

Daniela Moreira Silva - Número USP: 7629928

Desenvolvimento de uma impressora 3D de  
uso autônomo tipo *3D pen*

São Paulo, Brasil

2018

Daniela Moreira Silva - Número USP: 7629928

**Desenvolvimento de uma impressora 3D de uso  
autônomo tipo *3D pen***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção de título de engenheira  
mecatrônica

Universidade de São Paulo – USP  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Programa de Graduação

Orientador: Prof. Rodrigo Lima Stoeterau

São Paulo, Brasil  
2018

# Resumo

A proposta deste projeto é o desenvolvimento de uma impressora de uso autônomo tipo *3D pen*. O processo de impressão destas se diferencia de uma impressora 3D típica por não utilizar um desenho CAD como ponto de partida para a impressão, e pela movimentação ser feita manualmente pelo próprio operador. A *3D pen* proposta é constituída por um sistema de avanço de filamento polimérico com controle pré-selecionado em função do material a ser utilizado, um sistema de aquecimento de bico extrusor com controle integrado de temperatura em função dos parâmetros de processo e material, e um sistema de controle integrado para ambos, de modo que seja possível utilizar o protótipo final como uma impressora 3D de uso em mãos. Para tanto foram empregadas metodologias de projeto e de desenvolvimento de produto.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva, modelagem por fusão e deposição, Impressora 3D, *3D pen*, extrusão polimérica, controle de temperatura

# **Lista de ilustrações**

Figura 1 – Exemplo de <i>3D pen</i> comercial . . . . .	9
Figura 2 – Fases, passos e resultados no projeto segundo a norma alemã VDI 2221 (VDI, 1993) . . . . .	13
Figura 3 – Desenvolvimento de projeto segundo Rozenfeld (2006) . . . . .	14
Figura 4 – Comparação entre uma peça obtida por fresamento e uma impressa . . . . .	19
Figura 5 – Desenho observado na patente de FDM (CRUMP, 1989) . . . . .	21
Figura 6 – Tecnologias de impressão 3D mais utilizadas segundo pesquisa. . . . .	23
Figura 7 – Representação do processo de impressão com a tecnologia FDM . . . . .	24
Figura 8 – Percentual de pessoas que já utilizaram cada um desses materiais para impressão 3D. Traduzido de (CORE-BAILLAIS et al., 2017) . . . . .	25
Figura 9 – Estimativa da relação de tamanho entre a 3Doodler inicial (a esquerda), sua versão 2.0 (ao centro) e a LixPen (à direita) . . . . .	27
Figura 10 – Modelo funcional da impressora 3D tipo <i>3D pen</i> , com os diagramas dos respectivos subsistemas . . . . .	32
Figura 11 – Diferentes soluções possíveis . . . . .	34
Figura 12 – Ponte H . . . . .	42
Figura 13 – Exemplos de sinais PWM . . . . .	43
Figura 14 – Malha de controle proporcional . . . . .	44
Figura 15 – Malha de controle integral . . . . .	44
Figura 16 – Malha de controle derivativo . . . . .	45
Figura 17 – Desenho de conjunto do sistema de avanço da <i>3D pen</i> . . . . .	46
Figura 18 – Desenho de conjunto do sistema de aquecimento da <i>3D pen</i> . . . . .	48
Figura 19 – Malha de controle teórica do sistema de aquecimento . . . . .	48
Figura 20 – Vista em corte da estrutura da <i>3D pen</i> . . . . .	50
Figura 21 – Vista explodida da <i>3D pen</i> . . . . .	51
Figura 22 – Vistas da polia passiva . . . . .	51
Figura 23 – Vistas da polia ativa . . . . .	52
Figura 24 – Vistas da base do sistema de avanço . . . . .	53
Figura 25 – Vistas de parte da capa . . . . .	54
Figura 26 – Vistas de parte da capa . . . . .	54

# **Lista de tabelas**

Tabela 1 – Quality Function Deployment . . . . .	31
Tabela 2 – Comparação entre modelos funcionais e requisitos . . . . .	33
Tabela 3 – Relação entre tipos de estrutura e requisitos . . . . .	35
Tabela 4 – Relação entre aquecimentos possíveis e requisitos . . . . .	36
Tabela 5 – Relação entre controladores/processadores e requisitos . . . . .	37
Tabela 6 – Relação entre métodos de avanço e requisitos . . . . .	38
Tabela 7 – Relação entre fontes de energia e requisitos . . . . .	39
Tabela 8 – Comparação de características de diferentes modelos de <i>3d pens</i> . . .	60

# **Lista de abreviaturas e siglas**

3D	Tridimensional
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
CAD	<i>Computer Aided Design</i> ou Desenho assistido por computador
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> ou Manufatura auxiliada por computador
CLIP	<i>Continuous Liquid Interface Production</i> ou Produção Contínua em Interface Líquida
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DLP	<i>Digital Light Processing</i> ou Processamento de luz digital
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i> ou Sinterização direta de metal por laser
EBM	<i>Electron Beam Melting</i> ou Fusão por feixe de elétrons
FDM	Fused Deposition Modeling ou Modelagem por fusão e deposição
MJP	<i>Multijet printing</i>
NTC	<i>negative temperature coefficient</i> ou Coeficiente negativo de temperatura
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLA	Ácido Polilático
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> ou Modulação por largura de pulso
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
RepRap	<i>Replicating Rapid-prototyper</i>
SLA	Estereolitografia
SDL	<i>Selective Deposition Lamination</i> ou Laminação seletiva

