

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AMANDA ALBERTIN XAVIER DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO DE MOVIMENTAÇÃO  
DOS EIXOS X E Y E ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DA  
SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES DE PASSO POR SERVO MOTORES  
COM *ENCODERS* EM UMA IMPRESSORA 3D**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2015

AMANDA ALBERTIN XAVIER DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO DE MOVIMENTAÇÃO  
DOS EIXOS X E Y E ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DA  
SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES DE PASSO POR SERVO MOTORES  
COM *ENCODERS* EM UMA IMPRESSORA 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa.

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2015



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Cornélio Procópio  
Departamento Acadêmico de Mecânica  
Curso de Engenharia Mecânica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Amanda Albertin Xavier da Silva**

**Desenvolvimento de um Mecanismo de Movimentação dos Eixos X e Y e Estudo sobre a Viabilidade da Substituição de Motores de Passo por Servo Motores com Encoders em uma Impressora 3D.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:00hs do dia 12/06/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Romeu Rony Cavalcante da Costa - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Amauri Bravo Ferneda - (Membro)

---

Prof(a). Me(a). José Aparecido Lopes Junior - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho a toda minha família e amigos e principalmente para minha mãe que não está mais presente fisicamente, mas estará sempre no meu coração.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa, pela sabedoria e paciência com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus amigos e amigas de turma, laboratório e da Juventude Feminina de Schoenstatt.

A Secretaria do Curso de Engenharia Mecânica, pela cooperação.

E, com certeza, o meu reconhecimento à minha família e meu namorado, pois sem o apoio deles nada seria possível.

## RESUMO

SILVA, Amanda Albertin Xavier da. **Desenvolvimento de um mecanismo de movimentação dos eixos x e y e estudo sobre a viabilidade da substituição de motores de passo por servo motores com *encoders* em uma impressora 3D.** 2015. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Esta pesquisa apresenta o desenvolvimento de um mecanismo de movimentação dos eixos x e y para uma impressora 3D, apresentando o projeto em computador via software SolidWorks. E após a adaptação do restante dos componentes do dispositivo de impressão 3D para possibilitar o uso do mecanismo já projetado, realizar a montagem da impressora 3D. O projeto do mecanismo de movimentação dos eixos x e y teve como base uma impressora 3D Rep Rap do modelo Prusa Mendel. Este trabalho também apresenta um estudo de viabilidade econômica por matriz de decisão que avalia a possibilidade de substituição dos motores de passo por servos motores com *encoders*, Tendo em vista que, usando servo motores com *encoders* o processo passará a ser controlado pelo programa bem como pelo sistema de controle, entretanto, apresentam custos mais elevados e sistemas de controle mais complexos comparados aos motores de passo.

**Palavras-chave:** Impressora 3D. Prototipagem rápida. Servo-motores. Modelo digital. Projeto de máquinas.

## ABSTRACT

SILVA, Amanda Albertin Xavier da. **Development of a drive mechanism of the x and y axes and study about the viability of the substitution of stepper motors by servo motors with encoders in a 3D printer.** 2015. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

This research presents the development of a drive mechanism of the x and y axes for a 3D printer, presenting the project on computer via SolidWorks software. And after the adaptation of the rest of the components of the 3D printing device, to enable the use of the mechanism already been designed, making the assembly of 3D printer. The project of the drive mechanism of the x and y axes was based on a 3D printer Rep Rap Prusa Mendel model. This work also presents an economic viability study for decision matrix that evaluates the possibility of substitution of stepper motors by servo motors with encoders. Considering that, using servo motors with encoders the process will be controlled by the program and also for the control system, however, have higher costs, more complex control systems compared to the stepper motors.

**Keywords:** 3D printer. Servo motors. Digital model. Design machine.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – IMPRESSORA 3D REP RAP PRUSA MENDEL DISPONÍVEL NA UTFPR-CP. ....	18
FIGURA 2 – MODELO COMPUTACIONAL E MODELO FÍSICO. ....	22
FIGURA 3 – MODELO SÓLIDO EM 3D CONVERTIDO PARA STL. ....	23
FIGURA 4 - FATIAMENTO EM CAMADAS. ....	24
FIGURA 5 – ESQUEMA ESTEREOLITOGRAFIA. ....	25
FIGURA 6 – MANUFATURA DE OBJETO EM LÂMINAS. ....	26
FIGURA 7 – SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER. ....	27
FIGURA 8 – ESQUEMA GENÉRICO DE FDM. ....	28
FIGURA 9 – CURA SÓLIDA NA BASE. ....	29
FIGURA 10 – IMPRESSÃO POR JATO DE TINTA. ....	30
FIGURA 11 – CONFORMAÇÃO PRÓXIMA AO FORMATO FINAL VIA LASER. ....	31
FIGURA 12 – SERVO-MOTOR COM <i>ENCODER</i> . ....	37
FIGURA 13 – IMPRESSORA ‘PRUSA MENDEL’ DISPONÍVEL NA UTFPR – CP. ...	39
FIGURA 14 – IMPRESSÃO COM DESVIOS NOS EIXOS. ....	40
FIGURA 15 – VISUALIZAÇÃO DO EMPILHAMENTO DA IMPRESSÃO. ....	41
FIGURA 16 – IMPRESSÃO TESTE DE UMA PRÓTESE DE QUADRIL EM ESCALA REDUZIDA. ....	42
FIGURA 17 – CICLO BÁSICO DO PROCESSO DE PR POR ADIÇÃO DE CAMADAS. ....	43
FIGURA 18 – O PROCESSO DE MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO. ....	45
FIGURA 19 – EFEITO ESCADA ( <i>STAIRCASE</i> ). ....	46
FIGURA 20 – TIPOS DE FATIAMENTOS. ....	47
FIGURA 21 – GEOMETRIA DA PEÇA. ....	47
FIGURA 22 – FATIAMENTOS DA PEÇA ESTUDADA. ....	48
FIGURA 23 – IMPRESSÃO DE MODELOS DE PRÓTESES DE QUADRIL. À DIREITA O MODELO EM SOFTWARE CAD E A ESQUERDA O MODELO IMPRESSO. ....	49
FIGURA 24 – MODELOS DE DUAS PRÓTESES DE QUADRIL PROJETADAS IMPRESSAS. ....	49
FIGURA 25 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA IMPRESSORA 3D. ....	50
FIGURA 26 – FILAMENTO DE MATERIAL. ....	50
FIGURA 27 – IMPRESSORA 3D BASE UTILIZADA. ....	52
FIGURA 28 – GUIA LINEAR COM ACIONAMENTO POR CORREIA E SEUS COMPONENTES. ....	54
FIGURA 29 – MECANISMO DE MOVIMENTAÇÃO DO EIXO X E Y PROJETADO. ....	54
FIGURA 30 – CAMISA PROJETADA (PEÇA DO MECANISMO DE MOVIMENTAÇÃO DOS EIXOS X E Y). ....	55
FIGURA 31 – CAMISAS E COMPONENTES DO MECANISMO DE MOVIMENTAÇÃO DO EIXO X E Y PRODUZIDOS POR IMPRESSÃO 3D. ....	56



FIGURA 32 – FUSO DO TIPO ESFERA.....	57
FIGURA 33 – SISTEMA DE MOVIMENTO EM Z.....	58
FIGURA 34 – MESA DE IMPRESSÃO.....	59
FIGURA 35 – MOVIMENTAÇÃO DA EXTRUSORA. ....	60
FIGURA 36 – ESTRUTURA FINAL DA IMPRESSORA 3D DESENVOLVIDA.....	62
FIGURA 37 – ESTRUTURA FINAL DA IMPRESSORA 3D DESENVOLVIDA EM VISUALIZAÇÃO ISOMÉTRICA. ....	62
FIGURA 38 – MATRIZ DE DECISÃO DE PUGH. ....	65
FIGURA 39 – – PEÇAS OBTIDAS POR IMPRESSÃO 3D. COMPONENTES DO MECANISMO DE MOVIMENTAÇÃO DO EIXO X E Y.....	66

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - RESUMO DAS TECNOLOGIAS RP.....	32
QUADRO 2: COMPARAÇÃO ENTRE OS MOTOR DE PASSO E SERVO-MORTO.....	37

## LISTA DE SIGLAS

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
CP	Cornélio Procópio
RP	Prototipagem Rápida
CNC	Comando Numérico Computadorizado
3D	Tridimensional
2D	Bidimensional
CTI	Centro de Tecnologia da Informação
FDM	Fused Deposition Modeling
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
STL	Standard Template Library
CAD	Computer Aided Design
SRP	Subtractive Rapid Prototyping
SLA	Stereolithography Apparatus
LOM	Laminated Object Manufacturing
SLS	Selective Laser Sintering
SGC	Solid Ground Curing
MJT	Multi Jet Modeling
LENS	Laser Engineered Net Shaping
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CAM	Computer Aided Manufacturing

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	16
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS .....	17
1.3 OBJETIVO GERAL.....	18
1.3.1 Objetivos Específicos .....	18
1.4 JUSTIFICATIVA .....	19
1.5 DESCRIÇÃO DO TRABALHO .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
2.1 PROTOTIPAGEM RÁPIDA E IMPRESSÃO 3D .....	21
2.2 CENÁRIO ATUAL.....	32
2.3 MOTORES ELÉTRICOS .....	33
2.3.1 Motor de Passo .....	34
2.3.2 Servo-Motor com <i>encoder</i> .....	35
2.3.3 Comparações entre os Motores de Passo e Servo-motores com <i>encoders</i> .....	37
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>39</b>
3.1 IMPRESSORA 3D .....	39
3.2 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA. ....	43
3.3 METODOLOGIA E IMPRESSÕES.....	48
3.4 MATERIAIS UTILIZADOS PARA IMPRESSÃO 3D.....	50
<b>4 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO</b> .....	<b>52</b>
4.1 EIXOS .....	53
4.1.1 Eixo X e Y.....	53
4.1.2 Eixo Z .....	56
4.2 MESA .....	58
4.3 EXTRUSORA .....	60
4.4 ESTRUTURA .....	61
4.5 SELEÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS (MÁQUINAS ELÉTRICAS) .....	63
4.6 SELEÇÃO DAS PEÇAS .....	66
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>68</b>
<b>APÊNDICE A – LISTA DE PEÇAS</b> .....	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com avanço da ciência e da tecnologia muitas organizações e empresas estão investindo em inovação a fim de desenvolver novos produtos, de maneira rápida e eficiente, devido a forte concorrência no mercado atual. Novas tecnologias têm surgido nos últimos anos a fim de adotar um método de produção de produtos no menor tempo possível. Uma das tecnologias que tem contribuído para este cenário é a prototipagem rápida (RP), utilizando a impressão tridimensional (3D), que é um processo de fabricação de produtos diretamente de um modelo computacional, dispensando ferramental, tempo e custo. (CONCEIÇÃO JUNIOR, MARQUES)

Das áreas do curso de engenharia mecânica, a área de engenharia de produto é a que mais realça a importância atual do setor industrial, devido suas responsabilidades perante o restante da cadeia, sendo que um projeto de um produto realizado com sucesso, ao longo da sua execução não gerará custos altos, ou antes, não planejados. (DELEVATTI, 2013)

A impressão tridimensional possui atualmente ampla aplicação, como na fabricação de protótipos, fabricação direta de produtos finais e em uma série de indústrias. (AZEVEDO, 2013)

Um dos mais antigos projetos de impressoras 3D para computadores pessoais é o RepRap (Replicating Rapid Prototyper). A impressora é replicável sendo capaz de imprimir muitas de suas próprias partes plásticas.

Com base nessas informações este trabalho objetiva desenvolver um novo protótipo de impressora 3D com principal modificação no mecanismo de movimentação dos eixos x e y, inspirado em um modelo já existente que teve como base uma impressora 3D Rep Rap do modelo Prusa Mendel, buscando uma melhor qualidade de impressão, através de elementos de máquinas mais bem acabados e refinados, assim como melhor qualidade dos movimentos da mesa de impressão e do cabeçote de extrusão do filamento.

Além do desenvolvimento do mecanismo de movimentação dos eixos x e y, há também um estudo e uma análise de viabilidade econômica sobre a possível substituição dos motores de passo, utilizados na impressora 3D Rep Rap Prusa Mendel, com servo-motores com *encoders* (sensores), que tem como

função dar a posição exata de objetos com deslocamento linear ou angular. Esse estudo de viabilidade econômica confronta a relação custo benefício entre os tipos de motores e a qualidade de impressão que poderia vir com a substituição dos referidos elementos.

No Brasil, o CTI (Centro de Tecnologia da Informação) Renato Archer, localizado na cidade de Campinas no estado de São Paulo, possui uma máquina Vantage-Si, uma Fortus400 e uma Objet Connex 350 e impressoras 3D Stratasys. A Vantage-Si é uma máquina que trabalha com tecnologia FDM (Modelagem por Deposição de Material Fundido) e que utiliza como material de impressão o ABS que apresenta flexibilidade considerável. O volume de projetos começou a crescer, o CTI Renato Archer adquiriu novos equipamentos, com novos recursos. A Fortus é uma impressora 3D que apresenta impressão com multimateriais e de alta precisão. E, a Objet Connex 350 também é útil em aplicações médicas, em estruturas mais maleáveis, como nervos e artérias, além de aplicações em várias outras áreas. (CONVERGE COMUNICAÇÕES, 2013)

## 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O projeto abordará questões descritivas e práticas de projeto, por meio de pesquisas bibliográficas. Sendo abordados os temas de prototipagem rápida, impressão tridimensional, motores elétricos e desenvolvimento de produto.

A partir do projeto de Damasceno *et al* (2014) pretende-se diminuir a quantidade de elementos de máquinas para a movimentação do sistema de impressão, tais como fusos de esferas, correias, polias e guias lineares.

Outro estudo abordado será a possível substituição dos motores de passo por servo-motores com *encoders*. Essa pesquisa terá cunho investigativo da viabilidade econômica do projeto. Havendo a necessidade de análises e discussões baseada em matriz de decisão sobre a melhor configuração a ser empregada. Com isso, apresentar-se-á uma conclusão sobre o desenvolvimento do projeto.

Com projeto do mecanismo de movimentação do eixo x y realizado, este será adaptado ao restante do projeto Damasceno *et al* (2014) , fazendo as

modificações necessárias nos outros componentes do protótipo de impressão 3D. Como já mencionado, com a conclusão de qual dos motores será utilizado, deverá ser feita a seleção dos drives para realizar o controle e automação do sistema da impressora 3D.

Finalmente, com todos os equipamentos e peças selecionadas e dimensionadas, habilitará a possibilidade de aquisição e posterior montagem do equipamento, permitindo seu funcionamento para realização de testes e ajustes de impressão.

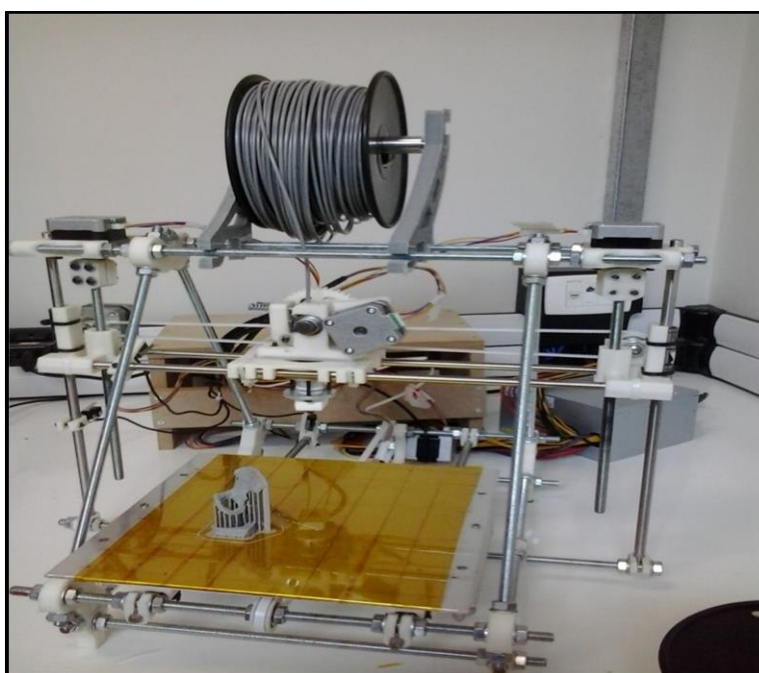
## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Com o desenvolvimento de novas tecnologias de prototipagem rápida, juntamente com a gama de equipamentos já existentes de impressão 3D, observou-se a oportunidade de realizar o projeto de um novo protótipo de impressão 3D baseado em produtos já existentes, no caso a impressora 3D Rep Rap Prusa Mendel presente na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), no campus de Cornélio Procópio (CP). Esta tecnologia proporciona a oportunidade de acelerar o processo de criação de produtos, seja na forma de protótipos impressos ou de produtos finais.

Deste modo, as impressoras 3D junto com suas técnicas de prototipagem rápida tem aplicação em diversas áreas, desde automobilística, desenvolvimento de produtos de engenharia, impressão de protótipos para empresas de design e na robótica, até à medicina. Já existem técnicas que permitem a impressão em material biocompatível, sendo extremamente útil na área médica, permitindo a fabricação de próteses de alta qualidade e custo reduzido.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um mecanismo de movimentação do eixo x y, a partir de uma impressora 3D Rep Rap do modelo Prusa Mendel, Figura 1. Com o intuito de melhorar a qualidade de impressão no dispositivo de impressão 3D que será posteriormente montado.



**Figura 1 – Impressora 3D Rep Rap Prusa Mendel disponível na UTFPR-CP.  
Fonte: Damasceno *et al.* (2014)**

#### 1.3.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Projetar a base do cabeçote de impressão (mecanismo de movimentação do eixo x e y);
- Selecionar os motores de acionamentos dos eixos;
- Selecionar os drivers de controle dos motores;
- Dimensionar o sistema de aquecimento da mesa;



- Dimensionar um gabinete para a máquina, com o intuito de controlar a temperatura na região de impressão,
- Dimensionar as portas e sistema de alimentação de matéria prima e retirada do modelo impresso.
- Montar impressora 3D;
- Fazer alguns ajustes necessários e testes de impressão.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

No presente trabalho é necessário um estudo detalhado de cada componente da máquina, como os eixos, mesa de impressão, estrutura, componentes eletrônicos, entre outros, que possibilita a oportunidade de adquirir conhecimentos aprofundados de assuntos abordados ou não, ao decorrer do curso de Engenharia Mecânica. E também, conhecer os processos de prototipagem rápida que vem se difundindo muito no processo de desenvolvimento de produtos, como alternativa mais rápida e com menor custo.

Tendo em vista os projetos desenvolvidos pelo grupo de trabalho, este vem a complementar, pois segue em direção da produção de modelos para futuros desenvolvimento de produtos.

