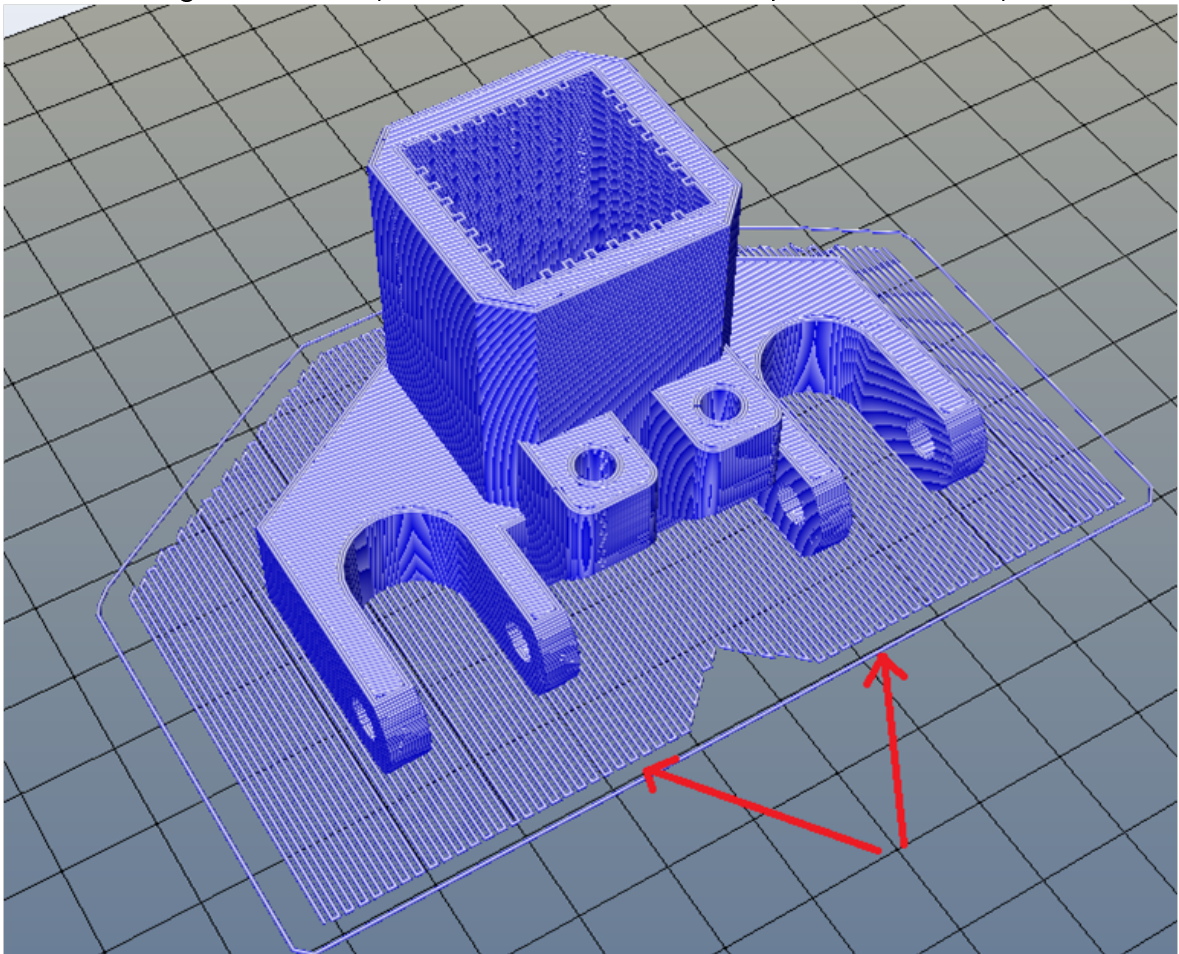


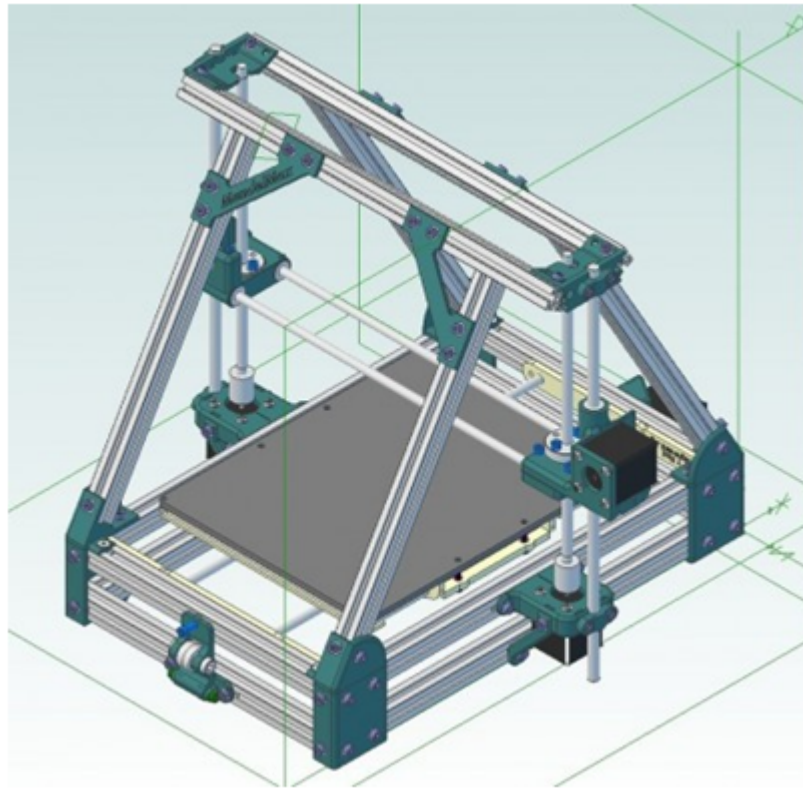
Figura 2 - Disponível em (BOOTINDUSTRIES2014,)

1.2.1 RepRap

O projeto RepRap trata-se de uma iniciativa para desenvolver uma impressora 3D que possa imprimir a maior parte de seus próprios componentes. RepRap (Replicating Rapid Prototyper) é uma das impressoras que, como dito anteriormente, utiliza a FFF (Fused Filament Fabrication) como tecnologia de deposição do material. Tal material é depositado em camadas e pode utilizar filamento de plástico ou fio de metal para produzir uma parte.

Atualmente há RepRaps construídas que podem imprimir usando qualquer tipo de material. A RepRap é um modelo de design aberto e todos os designs publicados estão licenciados sob a licença para software livre (GNU, General Public License, no inglês). A grande idéia da RepRap é a de popularizar o uso e a montagem das impressora 3D, proporcionando ao usuário final a possibilidade de imprimir quaisquer modelos 3D que possa baixar na internet, inclusive aqueles produzidos pela indústria em larga escala, proporcionando ganhos de tempo e economia de dinheiro, além de evitar a poluição gerada durante o transporte das peças.

Figura 3 - Ilustração da RepRap Impressora 3D

Figura 3 - Disponível em: [<http://uattech.com>]

Apesar disso, as RepRaps possuem uma estrutura menos robusta. A plataforma é construída a partir de barras de aço e varetas ligadas por peças de plástico impressos, e algumas empregam mesmo o arame na sua estrutura, o que a torna mais suscetível a problemas de vibração. Em contra-partida, a impressora 3D deste projeto irá contar com barras de alumínio, guias cilíndricas metálicas mais robustas e toda uma estrutura de maior rigidez.

Os módulos de controle da impressora utilizados no projeto serão os mesmos da RepRap: o módulo RAMPS e o Arduino.

1.2.2 Makerbot

A Makerbot atualmente possui estrutura mais robusta. Mas no início era feita quase que totalmente em madeira. A versão inicial, Print-O-Matic2, imprimia em PLA ou ABS. Ela foi concebida a partir do design de uma pequena máquina de CNC, também em madeira. Como vantagens, ela era relativamente barata, tinha bom suporte técnico e era montada com material de relativo baixo custo. Em compensação, ela possuía pequeno envelope de impressão, além de o material de suporte da impressão ser o mesmo da impressão da peça em si. O próximo modelo a ser produzido foi a Replicator, com maior envelope de impressão, dupla extrusora,

Figura 4 - Ilustração da Impressora 3D Makerbot Replicator 2

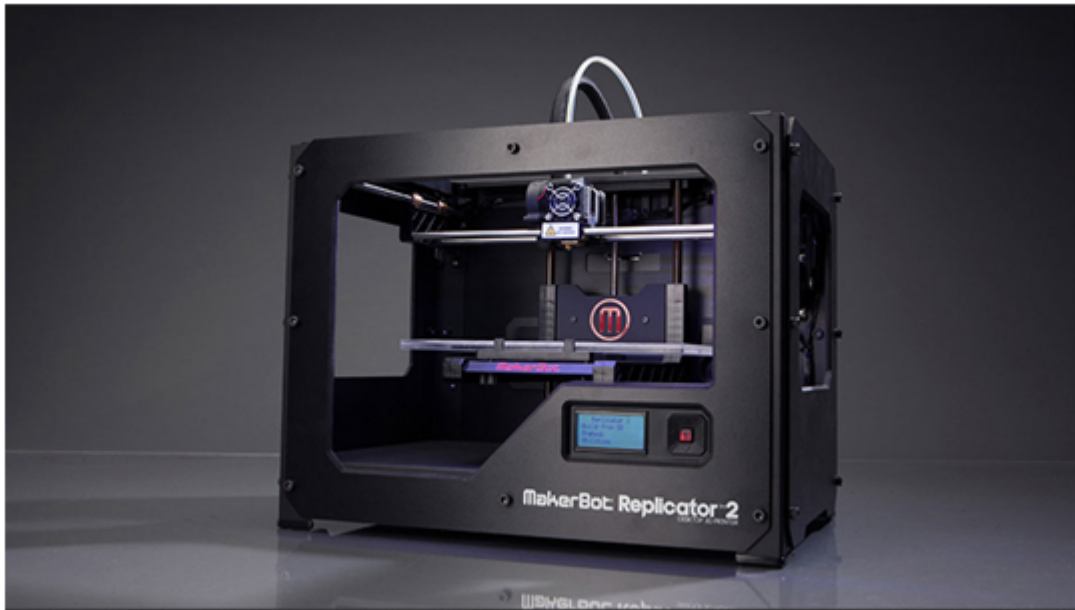


Figura 4 - Disponível em: [<http://store.makerbot.com/replicator2>]

possibilitando uso de dois materiais e visor LCD.