SLM      *Selective Laser Melting* ou Fusão seletiva a laser

SLS      *Selective Laser Sintering* ou Sinterização seletiva por laser

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	9
1.1	Formulação do problema . . . . .	10
1.2	Motivação . . . . .	10
1.3	Objetivos . . . . .	10
1.4	Abordagem metodológica . . . . .	11
1.5	Estruturação do trabalho . . . . .	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .	12
2.1	Metodologia de projeto . . . . .	12
2.2	Revolução industrial . . . . .	17
2.3	Impressão 3D . . . . .	18
2.3.1	História da manufatura aditiva . . . . .	20
2.3.2	Processos de impressão 3D . . . . .	22
2.3.3	Materiais para impressão . . . . .	24
2.4	<i>3D pens</i> . . . . .	27
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO . . . . .	28
3.1	Informacional . . . . .	28
3.1.1	Requisitos de projeto . . . . .	28
3.1.2	Especificações . . . . .	29
3.2	Projeto conceitual . . . . .	32
3.2.1	Desenvolvimento da solução . . . . .	34
3.3	Detalhamento . . . . .	36
3.3.1	Estrutura . . . . .	36
3.3.2	Projeto estrutural . . . . .	37
3.3.3	Sistema de avanço do filamento . . . . .	37
3.3.4	Sistema de aquecimento . . . . .	40
3.3.4.1	Fator Beta . . . . .	41
3.3.5	Controle . . . . .	41
3.3.5.1	Ponte H . . . . .	41
3.3.5.2	Modulação por largura de pulso . . . . .	42
3.3.5.3	Controle Proporcional . . . . .	43

3.3.5.4	Controle Integrativo . . . . .	44
3.3.5.5	Controle Derivativo . . . . .	45
3.3.5.6	Controle Proporcional-Integral-Derivativo . . . . .	45
4	<b>IMPLEMENTAÇÃO . . . . .</b>	<b>46</b>
4.1	Sistema de avanço . . . . .	46
4.2	Sistema de aquecimento . . . . .	47
4.3	Sistemas de controle . . . . .	49
4.4	Estrutura . . . . .	49
4.5	Visão geral do sistema . . . . .	50
5	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>56</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>58</b>
	<b>APÊNDICE A – <i>BENCHMARKING</i> . . . . .</b>	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE B – DESENHO DE COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DO FILAMENTO</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE C – DESENHOS DE MONTAGEM E FABRICAÇÃO . . . . .</b>	<b>63</b>
	<b>APÊNDICE D – ESQUEMA ELÉTRICO DO SISTEMA . . . . .</b>	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE E – CÓDIGO DO ARDUINO . . . . .</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO A – PATENTES SOBRE SLA . . . . .</b>	<b>80</b>
	<b>ANEXO B – PATENTES SOBRE IMPRESSÃO 3D . . . . .</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXO C – PATENTES DE <i>3D PENS</i> . . . . .</b>	<b>83</b>

# 1 Introdução

Apesar dos métodos de manufatura aditiva já serem de conhecimento desde o final do século XIX, a impressão 3D tal como a conhecemos hoje surgiu nos anos 80 do século XX. A impressão 3D refere-se a uma nova classe de processos de fabricação onde a peça é gerada através da deposição sucessiva de camadas de material, a partir de um arquivo CAD.

De acordo com um estudo publicado pela *International Data Corporation- IDC* existe uma demanda crescente por produtos associados à impressão 3D ([PARKER; KMETZ, 2014](#)). Algumas oportunidades relacionadas à impressão 3D estão associadas à portabilidade e autonomia desses sistemas. Demandas provenientes dos meios artístico e arquitetônico, entre outros, têm pressionado pelo surgimento de sistemas portáteis, de uso manual. Sob esse aspecto, a impressão 3D autônoma trouxe todo um novo conceito de trabalhos em três dimensões, abrangendo uma nova técnica para a área de escultura e criação de formas livres. Esse novo modelo é denominado comercialmente de *3D pen*, e um exemplo desse tipo de impressora pode ser visto na figura 1.



Figura 1 – Exemplo de *3D pen* comercial

Fonte: ([3DOODLER..., 2016](#))

## 1.1 Formulação do problema

Uma das limitações de uma impressora 3D típica é definida por seu volume de trabalho. Ao se projetar e desenhar qualquer peça, é necessário garantir que a mesma não ultrapassará os limites de comprimento, largura e altura limitados pelo volume de trabalho da impressora. Já as impressoras autônomas do tipo *3D pen* não usam guias para a movimentação do cabeçote de impressão, e também não realizam a impressão a partir de um desenho CAD. Isso permite que o usuário de uma *3D pen* tenha maior liberdade de expressão, pela maior liberdade de movimento.

O problema consiste em conceber, projetar, construir e qualificar uma *3D pen* portátil e de uso autônomo, que permita a criação de formas livres, sem a necessidade do uso de uma base de sacrifício e de um sistema de CAD.

## 1.2 Motivação e Relevância

A possibilidade de desenvolver um sistema de concepção simples, capaz de ultrapassar os desafios inerentes ao desenvolvimento de um *3D pen* tornou-se um desafio ímpar. Associado a isso tem-se a possibilidade de suprir uma demanda real de um nicho de mercado que busca liberdade na fabricação, eliminando a necessidade do uso de um CAD.

## 1.3 Objetivos

O objetivo geral é desenvolver um modelo *open source* de impressora de uso autônomo tipo *3D pen*. Para tanto, devemos considerar característica como tamanho, peso, velocidade de extrusão e ergonomia, adequando-as ao uso em mãos. De forma específica este trabalho apresenta como objetivos:

- a. Projetar uma impressora autônoma do tipo *3D pen* aplicando metodologias de desenvolvimento de produto
- b. Construir um protótipo funcional com base nas soluções de projeto desenvolvidas
- c. Desenvolver os sistemas de controle necessários ao processo
- d. Qualificação de protótipo
- e. Disponibilização de desenhos e de código para usos futuros

## 1.4 Abordagem metodológica

A abordagem metodológica do problema proposto será teórica/experimental, contendo uma revisão sobre metodologia de projeto, revisão sobre manufatura aditiva e impressão 3D, revisão sobre *3D pens*, aplicação da metodologia no projeto, fabricação de protótipo, testes do protótipo e avaliação de resultados.