Na busca de melhorar a qualidade de impressão de máquinas que usam tecnologia FDM, foi feita a principal modificação, sendo no mecanismo de movimentação dos eixos x e y, com objetivo principal a redução de elementos de máquinas, e por meio de matriz de decisão de viabilidade econômica, estuda-se as opções de utilização de motores de passo ou servo motores com *encoders*, sendo que, servo motores com *encoders* possuem precisão superior, porém custo relativamente alto e sistema de controle complexo.

#### 1.5 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

A pesquisa realizada é de natureza aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos, como o projeto do novo mecanismo de movimentação dos eixos x e

y e adaptações necessárias nos demais componentes do protótipo de impressão 3D já existente, serão feitos via *software* SolidWorks. Por meio de pesquisas bibliográficas, onde serão abordados os temas prototipagem rápida, impressão 3D, desenvolvimento de produto e motores elétricos, e também por análise da impressora 3D Rep Rap do modelo Prusa Mendel disponível na UTFPR-CP. Estudos sobre motores de passo e servo-motores com *encoders* a partir de referências bibliográficas, juntamente, será feito uma análise de viabilidade econômica, a partir de uma matriz de decisão, para posterior conclusão sobre o desenvolvimento do projeto da impressora 3D. Após a montagem da impressora 3D, possibilitará os testes e ajustes de impressão para verificar se o objetivo geral foi atingido.

Com base nos objetivos específicos propostos, o desenvolvimento do trabalho está estruturado da seguinte forma:

- **Revisão Bibliográfica:** apresentação de temas como prototipagem rápida, impressão 3D, cenário atual e motores elétricos. Com base nas literaturas apresentadas implicará o desenvolvimento do projeto.
- **Materiais e Métodos:** apresentação da máquina de impressão 3D que foi utilizada como comparação para o estudo, a metodologia de impressão, os materiais utilizados para impressão, etc..
- **Desenvolvimento do Produto:** no caso o produto é a nova máquina de impressão 3D que foi subdivida em alguns grupos para serem mais bem explicados e exemplificados.
- **Conclusões:** nesse capítulo tem-se a conclusão do trabalho, considerando quais objetivos foram alcançados e quais trabalhos futuros têm-se com a conclusão deste.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROTOTIPAGEM RÁPIDA E IMPRESSÃO 3D

De acordo com Gorni (2001), prototipagem rápida é um termo referente às tecnologias capazes de construir objetos físicos diretamente com base em um modelo do sólido gerado por sistemas de projeto auxiliado por computador (CAD).

Este processo permite ao projetista construir seus protótipos de forma muito mais rápida e barata, possibilitando uma economia na ordem de 70 a 90% de tempo e custo.

As técnicas de prototipagem rápida são muito utilizadas na fabricação de ferramentas, que geralmente são bastante complexas e de elevada precisão. Normalmente, a produção da matriz (molde) do ferramental se dá por meio de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado), um processo consideravelmente mais caro e demorado que a impressão 3D, de forma que esta se torna cada dia mais indispensável, pois pode, desta maneira, dar vantagem competitiva para a empresa no mercado.

Além disso, de acordo com Gorni (2001) a prototipagem rápida é o melhor processo de manufatura possível quando se necessita produzir pequenos lotes de peças e ou no caso de objetos com geometrias complexas.

Enquanto nos processos convencionais de usinagem com remoção de material é, aos poucos, retirado do tarugo (material bruto) até a obtenção da forma desejada da peça, os processos de impressão 3D geram a peça a partir da união gradativa de líquidos, pós ou folhas de papel. (CARVALHO, 1999).

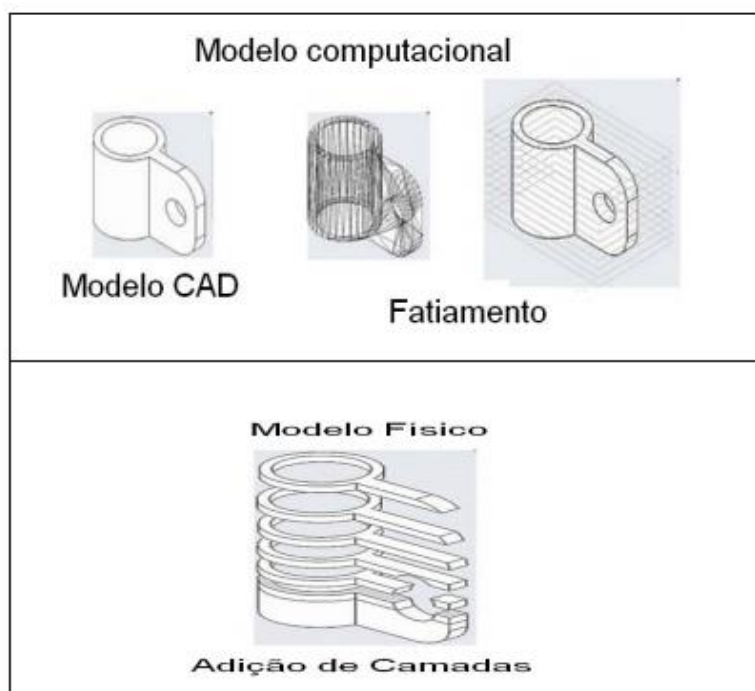
Segundo Gorni (2001) após a geração do modelo tridimensional, em um software de CAD (*Computer Aided Design*), cria-se a estratégia de impressão de acordo com a sequência de camadas que foram geradas em software específico.

Existem diversos tipos de técnicas de prototipagem rápida atualmente, mas todos seguem as mesmas etapas básicas:

1. Criação de um modelo CAD da peça que se deseja construir;
2. Conversão do arquivo CAD em formato STL (Standard Template Library, linguagem universal das impressoras 3D);

3. Fatiamento do arquivo STL em finas camadas transversais;
4. Construção física do modelo, empilhando-se uma camada sobre a outra;
5. Limpeza e acabamento do protótipo.

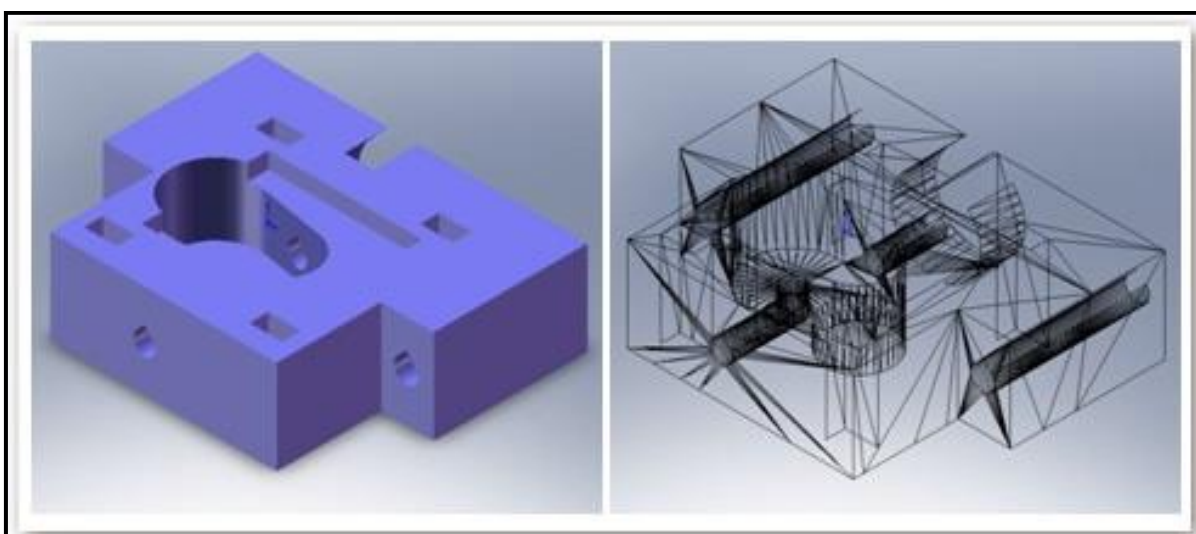
As tecnologias que utilizam a prototipagem rápida podem ser separadas de diversas maneiras, sendo a principal delas como métodos de adição ou remoção de material. Na adição de material, o modelo físico é construído sequencialmente, uma camada sobre a outra, até formar uma cópia análoga de seu original digital em CAD (Figura 2); já na remoção de material, chamada de prototipagem rápida subtrativa (SRP – Subtractive Rapid Prototyping), uma ferramenta ‘subtrai’ material, através da utilização de série de diferentes tipos de fresas, que é gradualmente reduzido para a réplica física do modelo original desenhado em CAD. A principal diferença entre elas está no princípio físico de construção do protótipo, porém, quanto ao aspecto computacional, as etapas do processo de planejamento possuem pontos em comum. (RAULINO, 2011)



**Figura 2 – Modelo Computacional e Modelo Físico.**  
**Fonte: Conceição Junior (2010).**

O processo de obtenção das peças requeridas é baseado nas fases gerais já citadas acima, mas também pode ser dividido em três fases: pré-processamento, processamento do protótipo rápido e pós-processamento.

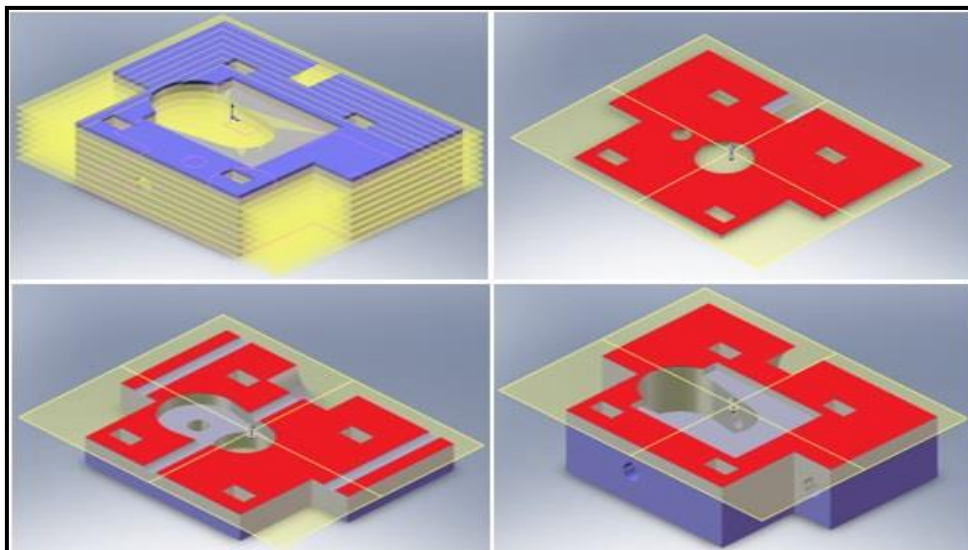
Na fase de pré-processamento, cria-se um modelo da peça em qualquer software CAD 3D, ou ainda pode-se obtê-lo através de um escaneamento do objeto ou peça em que se deseja imprimir. Na sequência, o arquivo gerado deve ser transformado para uma extensão que seja aceito pela máquina de prototipagem rápida, sendo o formato STL o mais utilizado, consistindo na representação geométrica da superfície do modelo em malha (vide Figura 3), sem detalhes de cores ou texturas comuns em sistemas CAD, com a resolução requerida pelo operador. (RAULINO, 2011)



**Figura 3 – Modelo Sólido em 3D convertido para STL.**  
Fonte: Raulino (2011).

Quando o modelo CAD 3D é convertido para o formato STL, é feita a definição da orientação do objeto, o que afeta diversas características do protótipo final, como o total de camadas geradas no *slicing* (“fatiamento”) e a quantidade de material suporte necessário. O suporte é necessário sempre que a ação da gravidade pode afetar qualquer face do sólido, provocando a falta de estabilidade ou queda da mesma, sendo este suporte sempre feito com menor densidade do que o material da peça em si, sendo, após o processo, possível removê-lo facilmente de maneira mecânica ou química.

Após a conversão para o formato STL, o modelo sólido digital é fatiado em camadas que serão construídas uma após a outra, sequencialmente, na máquina de impressão 3D. Estas fatias representam um plano de seção transversal com uma espessura uniforme. Na Figura 4, apresenta-se o fatiamento em camadas e a visualização de como seria a construção da peça.



**Figura 4 - Fatiamento em camadas.**  
Fonte: Raulino (2011).

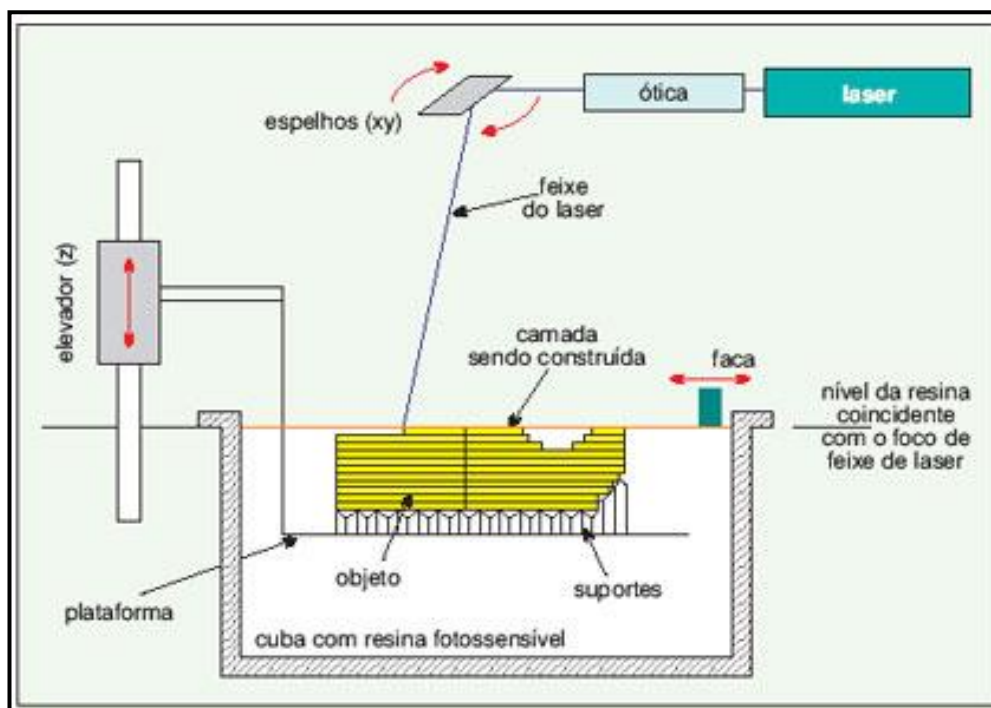
A fase após o fatiamento segue-se o processo de impressão do objeto de acordo com a sequência de empilhamento criada com o fatiamento e adição de material suporte, quando couber. A estratégia de impressão se dá no momento do fatiamento. Então, através de todo sistema de controle da impressora o modelo virtual se torna um modelo real. O software de impressão controla a espessura de camada, a velocidade de impressão, a temperatura da mesa, a densidade do material suporte, etc..

Finalmente, o pós-processamento que compreende as atividades de cura, remoção da estrutura de suporte e limpeza da peça para um melhor acabamento final. (RAULINO, 2011).

Para melhor compreender os principais sistemas da tecnologia RP usados na fabricação de protótipos, na sequência são descritas algumas das tecnologias mais importantes e interessantes que utilizam da RP como tecnologia de base:

1. Estereolitografia (SLA, Stereolithography Apparatus): este processo pioneiro, patenteado em 1986, iniciou a revolução da prototipagem rápida. Ele constrói modelos tridimensionais a partir de polímeros líquidos sensíveis à luz, que se solidificam quando expostos à radiação ultravioleta. O modelo é construído sobre uma plataforma situada imediatamente abaixo da superfície de um banho líquido de resina epóxi ou acrílica. Uma fonte de raio laser ultravioleta, com alta precisão de foco, traça a primeira camada, solidificando a seção transversal do

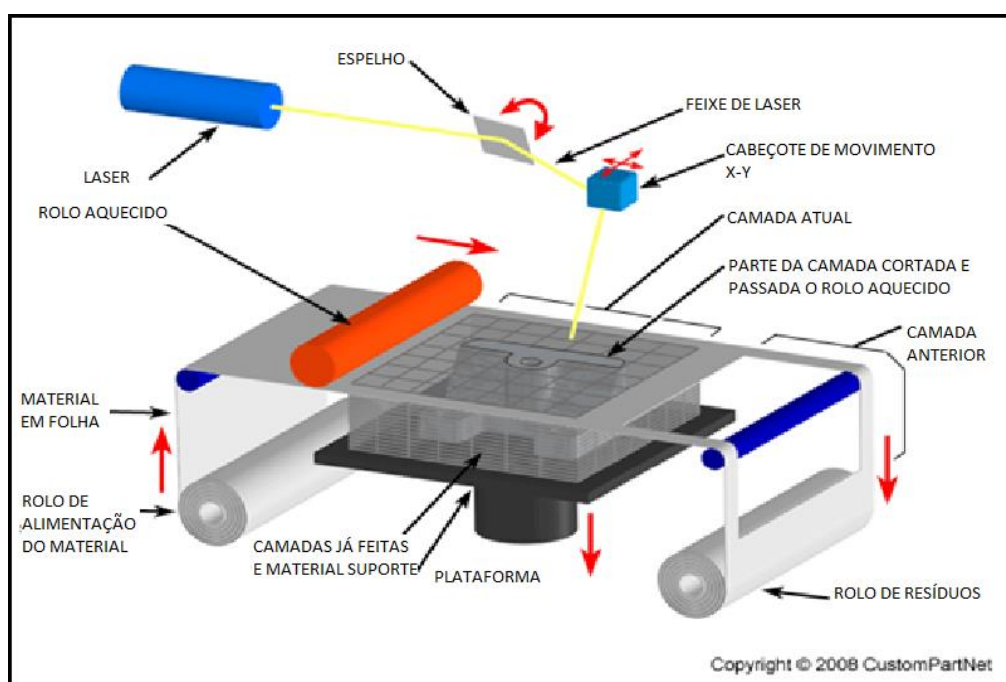
modelo e deixando as demais áreas líquidas. Em seguida, um elevador mergulha suavemente a plataforma no banho de polímero líquido e o raio laser cria a segunda camada de polímero sólido acima da primeira camada. O processo é repetido sucessivamente até o protótipo estar completo. Finalizado, o modelo sólido é removido do banho de polímero líquido e lavado. Os suportes são retirados e o modelo é introduzido num forno de radiação ultravioleta para ser submetido a uma cura completa. Uma vez que a estereolitografia foi a primeira técnica bem sucedida de prototipagem rápida ela se tornou um padrão de avaliação (*benchmarking*) para as demais, que surgiram (e continuam surgindo) posteriormente (GORNI, 2001). O esquema do processo é apresentado na Figura 5.