Figura 5 - Ilustração da Impressora 3D Makerbot Thing-O-Matic



Figura 5 - Disponível em: [<http://upload.wikimedia.org>]

1.2.3 Metamaquina

A Metamáquina³ possui estrutura de madeira. É uma alternativa brasileira no mercado de impressoras 3D. As máquinas são operadas por software livre e baseadas em hardware aberto,

Figura 6 - Ilustração da Impressora 3D Metamaquina

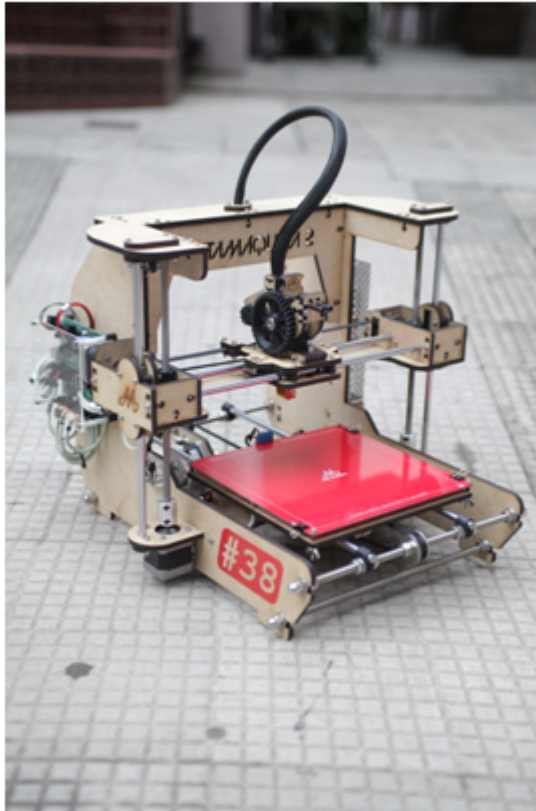


Figura 6 - Disponível em: [<http://metamaquina.com.br>]

isto é, todos os arquivos de projeto estão disponíveis para serem modificados e reproduzidos.

1.3 ESTADO DA ARTE

Como dissemos, atualmente a tecnologia utilizada e com a patente liberada é a de extrusão a quente com deposição de material ("fused deposition modelling"). Neste tópico, serão citadas o estado da arte de impressoras que utilizam outras tecnologias e como elas podem ser utilizadas em outras áreas.

Na construção civil, existe uma impressora 3D de grandes dimensões, capaz de imprimir concreto, que pode ser utilizada para construções a partir de um desenho 3D. Essa tecnologia permite construir uma casa de 700 metros quadrados em 24 horas. A intenção no futuro é de construir colônias em ambientes extraterrestres, visto que não há necessidade de operários na obra (CROFFI, 2014).

Na área da biomedicina, impressoras 3D que estão sendo desenvolvidas poderão criar órgãos sintéticos. A precisão dessa impressora é capaz de fazer objetos com espessura de 500 microns. No começo esses órgãos serão utilizados somente para pesquisa, mas no futuro pode ser utilizado em seres humanos. O texto exemplifica também o uso da impressora 3D para

a confecção de tecidos e órgãos vivos pela deposição de camadas contendo células vivas, uma a uma. A técnica envolve a deposição de um gel (o “biopapel”) que envolve as células, denominadas de “esferóides de bio-tinta”. Camadas adicionais dessa mistura são sobrepostas e, após a dissolução do gel, as camadas de esferóides se unem e é criado o tecido vivo final (BRINO, 2014).

Uma impressora que está sendo desenvolvida é a Mark One. Essa impressora utiliza fibra de carbono em vez de plástico para imprimir as peças, visto que a fibra de carbono é cerca de 15 vezes mais resistente do que o plástico. Essa impressora pode ser usada para peças com maiores requisitos de resistência. Outra vantagem é que ela contará com 2 bicos injetores, podendo fazer peças com 2 tipos de materiais (MARKFORG3D, 2014).

Similarmente, impressoras de ponta de linha podem imprimir metais. Isso possibilita a fabricação de peças mais complexas a um custo mais baixo. Peças desse tipo são bastante confiáveis e já são usadas, por exemplo, em jatos da força aérea britânica (GUARDIAN, 2014).

A fabricante 3Dsystems tem impressoras com até 5 pontas quentes e tem a capacidade de criar peças coloridas, utilizando plásticos de até 5 cores, a sua principal utilização é para criar esculturas e modelos mais realistas (3DSYSTEMS, 2014).

Outra tecnologia, próxima de ser liberada, é a “selective laser sintering” (sinterização a laser seletiva), que consiste de um material em pó e um laser que sinteriza os grãos desse pó para criar a peça. A tecnologia irá baratear o custo de fabricação da impressora e ao mesmo tempo irá aperfeiçoar a qualidade de acabamento das peças impressas (LOU; GROSVENOR, 2014).

Segundo o professor Lee Cronin da Universidade de Glasgow, sua equipe está trabalhando com o objetivo de permitir que remédios sejam impressos, isso possibilitaria o cliente a fabricar seus próprios remédios com diferentes dosagens, permitindo remédios customizáveis que seriam mais efetivos. Essa tecnologia se baseia na compra da tinta, que é a matéria base e a planta, que é a receita (HOLMES, 2014).

2 REQUISITOS DE PROJETO

Devido às características gerais de projeto, estima-se um consumo total para os motores de passo de aproximadamente 60 W (ou 12 W por motor). A potencia dos motores foi calculada do mesmo modo para todos os motores. Para o cálculo, foi utilizado o motor que realizará maior trabalho, o do eixo z, pois é o único que terá que vencer a gravidade. No eixo z existem dois motores e o peso estimado do conjunto mesa, guias e suportes é de 6kg. A velocidade máxima estimada é de 1m/s, pois a impressão é por camadas e a distância entre duas camadas é menor que 1mm. Logo, a velocidade pode ser baixa, utilizando um coeficiente de segurança de 2 para atrito e eventuais perdas.

A mesa aquecida, conforme a especificação do fabricante, tem um consumo de 110 W. O volume de trabalho a que se pretende chegar leva em conta uma área de impressão de 400 mm x 500 mm e uma altura de 300 mm (vide Figura 7). A Tabela 1 sumariza tais requisitos.

Consumo	170 W
Precisão de Movimento	0.5 mm $\pm$ 0.1 mm
Volume de Trabalho	0.06 m ³

Tabela 1 - Tabela de Requisitos de Projeto

Os materiais das peças utilizadas serão alumínio, latão, peças que foram impressas em uma máquina similar à que está sendo construída, e algumas peças serão compradas prontas, como rolamentos, correias, motores e outras. A escolha do alumínio é devido a seu baixo custo e rigidez suficiente para os esforços solicitantes. O latão será utilizado para peças onde os esforços solicitantes são maiores, como na peça de acionamento do eixo z. Os suportes estruturais da máquina serão feitos com perfis Bosch de alumínio (Figura 8), por terem peso menor e melhor rigidez que o perfil quadrado.

Assim, todos os calculos serão feitos com base nesses valores.