## 1.5 Estruturação do trabalho

O trabalho está estruturado em 6 capítulos, onde o primeiro apresenta as considerações iniciais do trabalho, a promulgação do problema, sua relevância, objetivos, abordagem metodológica e estrutura do trabalho. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a metodologia de projeto e sobre impressão 3D. O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento da concepção e funcionalidade do projeto segundo a metodologia selecionada, seguindo o capítulo 4 com o detalhamento e construção do protótipo. O capítulo 5 apresenta o teste do protótipo desenvolvido, seguindo o capítulo de conclusão e considerações finais.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Metodologia de projeto

O projeto, por sua natureza, é um processo sistemático com cada uma de suas etapas sendo iniciada ao término da anterior. Até meados dos anos cinquenta do século XX o projetista era considerado um tipo especial de engenheiro, cuja aptidão para o desenvolvimento de projetos era natural. Com base nos trabalhos de Pahl e Beitz (1977), o projeto e consequentemente o desenvolvimento de produtos passaram a ser sistematizados e o desenvolvimento a apresentar uma sequência lógica de projeto. O desenvolvimento do projeto proposto divide o trabalho em quatro fases principais (ROZENFELD et al., 2006) :

- **A definição da tarefa**, onde o departamento de projeto solicita informações aos representantes dos clientes, visando levantar possíveis custos, rentabilidade e uma viabilidade potencial do projeto
- **Projeto conceitual**, onde são estabelecidas as relações funcionais dos componentes e uma estrutura física é geralmente definida
- **Projeto preliminar**, onde algumas das soluções apresentadas no projeto conceitual são expandidas em detalhes e arranjadas
- **Projeto detalhado**, que pode ser definido como tudo que segue o projeto preliminar com o objetivo de trazer o projeto à vida

Slocum (1992) acrescenta uma quinta fase às quatro apresentadas anteriormente:

- **Acompanhar o projeto** (*Design follow-up*), a qual pode ser definida como as atividades que englobam a parte de documentação e planos de manutenção

Com base nos trabalhos de Pahl e Beitz (1977), foi desenvolvida a norma alemã VDI 2221 cujas fases e resultados esperados a cada passo do desenvolvimento de projetos são apresentadas na figura 2.

Segundo Rozenfeld (2006) o desenvolvimento de produtos pode ser sistematizado segundo a figura 3

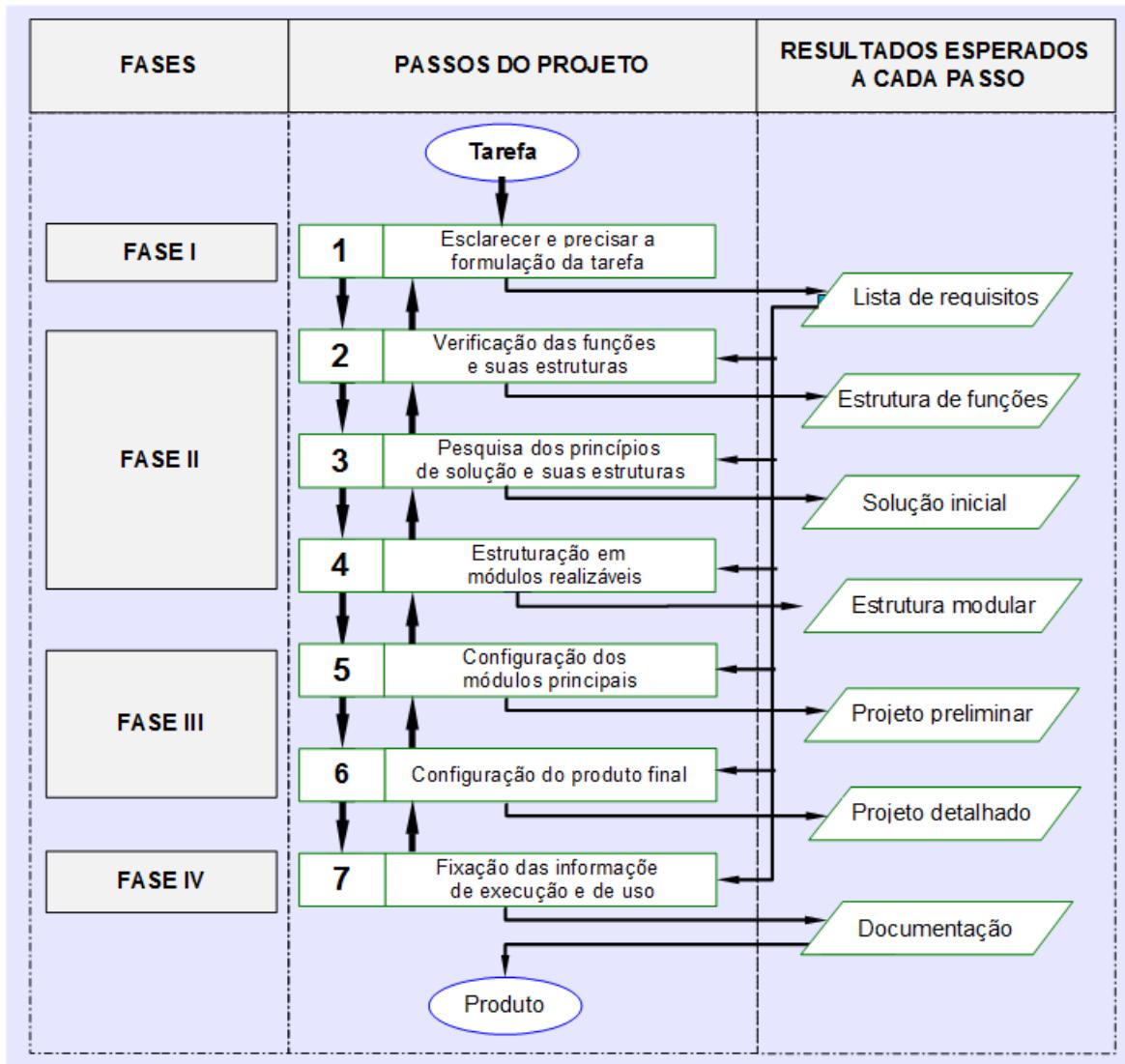


Figura 2 – Fases, passos e resultados no projeto segundo a norma alemã VDI 2221 ([VDI, 1993](#))