**Figura 5 – Esquema Estereolitografia.**  
Fonte: Ryall (2005).

2. Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM, Laminated Object Manufacturing): nesta técnica (vide Figura 6) camadas de material, na forma de tiras revestidas de adesivo, são grudadas umas nas outras formando-se o protótipo. O material das peças impressas consiste de bobinas de papel laminado com cola ativada pelo calor. Um rolo coletor avança a tira de papel sobre a plataforma de construção, onde há uma base feita de papel e fita com espuma nas duas faces. A seguir, um rolo aquecido aplica pressão para fixar o papel à

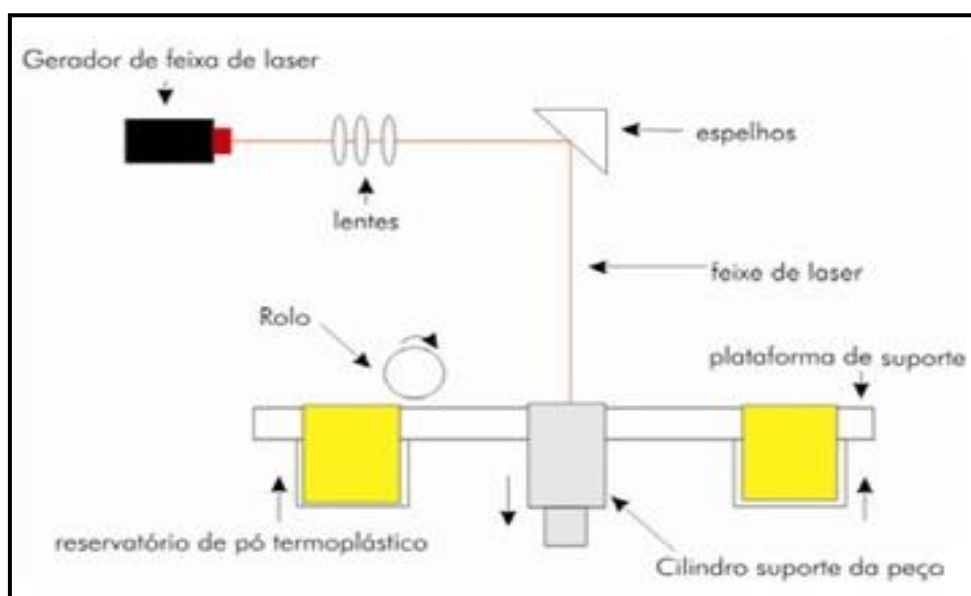
base. Uma fonte de raio laser com alta precisão de foco corta o contorno da primeira camada sobre o papel e então quadricula a área em excesso, ou seja, o espaço negativo do protótipo. Esse quadriculado rompe o material extra, tornando fácil sua remoção durante o processamento posterior. Esse material em excesso proporciona um excelente suporte para projeções, saliências e seções com paredes finas durante o processo de construção. Após o corte da primeira camada a plataforma é abaixada, liberando o caminho para que o rolo coletor avance a tira de papel e exponha material novo. Então a plataforma se eleva até um ponto ligeiramente inferior à altura original, o rolo aquecido liga a segunda camada a primeira e a fonte de raio laser corta a segunda camada. Este processo é repetido até a peça estar construída, a qual apresentará textura similar à de madeira. Uma vez que os modelos são feitos de papel, eles devem ser selados e revestidos com tinta ou verniz para se evitar danos devido a umidade. Os mais recentes desenvolvimentos deste processo permitem o uso de novos tipos de materiais, incluindo plástico, papel hidrófobo e pós cerâmicos e metálicos. Estes materiais geram no final do processo uma peça "verde" que deve ser posteriormente sintetizada para que se alcance máxima resistência mecânica (GORNI, 2001).



**Figura 6 – Manufatura de Objeto em Lâminas.**  
Fonte: Ryall (2005).



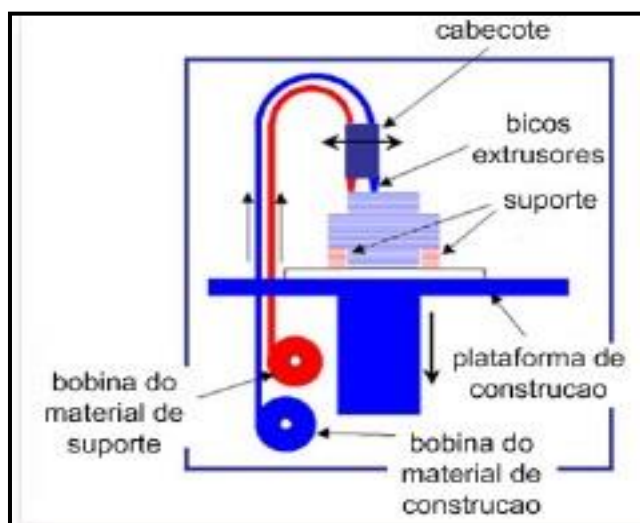
3. Sinterização Seletiva a Laser (SLS, Selective Laser Sintering): esta técnica, patenteada em 1989, usa um raio de laser para fundir, de forma seletiva, materiais pulverulentos, tais como náilon, elastômeros e metais, num objeto sólido. As peças são construídas sobre uma plataforma a qual está imediatamente abaixo da superfície de um recipiente preenchido com o pó fusível por calor, como mostrado na Figura 7. O raio laser traça a primeira camada, sinterizando o material. A plataforma é abaixada ligeiramente, reaplica-se o pó e o raio laser traça a segunda camada. O processo é repetido até a peça estar construída. O pó em excesso ajuda a dar suporte ao componente durante sua construção (GORNÍ, 2001).



**Figura 7 – Sinterização Seletiva a Laser.**  
Fonte: Ryall (2005).

4. Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM, Fused Deposition Modeling): Segunda técnica mais utilizada no mundo, baseando-se na deposição de camadas resultantes do aquecimento de filamentos de material termoplástico, com temperatura variável para cada tipo de material, sendo por volta de 200°C. Simultaneamente, outros fios amolecidos formam o suporte para as superfícies suspensas do modelo, a fim de oferecer sustentação. Os materiais termoplásticos destinados à confecção podem ser poliéster, polipropileno, ABS, elastômeros ou cera. Tais materiais conferem durabilidade e resistência ao protótipo (RAULINO, 2011).

A plataforma da máquina de FDM onde se deposita o material movimenta-se no eixo Z e a extrusora, movimenta-se no plano XY. O filamento é direcionado por guias rotativas e ficam estocados dentro da máquina, em ambiente a vácuo aquecido, para evitar que a umidade forme bolhas no material e impeça a continuidade da deposição, como pode ser visualizado na Figura 8. Preferencialmente, todo o ambiente de construção também deve encontrar-se fechado em um ambiente com temperatura controlada.

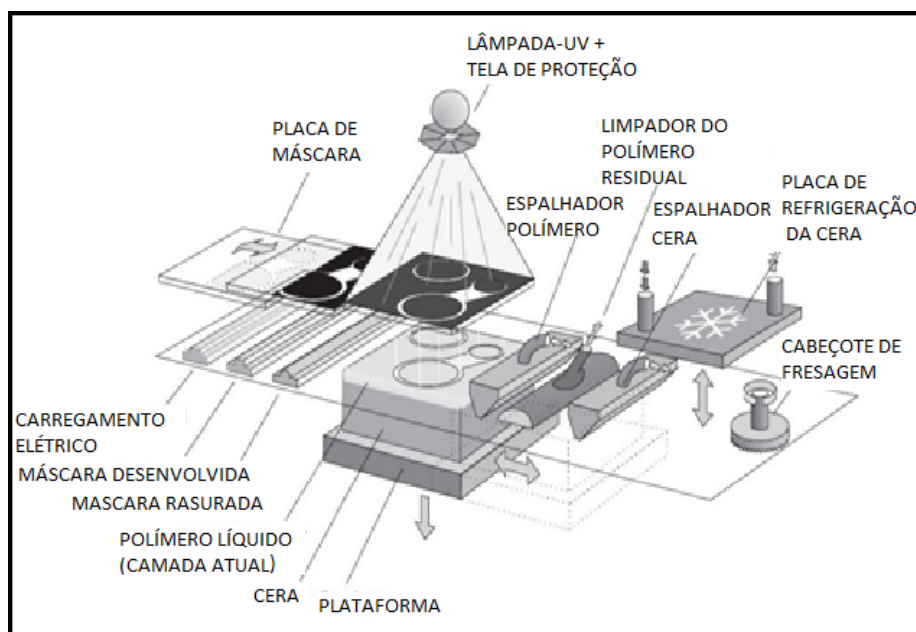


**Figura 8 – Esquema Genérico de FDM.**  
Fonte: Raulino (2011).

Com estas máquinas não há desperdício de material e pouca necessidade de limpeza, em oposição à SLA. Outra diferença notável é a ocupação de um espaço bem menor, pois os motores de acionamento necessitam de menos potência e resfriamento que os lasers. Estas características permitem sua instalação em ambientes não industriais. Em termos de custos (de aquisição, operação e material), também se verifica grandes diferenças entre as duas tecnologias, devido à qualidade que proporcionam. Enquanto FDM satisfaz plenamente o uso interno em empresas, atividades acadêmicas e lotes de produtos customizáveis para comercialização, a SLA é uma tecnologia voltada para a engenharia de produtos mais exigentes, com dimensões críticas. Já em relação ao tempo total de produção, incluindo a etapa de pós-processamento, há empate entre estas tecnologias. Apesar do tempo de fabricação do SLA ser menor, o objeto precisa passar por alguns tratamentos antes de ser utilizado. Por causa dessas características, na maioria das aplicações e para o objetivo

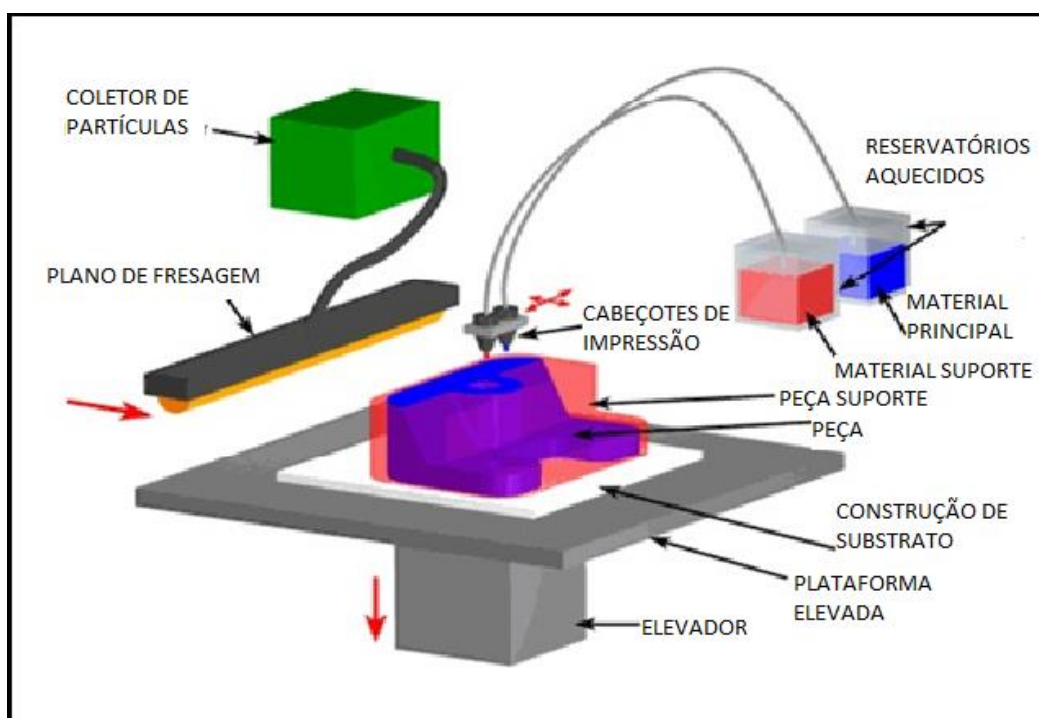
sugerido pelas tecnologias de impressoras 3D RepRap, a técnica de FDM apresenta a melhor relação custo-benefício (RAULINO,2011).

5. Cura Sólida na Base (SGC, SolidGroundCuring): é um processo bastante similar a estereolitografia (vide Figura 9), pois ambos usam radiação ultravioleta para endurecer, de forma seletiva, polímeros fotossensíveis. Contudo, ao contrário da estereolitografia, este processo cura uma camada inteira de uma vez. Em primeiro lugar, a resina fotossensível é borrifada sobre a plataforma de construção. A seguir, a máquina gera uma foto-máscara (como um estêncil) correspondente à camada a ser gerada. Esta foto-máscara é impressa sobre uma placa de vidro acima da plataforma de construção, usando-se um processo similar ao das fotocopiadoras. A seguir a máscara é exposta à radiação ultravioleta, a qual passa apenas através das porções transparentes da máscara, endurecendo seletivamente as porções desejadas de polímero correspondentes à camada atual. Após a cura da camada, a máquina succiona por vácuo o excesso da resina líquida e borrifa cera em seu lugar para dar suporte ao modelo durante sua construção. A superfície superior é fresada de forma a ficar plana e o processo é repetido para se construir a próxima camada. Assim que a peça ficar pronta é necessário remover a cera nela presente, através de sua imersão num banho de solvente. Essas máquinas são de grande porte e podem produzir modelos de grande tamanho (GORNÍ, 2001).



**Figura 9 – Cura sólida na base.**  
**Fonte: Ryall (2005).**

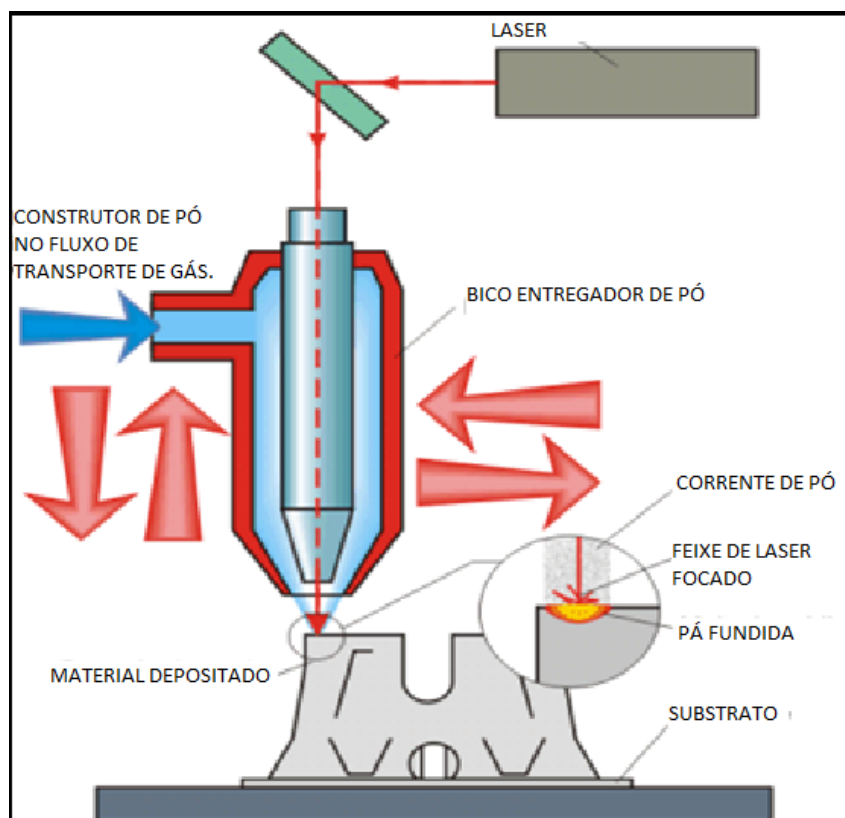
6. Impressão por Jato de Tinta (MJT, Multi Jet Modeling; BPM, BallisticParticle Manufacturing): ao contrário das técnicas expostas anteriormente, esta se refere a uma classe inteira de equipamentos que usam a tecnologia de jato de tinta. Como mostrado na Figura 10, os protótipos são construídos sobre uma plataforma situada num recipiente preenchido com material pulverulento. Um cabeçote de impressão por jato de tinta "imprime" seletivamente um agente ligante que funde e aglomera o pó nas áreas desejadas. O pó que continua solto permanece na plataforma para dar suporte ao protótipo que vai sendo formado. A plataforma é ligeiramente abaixada, adiciona-se mais material pulverulento e o processo é repetido. Ao se terminar o processo a peça "verde" é sinterizada, removendo-se o pó que ficou solto. Podem ser usados pós de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos (GORNI, 2001).



**Figura 10 – Impressão por Jato de Tinta.**  
**Fonte: Ryall (2005).**

7. Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS, Laser Engineered Net Shaping): processo relativamente novo, que apresenta a vantagem de produzir protótipos de metal plenamente densos, com boas propriedades metalúrgicas e sob velocidades razoáveis de construção. Na Figura 11 apresenta-se o processo, onde um gerador de raio laser de alta potência é

usado para fundir pó metálico fornecido coaxialmente ao foco do raio laser, através de um cabeçote de deposição. O raio laser passa através do centro do cabeçote e é focado para um pequeno ponto através de uma lente ou conjunto e lentes. Uma mesa X-Y é movida por varredura de forma a gerar cada camada do objeto. O cabeçote é movido para cima à medida que cada camada é completada. O raio laser pode ser conduzido até a área de trabalho através de espelhos ou fibra ótica. Os pós metálicos são fornecidos e distribuídos ao redor da circunferência do cabeçote por gravidade ou através de um gás portador inerte pressurizado. Mesmo nos casos onde não é necessário um fluxo de gás para o transporte do pó metálico, por causa do oxigênio atmosférico o uso do gás inerte é importante para a proteção da poça de metal fundido. Podem ser usados pós de diversas ligas metálicas, tais como aço inoxidável, cobre, alumínio e titânio. A potência do gerador de raio laser varia conforme o material usado, taxa de deposição e outros parâmetros, podendo oscilar desde algumas centenas até 20.000 watts ou mais. Os protótipos produzidos requerem usinagem para acabamento, apresentando densidade plena, boa microestrutura e propriedades similares ou melhores ao metal convencional (GORNI, 2001)



**Figura 11 – Conformação Próxima ao Formato Final via Laser.**  
Fonte: Ryall (2005).

Segue abaixo um quadro que resume as características de cinco das tecnologias de prototipagem rápida descritas acima.