Figura 7 - Esboço de concepção da parte mecânica da máquina

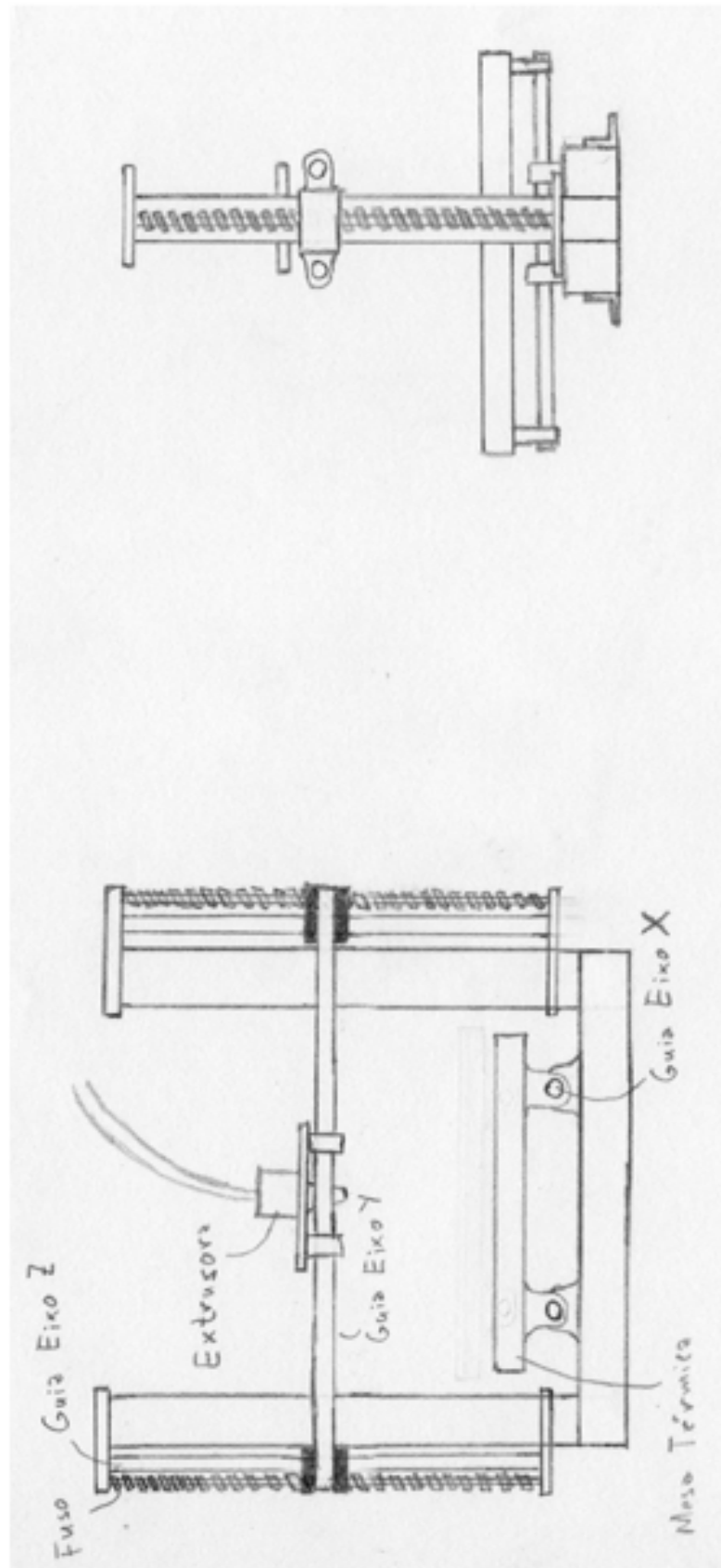


Figura 8 - Perfil Bosch

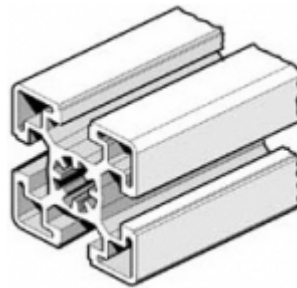


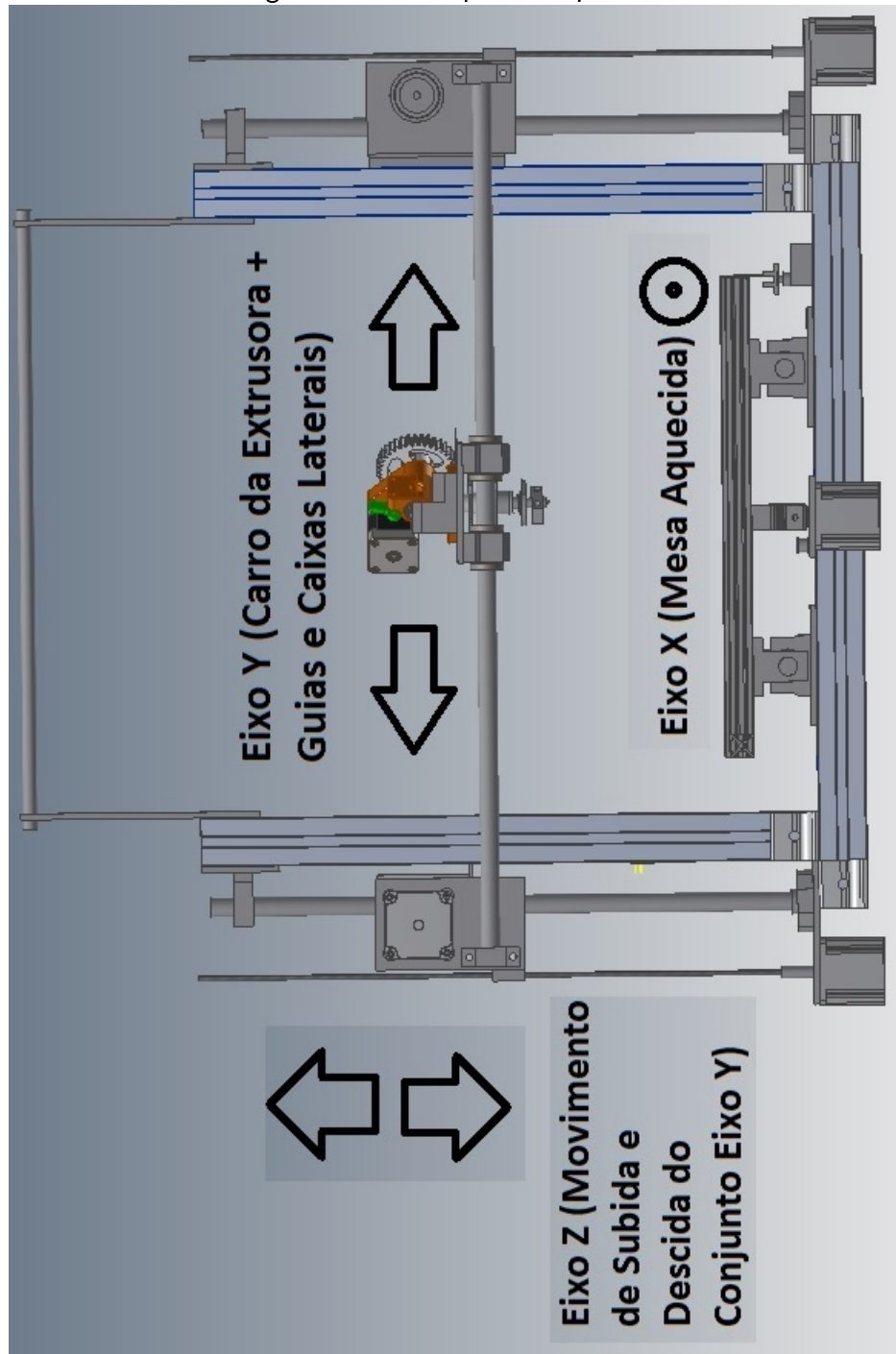
Figura 8 - Disponível em: <https://www.damencnc.com/es/piezas/perfiles-de-aluminio>

3 MATERIAS E MÉTODOS

3.1 FUNCIONAMENTO

Conforme ilustra a Figura 9, a impressora está dividida em 5 subsistemas:

Figura 9 - Protótipo da Impressora



1. Eixo x: contém a mesa aquecida, 1 motor de passo, 1 correia, 2 guias cilíndricas paralelas

- e 1 sensor de fim de curso.
2. Eixo y: responsável pelo movimento longitudinal da extrusora e pela deposição de plástico a quente, este eixo contém 2 motores de passo, 2 guias cilíndricas, a mesa de extrusão, 1 polia para apoio da correia e 1 sensor de fim de curso.
 3. Eixo z: atua na elevação da mesa de extrusão, e portanto, move-se para iniciar uma nova camada de impressão assim que a anterior estiver concluída. Este eixo é formado por 2 motores de passo, 2 parafusos de metro, 2 guias cilíndricas, 2 perfis Bosch de alumínio e peças de acoplamento parafuso-extrusora.
 4. Base: promove a sustentação dos demais subsistemas. É formada por dois perfis de alumínio em paralelo e por pés de fixação ao chão.
 5. Hardware: é o sistema de controle e de alimentação da impressora. É um sistema embarcado formado pela placa Arduino e pela placa RAMPS.

Figura 10 - Placa ATmega 2560

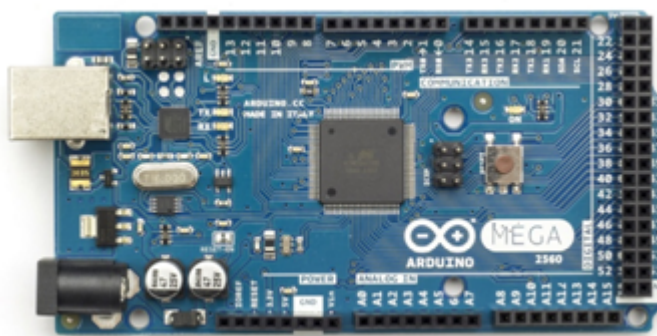


Figura 10 - Disponível em: [<http://arduino.cc>]

3.1.1 Repetier

Existe um programa chamado Repetier, que fatia horizontalmente o desenho em 3D. O formato do desenho deve ser .stl ou .obj⁵. Em seguida, o Repetier cria um código G que definirá a posição da extrusora em relação à mesa, assim, obtendo o formato do objeto impresso. Esse código G é enviado para o Arduino (contido na placa ATmega 2560), que a partir dele, envia o pulso PWM para a placa RAMPS. Essa placa envia o sinal de até um ampère para o driver dos motores, que amplifica o sinal para poder acionar os motores. Para imprimir, por exemplo, um objeto em forma de T, o programa automaticamente calcula e insere no desenho suportes, que serão retirados manualmente no fim.

O software Repetier é muito utilizado no Brasil para fatiar o modelo 3D e enviar o código G correspondente para a impressora. É a interface escolhida para a operação da impressora do projeto.

Figura 11 - Ilustração do programa Repetier-Host

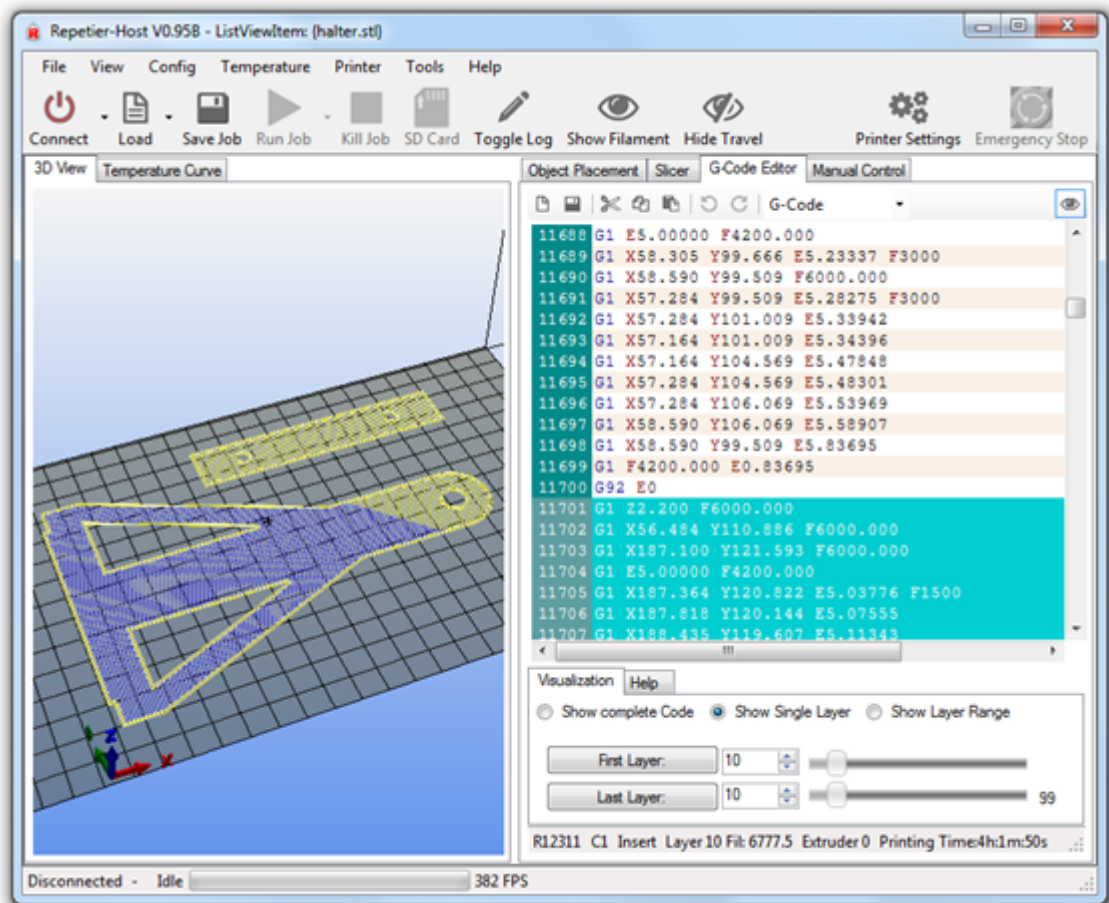


Figura 11 - Disponível em: [<http://www.repetier.com>]