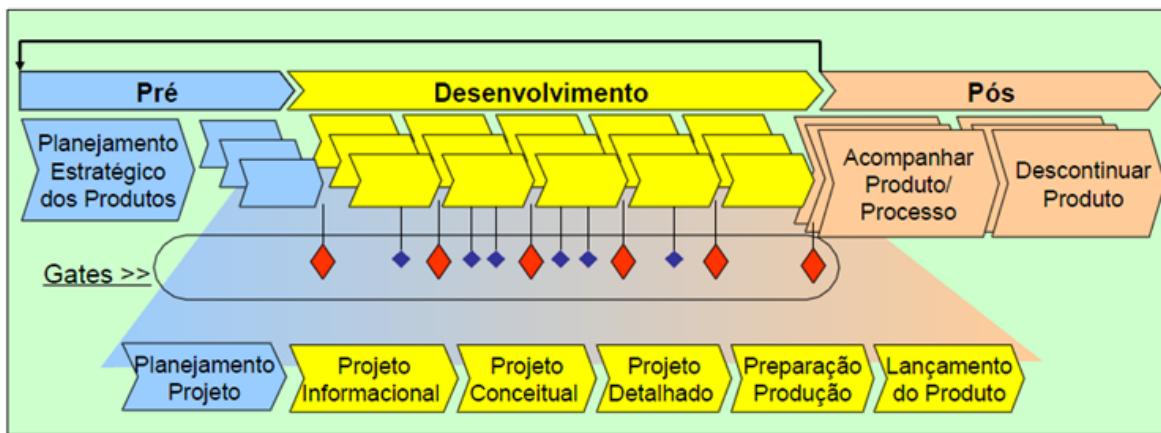


Figura 3 – Desenvolvimento de projeto segundo Rozenfeld (2006)

O projeto informacional, que precede todo o desenvolvimento de um produto, pode ser sistematizado por uma série de questionamentos que permitem identificar requisitos e necessidades do projeto. As metodologias de projeto proposta clássicas dividem os envolvidos no desenvolvimento de um produto em três grandes grupos, denominados de clientes. O termo cliente visa identificar todas as possíveis pessoas que entrarão em contato, direta ou indiretamente, com a máquina durante todas as fases de seu desenvolvimento, fabricação, transporte, montagem, utilização, manutenção e descarte. Os clientes são definidos como:

- **Externos** - agrupamento de pessoas, instituições ou empresas relacionadas com a utilização do produto a ser desenvolvido, ou seja, aqueles que irão diretamente utilizá-lo
- **Intermediários** - pessoas responsáveis pela montagem, embalagem, armazenamento, transporte e manutenção, fundamentais para um eficiente funcionamento do produto
- **Internos** - pessoas responsáveis pelo projeto, fabricação e montagem do produto a ser desenvolvido, bem como pelo fornecimento de componentes. Neste grupo se encontram técnicos, engenheiros projetistas e as interfaces de desenvolvedores e fornecedores externos

Cada um desses clientes tem suas necessidades, quantificáveis ou não, relativas ao produto.

## Cliente externo

Geralmente caracterizados pelos usuários finais, estes em geral externam suas necessidades sob a forma de questionamentos tais como:

- Geometria e dimensões: Quais as formas geométricas e dimensões são associadas a *3D pen*? As formas são atrativas?
- Tolerâncias: Quais as tolerâncias dimensionais e geométricas podem ser alcançadas e mantidas?
- Qualidade superficial: Qual a qualidade superficial pode ser alcançada e mantida?
- Materiais: Que materiais podem ser processados? Há limites associados aos materiais das peças geradas?
- Volume: Que tamanho de peças podem serem produzidos, em quanto tempo e a que custo?
- Flexibilidade: Que outros usos dentro de um portfólio de produtos a *3D pen* pode ser utilizada?
- Transporte e instalação: Quais as facilidades e dificuldades associadas ao transporte da *3D pen*
- Tempo: Qual o tempo para instalar? Qual o tempo de espera até a habilitação para uso?
- Uso: Quais os requisitos necessários para a instalação e uso? Há necessidade de alterações físicas para instalação?
- Confiabilidade e manutenabilidade: Qual a frequência de manutenção? Qual a confiabilidade associada ao uso? Qual a disponibilidade? Quais os custos associados a manutenção? Os principais itens sujeito a falhas são de fácil aquisição ou são específicos?
- Custo: Qual o custo de aquisição, operação e manutenção associados a uma *3D pen*?
- Segurança: Quais os riscos associados ao uso de uma 3Dpen? É necessário EPI?

## Cliente intermediário

Este grupo, apesar de não estar diretamente envolvido no projeto da *3D pen*, também apresenta suas necessidades sob a forma de questionamentos tais como:

- Dimensões: Quais as dimensões dos componentes? Quais requisitos de movimentação?
- Montagem: A *3D pen* pode ser montada de forma econômica?
- Fabricabilidade: Os componentes podem ser fabricados com facilidades?

## Cliente interno

Aqui é onde se localiza o engenheiro. Como principal desenvolvedor de uma máquina-ferramenta, os questionamentos do engenheiro devem ser focados em:

- Dimensões: Quais as dimensões finais da *3D pen*? Qual seu peso? Quais requisitos de movimentação?
- Montagem: A *3D pen* pode ser montada de forma econômica? A montagem é simples? Há necessidade de desenvolver ferramental e/ou ferramentas específicas para desmontagem/montagem?
- Cinemática: Quais movimentos são necessários? Quais mecanismos e qual a repetitividade, precisão são requeridas?
- Dinâmica: Que forças devem geradas e quais são seus efeitos potenciais sobre o sistema de movimentação, estrutura e seus componentes? Qual a rigidez necessária para resistir às forças do processo?
- Potência: Qual a potência requerida?
- Materiais: Quais os tipos de materiais que podem ser utilizados para maximizar a eficiência da *3D pen*?
- Sensores e controle: Que tipo de sensores e sistemas de controle são necessários? Como eles podem ser incorporados de forma a melhorar o desempenho da *3D pen* sem acrescentar custos demasiados?