	<i>SLA</i>	<i>FDM</i>	<i>SLS</i>	<i>LOM</i>	<i>3DP</i>
<i>Variedade de materiais</i>	Pequena	Média	Grande	Pequena	Média
<i>Qualidade superficial</i>	Regular	Regular	Boa	Regular	Boa
<i>Pós-acabamento</i>	Regular	Regular	Bom	Baixo	Bom
<i>Precisão</i>	Excelente	Regular	Boa	Baixa	Regular
<i>Resistência ao impacto</i>	Regular	Boa	Boa	Baixa	Baixa
<i>Resistência à flexão</i>	Baixa	Excelente	Excelente	Baixa	Baixa
<i>Custo do protótipo</i>	Alto	Baixo	Alto	Alto	Médio
<i>Pós-cura</i>	Sim	Não	Sim*	Não	Não

\*Não necessita de cura quando utiliza termoplástico.

**Quadro 1: Resumo das tecnologias RP.**  
**Fonte: Raulino (2011).**

## 2.2 CENÁRIO ATUAL

A cada dia, novas máquinas de prototipagem rápida são criadas, popularmente conhecidas como “impressoras 3D”, com diferentes finalidades e custos que variam de menos de cinco mil reais até duzentos mil, no caso das mais rápidas e sofisticadas.

De acordo com Ciriaco (2013), a Cliever CL-1 é um modelo brasileiro de impressora 3D, fabricada em aço e carbono, que utiliza a tecnologia de fabricação por filamento fundido (FFF ou FDM), ou seja, trabalha com um filamento plástico como matéria-prima para criar objetos em 3D. Disponível por R\$ 4.650.

A Metamáquina 2 foi a primeira impressora 3D fabricada no Brasil a ter como enfoque a economia. Também usa o método FDM na impressão dos objetos, e é vendida por R\$ 3.700.

A linha Cube de impressoras 3D é bastante atrativa, pois vem com *software* compatível com Windows e Mac, sem que haja a necessidade de

utilizar modeladores sofisticados de CAD. “Ela traz conexão WiFi, ou seja, pode ler arquivos sem estar conectada via cabo a outro dispositivo, e imprime em materiais ABS e PLA, que oferecem resistência e brilho, respectivamente, aos objetos.” (CIRIACO, 2013).

A impressora 3D disponível na UTFPR-CP é a RepRap (Replicating Rapid Prototyper) modelo Prusa Mendel, um tipo *OpenSource* (código aberto), ou seja, seu projeto é livre, qualquer um pode alterá-lo de acordo com as suas necessidades. A maioria de seus componentes são feitos de plástico, logo a própria Rep Rap pode imprimi-los (auto-replicável). De montagem simples, permite imprimir uma ampla gama de objetos. Ela esquenta um filamento plástico e um cabeçote com um pequeno furo distribui esse plástico derretido camada por camada. Por apenas 400 dólares pode-se adquirir uma máquina destas.

De modo geral, as impressoras 3D e suas técnicas de prototipagem rápida podem ser aplicadas em diversas áreas, desde peças automotivas, desenvolvimento de objetos de engenharia, prototipagem para empresas de design e auxílio no campo da robótica, até à medicina. Segundo Fernando José de Almeida, um dos executivos de vendas da Robotec, alguns pesquisadores em todo o mundo já desenvolvem tecnologias que permitem a impressão em material biocompatível, permitindo assim a fabricação de próteses de alta qualidade e custo reduzido.

## 2.3 MOTORES ELÉTRICOS

Buscando a melhora no mecanismo de movimento dos eixos, conseqüentemente, uma maior precisão de posicionamento, este trabalho apresenta um estudo em relação a dois tipos de motores disponíveis no mercado, sendo eles o motor de passo e o servo motor com *encoder* (sensor de posicionamento), e posteriormente, A conclusão da melhor configuração, levando em consideração o custo benefício da tecnologia empregada.

Em geral, os motores elétricos, transformam energia elétrica em energia mecânica, notadamente cinética (implica movimento). Em sequência será

apresentado os dois tipos de motores estudados com seu funcionamento e suas vantagens e desvantagens, trazendo uma ideia sucinta de tais motores.

### 2.3.1 Motor de Passo

Segundo Brites e Santos (2008), os motores de passo são dispositivos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares discretas. O eixo de um motor de passo é rotacionado em pequenos incrementos angulares, denominados “passos”, quando pulsos elétricos são aplicados em uma determinada sequência nos terminais deste.

Motores de passo tem uma grande utilidade quando movimentos precisos são requisitados. Eles são aplicados onde é necessário controlar vários parâmetros tais como: ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo. Apresentam algumas desvantagens, em relação a sua força (torque), e na sua capacidade de desenvolver altas velocidades (ao contrário da maioria dos outros motores elétricos), mas mesmo assim fornece a possibilidade de controlar seus movimentos de forma precisa. Segundo Brites e Santos (2008) “Por conta disso este é amplamente usado em impressoras, scanners, robôs, câmeras de vídeo, brinquedos, automação industrial entre outros dispositivos eletrônicos que requerem de precisão”.

Abaixo estão listadas algumas vantagens que o motor de passo apresenta:

- Boa funcionalidade em baixa velocidade e elevado torque.
- Rotação anti-horária e horária.
- Apresenta maior vida útil e não necessita de escovas.
- Tem a capacidade de permanecer inativo por longo período.
- Apresenta uma velocidade proporcional à frequência dos pulsos elétricos.
- Acelera e desacelera com praticidade, quando necessário.



### 2.3.2 Servo-Motor com *encoder*

Para explicar o funcionamento e as vantagens de um servo-motor com *encoder*, primeiramente será abordado a função do *encoder* no motor e posteriormente, como funciona os sistemas de controle de malha fechada e malha aberta, sendo que servo-motor com *encoder* trabalha em malha fechada e motor de passo em malha aberta.

#### 2.3.2.1 *Encoder*

O *encoder*, sendo um sensor, é um dispositivo que serve para medir posição de algum objeto que se move. Ele tem a capacidade de auxiliar uma impressora a “saber” em que local ela está imprimindo.

Existem *encoders* que podem ser classificados de rotativos ou lineares e absolutos ou relativos. Os *encoders* rotativos são utilizados em objetos que estão em rotação, como as rodas de um robô. Já, os *encoders* lineares, servem para indicar posições em superfícies e são utilizados, por exemplo, em impressoras.

A classificação de absolutos e relativos vem da forma como indicam a posição. Os absolutos indicam a posição real do objeto, ao passo que os relativos indicam a mudança de posição. Pensando em uma máquina CNC sua linguagem pode ser tanto com coordenadas absolutas como com coordenadas relativas.

#### 2.3.2.2 Sistemas de Controle em Malha Aberta e Malha Fechada

Com relação à forma de implementação os sistemas de controle, podem ser classificados de duas formas, em malha aberta e em malha fechada.

- Malha aberta: Quando o sistema de controle gera o sinal para o atuador, com base no sinal piloto, sem receber nenhuma informação do sobre o andamento do processo.

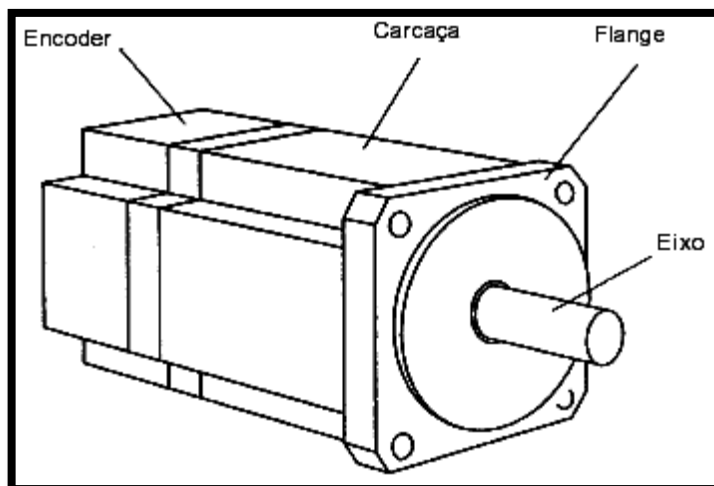
- Malha fechada: Quando o controlador gera o sinal para o atuador, com base no sinal piloto, porém agora ele recebe informação sobre o andamento do processo, através de um *transdutor (encoder)*. O sinal entrada, no caso, corresponde à diferença entre o *set-point* e o sinal do transdutor, por isso, também é chamado de sinal de erro.

A malha fechada apresenta algumas vantagens em relação a malha aberta, principalmente no que tange a menor sensibilidade a interferências e ruídos. Isto porque o sistema sendo realimentado, qualquer desvio do sistema, gera um erro que tende a ser compensado. Além disso, o sistema fica mais independente dos parâmetros da planta, já que ele passa a atuar sobre o sinal de erro.

Entretanto, também há desvantagens como o custo mais elevado e a possibilidade do sistema atingir a instabilidade quando o ganho do controlador é muito alto.

Depois de abordados contextos importantes para entender o funcionamento do servo-motor com *encoder*, na sequência será apresentado as características destes.

São motores elétricos contínuos com a capacidade adicional de terem sua velocidade controlada por meio da tensão, da corrente e da frequência, dependendo do seu tipo. Basicamente são motores que devem trabalhar sobre a ação de algum mecanismo de servo posicionamento. Em razão disto, possuem sempre um mecanismo de realimentação de sua posição, que pode ser um *encoder*. A Figura 12 ilustra um servo motor com *encoder* acoplado no mesmo eixo do servo motor, formando um corpo único.



**Figura 12 – Servo-motor com *encoder*.**  
**Fonte: Brites e Santos (2008).**

Os servo motores são classificados de acordo com a forma de alimentação sendo como servo-motores DC ou CC (Corrente Contínua) e servo-motores AC ou CA (Corrente Alternada).

### 2.3.3 Comparações entre os Motores de Passo e Servo-motores com *encoders*

Os autores Brites e Santos (2008), disponibilizaram um quadro comparativo entre os motores estudados com suas principais características (Quadro 2).

	<b>Motor de Passo</b>	<b>Servo-Motor</b>
<b>Velocidade</b>	Baixa	Média
<b>Torque</b>	Alto/Médio	Baixo/Alto
<b>Facilidade de controle</b>	Média	Complexo
<b>Precisão</b>	Alta	Muito Alta
<b>Durabilidade</b>	Ótima	Média
<b>Requer Manutenção?</b>	Não	Sim

**Quadro 2: Comparação entre os Motor de Passo e Servo-Morto.**  
**Fonte: BRITES; SANTOS. Grupo PET-Tele (2008)**

Algumas comparações foram tiradas da tabela pelos autores Brites e Santos (2008), explicando o porque da classificação dada para cada característica. Em sequência serão abordadas.

- Motores de Passo perdem passos em altas velocidades, já Servos Motores conseguem altas rotações por usarem para movimentar-se da mesma forma que os Motores de Corrente contínua.
- Servo-Motores não conseguem se manter em uma posição fixa estando ligados, apenas o Motores de Passo tem esta característica. Entretanto, é possível usar servo motores para tal fim. Porém, faz-se necessário com que este corrija sua posição na tentativa de se manter parado, o que é pouco prático tendo em vista que seu torque é pequeno em baixas velocidades.
- Motores de passo requerem pulsos em determinada ordem para se movimentar, os quais exigem um drive para o controle dos mesmos. Servo-motores, no entanto requerem um hardware mais complexo que analise os dados como posicionamento e velocidade e envia as instruções de forma que o motor se posicione na posição requisitada.
- Motores de Passo podem ser controlados de forma a fazer movimentos discretos (passos); Servo-Motores podem fazer movimentos mais suaves que Motores de Passo (possuem maior resolução), bem como é possível fazer um controle de posicionamento com o mesmo.
- Motores de passo são extremamente duráveis uma vez que não usa escovas ao contrário de Servo-Motores (que é um Motor de Corrente Contínua com controle de posicionamento). Este último ainda pode ter problemas com o aparato ótico que faz o controle do posicionamento (*encoder*).

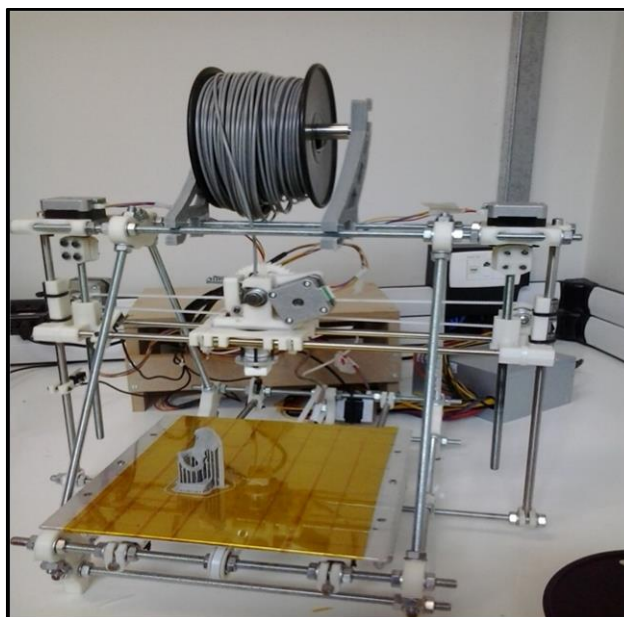
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 IMPRESSORA 3D

No universo da impressão 3D, nota-se que essa tecnologia tem todo um potencial para emplacar e se tornar cada vez mais útil no seguimento de fabricação do produto final, por ter a capacidade de produção de peças com geometrias complexas e praticamente impossíveis com outras tecnologias de manufatura convencionais. (OKANE, 2011).

As impressoras 3D, antes restritas a grandes empresas devido aos custos, estão se popularizando em extrema velocidade, pois foram desenvolvidas tecnologias que as tornaram extremamente acessíveis, como as impressoras 3D Rep Rap. (TAKAGAKI, 2012)

A impressora que serviu de plataforma para o desenvolvimento do presente trabalho é uma impressora 3D Rep Rap do modelo Prusa Mendel, contida na Figura 13, onde foi possível a realização das pesquisas e testes necessários para verificar os componentes e fenômenos que diminuem e influencia na precisão e estabilidade do processo, com os resultados apresentase uma configuração de impressora com potencial de melhoria, tanto na geometria como no acabamento, na impressão de peças.



**Figura 13 – Impressora ‘Prusa Mendel’ disponível na UTFPR – CP.  
Fonte: Autoria Própria.**

Alguns fenômenos e componentes foram identificados e posteriormente serão explicados.

Durante o processo de impressão ocorriam interrupções ou falta de comunicação da impressora com o computador que a gerencia. Então, percebeu-se que isso acontecia devido ao pequeno comprimento dos fios que liga a placa de controle aos elementos (motores e extrusora) da impressora. Em virtude do movimento do sistema de impressão os fios se desconectavam dos contatos e, assim, os motores paravam de funcionar.

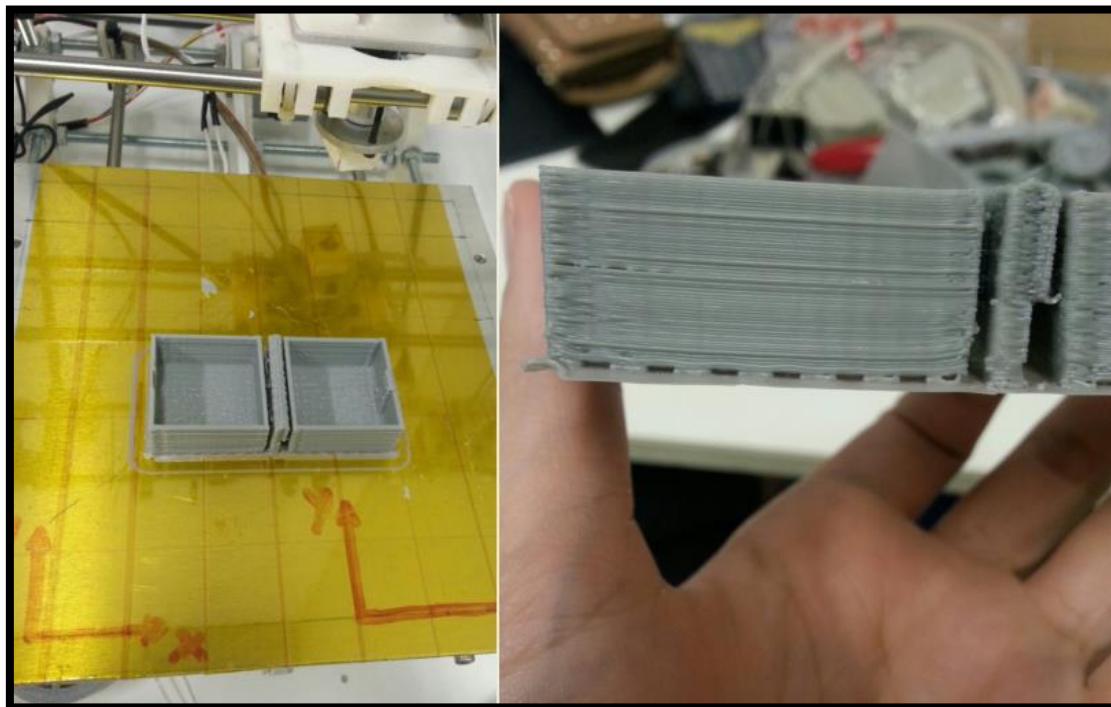
Outro fator importante é a correta regulagem dos potenciômetros pertencentes à placa, que tem como função regular as potências dos motores de passo dos eixos x, y e z. Com as potências corretas nos motores de passo o movimento se torna preciso e sem desalinhamentos, os quais podem ser vistos por meio da Figura 14. Esses desalinhamentos ocorrem no momento da impressão em relação ao eixo x, sendo que este estava com a regulagem do potenciômetro errada.



**Figura 14 – Impressão com desvios nos eixos.**  
**Fonte: Autoria própria.**

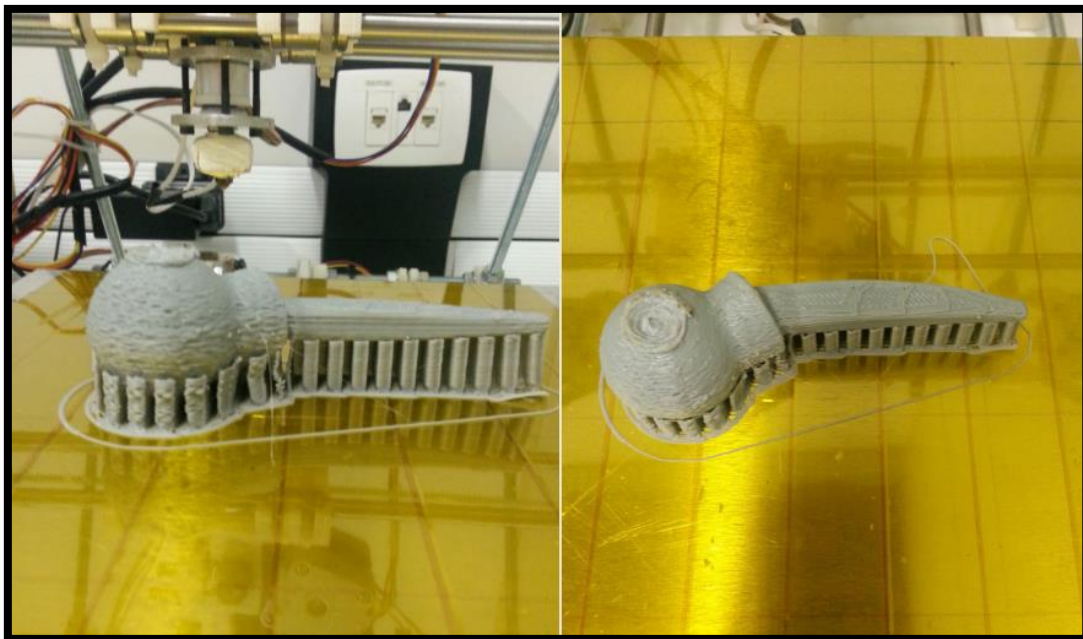
Com os ajustes necessários os resultados obtidos foram regulares, com pouca precisão, mas após algumas tentativas de regulagem dos potenciômetros os resultados foram cada vez mais satisfatórios. Foram impressos vários objetos para verificar fatores, como o empilhamento, qualidade final da

peça e precisão. Na Figura 15, pode ser verificado o empilhamento da peça com resultado regular.