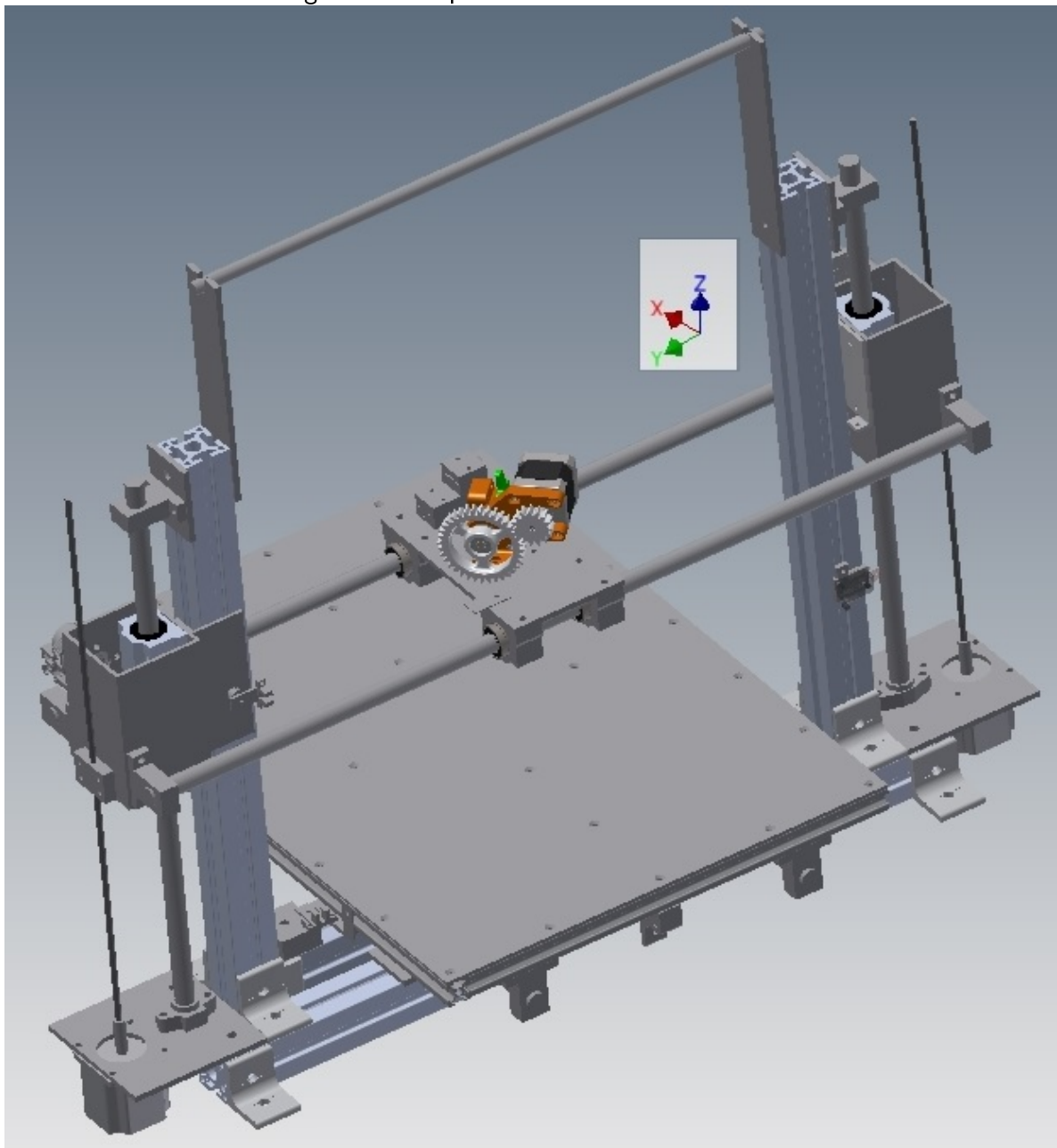
3.2 MONTAGEM MECÂNICA

Nessa seção serão descritas algumas peças da máquina e como elas se unem para formar a impressora. A Figura 12 mostra os componentes projetados e explicados a seguir:

Perfil Bosch.

Esses perfis serão utilizados para a estrutura da máquina. Este perfil possui um alto momento de inércia I , proporcionando maior resistência a momento fletor. O cálculo dos esforços solicitantes no perfil indicará qual material e espessura mais adequadas ao projeto.

Figura 12 - Impressora em Vista isométrica



Cantoneira L.

As cantoneiras serão utilizadas para fixar os perfis entre si e com as outras peças que estejam em contato com eles. A cantoneira escolhida será de fácil acoplamento aos perfis.

Guias.

Os movimentos nas três direções serão efetuados com apoio por guias.

Mancais.

- Os mancais serão de rolamento axial para as guias.

Polias.

- Os eixos x e y terão atuadores com eixos encaixados em polias.

Correias.

As correias MXL025 sincronizadoras, foram escolhidas para o acoplamento ao pinhão do motor.

Esticador da Correia (Eixo Y)

Essa peça será feita em uma impressora 3D em material ABS e é composta de três partes: base, tampa T e tampa simples. Será utilizada para prender a correia que movimenta a estrutura da extrusora no eixo y. A imagem abaixo ilustra o seu funcionamento: a correia é fixada na parte esquerda da base pela tampa em forma de T que é fixada por parafusos e, do lado direito, é possível tensionar a correia antes de parafusar a tampa. A diferença na altura serve para compensar as diferentes dimensões das polias movida e motora.

3.2.1 Montagem da Impressora

- Base: A base da máquina será construída com dois perfis Bosch paralelos, na horizontal, sendo que entre esses perfis, em cada extremidade, haverá um perfil Bosch na vertical, fixado por cantoneiras.
- Guias eixo z: Paralelamente aos perfis verticais, haverá as guias do eixo z e seus fusos, os dois lados serão acionados por motor, que movimentam a estrutura da extrusora para cima e para baixo.
- Estrutura de apoio da extrusora: A estrutura da extrusora é formada por uma chapa retangular de alumínio onde a extrusora (Figura 12) será parafusada. Essa chapa será apoiada em quatro mancais, dois alinhados para uma guia e os outros dois paralelos aos primeiros para a outra guia. Essas guias serão presas de cada lado a um perfil quadrado tubo de aproximadamente 150mm de comprimento, esses tubos serão posicionados na

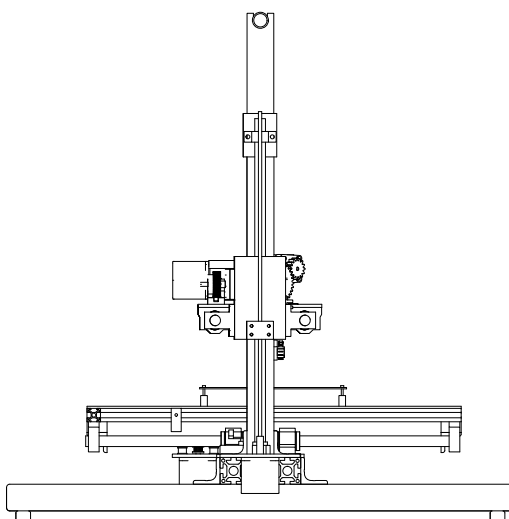
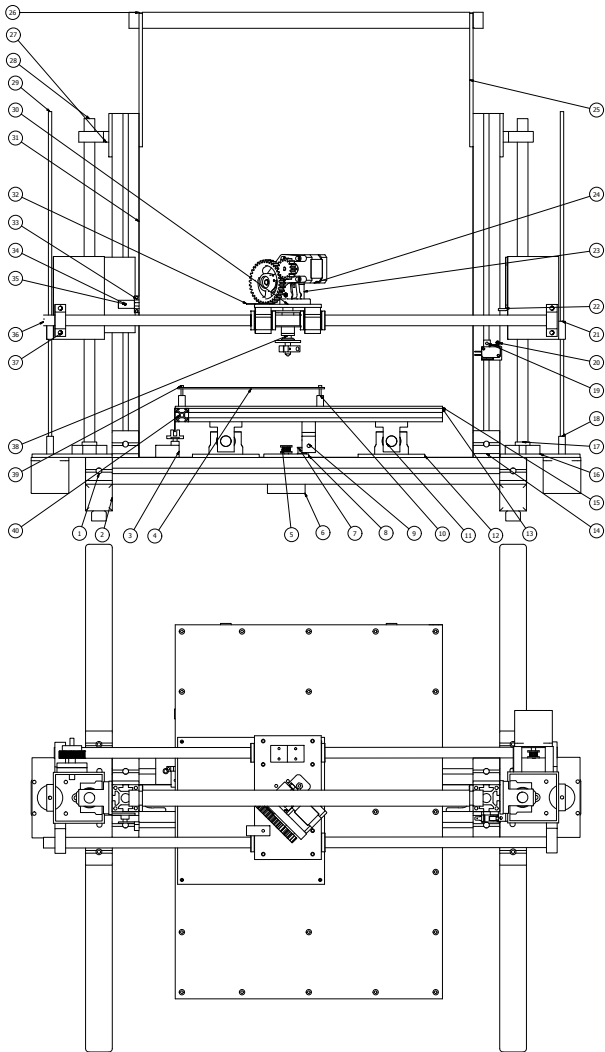
vertical, pois o perfil Bosch vertical da estrutura e a guia vertical passam por dentro dele e o perfil quadrado é acionado pelo fuso através de uma castanha que está fixa a ele.

- Sistema de acionamento: o motor apoiado no perfil quadrado de um lado e uma polia movida do outro, conectados por uma correia que passa pelo motor e pela polia formam o conjunto de acionamento da estrutura da extrusora. A polia é presa no esticador do eixo y que está parafusado na chapa de alumínio.
- Mesa aquecida – eixo x: A mesa aquecida fica sobre uma chapa de alumínio, cuja parte inferior estão fixas pelas extremidades duas guias paralelas. Os mancais dessas guias estão presos nos perfis Bosch horizontais da estrutura, permitindo o movimento no eixo x. Esse movimento é feito por uma correia que é acionada por um motor de passo e é fixa por um esticador do eixo x em cada uma das extremidades da mesa.

3.2.1.1 Desenhos de Conjunto

CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK



LISTA DE PEÇAS		
ITEM	QTD	DESCRIÇÃO
1	2	Base do eixo 1
2	2	Perfil quadrado
3	1	Base fim de curso eixo 1
4	1	Motor de passo
5	2	Parafuso
6	4	Motor de passo
7	2	Base para motor
8	1	Base motor
9	18	Parafusos
10	4	Base para eixo 2
11	7	Eixo eixo 1
12	4	Base para eixo 2
13	3	Parafuso Hex
14	12	Parafusos Hex
15	1	Base
16	2	Base motor eixo 2
17	2	Base para eixo 2
18	2	Parafuso
19	1	Base fim de curso eixo 2
20	1	Parafuso Hex
21	2	Parafuso Hex
22	1	Base para eixo 2
23	1	Base para eixo 2
24	1	Base para eixo 2
25	2	Base para eixo 2
26	1	Base para eixo 2
27	18	Parafusos
28	2	Base eixo 2
29	2	Base eixo 2
30	1	Base para eixo 2
31	2	Base para eixo 2
32	2	Base para eixo 2
33	2	Base para eixo 2
34	2	Base para eixo 2
35	1	Base para eixo 2
36	2	Base para eixo 2
37	2	Base para eixo 2
38	1	Base para eixo 2
39	4	Parafuso Hex
40	2	Parafuso Hex

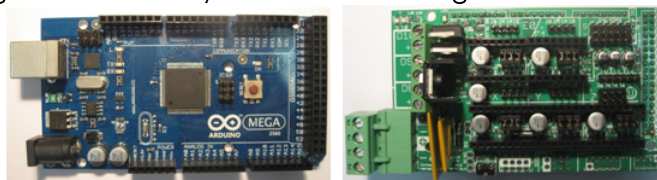
Desenho em	Formato de	Projeto	Revista	AutoCAD
AutoCAD	A3	Projeto	Revista	AutoCAD
Desenho em	Formato de	Projeto	Revista	AutoCAD
AutoCAD	A3	Projeto	Revista	AutoCAD

3.3 MONTAGEM ELETRÔNICA

São necessários cinco atuadores para a movimentação dos eixos x, y e z da impressora. Antes de iniciar a montagem eletrônica, percebeu-se que a estrutura mecânica necessitaria de motores mais potentes do que os usuais em uma aplicação de impressora 3-D. Foram selecionados para essa função motores de passo que variam na faixa de 1.2 A a 2.5 A. Para o controle desses atuadores, é necessária uma interface eletrônica que traduza o correspondente código G (gerado pela Slic3r e *Repetier-Host*) para sinais elétricos que comandem cada motor de passo. Para isso, foi escolhido um conjunto de placas similares ao sistema da impressora RepRap, descrita no capítulo de introdução. Os principais subsistemas eletrônicos são:

- Arduino: há vários tipos de Arduino disponíveis no mercado. Dentre eles, há o Arduino Uno, e o próprio Arduino Mega (Figura 13, à esquerda).
- RAMPS: é o shield de interface entre o Arduino e a placa de controle dos atuadores (Figura 13, à direita).
- Driver TB6560AHQ: Suporta correntes maiores do que a RAMPS, sendo portanto o driver de controle de atuação (Figura 14).