- Segurança: Que normas regem o aspecto de segurança, considerando as exigências locais e de um mercado global. Quais são as exigências para a proteção do usuário?
- Produção: Os componentes da máquina podem ser fabricados e integrados de forma econômica?
- Ergonomia: Como todos os fatores de projeto podem ser combinados para produzir uma *3D pen* que proporcione satisfação para quem a operar?
- Confiabilidade e manutenibilidade: Qual a probabilidade de falha associada aos componentes críticos?
- Meios de fabricação à disposição: Quais os meios de fabricação necessários a fabricação, montagem, integração e qualificação da *3D pen*?
- Outros recursos à sua disposição: Que outros recursos, sejam estes financeiros, materiais, humanos ou físicos devem ser considerados? O que, onde, como, quem e quais custos envolvidos?

## 2.2 Revoluções industriais

A primeira Revolução Industrial proporcionou uma evolução tecnológica nunca vista no mundo, com o advento da produção mecanizada, ocorrida principalmente na Inglaterra no fim do século XVIII, sendo seu grande expoente James Watt, pela invenção da máquina a vapor em 1760.

A Revolução Industrial tem como uma de suas principais características a mecanização do sistema fabril, o que significa a substituição dos artesãos por máquinas. Essa substituição aumentava a velocidade de produção, e por consequência, ampliava os lucros diminuindo o preço por peça fabricada (produção em larga escala). Ao mesmo tempo surgia a necessidade por matérias-primas para suprir esse sistema fabril, e de formas para escoar a produção para diferentes localizações.

A segunda Revolução Industrial, ocorrida entre o final do século XIX e início do século XX, por sua vez, trouxe a eletricidade, o petróleo e o desenvolvimento de indústrias químicas e de aço para a produção em massa. Nesse ponto, vale ressaltar que a indústria ainda estava num processo de melhoria, iniciado ainda na primeira Revolução.

A terceira Revolução Industrial, que se inicia no final do século XX, traz a frente a tecnologia de comunicação pela rede, a digitalização, expansão do uso doméstico de

computadores, *smartphones*, e o uso de processamento de dados automatizado. Entram nessa revolução a biotecnologia, o desenvolvimento aeroespacial e a microeletrônica, entre outros. (BRANCO, 2007)

Acredita-se que vivemos atualmente a quarta Revolução, agora denominada revolução tecnológica: Onde existe o conceito de realidade virtual, carros autônomos, robôs ultrarrealistas, softwares de processamento de dados exponencialmente mais rápidos que humanos, reconhecimento de imagem até mesmo nos *smartphones*, o desenvolvimento da indústria 4.0 e a impressão 3D.

## 2.3 Impressão 3D

Apesar do processo de fresamento CNC permitir a geração de peças de geometria tridimensionais complexas partindo de modelos computacionais em CAD, este, mesmo com o desenvolvimento do fresamento com quatro e cinco eixos simultâneos ainda mostra-se limitado quando comparado às possibilidades da impressão 3D. Assim como o processo de fresamento, existe uma limitação relacionada aos processos de manufatura subtrativa. Essa limitação ocorre em razão da necessidade de se ter espaço disponível para manobrabilidade da ferramenta de subtração de material, especialmente se tratando de posições internas à peça fabricada. Por sua vez a impressão 3D elimina esse problema ao fabricar um objeto camada por camada. Por esta razão a impressão 3D também é denominada de manufatura aditiva.

Essa nova classe de processo de fabricação não é subtrativa de material como os processos de usinagem, ou consolidativa, como os processos de fundição ou conformação mecânica. Os processos aditivos não necessitam de ferramental específico, tais como brocas, fresas ou moldes, ou planejamentos elaborados da sequência de fabricação, típicos da usinagem. Na impressão 3D a peça é gerada a partir de um modelo tridimensional desenvolvido em um programa CAD. Esse modelo digital 3D é processado de forma a ser fatiado em finas camadas, que, quando pós-processadas, geram comandos específicos para o equipamento de impressão ou adição. O processo que será empregado para constituir de forma sequenciada estas camadas, que darão origem a forma da peça, pode variar de acordo com forma de promover a adição do material.

Inicialmente a impressão 3D ou manufatura aditiva era denominada prototipagem rápida, dada a versatilidade destes processos em criarem formas complexas de maneira rápida quando comparada aos processos convencionais de fabricação. O termo proto-



Figura 4 – Comparação entre uma peça obtida por fresamento e uma impressa

Fonte: ([SIMON, 2015](#)) apud ([HUANG et al., 2016](#))

tipagem vem do início da aplicação dessa tecnologia, onde as peças eram fabricadas principalmente em resina, não apresentando a resistência mecânica necessária para criar componentes plenamente funcionais, mas passíveis de serem aplicadas em protótipos para estudos conceituais

As principais vantagens da manufatura aditiva são:

- Velocidade, uma vez que o ciclo de produção entre finalização do desenho no CAD e a obtenção da peça final é muito curto. Isso se deve à não necessidade de preparação de ferramental, ferramentas e máquinas
- Capacidade de gerar geometrias complexas
- Versatilidade de materiais, permitindo o emprego de polímeros rígidos, flexíveis, termorresistentes, transparentes, translúcidos, opacos, metais, cerâmicas, compósitos, papel, madeira, metais, e outros não tão comuns ao setor metal-mecânico, tais como biomateriais ou concreto. As peças podem ser fabricadas tanto em um único material, quanto em combinações ou com gradientes de diferentes materiais
- Capacidade de gerar componentes funcionais
- Capacidade de produção com perda mínima de material
- Emprego de mão-de-obra não especializada

De uma forma geral os processos de impressão 3D não irão substituir processos de fabricação mais convencionais, tais como: usinagem, fundição e estampagem. Isso porque esse processo tem como principais desvantagens:

- Limitado a peças de pequena e médias dimensões, não sendo recomendada para peças grandes
- Não recomendado para produção de peças com grandes volumes de material
- Não recomendado para a produção de grandes lotes, sendo mais adequada a fabricação de pequenos e médios lotes
- Limitações quanto a precisão geométrica e dimensional, quando comparado a processos de usinagem
- Limitação de uso apenas para materiais com boa viscosidade (viscosidade baixa o suficiente para extrusão e alta o suficiente para construir um objeto camada por camada)
- Limitações quanto a acabamento superficial
- Baixa relação custo/tempo de produção para pequenos lotes, onde processos convencionais são mais efetivos
- Custo do material empregado ainda é elevado quando comparado com outros processos