**Figura 15 – Visualização do empilhamento da impressão.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na impressão de peças esféricas a qualidade fica bem reduzida, um dos motivos que influencia é que nas últimas camadas o tempo para cura se torna muito curto, não sendo suficiente e acontecendo um acúmulo de material camada após camada, isto pode ser visualizado da Figura 16, uma alternativa para evitar este último problema seria a instalação de um *cooler* próximo ao bico extrusor, para acelerar o resfriamento do material recém-depositado. Ainda na Figura 16, também pode ser visto que no restante da peça onde a geometria não é esférica, a qualidade de impressão foi satisfatória. Finalmente na Figura 16, há o desprendimento da interface mesa/peça, que pode ter sido causado pelo fenômeno de perda de energia em forma de calor, devido à estrutura da impressora 3D Rep Rap ser aberta e estar sempre em contato com o ambiente externo, possibilitando um fluxo de ar.



**Figura 16 – Impressão teste de uma prótese de quadril em escala reduzida.  
Fonte: Autoria própria.**

O intuito da utilização da impressora Rep Rap disponível é para servir de plataforma e verificação dos fatores que influenciam negativamente na precisão, exatidão e qualidade de impressão da máquina. Então, com essas informações buscar-se-á desenvolver um projeto que minimize todos esses fatores que afetam a qualidade de impressão.

Pode-se constatar que na nova impressora 3D, sua estrutura física deve ser a mais rígida possível, para que esta não receba impactos externos e não sofra influência de vibrações, devido à própria movimentação necessária para o processo de impressão. Na impressora 3D Rep Rap modelo Prusa Mendel a estrutura é composta por barras roscadas interligadas por meio de conectores produzidos pela própria impressora, não sendo rígida suficiente para evitar vibrações causadas pela movimentação dos eixos no momento da impressão. Logo, para uma maior estabilidade e conseqüentemente melhor precisão e qualidade de impressão, a estrutura da nova impressora 3D possui perfil quadrado, com estrutura rígida, com todos os elementos ligados por solda e/ou parafusos.



### 3.2 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA.

No mercado atual existem sete diferentes tecnologias de prototipagem rápida por adição de material, entre elas a Estereolitografia (SLA), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), a Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM), a Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) e a impressão tridimensional (*3D Printing*).

Há cinco etapas que são atribuídas para o processo de prototipagem rápida por adição de material, sendo elas:

- I. Projeto do objeto em CAD
- II. Projeto em formato STL;
- III. Fatiamento em finas camadas transversais e criação do código G via software;
- IV. Empilhamento de camadas;
- V. Limpeza e acabamento do objeto.

As etapas são mais bem exemplificadas na Figura 17.

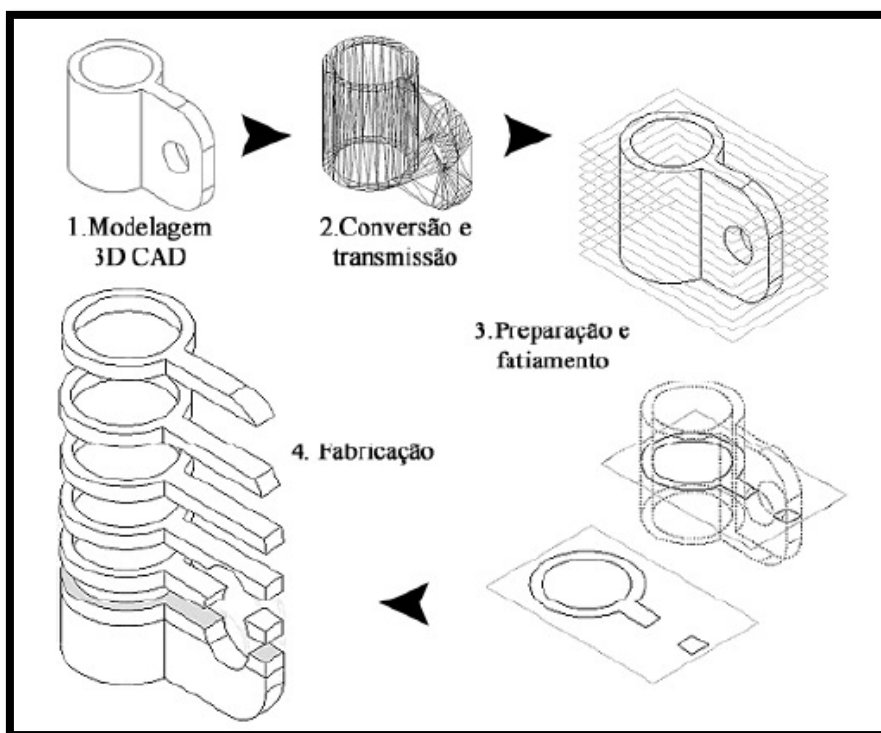
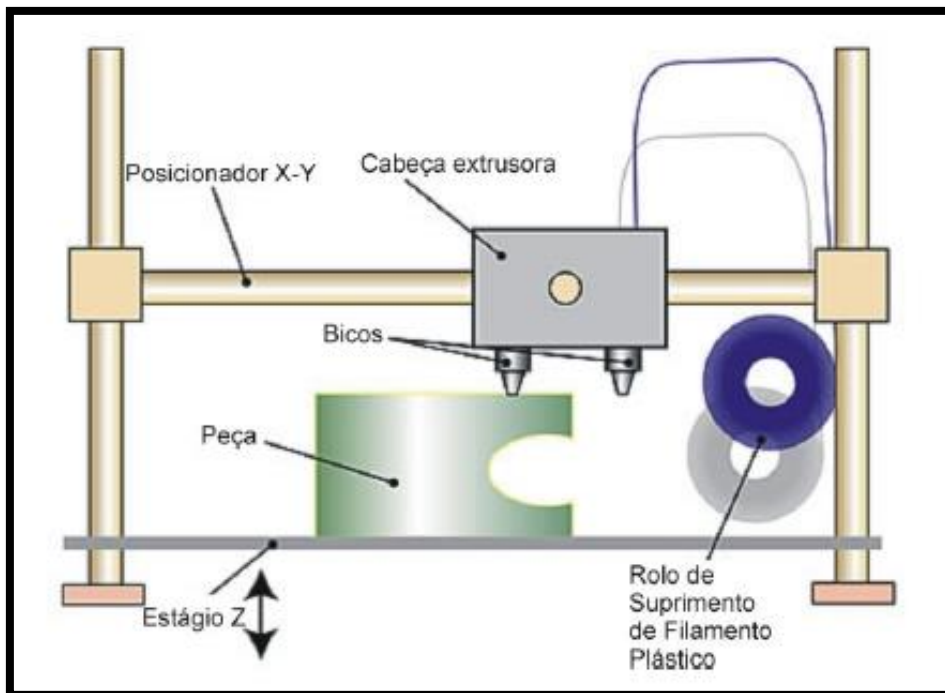


Figura 17 – Ciclo básico do processo de PR por adição de camadas.  
Fonte: Mello (2010) apud Beal (2002)

A FDM é um processo que consiste na deposição de filamentos de material plástico fundido sobre uma plataforma, onde são criadas camadas sobre camadas até a obtenção do objeto que foi projetado inicialmente. Além do material da peça que está sendo impressa, há também o material que vai construir os suportes necessários para que nas áreas suspensas do modelo a impressão do objeto seja possível. Os filamentos de ABS, elastômeros ou cera são destinados ao modelo, e os destinados aos suportes são uma mistura de ABS e cal.

Segundo Mello (2010), a máquina para a FDM possui uma plataforma, revestida de uma espuma densa e flexível, que se movimenta no sentido vertical (eixo Z) e um cabeçote que possui dois bicos extrusores de arames aquecidos: um para alimentar as camadas do modelo e o outro para a construção dos suportes. Esses arames ficam estocados dentro da máquina, em ambiente a vácuo aquecido, pois a umidade do material dentro do bico extrusor poderia causar formação de bolhas, que impediria a continuidade de sua deposição pelo bico. Os bicos extrusores, que na verdade, funcionam como uma resistência são alimentados por esses filamentos através de duas guias giratórias ligadas a um motor, as quais vão transferindo para eles os arames estocados no rolo

O software que fará a interação do dispositivo de impressão com o computador é um misto CAD/CAM, o sistema CAM (Computer Aided Manufacturing) monitora os comandos de construção do modelo. Os comandos são gerados a partir de códigos G gerados pelo software, após o fatiamento do modelo, esses comandos guiam o bico extrusor para deposição de material fundido. Quando é completada a camada a plataforma desce (movimento eixo z) é dá início a uma nova camada, sucessivamente esse processo é realizado até a obtenção do modelo. A Figura 18 demonstra o processo.

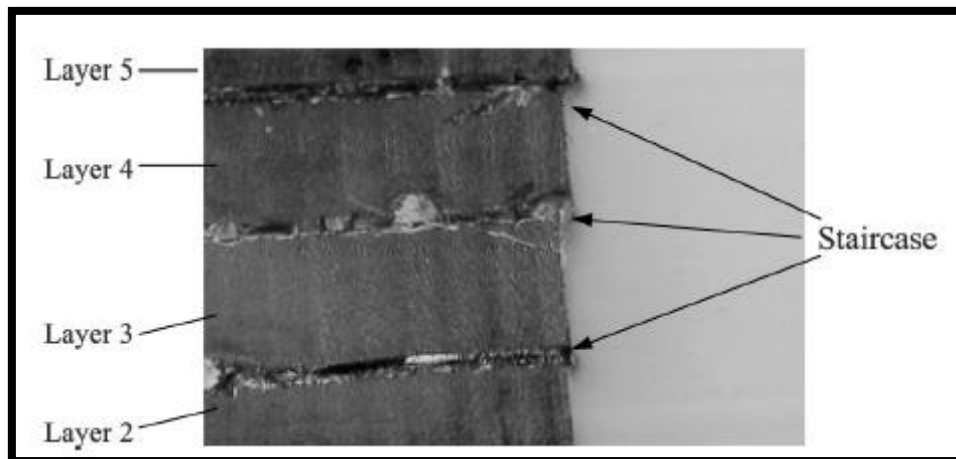


**Figura 18 – O processo de modelagem por deposição de material fundido.**  
**Fonte: Mello (2010) apud Artis (2006).**

O processo desperdiça pouco material, sendo somente, devidos os suportes necessários para a impressão. Os suportes são retirados da peça impressa com facilidade.

No processo de FDM, o material é depositado com temperatura elevada, podendo apresentar textura pastosa, sendo resfriado posteriormente.

Alguns fenômenos podem ser observados nos processos de deposição de material sendo uma deles o efeito escada (*staircase*), que apresenta uma descontinuidade da superfície da peça impressa, devido ao efeito do seu resfriamento e da deposição de camadas. (MELLO, 2010 apud WENBIN, TSUI; HAIQING, 2005). Esse efeito ocorre entre duas camadas adjacentes (*layers*) como ilustra a Figura 19.



**Figura 19 – Efeito escada (*staircase*).**  
Fonte: Mello (2010) apud Wenbin, Yong e Haiqing (2005)

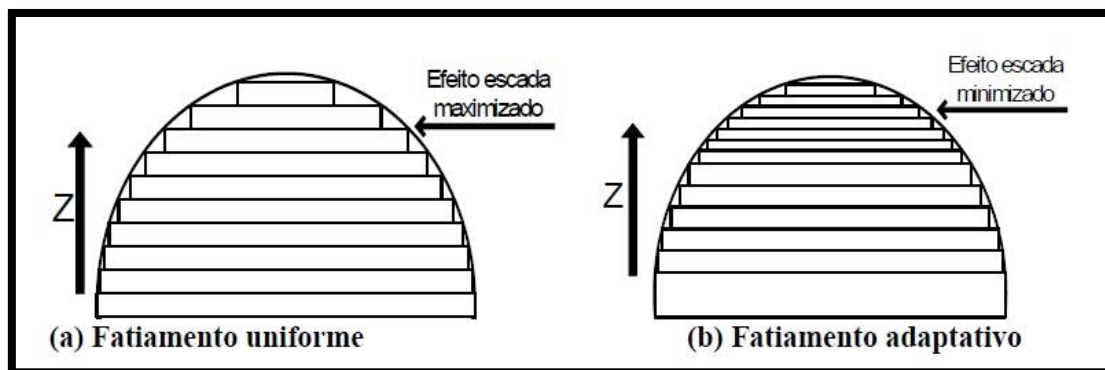
O distanciamento entre as camadas ou a espessura de fatiamento, é constante, podendo adquirir o valor desejado através do software, fatiando uniformemente o modelo. O fatiamento uniforme não tem a capacidade de alterar a espessura da camada, mesmo que necessário um refinamento em alguma área, para adquirir uma melhor representação da geometria do modelo. Para obtenção desse refinamento é necessário diminuir a espessura da camada constante em toda peça, mesmo sabendo que alguns detalhes da geometria do modelo são obtidos com espessura de camada maior. Nos programas de fatiamento convencional não é possível variar a espessura da camada, ou seja, todas as camadas têm a mesma espessura. Porém, há softwares que possibilitam essa variação, tendo em vista que existem contornos que não demandam de camadas ou fatias muito finas, logo um método de fatiamento adaptativo, aumentando a precisão dimensional, melhorando a qualidade da peça e também uma redução no tempo de impressão (VOLPATO *et al*, 2009).

A exatidão na impressão de uma peça está relacionada diretamente ao distanciamento de camadas, notando que, quanto maior a espessura da peça, pior a precisão geométrica da mesma.

O método de fatiamento adaptativo apresenta três vantagens principais: qualidade do acabamento superficial do objeto é melhorada, devido à diminuição do efeito escada; o tempo de impressão do objeto é reduzido, pois em regiões onde o efeito escada não tem influência significativa, utilizando camadas mais espessas, conseqüentemente, diminuindo o número de camadas necessárias para fabricação; o efeito escada é amenizado possibilitando também

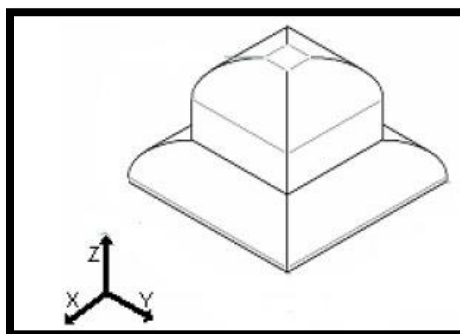
uma melhor precisão geométrica e dimensional no objeto impresso (VOLPATO *et al*, 2009).

Na Figura 20 abaixo a representação esquemática do fatiamento uniforme e adaptativo.



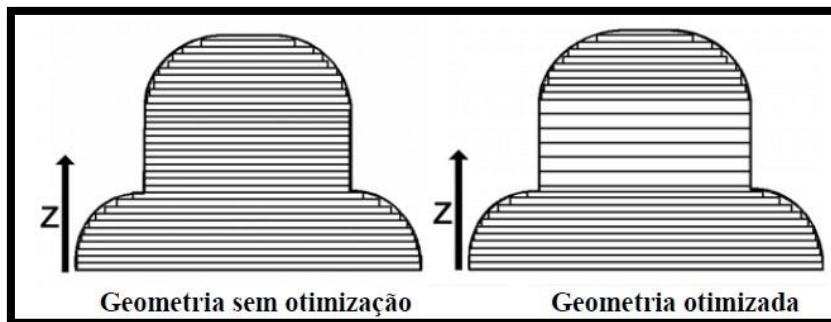
**Figura 20 – Tipos de fatiamentos.**  
Fonte: Volpato *et al* (2009).

Para avaliar os tipos de fatiamento, foi projetado um modelo (Figura 21) com uma geometria de forma a facilitar a aplicação do fatiamento adaptativo (VOLPATO *et al*, 2009).



**Figura 21 – Geometria da peça.**  
Fonte: Volpato *et al* (2009).

Os resultados do fatiamento uniforme e do fatiamento adaptativo estão demonstrados na figura 22.



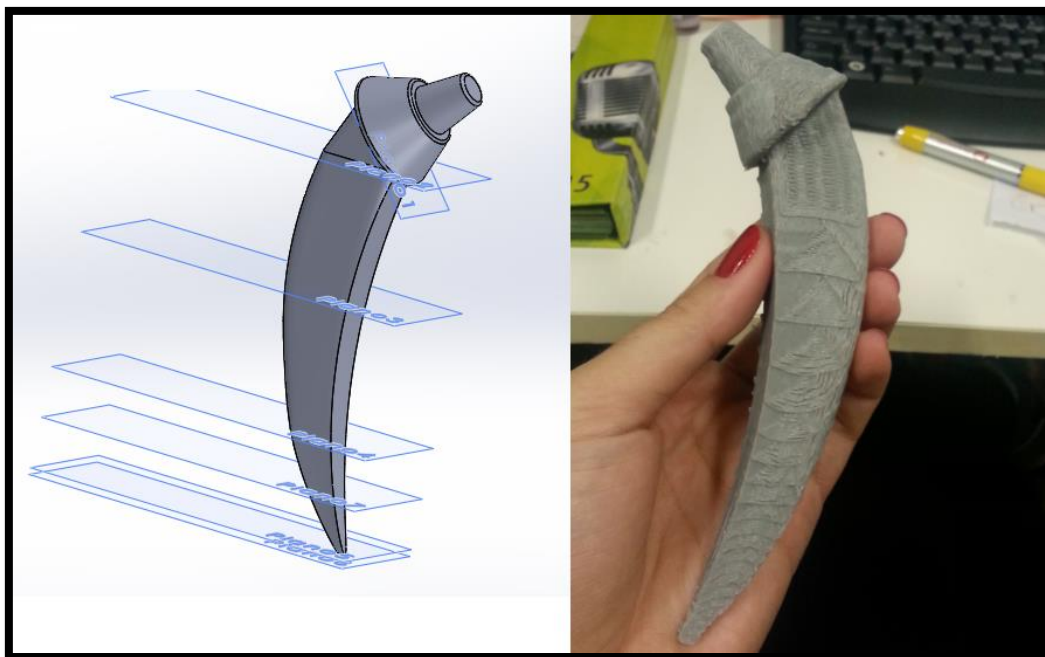
**Figura 22 – Fatiamentos da peça estudada.**  
**Fonte: Volpato et al (2009).**

Como pode ser visto na Figura 22, a geometria otimizada que utilizou fatiamento adaptativo possui camadas mais espessas onde sua geometria é mais simples, reduzindo o tempo de impressão da peça, outro fator muito importante é que o efeito de escada é amenizado, pois há menos camadas em relação a geometria sem otimização que sofreu fatiamento uniforme, logo fica melhor exemplificadas as vantagens que o processo de fatiamento adaptativo apresenta.