Figura 13 - Ilustração do Arduino Mega e do driver Pololu



Os motores possuem suas características descritas na Tabela 2.

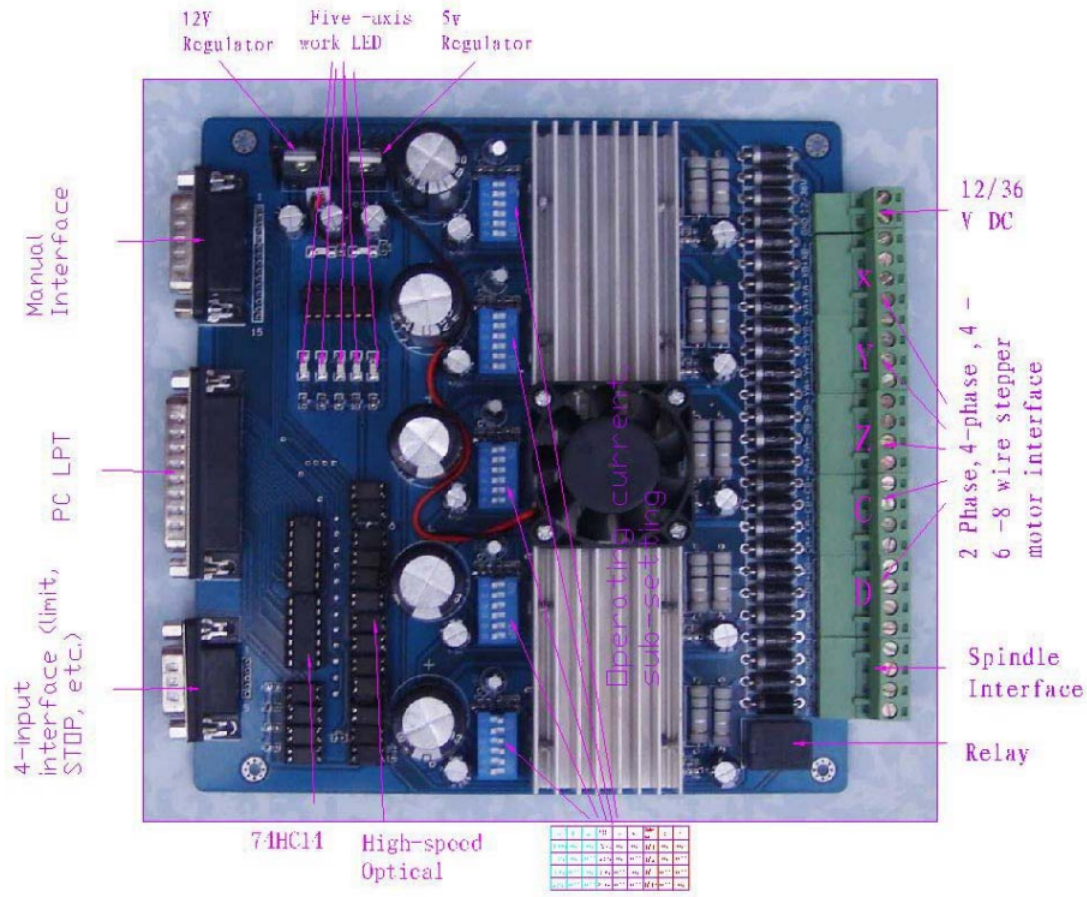
Modelo	NEMA 23 (x4) e NEMA 17 (x1)
Corrente	2.3 A (NEMA 23) e 2.5 A (NEMA 17)
Tensão	12 V
Resolução	200 Passos/Volta

Tabela 2 - Tabela dos Motores de Passo

O sistema utiliza a plataforma ArduinoMega, no qual devem ser carregados os programas padrão de impressoras deste tipo. O sistema é dividido em duas partes: A primeira é uma placa RAMPS (*RepRapArduinoMegaPololuShield*), a qual recebe pela conexão PC - ArduinoMega o código G gerado pelos softwares específicos da impressora 3D. A interface de potência é

feita através da placa RAMPS, e os sinais de controle são enviados aos motores pela placa controladora de 5 eixos baseada no micro controlador Toshiba TB6560AHQ.

Figura 14 - Ilustração do driver TB6560AHQ



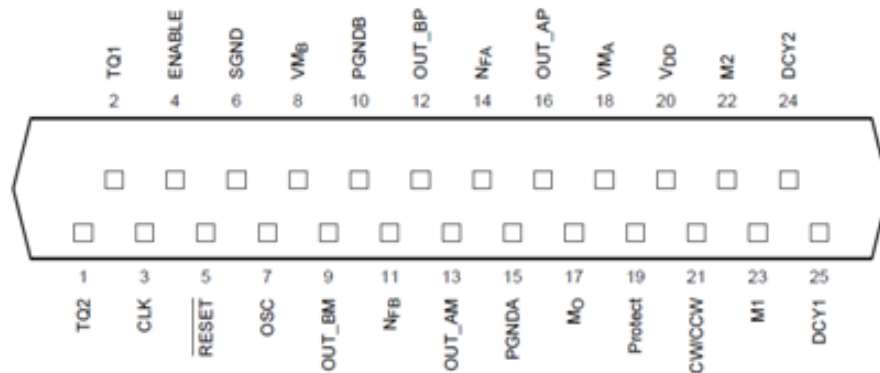
3.3.1 Problemas encontrados

Inicialmente havia o problema de a placa não possuir datasheets ou pinagem, então tais sinais foram manualmente testados e mapeados. Foram levantados os pinos da conexão DB25, existente na controladora, que conectavam-se aos pinos ENABLE, DIR e STEP (Figura 15). São estas as três variáveis importantes para um motor de passo:

- ENABLE: habilitação dos motores
- DIR: direção de rotação (horário ou anti-horário)
- STEP: pulsos dados, para que ocorram os passos

O driver é conectado à placa RAMPS através de um cabo DB-25, o mesmo usado nas portas paralelas de impressora e no momento está sendo soldado o contato entre os sinais

Figura 15 - Ilustração da Pinagem do Driver TB6560AHQ

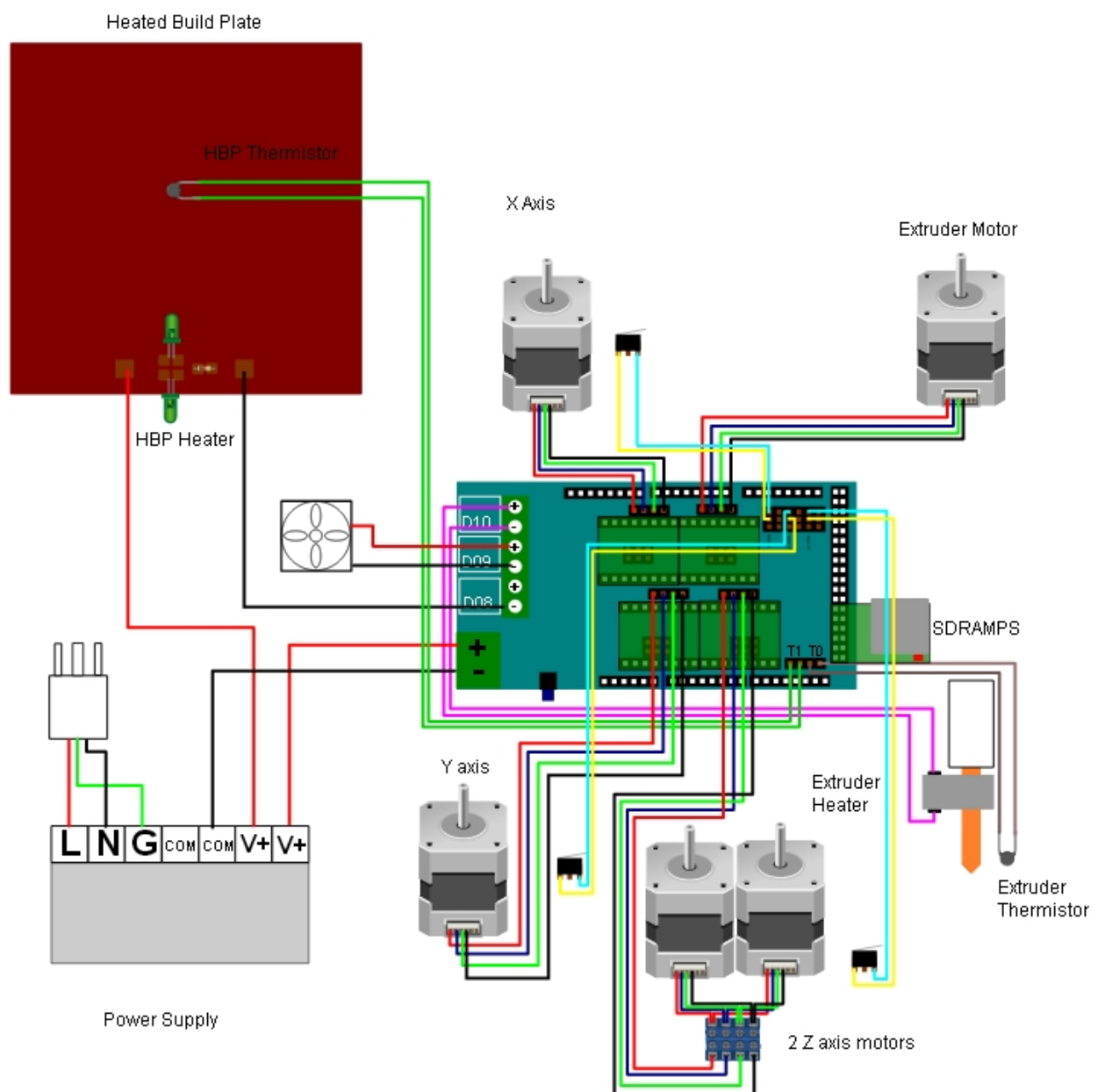


dos cinco canais de RAMPS e driver. Na placa original havia capacitores de 1000 pF ligados ao pino OSC do CI controlador. Segundo o datasheet deste CI, não haveria problema nesta montagem. Porém, o problema está na diminuição da velocidade máxima alcançada pelos motores. O pino OSC está conectado a um circuito RC e promove os cortes no sinal de saída. O estudo da patente US4983931 de 1991 mostra claramente o funcionamento do circuito RC que através de um resistor e um capacitor, mantém uma relação constante entre o potencial de carregamento e descarregamento do capacitor e a potência sobre o resistor.