### 2.3.1 História da manufatura aditiva

Apesar de processos como galvanização, cromagem, niquelagem, entre outros, também serem considerados como manufatura aditiva, os primeiros processos de impressão 3D tal como o conhecemos hoje surgiram nos anos 80 do século XX, e consistiam na polimerização (endurecimento/cura) de resinas fotossensíveis com o uso de feixes de luz. Este processo, que ficou conhecido como estereolitografia (SLA), teve sua primeira patente reconhecida em 1986. Concedida à Charles W. Hull, pela produção do aparelho de estereolitografia ([CHARLES, 1984](#)), a tecnologia descrita na patente consiste em: um tanque de resina líquida, que se solidifica por fotopolimerização ao contato com um laser ultravioleta. Para o controle da forma dos objetos bastava controlar a espessura das camadas criadas e a posição do laser.

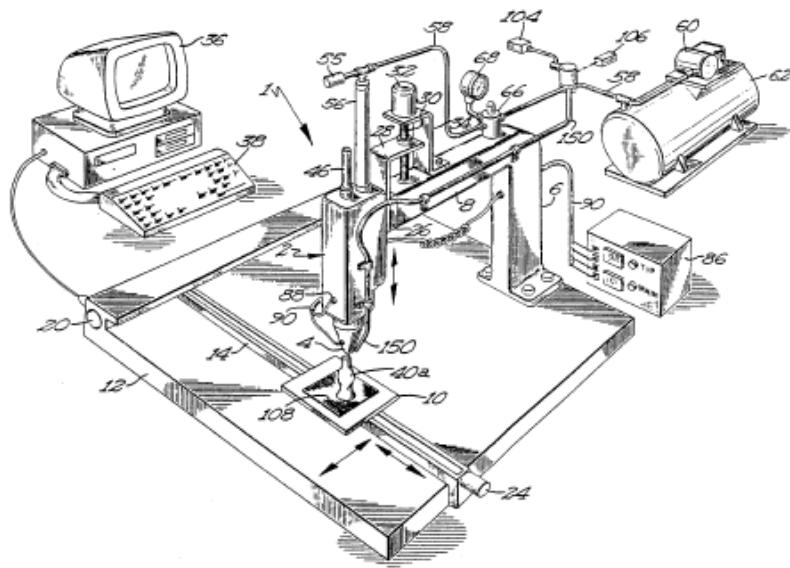


Figura 5 – Desenho observado na patente de FDM ([CRUMP, 1989](#))

Já a modelagem por fusão e deposição (FDM) teve sua primeira patente em 1989, onde Scott Crump registrou um protótipo de impressora 3D ([CRUMP, 1989](#)) como visto na figura 5. Nessa patente já estão presentes as ideias de utilizar *softwares CAD e CAM* para controle do formato das camadas da peça a ser produzida, bem como para controle da movimentação dos eixos de liberdade do sistema.

Em 2007 já existia uma impressora 3D com preço menor que dez mil dólares, e ainda nesse ano a Replicating Rapid-prototyper (RepRap) começou a ganhar destaque no mercado mundial com seu projeto de impressora replicável. A partir desse ponto, o desenvolvimento da tecnologia das impressoras ganhou força, sendo que, em 2009 começaram a surgir os kits para montagem da sua própria RepRap.

Hoje a tecnologia de prototipagem rápida é desenvolvida em larga escala, sendo possível hoje trabalhar com diferentes materiais. De acordo com a pesquisa realizada pela Sculpteo ([2017](#)), os materiais mais utilizados pelos usuários de impressão 3D são plásticos, resinas, metais, arenito, cera e cerâmica.

Atualmente, existem diversas pesquisas em paralelo por todo o mundo buscando as mais diversas melhorias de processo, muitas delas surgindo devido às novas possibilidades de uso da impressão 3D. Um exemplo é o estudo de novos protótipos de extrusora, onde Neto ([NETO, 2013](#)) buscava projetar um mini-cabeçote intercambiável para utilizar em

impressororas 3D portáteis. Sua ideia surgiu da necessidade do uso da impressora na área de bioengenharia, de modo que, a partir de uma FAB@CTI fosse possível, com a troca de seu cabeçote, trabalhar com materiais em pó. Para tanto, ele troca todo o sistema de extrusão original (extrusora com roda de atrito) por um sistema de extrusão por rosca, que ele desenvolve ao longo de sua tese.

Também a indústria observou o potencial desta nova tecnologia de prototipagem, e percebeu nela a possibilidade de se produzirem peças com menor desperdício de material, dentro de uma visão de manufatura enxuta (lean manufacturing), ou de se produzirem peças de geometria complexa sem a necessidade de possuir ferramentais complexos. As primeiras impressoras 3D funcionavam pelo princípio de estereolitografia. A estereolitografia com resinas fotossensíveis não permitia a obtenção de peças com resistência estrutural necessária para uso, nem uma diversidade de materiais, mas seu emprego no desenvolvimento de protótipos e modelos logo se fez presente.

Nestes mais de 30 anos de desenvolvimento o processo de impressão 3D evoluiu permitindo o emprego de praticamente todo o tipo de materiais, de resinas a cerâmicas, de metais a biomateriais. Atualmente o processo de impressão 3D se divide em três grandes grupos: o de deposição por fusão (fused deposition modeling), o de deposição por injeção (ink jet printing) e sinterização a laser (laser sintering). O processo de deposição por fusão é o clássico empregado nas impressoras 3D de polímeros, o processo de deposição por injeção permite a operação de materiais poliméricos, cerâmicos, compósitos e biomateriais, e o processo de sinterização a laser está mais focado em materiais metálicos e compósitos metálicos/cerâmicos.(CHARLES, 1984).