### 3.3 METODOLOGIA E IMPRESSÕES

Com o auxílio de softwares de CAD, será feito o esboço 2D (bidimensional) e 3D do objeto projetado. Tendo a capacidade de criar arquivos no formato STL, ou gerar arquivos a partir de ressonâncias magnéticas na área médica, tais softwares garantem a modelagem, e possibilitam que a impressão 3D seja realizada.

Na etapa seguinte, há a necessidade de um software que fará todo o reconhecimento do arquivo, e dará a possibilidade da impressão 3D do objeto. O software utilizado para impressão é o *Repetier-Host*, em que primeiramente a peça que será impressa é carregada na sua interface com o arquivo no formato STL. Com a função *slicer*, é feito o fatiamento da peça, e então, criado o código G, o qual define as coordenadas de impressão e a quantidade de camadas necessárias para a impressão. Para verificação do potencial de impressão Rep Rap disponível foram feitos alguns modelos de próteses de haste de quadril, conforme Figura 23 e Figura 24.

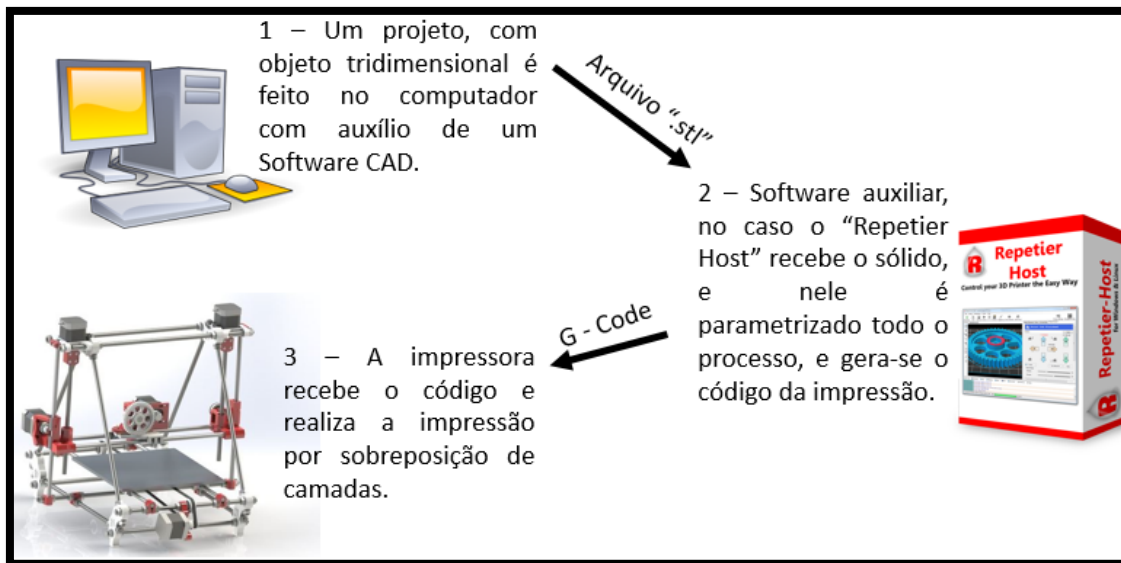


**Figura 23 – Impressão de modelos de próteses de quadril. À direita o modelo em software CAD e a esquerda o modelo impresso.**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 24 – Modelos de duas próteses de quadril projetadas impressas.**  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 25 é um esquema de como se processa as fases de execução de uma impressora 3D.



**Figura 25 – Esquema de funcionamento de uma impressora 3D.**  
 Fonte: Damasceno *et al* (2014).

### 3.4 MATERIAIS UTILIZADOS PARA IMPRESSÃO 3D

O material utilizado para impressão vem em formato de filamentos de 3,0 ou 1,75 mm de diâmetro (Figura 26), formando um rolo, estes podem apresentar variadas cores. O rolo de material pode ser acoplado a um suporte que foi desenvolvido para otimizar o processo de alimentação do bico extrusor. Se o bico apresentar 0,5 mm, o diâmetro do filamento deve ser de 3 mm, caso o bico apresentar 0,3 mm de diâmetro o filamento usado é o de 1,75 mm. Há várias empresas que fornecem esse tipo de material.



**Figura 26 – Filamento de material.**  
 Fonte: Desconhecida.



O material ABS é o mais utilizado na impressão por modelagem por fusão e depósito, sendo este derivado do petróleo. Esse polímero é bastante rígido e leve, apresentando resistência mecânica considerável e ductilidade, e também resistência ao impacto além de ser um material isolante elétrico. Uma das desvantagens é que no processo de resfriamento o ABS se contrai, dificultando o processo de adesão peça/mesa, e a peça acaba sofrendo descolamento que conseqüentemente, gera imperfeições na base. Para melhorar a interface mesa/peça uma das soluções é o aquecimento da mesa, geralmente entre 100 a 120°C, recoberta por fita Kapton. A temperatura de extrusão nas impressoras Rep Raps está na faixa de 210 a 240°C, dependendo da máquina e do tipo de material.

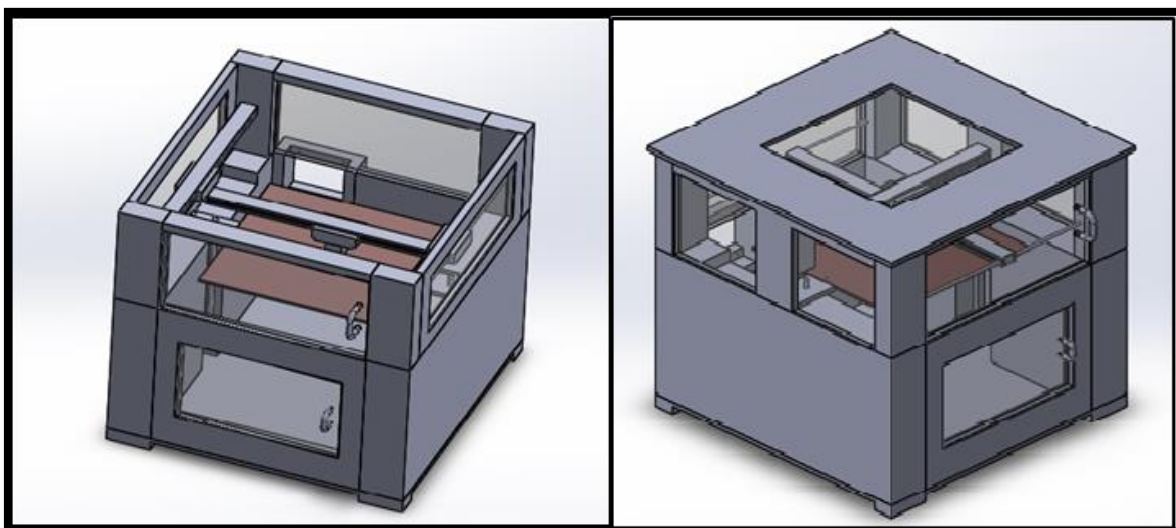
O PLA é um polímero produzido a partir de ácido láctico fermentado a partir de culturas como milho e cana-de-açúcar. Esse tipo de material apresenta propriedades melhores que o ABS em determinados projetos, ele apresenta menos deformação depois de aplicados e libera menos gases ao atingir o seu ponto de fusão, além de ser biodegradável.

O PLA é quase tão usado quanto o ABS como matéria-prima das impressoras 3D. Esse material não necessita do aquecimento da mesa, isto implica facilidade no momento da impressão. A temperatura de extrusão do PLA está entre 170 C° a 200 °C e tem rigidez superior ao ABS, conseqüentemente é menos flexível. Para peças complexas que necessita de material suporte, sendo que este promove imperfeições na peça. Devido seu menor ponto de fusão o PLA não suporta altas temperaturas. (HARADA, 2005)

Objetos impressos com ABS apresentam qualidade maior, mas, o PLA apresenta objetos mais resistentes por possuir ponto de fusão menor. Ainda, o PLA possui maior viscosidade no estado líquido, ocasionando uma menor força para extrusão do material, o que garante uma maior durabilidade para o equipamento. Na universidade foram feitos experimentos, onde a impressão com ABS de boa qualidade e puro apresentou um acabamento superior e uma rigidez maior no objeto impresso. (DAMASCENO *et al*, 2014)

#### 4 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

Como explicado anteriormente à base para o novo protótipo de impressão 3D é o projeto do autor Damasceno *et al* (2014), que desenvolveu uma impressora 3D se preocupando com uma melhoria na parte de vibrações causadas pelo movimento dos eixos, qualidade e maior volume de impressão e um estudo para a estrutura ser totalmente lacrada, para evitar a perda de fluxo de calor, mantendo uma temperatura constante na mesa e no ambiente de impressão. Tendo em vista que alguns componentes da máquina projetada pelo autor Damasceno *et al* (2014) não seriam modificados, como o projeto da estrutura e da mesa da máquina de impressão 3D, que envolveu a ampliação da área de impressão e escolha do mecanismo de movimentação do eixo z (fusos de esferas), o objetivo desse trabalho é desenvolver um mecanismo de movimentação dos eixos x e y, tentando alcançar soluções com custos mais baixos, reduzindo elementos de máquinas, como exemplo as guias lineares, e também melhorar a parte de controle de movimentação dos eixos com uso de sensores nos motores. A impressora que sofrerá as modificações está demonstrada na Figura 27 abaixo.



**Figura 27 – Impressora 3D base utilizada.**  
Fonte: Damasceno, 2014.

A utilização de componentes comumente encontrados no mercado contribui para a redução de custos do projeto. Para as partes componentes fora

de série serão especificados os processos de fabricação mais adequados à demanda do produto

Para melhor organização do projeto a ser realizado, dividiu-se a máquina em conjuntos portadores de funções, onde cada um será explicado e exemplificado abaixo pela ordem citada a seguir. Para identificá-los, recorreu-se à estrutura funcional do produto, e como resultado foram obtidos os seguintes conjuntos: eixos (X, Y e Z); mesa; extrusora; estrutura e seleções dos motores elétricos.

## 4.1 EIXOS

Dentro do projeto em questão, os eixos desenvolvem papéis importantes no sistema em desenvolvimento. Além de serem responsáveis pela movimentação ao longo das suas respectivas direções, servem de suporte para outros conjuntos importantes, como a extrusora e a mesa. A imprecisão de movimento destes pode acarretar em uma queda significativa da qualidade, preenchimento e acabamento da produção do protótipo. Cada um dos três eixos será brevemente descrito, para, então, serem visualizados os desenhos das peças e a lista de materiais.

### 4.1.1 Eixo X e Y

No projeto do autor Damasceno *et al.* (2014), o mecanismo de movimentação do eixo x e y, consiste em um sistema de guias lineares convencionais do tipo de esfera, com acionamento por correia, onde este tem como características: uma alta precisão de posicionamento, pois como o contato entre a carga e o trilho é realizado sob o movimento rotativo das esferas, o coeficiente de atrito é muito baixo, fazendo com que não houvesse nenhuma interrupção enquanto a carga está se movendo; movimento de alta precisão e maior vida-útil devido a recirculação das esferas e lubrificação contínua do sistema; alta velocidade de movimento com um motor de baixa potência devido

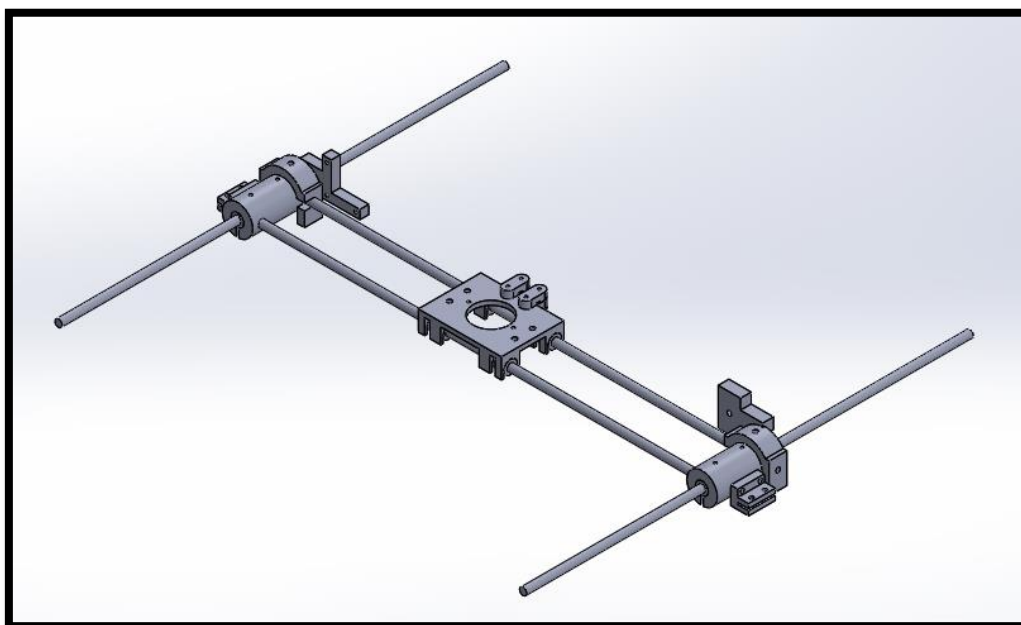
ao baixo coeficiente de atrito; igualdade de capacidade de carga em todas as direções, tanto na horizontal quanto na vertical; fácil instalação; fácil lubrificação; intercambiável, sendo facilmente substituídas caso ocorra qualquer falha.

A Figura 28 representa a guia linear do tipo esfera, com acionamento mecânico por correia.



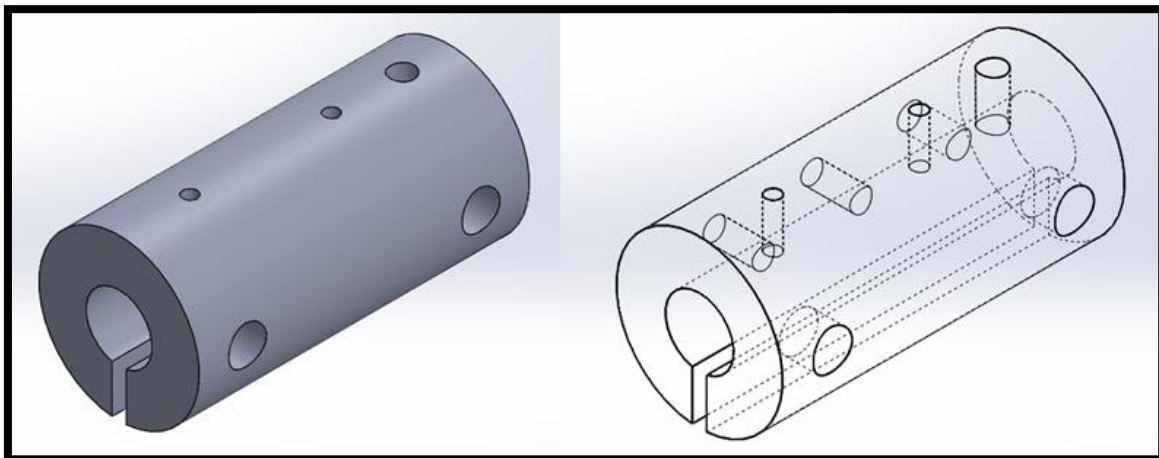
**Figura 28 – Guia Linear com acionamento por correia e seus componentes.**  
Fonte: Desconhecida.

Com o intuito de diminuir os custos e os elementos de máquinas empregados, estudou-se a possibilidade de emprego das guias de deslizamento circulares. A Figura 29 representa o sistema de movimento dos eixos X e Y modificado.



**Figura 29 – Mecanismo de movimentação do eixo x e y projetado.**  
Fonte: Autoria própria

Serão utilizadas buchas de esferas que serão encaixadas em uma camisa responsável para dar ligação às outras guias lisas que farão a movimentação da extrusora. Essas camisas serão fabricadas por impressão na impressora 3D Stratasys Objet 24 presente na UTFPR-CP, na Figura 30 pode se ter a visualização.