A Figura 16 ilustra as ligações que devem ser feitas, com exceção das ligações dos motores de passo, que devem ser ligados ao driver da Figura 14.

Figura 16 - Ilustração das Ligações da Placa RAMPS

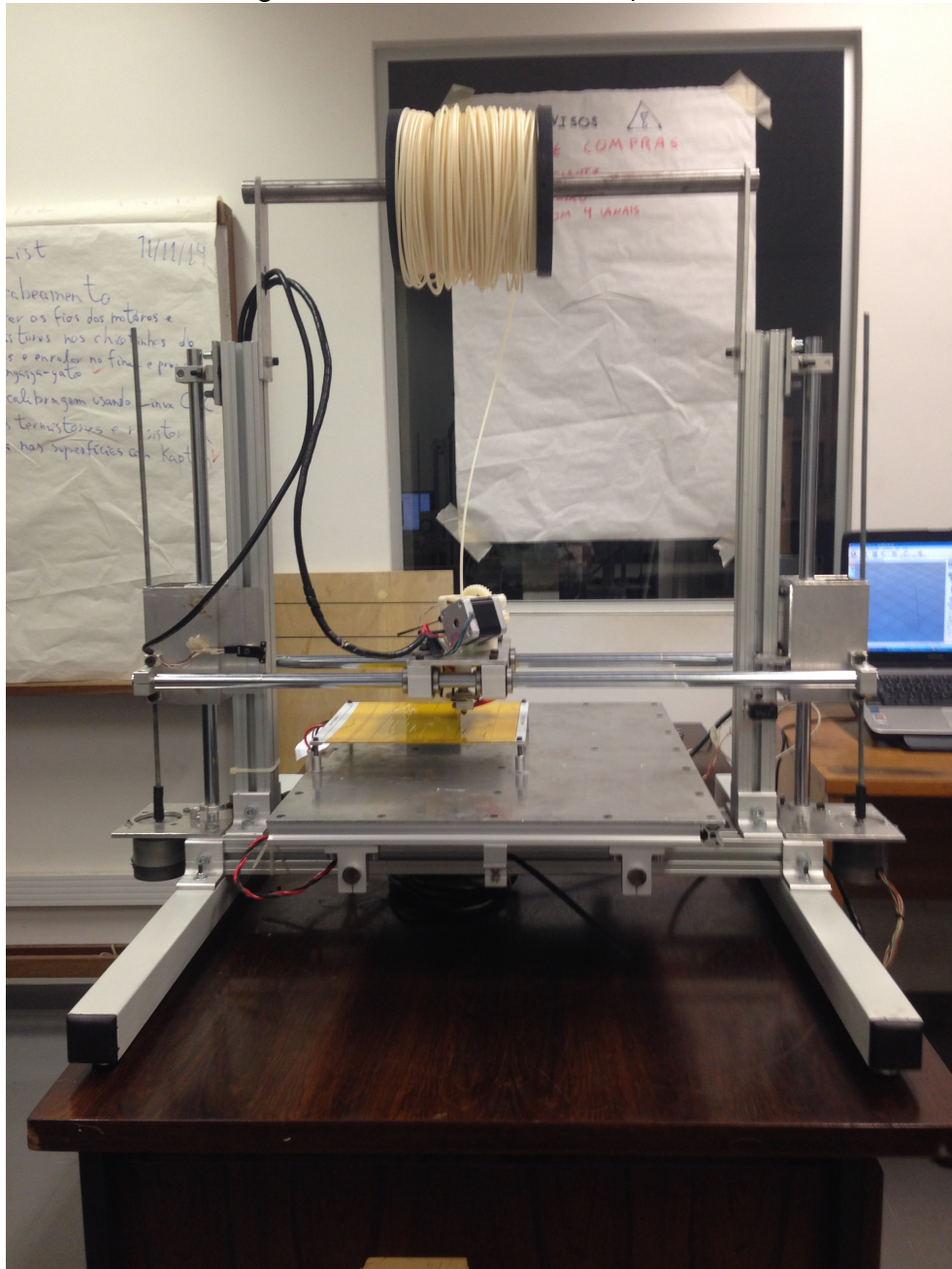
RepRap Arduino Mega Pololu Shield 1.2



4 RESULTADOS

Foram realizados testes nos motores utilizando a montagem da parte mecânica praticamente concluída, o objetivo era observar se os motores estavam funcionando, se seria possível movimentar a estrutura com a carga total da máquina, verificar o sincronismo dos motores paralelos do eixo z e realizar testes de aceleração e velocidades para utilizar no funcionamento.

Figura 17 - Vista Frontal da Impressora



Para este teste, os motores foram ligados no driver de potência conectado pela porta paralela ao computador, o driver possui jumpers de 4 posições que possibilitam o ajuste da corrente

máxima, redução de passo e instantaneidade de parada. O controle foi realizado utilizando o software Linux CNC. Este software é comum para tornos e fresadoras CNC, é um software livre com código open source.

A configuração do software foi necessária previamente aos testes, os pinos de saída da porta paralela foram designados, a partir do conhecimento do datasheet do driver e para cada motor foram inseridos algumas informações básicas como passos por volta e dentes na polia.

Os testes foram realizados antes da instalação das chaves fim de curso, pois a instalação está sendo feita na mesma época dos testes e ajustes de cabos, com o objetivo de reduzir o tempo gasto. Por isso, dados como localização de home e curso da mesa não estavam corretos. Também, todos os testes foram realizados com total atenção para não causar danos na máquina.

Primeiramente, os testes foram realizados nos motores separadamente com velocidades e acelerações reduzidas, por volta de 300mm/s e 20mm/s², utilizando somente jog manual. Em seguida, as velocidades e acelerações foram aumentadas em etapas até chegarmos aos valores de 700mm/s e 200mm/s². Logo após, foram testados movimentos repetitivos de ida e volta, configurados no software para um curso de 100mm em diversas posições. Finalmente, foram testados todos os motores funcionando simultaneamente.

Os problemas encontrados nos testes foram os seguintes: os fusos do eixo z não estavam corretamente alinhados, e por isso, os motores travavam e perdiam passo, para corrigir o desalinhamento, os motores ficaram ligeiramente soltos no apoio, para diminuir o risco de travar; a base do eixo y estava vibrando, que será resolvido diminuindo o atrito nas suas guias utilizando graxa; também foi observado perda de passo em alguns motores, que ocorreu devido ao mau contato entre os cabos do driver até os motores, como solução, todos os cabos serão substituídos e as conexões serão refeitas.

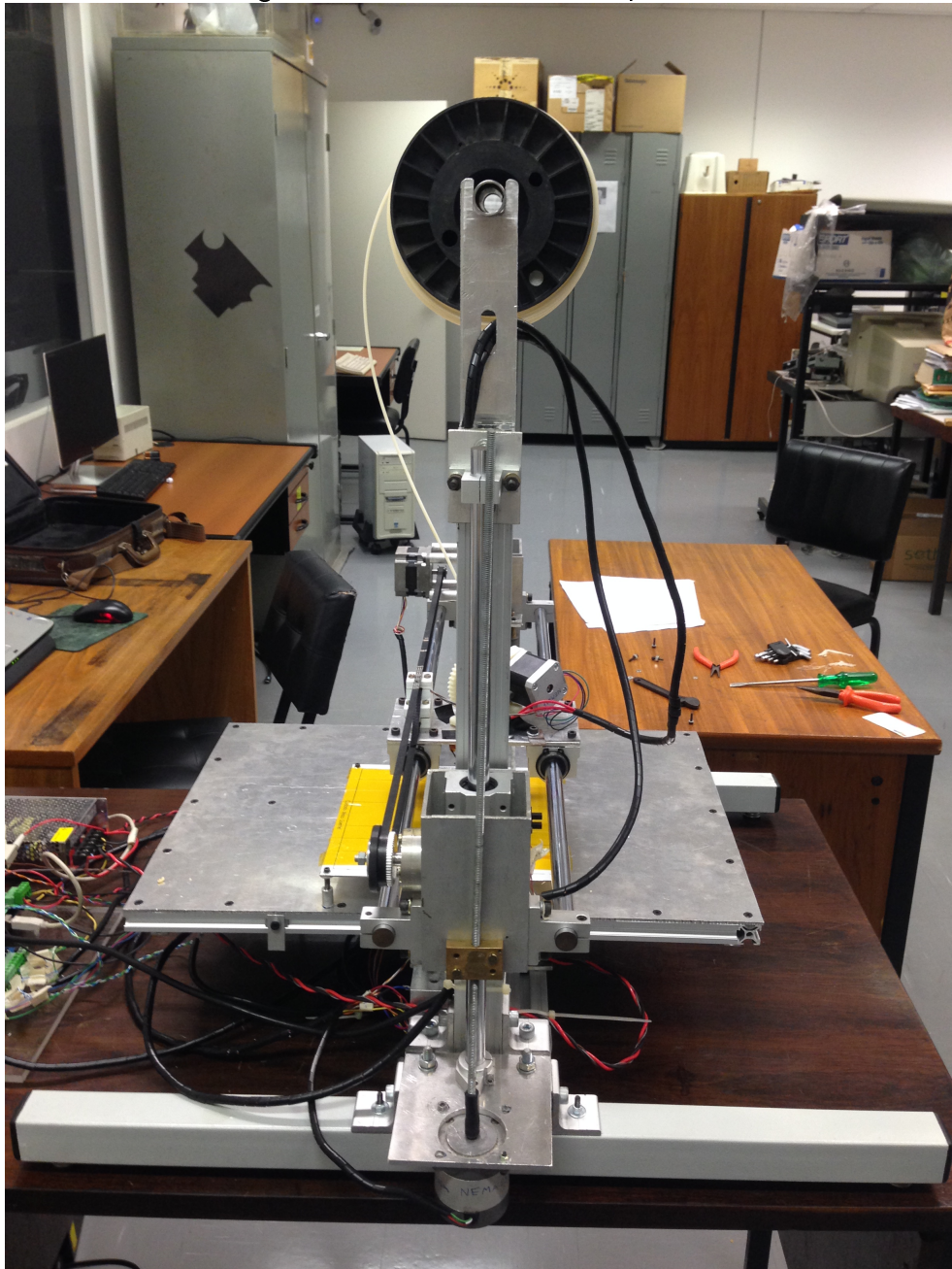
Os resultados obtidos nos testes mostraram que as velocidades e acelerações não causaram nenhum problema estrutural, a carga que os motores estão sendo submetidos não os leva a perdas de passos e o sincronismo entre os motores do eixo z está sem erros observáveis.

A qualidade de impressão depende muito do ajuste perfeito dos parâmetros escolhidos na Repetier. O software já tem todas as configurações padrão salvas, para melhorar a qualidade das peças impressas foram necessárias algumas alterações.

A altura do filamento utilizada para confeccionar a moeda mostrada na Figura 19 foi de 0,3mm. Esse valor pode ser alterado para melhorar o nível de detalhes na peça pronta, quanto menor o tamanho do filamento, mais detalhado, em compensação, o tempo de confecção será muito maior.