### 2.3.2 Processos de impressão 3D

De acordo com a pesquisa realizada pela Sculpeo (2017) observa-se que, dentre as pessoas entrevistadas, as tecnologias de impressão 3D mais utilizadas são fusão por modelagem e deposição (FDM) e sinterização seletiva a laser (SLS). Conforme a figura 4, pode-se observar que existem vários métodos de impressão 3D amplamente utilizados, os quais serão descritos a seguir.

O que as impressoras 3D típicas têm em comum é a necessidade de pré-processamento do desenho da peça a ser fabricada. Esse pré-processamento é realizado por um software, que determina o caminho a ser realizada a impressão de cada camada e define o número de camadas que serão impressas.

**Modelagem por fusão e deposição** é o tipo mais conhecido de impressão 3D,

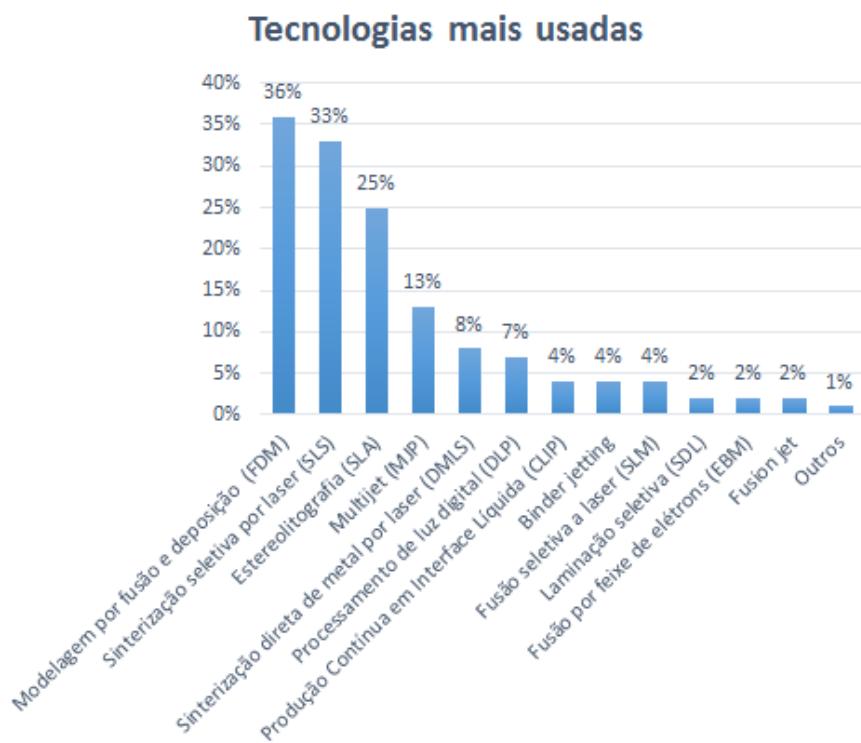


Figura 6 – Tecnologias de impressão 3D mais utilizadas segundo pesquisa.

Fonte: Adaptado de ([CORE-BAILLAIS et al., 2017](#))

e atualmente o mais utilizado no mundo. Tem como característica essencial o uso da deposição, geralmente de termoplásticos, para a produção de peças camada por camada. Para a fabricação das peças, a extrusão de material é feita pelo sistema de num estado semi-líquido, de modo que se solidifique aderindo à camada anterior. Nesse tipo de impressão, caso seja necessário suporte, o software irá processar de modo que, ao final da impressão, seja possível retirar o suporte sem danificar a peça final.

Nesse processo, o filamento passa pelo cabeçote de extrusão e é depositado formando a peça final. Nos casos necessários, suportes podem ser adicionados pelo software para que a fabricação ocorra corretamente. A mesa aquecida é onde a peça se adere durante a fabricação.

**Estereolitografia** é reconhecida como o primeiro processo de impressão 3D comercializado. Utiliza-se de uma resina fotopolimerizável num tanque, com uma plataforma interna que se movimenta no eixo vertical. Um laser se movimenta nos eixos X-Y desenhando cada camada da peça fabricada, de acordo com os dados recebidos pelo software da impressora. Ao final da camada, a plataforma se movimenta no eixo z, e

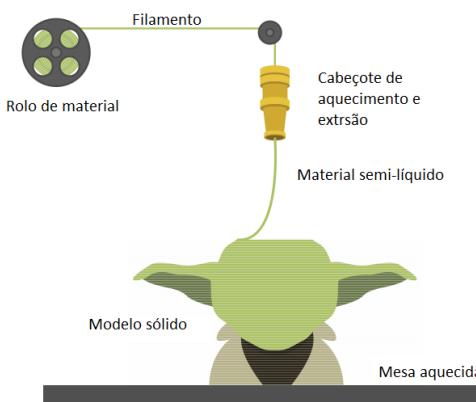


Figura 7 – Representação do processo de impressão com a tecnologia FDM

Retirado de: <http://3dcreative.lt/3d-printing-services/?lang=en>

a nova camada é iniciada. Esse processo termina quando a última camada da peça é fotopolimerizada. Usualmente é necessário que se faça a cura da peça final para garantir o endurecimento completo da resina. (SAHNER, 2015)

**Sinterização seletiva por laser** é um tipo de tecnologia de impressão 3D que trabalha com material em pó. O laser, como no SLA, traça o caminho determinado pelo software em cada camada, porém, como nesse caso o material é em pó, cada vez que a plataforma se move no eixo vertical, uma camada de pó é adicionada sobre a peça, e a nova camada é então iniciada. Como impressoras do tipo SLS utilizam-se de lasers potentes para criar as peças esse tipo de tecnologia não é encontrada em residências, sendo portanto um tipo de impressão mais utilizado em indústrias.

**Processamento de luz digital** é um modelo em que a impressora utiliza uma fonte de luz mais comum que o laser para endurecer o fotopolímero. Geralmente o processo é mais rápido que a SLA, uma vez que a luz, diferentemente do laser, é aplicada à camada inteira de uma vez, curando toda a resina daquela camada ao mesmo tempo.

Isso torna o processo de impressão mais rápido nos modelos DLP, mesmo quando a peça a ser produzida é complexa, e lhe garante um bom acabamento, desde que tomados os devidos cuidados de pós-processamento da peça.