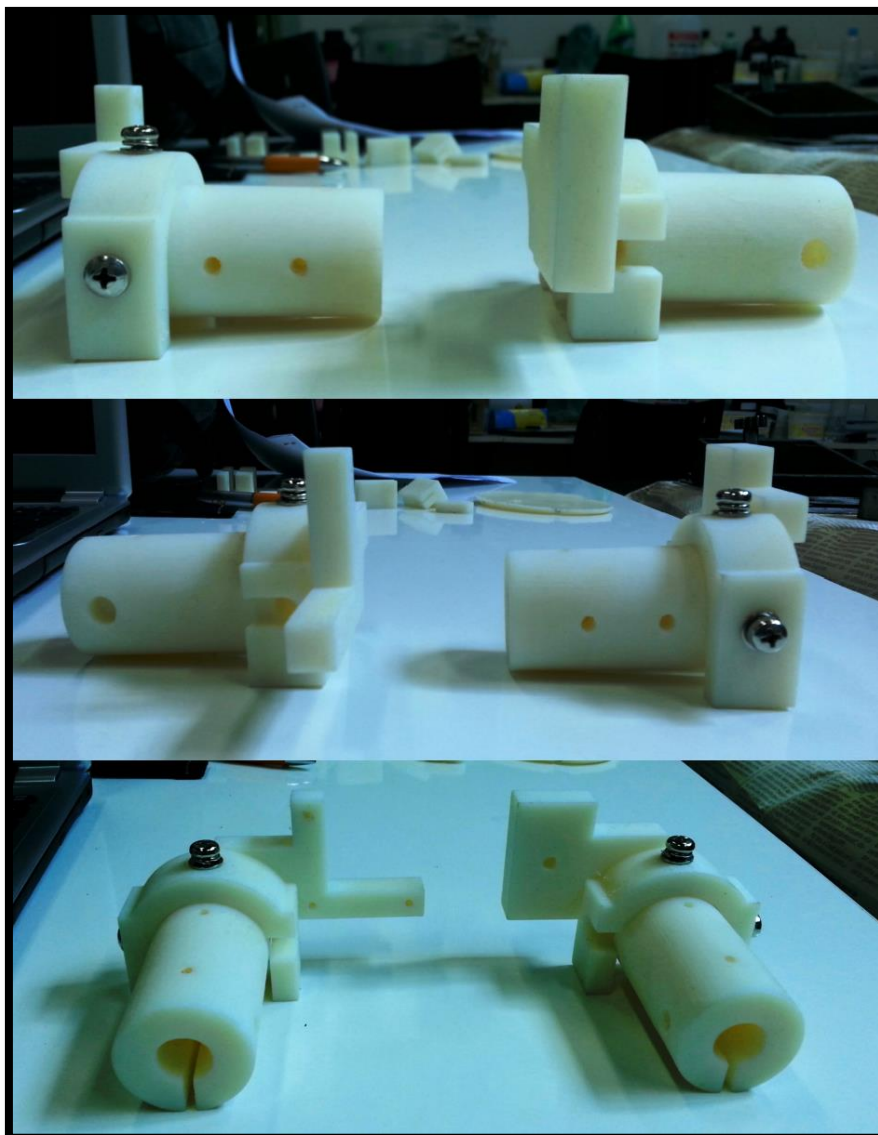


**Figura 30 – Camisa projetada (peça do mecanismo de movimentação dos eixos x e y).**  
Fonte: Autoria própria.

O conjunto da camisa com a bucha de esfera será movimentado por meio de correias. Essa mudança dará um movimento com precisão considerável e capacidade de absorção e redução das vibrações causadas devido à movimentação do mecanismo, em relação ao modelo Prusa Mendel disponível como modelo de comparação, a mudança de posição dos eixos contribui para uma melhoria na impressão.

No eixo x (responsável pelo movimento da extrusora) o mecanismo de movimentação da impressora Prusa Mendel será mantido, que consiste em uma correia mecânica de passo de 2,5 mm, onde sua precisão e eficácia são bastante limitadas.

A camisa e os suportes para o motor e para a engrenagem, que dá a possibilidade da movimentação do carro da extrusora demonstrados na Figura 31, onde se tem a visualização do mecanismo de movimentação dos eixos x e y, foram impressos em uma impressora Stratasys Objet 24.



**Figura 31 – Camisas e componentes do mecanismo de movimentação do eixo x e y produzidos por impressão 3D.  
Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.2 Eixo Z

Para o eixo Z, seguir-se-á o proposto por Damasceno *et al* (2014), tendo em vista que o sistema para movimentação do eixo Z da impressora Prusa Mendel apresentava desalinhamentos. Em virtude de o sistema ser composto por dois fusos roscados acoplados a dois motores independentes e a um conjunto de porca e mola para compensar possíveis folgas do sistema motriz. A alternativa escolhida pelo autor foi o fuso do tipo esfera (Figura 32), que é um sistema de

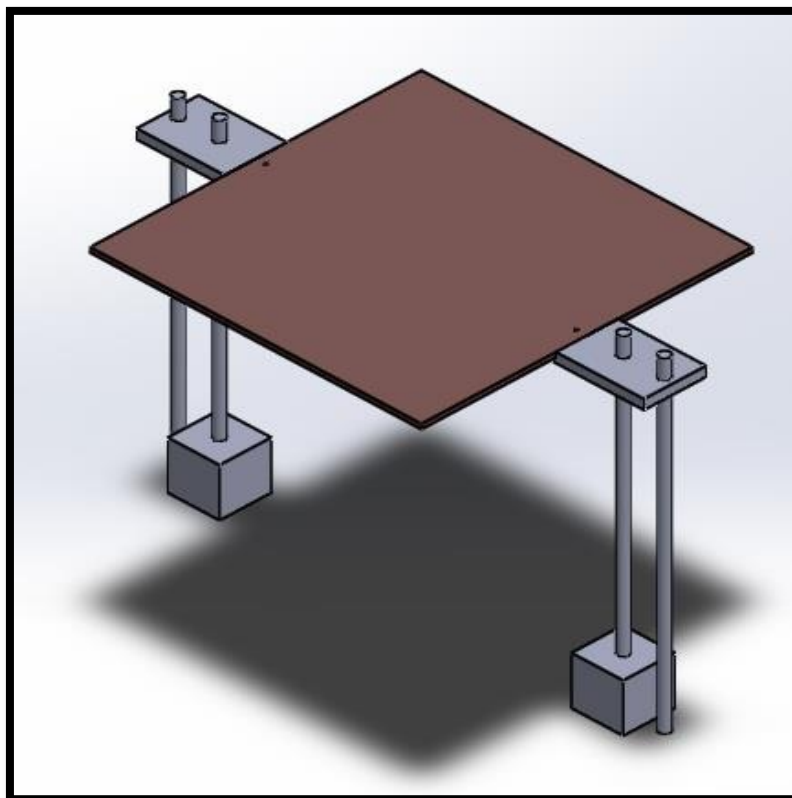
acionamento de alta eficiência, no qual a esfera realiza um movimento helicoidal entre o eixo do fuso e a castanha com baixo atrito.

O fuso de esfera recirculante possui capacidade de aplicar ou suportar grandes esforços com baixo atrito. Eles são feitos com precisões de 0,001mm (milésimos de milímetros) e são, portanto, adequados para uso em situações em que a alta precisão é necessária.



**Figura 32 – Fuso do tipo esfera.**  
**Fonte: Desconhecida.**

Na Figura 33, pode-se encontrar a disponibilidade dos componentes que são necessários para a movimentação da mesa (*bed*) ao longo do eixo z, e pode-se destacar o fuso de esfera (principal), e também as guias lisas que direcionam e apoiam o movimento.



**Figura 33 – Sistema de movimento em Z.**  
Fonte: Damasceno *et al* (2014).

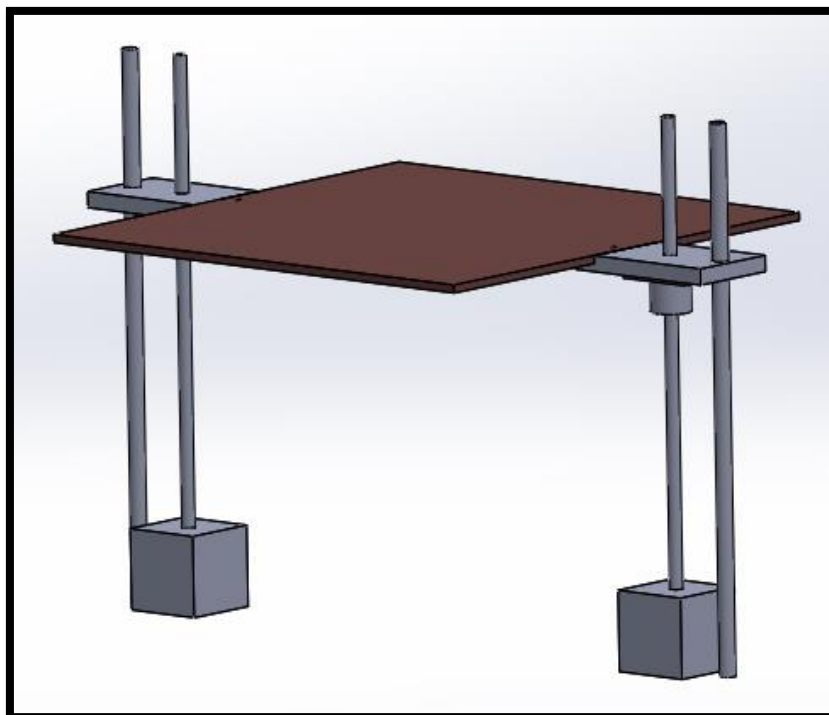
Para o projeto em questão, foi dimensionado e selecionado o fuso de esfera que será utilizado na movimentação sobre o eixo z, ou no caso, da mesa.

#### 4.2 MESA

A mesa de impressão é a superfície onde será depositado a camada do material de consumo, que resultará no objeto impresso. Sendo assim, a qualidade da mesa, seu alinhamento, temperatura de trabalho, etc., influenciará em todas as camadas. Pois no processo de impressão 3D os erros são cumulativos, tendo em vista que se ocorrer um erro em uma camada, este se propagará para as demais subsequentes.

No novo protótipo de impressão será utilizada a mesa projetada pelo autor Damasceno, que pode ser entendida a seguir na Figura 34.





**Figura 34 – Mesa de impressão.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A mesa possui uma chapa plana de 330mm x 330mm, com espessura adequada para manter a forma geométrica ou planicidade no ato da impressão, o qual requer aquecimento da mesa dependendo do tipo de material a ser impresso. No caso da placa não ser projetada para isso pode ocorrer empenamento da mesma, o que ocasionará defeitos de impressão. O material que compõe a cobertura da superfície da mesa de impressão deve propiciar completa adesão para o material de impressão, sem qualquer nível de escorregamento.

Seu princípio de aquecimento será diferente da impressora Rep Rap Prusa Mendel. Segundo o autor Damasceno *et al* (2014), será usado o princípio em que é impresso na própria mesa, com uma camada cobreada, um circuito resistivo para o aquecimento, onde procura-se manter a temperatura uniforme em toda a extensão da placa, propiciando uma melhor adesão na interface peça/mesa, sendo esta uma adesão total.

Para uma melhor precisão de impressão e rigidez, a mesa terá movimentação na direção do eixo z, por meio de dois fusos de esfera, sendo abaixada uma vez a espessura de fatiamento a cada comando, fazendo isso sequencialmente até o tamanho total da peça.

Comercialmente encontram-se mesas de impressão no tamanho de 314 mm x 314 mm, que resultará em uma área de impressão de 300 mm x 300 mm, sendo aquecida através de circuito impresso no próprio corpo da mesa, com duas camadas de cobre de 35 $\mu$ m, espessura de 1,6 mm, potência de entrada de 24 V e resistência entre 1 a 2 ohms.

### 4.3 EXTRUSORA

A extrusora é um dos componentes mais importantes na impressora 3D, tendo em vista que se a mesma não estiver com temperatura e furo adequados não proporcionará uma boa impressão. Na impressora Prusa Mendel a extrusora se movimenta nas direções X e Z. Porém, no atual projeto mudou-se a movimentação da extrusora para os eixos X e Y, pretendendo buscar uma melhora significativa da impressão, Figura 35.

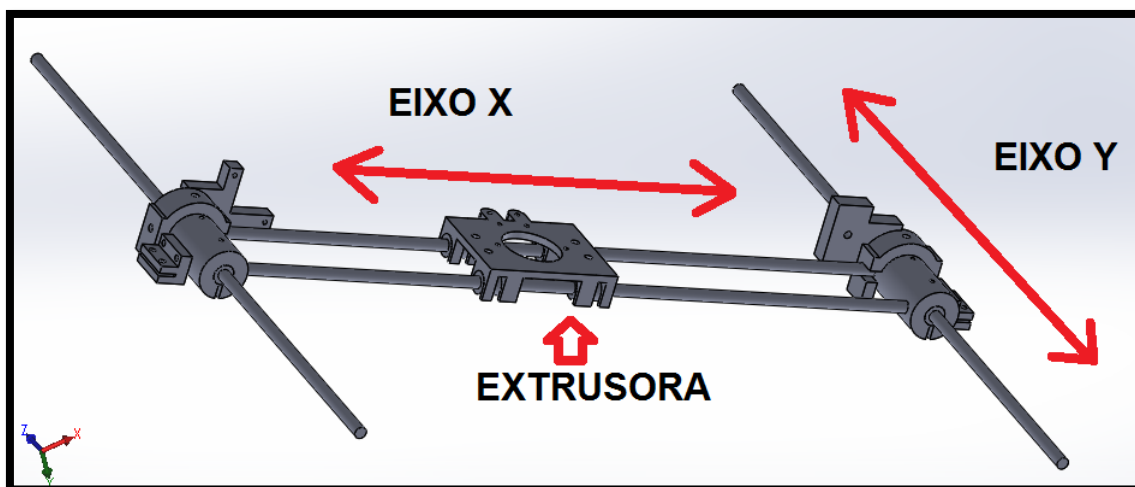


Figura 35 – Movimentação da Extrusora.

Fonte: Autoria própria.

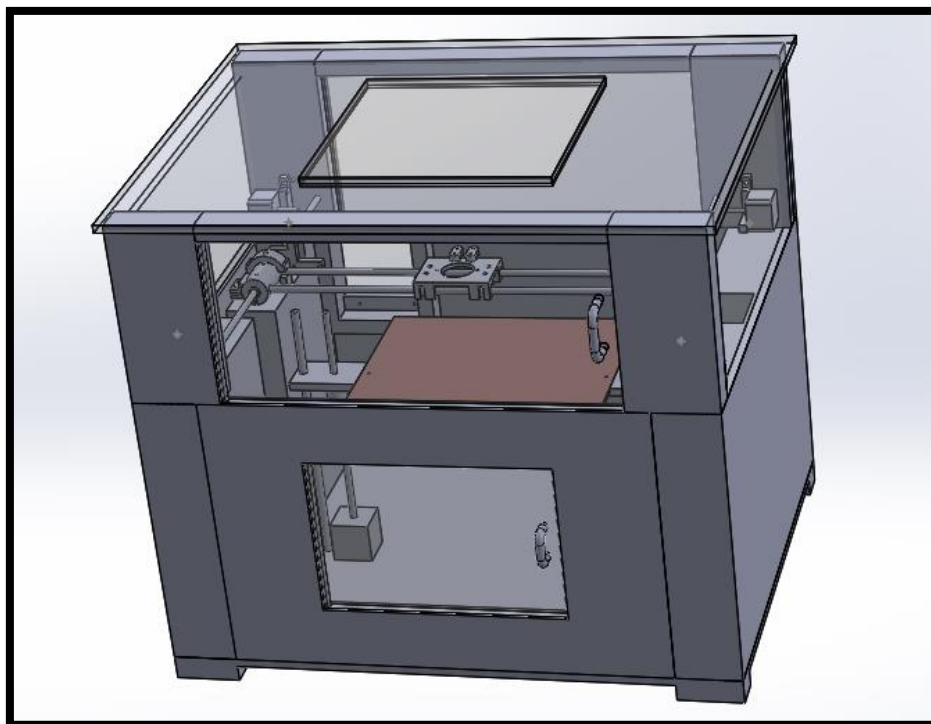
O componente com extrema importância na máquina é a extrusora. A movimentação dos eixos x e y contribuem para o seu posicionamento correto e com precisão, mas a extrusora tem papel limitante na qualidade final da peça impressa. Obtendo uma extrusora que possua fluxo constante e bem calibrado, a qualidade de impressão é atingida.

Para facilitar a retirada da peça no final da impressão, a extrusora será movimentada para fora da área de impressão.

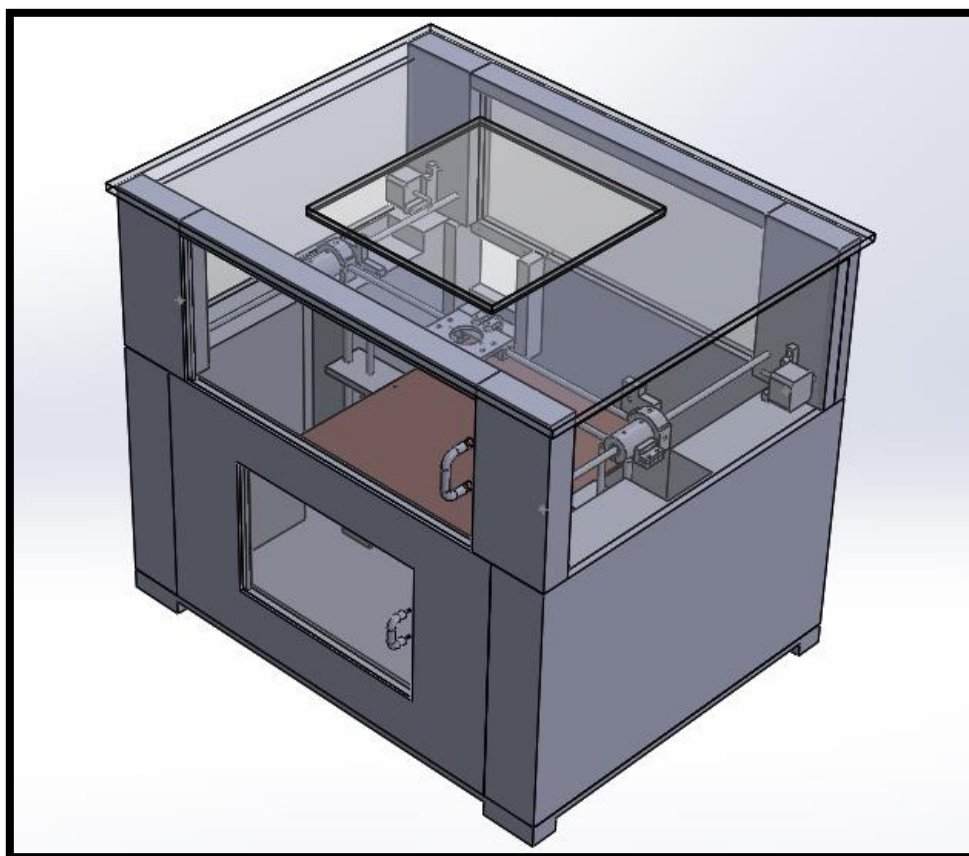
#### 4.4 ESTRUTURA

A estrutura da impressora Rep Rap Prusa Mendel é composta por barras roscadas e conectores produzidos pelas próprias impressoras. Também, a estrutura não tem carenagem para isolar a área de impressão do meio em que se encontra, isto promove alguns problemas durante a impressão. A estabilidade estrutural é outro fator que influencia, pois em virtude da movimentação do sistema ocorre certo nível de vibração.

O projeto conceitual da estrutura da impressora segue o proposto por Damasceno et al (2014), com algumas modificações dimensionais que se fizeram necessárias em virtude de ajustes, como por exemplo a mesa de impressão. A estrutura conta com um ambiente totalmente fechado, para que o calor não seja dissipado ao meio externo tão facilmente e seja mantida uma temperatura de impressão constante, resultando em uma melhor qualidade de impressão, devido à interface peça/mesa ficar mais bem aderida. Esta também possibilitará uma estrutura mais estável, pois é formada por uma estrutura mais robusta, formando um todo, diminuindo assim a ocorrência de tais fenômenos, como vibrações e perda de temperatura. A estrutura pode ser visualizada nas Figuras 36 e 37.