As velocidades de perímetro e preenchimento da peça foram diminuídas para 10mm/s, pois a velocidade padrão da Repetier resultava em peças de pior qualidade, visto que as camadas

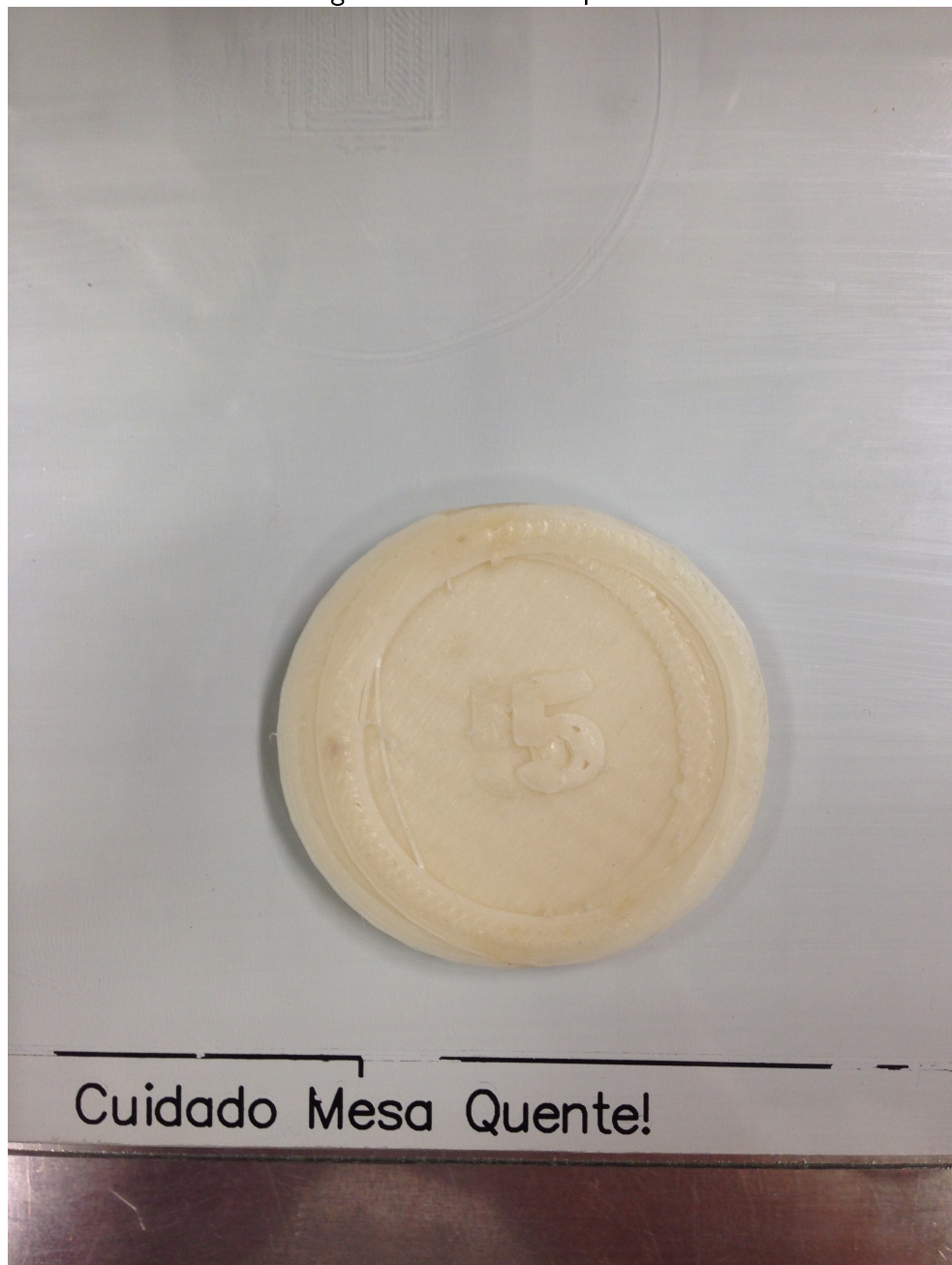
Figura 18 - Vista Lateral da Impressora



inferiores não estavam sólidas no momento em que a camada superior estava sendo impressa. Do mesmo modo, o tempo de impressão aumentou, com essas alterações.

O firmware da Repetier que é baixado para o Arduino também possibilita a alteração de diversos parâmetros. As principais alterações para essa impressora foram: as chaves fim-de-curso eletrônicas foram alteradas para normalmente abertas, a resolução dos motores deve ser alterada (para obter a resolução precisa, é necessário realizar o processo de calibração, que pode ser facilmente aprendido pesquisando na internet), o tamanho do volume de impressão foi definido, o posicionamento da mesa em relação com as fim-de curso foram definidas e as

Figura 19 - Moeda impressa



velocidades de cada eixo.

A principal dificuldade para ajustar a impressora foi devido ao Arduino não estar gravando algumas configurações, estavam somente na memória RAM e quando a fonte era desligada as informações foram perdidas. Para resolver esse problema, foram alteradas as configurações diretamente na EEPROM pelo software Repetier.

Figura 20 - Repetier Controle Manual

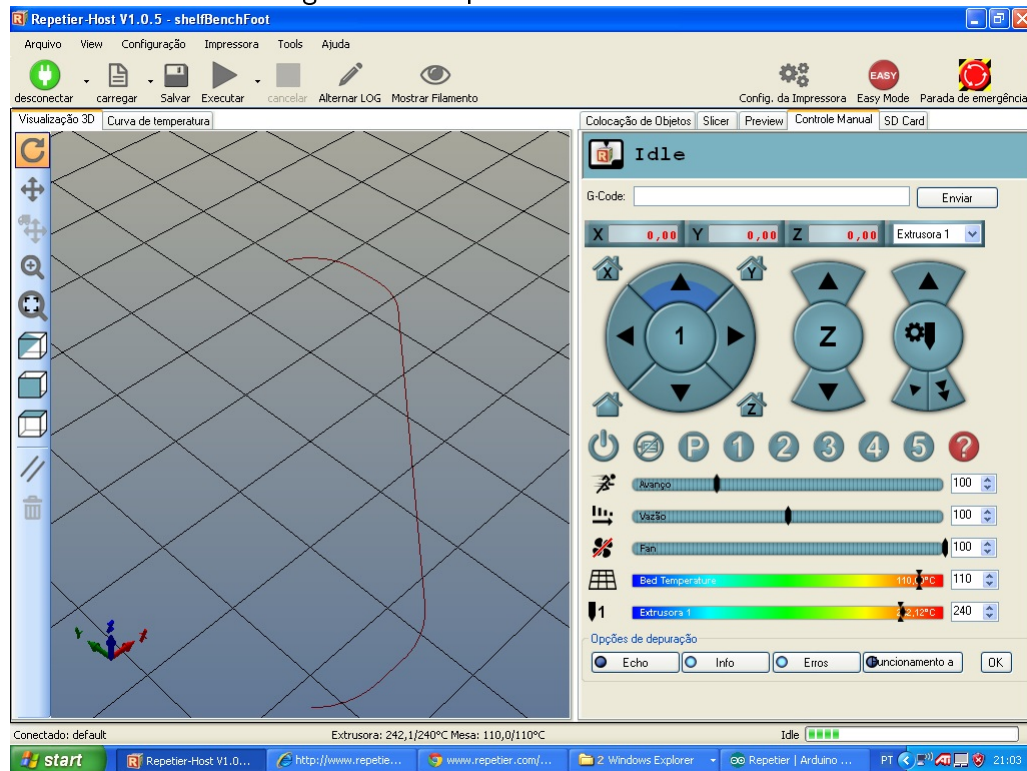
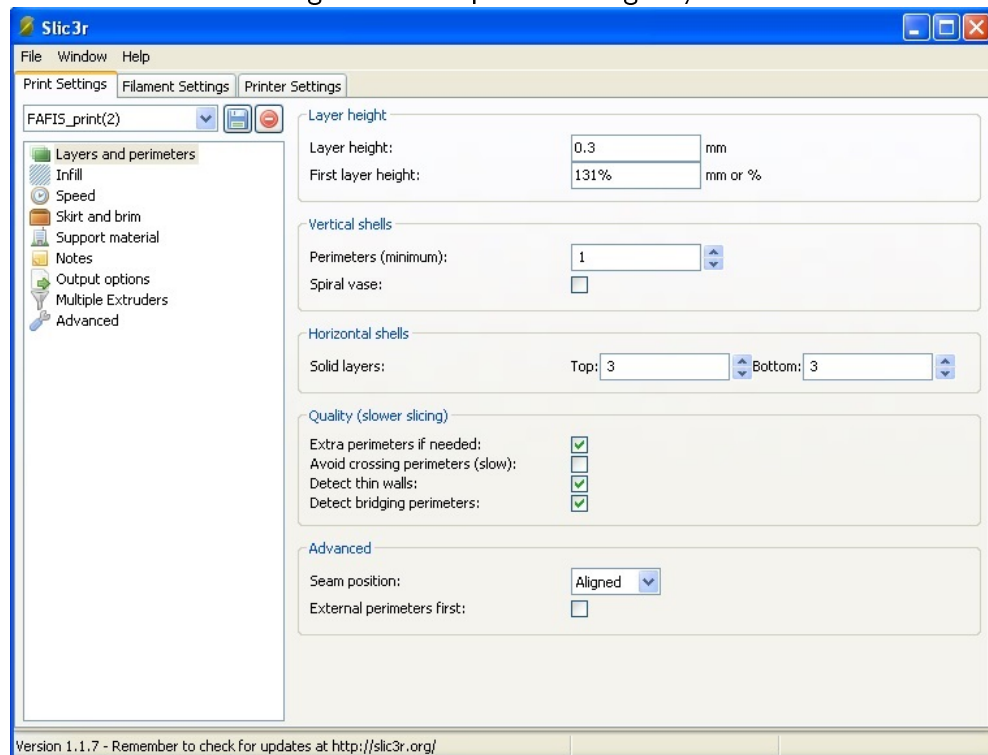


Figura 21 - Repetier Configuração



5 CONCLUSÕES

O objetivo desse projeto era criar uma máquina que conseguisse produzir objetos utilizando extrusão de plástico quente. Foi obtido sucesso nesse objetivo, mesmo que a qualidade e a velocidade da impressão não estejam no nível das impressoras comerciais.

Inicialmente o diferencial desse projeto era o maior volume de impressão. Devido a atrasos e incertezas para confeccionar a mesa aquecida, foi utilizada a mesa comercial de dimensões menores. A fabricação de uma máquina com maior volume seguirá como objetivo para esse projet. Toda a estrutura está projetada para uma mesa maior e a principal alteração para possibilitar a impressão de peças maiores seria a fabricação de um case que envolveria a máquina criando um ambiente com temperatura controlada e assim diminuindo os diferenciais de temperatura, os quais podem causar empenamento nas peças.

Os futuros projetos de impressoras devem ter significantes alterações em relação a esse, devido à queda de uma importante patente de sinterização a laser. A tecnologia de sinterização a laser avança muito rapidamente e poderia possivelmente levar a extrusão de plástico quente a se tornar obsoleta.

REFERÊNCIAS

3DSYSTEMS. Disponível em <http://www.3dsystems.com/>: [s.n.], 2014. Data de acesso: 13/Out/2014.

BRINO, V. *Primeiro órgão impresso em 3D sairá em 2014*. Disponível em <http://www.baboo.com.br/hardware/hardware-tecnologia/primeiro-orgao-impresso-em-3d-saira-em-2014/>: [s.n.], 2014. Data de acesso: 01/Abr/2014.

CROFFI, F. *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>: [s.n.], 2014. Data de acesso: 01/Abr/2014.

GUARDIAN, T. *Fighter jet flies with 3d printer parts*. Disponível em <http://www.theguardian.com/business/2014/jan/06/fighter-jet-flies-with-3d-printed-parts>: [s.n.], 2014. Data de acesso: 13/Out/2014.

Heat Beds in 3D Printing – Advantages and Equipment. Disponível em <http://bootsindustries.com/portfolio-item/heat-bed-3d-printing/>. Data de acesso: 07/Nov/2014.

HOLMES, K. *In The Future, Your Drug Dealer Will Be a Printer*. [S.l.: s.n.], 2014.

LOU, A.; GROSVENOR, C. *Selective Laser Sintering, Birth of an Industry. The University of Texas Austin*. [S.l.: s.n.], 2014.

MARKFORG3D. *The world's first 3d printer that can print carbon fiber*. Disponível em <https://markforged.com>: [s.n.], 2014. Data de acesso: 01/Abr/2014.

BIBLIOGRAFIA

- [Devijver] Devijver, S. RepRap – Build your own 3D Printer (An Introduction). Disponível em: < <http://reprapbook.appspot.com/> >. 2011. Data de acesso: 1 de Abril de 2014.
- [Barnatt] Barnatt, C. Bioprinting. Disponível em <<http://www.explainingthefuture.com/bioprinting.html>>. Data de acesso: 01/04/2014
- [Brino] Brino, Vinícius. Primeiro órgão impresso em 3D sairá em 2014. Disponível em: <<http://www.baboo.com.br/hardware/hardware-tecnologia/primeiro-orgao-impresso-em-3d-saira-em-2014/>> Data de acesso: 01/Abr/2014
- [Brites] Brites, Felipe G.; Santos, Vinicius P. de A. Motor de Passo. Niterói – RJ. Jul/2008. Disponível em: <<http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf>> Data de acesso: 01/Abr/2014
- [Cavalcante] Cavalcante, S, Edna Barros . Introdução aos Sistemas Embarcados. Universidade Federal de Pernambuco; 1999: 1-36
- [Croffi] 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: 01/Abr/2014
- [Brown] Brown, D. R. and E. P. Hamilton, III. Electromechanical Energy Conversion. Macmillan Publishing Company, 1984.
- [Ferreira] Ferreira, J. M. M. Introdução ao Projeto com Sistemas Digitais e Microcontroladores. 1ª Edição. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Marca Artes Gráficas; 1998
- [Fitzgerald] Fitzgerald, A. E., Charles Kingsley Jr., and Stephen D. Umans. Máquinas Elétricas, sexta edição. Bookman, 2006.
- [Kelly] Kelly, J.F, Hood-Daniel, P. Printing in Plastic – Build your own 3D Printer. Friends of Apress
- [Lou] Lou, Alex; Grosvenor, Carol. Selective Laser Sintering, Birth of an Industry. The University of Texas Austin. Disponível em: <http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712_sls_history.php?_ga=1.126723341.1442665244.1394911999>. Data de acesso: 01/Abr/2014
- [Markkanen] Markkanen, Carl O.; Blackwell, Dale B.; Knaust, George A.; Kropac, Christian R.; McCall, John M. Stepper Motor Control System. Jun/1971. <<http://www.freepatentsonline.com/3586953.html>> Data de acesso: 01/abr/2014
- [Mims] Mims, Christopher. 3D printing will explode in 2014, thanks to the expiration of key patents. Disponível em: <<http://qz.com/106483/3d-printing-will-explode-in-2014-thanks-to-the-expiration-of-key-patents/>> Data de acesso: 01/Abr/2014
- [markforged] Disponível em: <<https://markforged.com/>> Data de acesso: 01/Abr/2014
- [Hausman] Hausman, K.K., Horne, R. *3D Printing for Dummies*. 1a ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2014.
- [Kelly] Kelly, J. F. *3D Printing: Build Your Own 3D Printer and Print Your Own 3D Objects*. 1a ed. Estados Unidos: Pearson Tech Group, 2013.

APÊNDICE A – CALCULOS DE ESFORÇOS SOLICITANTES

Dimensionamento e Colocação dos Fusos no Eixo Z

Deslocamento do Eixo Z

Escolheu-se um fuso com o critério de o valor Δz de deslocamento vertical ser menor que 0.5 mm. Como o motor utilizado tem a especificação de 200 voltas por passo, e selecionando-se um fuso com as medidas abaixo, o seguinte cálculo foi feito:

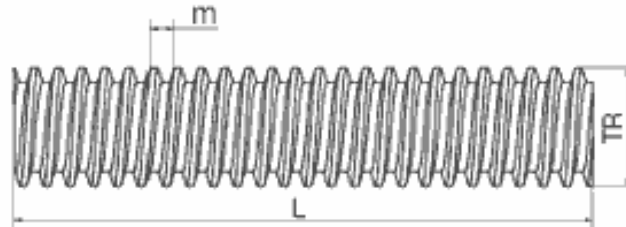


Figura 1: Ilustração do Fuso

Fuso Withworth de ¼ de polegada. Passo $m = 1.27 \text{ mm}$ (0.005"):

$$\Delta z = \frac{1.27 \text{ mm}}{1 \text{ passo}_w} * \frac{1 \text{ passo}_w}{1 \text{ volta}} * \frac{1}{200} \text{ volta}$$
$$\Delta z = \frac{0.00635 \text{ mm}}{\text{passo}_{motor}}$$

No entanto, devido a algumas imperfeições no corpo do fuso, advindas da própria qualidade de fabricação, além dos problemas de precisão encontrados durante a construção do protótipo, a precisão do deslocamento vertical alcançada será menor do que a calculada.

Flambagem do Fuso

1. Considerando aço 1020, que tem módulo de elasticidade $E=170\text{GPa}$,
2. Considerando um cilindro com o diametro interno do fuso:
 - diametro do nucleo do fuso na norma $d=0.186\text{pol}=4,72\text{mm}$ ($r=2,36\text{mm}$)

momento de inércia

$$I=(\pi*r^4)/4=2,45*10^{-11} \text{ m}^4$$

comprimento de flambagem

$$L_f=0,7L=0.35 \text{ m}$$

carga crítica

$$P_{cr}=(\pi^2*E*I)/(L_f^2)=334,94\text{N ou } 33,5\text{kgf}$$

Castanhas do Eixo Z

Os fusos são conectados ao eixo Y por meio de uma castanha de latão, material com baixo coeficiente de atrito. Para calcular qual a força máxima de cisalhamento suportada pelo fuso, adotaremos:

Material: aço 1020:
tensão de cisalhamento $\tau=180\text{MPa}$

parafuso 1/4 Whitworth:
Dext=6,35mm
Dint=4,72mm
filetes por polegada Nin=20, filetes por milímetro N=0,7874
comprimento da rosca L=25mm

Área de Cisalhamento

$$A_{st} = \pi \cdot N \cdot L \cdot D_{ext} \cdot \left(\frac{1}{2N} + 0,57735(D_{ext} - D_{int}) \right) = 618,93 \text{ mm}^2$$

Força

$$F = \tau \cdot A_{st} = 111407,4 \text{ N ou } 11140,7 \text{ kgf}$$

Cálculos de Deformação e Esforços Solicitantes

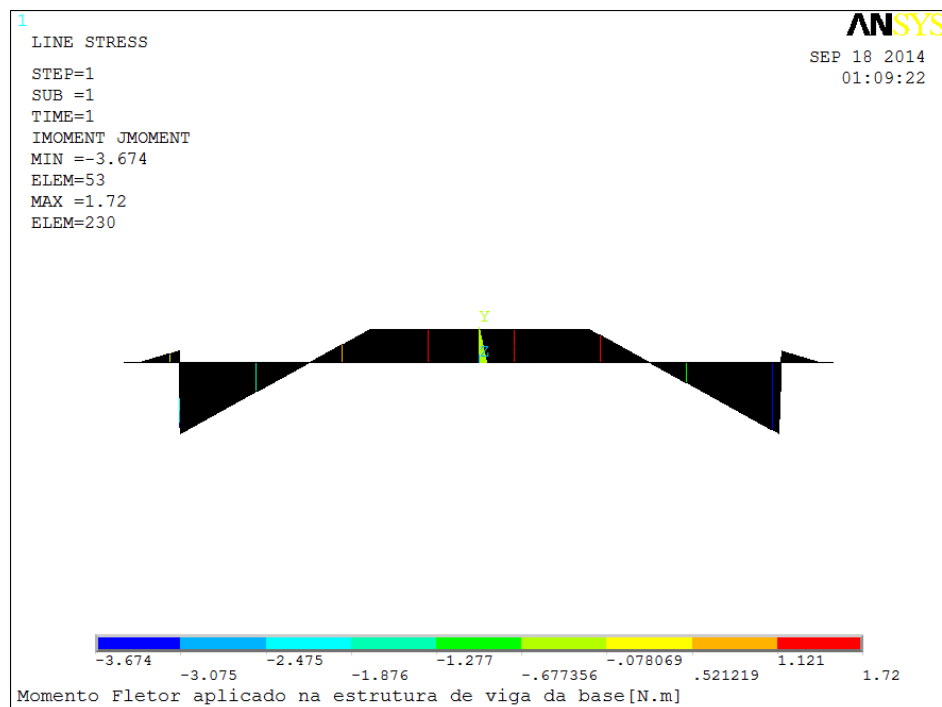
A base da impressora é composta por um perfil Bosch com as seguintes características mecânicas:

Tabela 1: Propriedades do Material da Base (Perfil Bosch)

I _{xy}	8.7 cm ⁴
W _{x,y}	4.35 cm ³
Area Transversal	5.25 cm ²
Peso	1.4 Kg/m
Modulo de Elasticidade do Aluminio	69 GPa
Coef. de Poisson do Aluminio	0.33
Densidade Aluminio	2.7 g/cm ³

Calculando a tensão normal máxima na viga, temos que:

$$\sigma = \frac{M}{I_z} \cdot y_{max}$$



$$\sigma = \frac{-3,67}{8,7 * 10^{-8}} * 0,02$$

$$\sigma = -843678 \text{ N/m}^2$$

Como da Tabela 1, temos que $E_{\max} = 69 * 10^9 \text{ N/m}^2$, vemos que a tensão normal máxima que age na viga Bosch é muitas ordens de grandeza menor que a sua tensão de escoamento.