**Figura 36 – Estrutura final da impressora 3D desenvolvida.**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 37 – Estrutura final da impressora 3D desenvolvida em visualização isométrica.**  
Fonte: Autoria própria.

#### 4.5 SELEÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS (MÁQUINAS ELÉTRICAS)

Para a seleção dos motores elétricos foi necessário uma análise de viabilidade econômica, através de matriz de decisão, a matriz utilizada foi a *Pugh Concept Selection* (Conceito de Seleção de Pugh) que pode ser visualizada na Figura 38. O Conceito de Seleção de Pugh, desenvolvido pelo professor Stuard Pugh, da Universidade de Strathclyde, fornece uma maneira de medir a capacidade de cada conceito de atender as necessidades dos clientes. A essência deste método consiste na comparação entre conceitos em forma de uma matriz, relacionando-as com as necessidades dos clientes e o valor do consumidor. (CUTOVOI, SALLES, 2013)

Há algumas fases que devem ser seguidas para a obtenção da matriz de decisão de Pugh, sendo elas:

1. Selecionar os critérios de comparação. No caso os critérios escolhidos são: velocidade, custo, facilidade de controle eletrônico, precisão, durabilidade, espaço físico e manutenibilidade.
2. Determinar os pesos dos critérios escolhidos. Os critérios que são mais relevantes para o projeto precisam ter um peso maior, variando de um a cinco.
3. Determinar os conceitos. Para o projeto em questão o motor de passo é largamente usado, sendo assim, o conceito a ser avaliado será o emprego do servo motor com *encoder*.
4. Selecionar o conceito de base ou *baseline*, inicialmente tomado como sendo o melhor e mais utilizado. Como o projeto se baseia na plataforma de impressora Rep Rap, o conceito base é o motor de passo.
5. Compare os outros conceitos com o *baseline*: na figura abaixo tem a forma de avaliação exemplificada.
6. Compute as pontuações ponderadas para os conceitos, excluindo o *baseline*.
7. Escolha do melhor conceito. Como pode ser visualizado na Figura 38 o conceito que ficou como primeira escolha foi o escolhido como

*baseline*, logo o motor de passo apresenta melhores critérios para tal aplicação.

Através de revisão e pesquisa bibliográfica que foram atribuídos os valores de comparação entre o conceito e o *baseline*. No caso, sendo o *baseline* o motor de passo e o conceito o servo motor com *encoder*. A seguir será explicado cada critério e o porquê dos valores atribuídos que podem ser verificados na Figura 38.

**Velocidade** – O Servo motor com encoder pode atingir velocidade mais alta, e para aplicação em impressoras 3D, este pode diminuir o tempo de impressão devido o aumento de velocidade. Logo foi atribuído o valor de +1, indicando o servo motor com encoder ser melhor que o motor de passo para esse critério.

**Custo** – O servo motor com encoder apresenta custo bem mais elevado que o motor de passo. O valor atribuído para esse critério foi de -3, por ser muito mais caro, logo muito pior que o *baseline*.

**Facilidade de Controle Eletrônico** – Devido o motor de passo ser um sistema de controle por malha aberta, o controle eletrônico é facilitado, já o servo motor com encoder, sendo o encoder um sensor, este trabalha com malha fechada, fazendo uma verificação de posição depois do que o comando foi executado. O valor de comparação foi de -3, pois o sistema de controle eletrônico do servo motor com encoder é bem mais complexo.

**Precisão** – O valor atribuído para esse critério foi de +2, devido o servo motor com encoder ter a capacidade de monitorar os movimentos mesmo depois dos comandos já executados, dando uma resposta para o sistema, se o bico extrusor está ou não na posição correta que foi feito o comando utilizando as coordenadas do código G gerado pelo software.

**Durabilidade** – O motor de passo possui maior durabilidade do que o servo motor com encoder, pois os sensores são equipamentos mais delicados. Logo o valor dado foi o de -1, por apresentar esse critério pior que os motores de passo.

**Espaço Físico** – Servo motor com encoder ocupa maior espaço físico por causa do sensor (encoder) acoplado na parte traseira. O valor atribuído foi de -1.

**Manutenibilidade** – Devido o servo motor com encoder possuir escovas elas necessitam de manutenção, já os motores de passo não necessitam manutenção alguma. O valor de comparação foi de -2 para o servo motor com encoder.

Após a análise de viabilidade econômica por matriz de decisão concluída, o motor de aplicação no novo protótipo de impressão pode ser escolhido, sendo o mais viável o motor de passo, o mais utilizado em equipamento de impressão.

<b>PUGH CONCEPT SELECTION</b>			
<b>MOTOR</b>			
		MOTOR DE PASSO	SERVO COM ENCODER
CRITÉRIOS	Peso	Baseline	Conceito 1
Velocidade	2	0	+1
Custo	4	0	-3
Facilidade de controle eletrônico	5	0	-3
Precisão	5	0	+2
Durabilidade	5	0	-1
Espaço físico	3	0	-1
Manutenibilidade	4	0	-2
Total $\Sigma +$		0	3
Total $\Sigma -$		0	10
Total $\Sigma 0$		0	0
Total com peso		0	-31
Ranking com peso		1	2
+3	critério muitíssimo melhor que a baseline		
+2	critério muito melhor que a baseline		
+1	critério melhor que a baseline		
0	critério tão bom quanto a baseline		
-1	critério pior que a baseline		
-2	critério muito pior que a baseline		
-3	critério muitíssimo pior que a baseline		

Figura 38 – Matriz de decisão de Pugh.  
Fonte: Autoria própria.

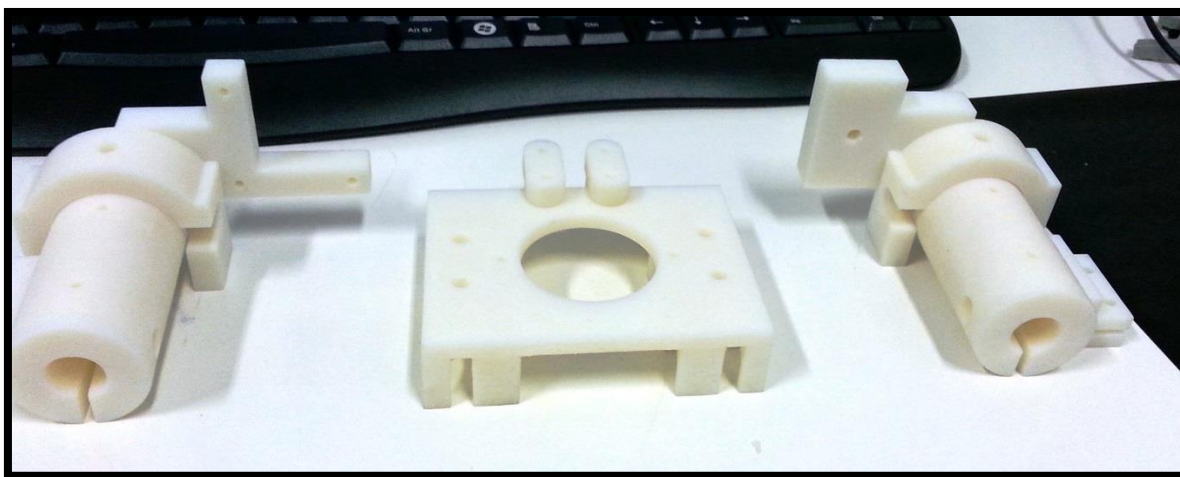
#### 4.6 SELEÇÃO DAS PEÇAS

Nesta etapa de desenvolvimento de uma nova impressora 3D, se tem a seleção das peças e componentes necessários para a próxima etapa, a da montagem da nova impressora 3D.

Com base nas dimensões, tipos e orçamentos dos componentes foi realizada a seleção. No Apêndice A se encontra a lista de peças, com suas respectivas quantidades e valores médios encontrados. O valor da estrutura da impressora 3D não foi estimado.

O valor total da nova impressora 3D desenvolvida se encontra em aproximadamente em R\$4000,00 (quatro mil reais).

Com o objetivo de reduzir custos e aplicar os conhecimentos adquiridos alguns componentes do mecanismo de movimentação do eixo z y foram fabricados por impressão 3D, em uma impressora 3D Stratasys Objet 24. Os componentes impressos podem ser visualizados na Figura 39.



**Figura 39 – – Peças obtidas por impressão 3D. Componentes do mecanismo de movimentação do eixo x e y.**  
**Fonte: Autoria própria.**



## 5 CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível verificar e conhecer os mecanismo de prototipagem rápida e as etapas do desenvolvimento de um novo produto, a nova impressora 3D. Além do amplo estudo e desenvolvimento que vem sendo realizado na área, tendo aplicações desde odontológicas até na indústria aeronáutica.

O objetivo de modificar o mecanismo de movimentação dos eixos x e y com um menor custo e sem diminuir a qualidade de impressão, em relação a diminuição dos recursos investidos foi possível através da redução de alguns elementos de máquina. Em relação aos motores de passo e servo-motores com *encoders*, verificou-se por estudo de viabilidade econômica por matriz de decisão que a substituição, mesmo que o servo motor com *encoder* possivelmente possibilite melhor exatidão, porém, devido aos custos de aquisição se tornou inviável, a necessidade de manutenção e o tempo de vida, levaram a uma conclusão da análise, tendo como resultado final o emprego dos motores de passo no novo protótipo de impressão 3D.

O projeto detalhado consta com todos os desenhos em software CAD, e também com toda a seleção das peças e componentes necessários para a aquisição para posterior montagem. No orçamento consta um valor final de aproximadamente R\$4000,00 (quatro mil reais), não constando o valor que seria utilizado para construção da estrutura projetada para impressora 3D. De um ponto de vista de mercado, este valor de custo para execução do projeto é relativamente adequado.

A montagem do novo protótipo de impressão não foi realizada, devido a falta de recursos. Contudo, a próxima etapa que seria de ajustes e testes de impressão não se fez possível, por não ter a nova impressora 3D desenvolvida montada.

Este projeto deixará trabalhos posteriores de montagem da nova impressora 3D desenvolvida e também ajustes e testes de impressão deverão ser feitos para verificar em prática todos os pontos teóricos almejados neste. Também, estudos de modificações nesta nova impressora 3D desenvolvida podem surgir, buscando melhorar ainda mais suas características de impressão.

## REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Fábio M. **Estudo e Projeto de Melhoria em Máquina de Impressão 3D**. 2013. 48 f. Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica, Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAAahUKEwib1d6A0ZXGAhVHI4AKHT2jBWU&url=http%3A%2F%2Fwww.tcc.sc.usp.br%2Ftce%2Fdisponiveis%2F18%2F180450%2Ftce-16012014-152931%2Fpublico%2FAzevedo\\_Fabio\\_Mariotto.pdf&ei=3dSAVdvyOceuggS9xpa0Bg&usg=AFQjCNGj\\_ZOMv5KBsczujungKv8H3YYf2Xg&bvm=bv.96041959,d.eXY](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAAahUKEwib1d6A0ZXGAhVHI4AKHT2jBWU&url=http%3A%2F%2Fwww.tcc.sc.usp.br%2Ftce%2Fdisponiveis%2F18%2F180450%2Ftce-16012014-152931%2Fpublico%2FAzevedo_Fabio_Mariotto.pdf&ei=3dSAVdvyOceuggS9xpa0Bg&usg=AFQjCNGj_ZOMv5KBsczujungKv8H3YYf2Xg&bvm=bv.96041959,d.eXY)> Acesso em: 13 jun. 2015.

BRITES, Felipe Gonçalves; SANTOS, Vinicius Puga de Almeida. **Motores de Passo**. 2008.15 f. Curso de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, 2008. Disponível em: <<http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf>> Acesso em: 04 out. 2014, 15:32.

CARVALHO, Jonas de. **Prototipagem Rápida**. NUMA – Núcleo de Manufatura Avançada, nov. 1999. Disponível em: <[http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos\\_port/pag\\_conhec/prototipagem.html](http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/prototipagem.html)>. Acesso em: 29 set. 2014.

CIRIACO, Douglas. **13 impressoras 3D já disponíveis no Brasil**. TecMundo, mai. 2013. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/impressora-3d/40248-13-impressoras-3d-ja-disponiveis-no-brasil.htm>>. Acesso em: 29 set. 2014.

CONCEIÇÃO JUNIOR, Pedro de Oliveira; MARQUES, Dani Marcelo N.. **Impressoras 3D: Redução de custo e tempo no desenvolvimento de produtos**. Disponível em: <[http://www.fatecgarca.edu.br/revista/Volume3/artigos\\_vol3/Artigo\\_24.pdf](http://www.fatecgarca.edu.br/revista/Volume3/artigos_vol3/Artigo_24.pdf)>. Acesso em: 23 set. 2014.

**Controle de Automação Industrial** – Etec Trajano Camargo. Disponível em: <[http://www.trajanocamargo.com.br/wp-content/uploads/2012/05/Controle\\_e\\_-Automacao\\_Industrial\\_II.pdf](http://www.trajanocamargo.com.br/wp-content/uploads/2012/05/Controle_e_-Automacao_Industrial_II.pdf)> Acesso em: 13 out. 2014.

CONVERGE COMUNICAÇÕES. **TI Renato Archer usa impressoras 3D para inovar na medicina**. 2013. Disponível em: <[http://convergecom.com.br/tiinside/services/03/12/2013/cti-renato-archer-usa-impressoras-3d-para-inovar-na-medicina/#.VV0N\\_UY5sZM](http://convergecom.com.br/tiinside/services/03/12/2013/cti-renato-archer-usa-impressoras-3d-para-inovar-na-medicina/#.VV0N_UY5sZM)> Acesso em: 10 maio 2015.

CUTOVOI, Iara Tonissi Moroni; SALLES, José Antonio Arantes. Aplicação do método Pugh para a sistematização do PDP na cadeia de suprimentos numa empresa do segmento automotivo. **IX Congresso Nacional de Excelência em Gestão**, jun. 2013.

DAMASCENO, André F. **Estudo sobre a possibilidade de expansão de impressão de uma impressora 3D**. 2014. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, 2014.

DELEVATTI, Giordano Becker. **Desenvolvimento de uma impressora 3D do tipo Rep Rap**. 2013. 64 f. Trabalho de Final de Curso – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, 2013. Disponível em: <[http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2013/Mec\\_Giordano.pdf](http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2013/Mec_Giordano.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2014, 14:33.

FOGGIATTO, J. A., **O Uso da Prototipagem Rápida na Área Médico-Odontológica, Tecnologia & Humanismo**, UTFPR, Ano 20, Nº 30, 2006.

GORNI, Antonio Augusto. Introdução À Prototipagem Rápida e Seus Processos. **Revista Plástico Industrial**, p. 230-239, mar. 2001. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/protrap.html>>. Acesso em: 29 set. 2014.

HARADA, Júlio & Wiebeck, Hélio, **“Plásticos de Engenharia - Tecnologia e Aplicações”**. Artliber, 2005

MANUAL Repetier Host, <<http://www.repetier.com/>> acessado em 13 de out. de 2014.

MELLO, Carlos. **Proposta de roteiro de processo de pós-processamento para protótipos rápidos produzidos através de modelagem por deposição de material fundido**. 2010. Disponível em: <[http://www.carlosmello.unifei.edu.br/Disciplinas/epr201/EXEMPLO\\_PROJETO\\_PESQUISA\\_02\\_IC.pdf](http://www.carlosmello.unifei.edu.br/Disciplinas/epr201/EXEMPLO_PROJETO_PESQUISA_02_IC.pdf)> Acesso em: 15 mar. 2015.

MELLO, Carlos Henrique Pereira et al. Análise da qualidade superficial e dimensional em peças produzidas por Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM). **Revista Produção Online**, v.10, n.3, p. 504-523, set. 2010.

OKANE, Toshimitsu. **The Potential of 3D PRINTING**, METI Journal, p. 07-08, 2011.

RAULINO, B. R. **Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida**. Trabalho de graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG- 2011 Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF,2011.

RYALL, Chris; WIMPENNY, David. **Rapid Prototyping technology as use don the Bombe Rebuild Project**; UniversityofWarmick, 2005.

SOUZA, Ramon de. **Mas afinal, o que é e para que serve uma impressora 3D?** TecMundo, fev. 2013. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/campus-party-brasil-2013/36199-mas-afinal-o-que-e-e-para-que-serve-uma-impressora-3d-.htm>>. Acesso em: 29 set. 2014.

TAKAGAKI, Luiz Koiti. **Capítulo 3 – Tecnologia De Impressão 3D**. Revista Inovação Tecnológica, São Paulo, v.2, n.2, p.28-40, jul./dez. 2012.

VOLPATO, N., FOGGIATTO, J. A. ; LIMA, M. V. A. de, **Modelos de Fatiamento Adaptativo em Processo de Prototipagem Rápida**. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2009, Belo Horizonte. Anais do V COBEF, v. 1, 2009.

## **APÊNDICE A – LISTA DE PEÇAS**

<b>LISTA DE PEÇAS</b>			
<b>ITEM</b>	<b>QUANT.</b>	<b>VALOR UNITÁRIO</b>	<b>VALOR</b>
Eixo linear de 8 m de diâmetro e 500mm de comprimento	4	R\$ 60,00	R\$ 240,00
Rolamento linear 8mm de diâmetro e 24mm de comprimento	4	R\$ 12,00	R\$ 48,00
Rolamento linear 8mm de diâmetro e 45mm de comprimento	2	R\$ 30,00	R\$ 30,00
Motor de passo nema 17 (5 + 1)	6	R\$425,00 + R\$125,00	R\$ 550,00
Fuso de esfera 8mm de diâmetro e fuso de 300mm	2	R\$ 634,10	R\$ 1.268,20
Eixo linear de 10 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento	2	R\$ 30,00	R\$ 60,00
Mesa aquecida	1	R\$ 60,00	R\$ 60,00
Kit 2 polia alumínio + 2 metros de correia gt2 – rewrap	2	R\$ 85,00	R\$ 170,00
Kit extrusora	1	R\$ 74,90	R\$ 74,90
Bico + hotend	1	R\$ 146,90	R\$ 146,90
Heatbreak para hotend	1	R\$ 20,00	R\$ 20,00
Placa de controle - Prusa mendel - Gen7v1.2br2b	1	R\$ 250,00	R\$ 250,00
Driver controlador motor de passo	4	R\$ 50,00	R\$ 200,00
FONTE ATX 450w REAIS	1	R\$ 140,00	R\$ 140,00
Kit eletrônica	1	R\$ 85,00	R\$ 85,00
Cartucho aquecedor 40w 12v - 1m de cabo	1	R\$ 18,00	R\$ 18,00
Mosfet irlz44n para o hotend	1	R\$ 4,50	R\$ 4,50
Mosfet irf1404 para a mesa aquecida	1	R\$ 7,50	R\$ 7,50
Estrutura impressora			
		<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 3.373,00</b>