### 2.3.3 Materiais para impressão

Segundo os estudos realizados pela Sculpteo (2017) os materiais mais utilizados para impressão 3D são plásticos, resinas e metais. De acordo com as características desejadas na peça final, o material é escolhido para atendê-las. A seguir são apresentados

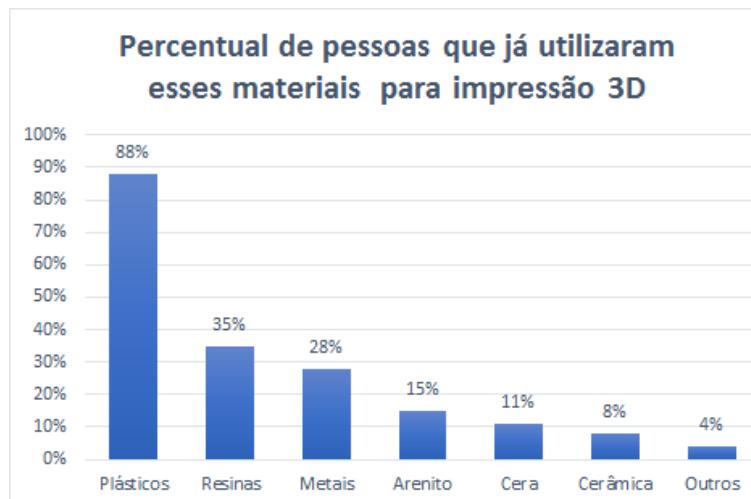


Figura 8 – Percentual de pessoas que já utilizaram cada um desses materiais para impressão 3D. Traduzido de ([CORE-BAILLAIS et al., 2017](#))

os principais tipos de materiais utilizados em impressão 3D.

**Nylon**, ou **Poliamida** são comumente usados em forma de pó no processo de sinterização ou em forma de filamento no processo de FDM. É um tipo de plástico que se mostrou confiável para a impressão 3D por ser forte, flexível e durável. É naturalmente de cor branca, mas pode ser colorido - impressão pré ou posterior. Este material também pode ser combinado, quando em pó, com alumínio em pó para produzir outro material de impressão 3D comum: o Alumide.

**ABS** é outro plástico muito usado para impressão em 3D e é amplamente utilizado nas impressoras FDM, por ser forte, ter uma grande variedade de cores e também por ser facilmente encontrado no mercado em formato de filamentos para impressão.

**PLA** é um plástico biodegradável, que pode ser usado em forma de resina para processos DLP e SL, bem como em filamento para o processo FDM. Ele é encontrado em uma ampla variedade de cores, incluindo transparentes, o que é uma opção útil para aplicações diferentes na impressão 3D. No entanto, não é tão durável quanto o ABS e o Nylon.

**LayWood** é um material de impressão 3D composto de madeira e polímero especialmente desenvolvido para impressoras 3D de tecnologia FDM.

**Aço inoxidável em pó**. Um dos metais mais fortes e, portanto, mais comumente usados para a impressão em 3D, é o aço inoxidável para os processos de sinterização / fusão / EBM. É naturalmente prata, mas pode ser revestido com outros materiais para

dar um efeito de ouro ou de bronze.

**Ouro** e a **prata** foram adicionados nos últimos dois anos à gama de materiais metálicos que podem ser impressos em 3D diretamente, com aplicações óbvias em todo o setor de jóias. Estes são materiais muito fortes e são processados em pó.

**Titânio** é um dos materiais metálicos mais fortes possíveis e tem sido usado para aplicações industriais de impressão em 3D há algum tempo. Fornecido em pó, pode ser usado para os processos de sinterização / fusão / EBM.

**Cerâmicas** são parte de um grupo relativamente novo de materiais que podem ser usados para impressão em 3D com vários níveis de sucesso. O particular a notar com esses materiais é que, após a impressão, as peças cerâmicas precisam passar pelos mesmos processos que qualquer peça cerâmica feita com métodos tradicionais de produção, nomeadamente fiação e vidros.

**Papel** de copiadora A4 padrão é um material de impressão 3D empregado pelo processo SLDL. A empresa opera um modelo de negócios particularmente diferente para outros fornecedores de impressão em 3D, pelo que o desembolso de capital para a máquina está no meio do alcance, mas a ênfase é muito útil em um fornecimento de materiais de fácil obtenção, custo-benefício, que pode ser comprado localmente. Os modelos impressos 3D feitos com papel são seguros, ecológicos, facilmente recicláveis e não requerem processamento pós-processamento.

**Biomateriais** são parte de uma grande linha de pesquisa na área de impressão 3D. O tecido vivo está sendo estudado com o objetivo de se desenvolver aplicações que incluem a impressão de órgãos humanos para transplante, bem como tecidos reposição no corpo. Outras pesquisas nesta área estão focadas no desenvolvimento de alimentos - sendo a carne o principal exemplo.

**Comida** é parte do grupo de materiais para os quais os estudos sobre as extrusoras têm dado atenção. Dentre os alimentos O chocolate é o mais comum, juntamente com o açúcar. Existem ainda impressoras que trabalham com massas (como macarrão e pizza).

**Outros**, como por exemplo os materiais da Stratasys, uma empresa que possui um material único com seus materiais digitais para a plataforma de impressão Objet Connex 3D. Esta melhoria significa que os materiais de impressão do objeto 3D podem ser combinados durante o processo de impressão em várias concentrações para formar novos materiais.



Figura 9 – Estimativa da relação de tamanho entre a 3Doodler inicial (a esquerda), sua versão 2.0 (ao centro) e a LixPen (à direita)

Fonte: Página da *3Doodle* (2013) e da *LixPen* (2016)

## 2.4 3D pens

De acordo com a pesquisa presente no relatório da Sculpteo (2016) acerca dos possíveis usos da impressão 3D, o meio artístico tem aceitação da ordem de 20% para esse uso, de acordo com os entrevistados.

O primeiro projeto miniaturizado de impressora 3D para uso com as mão foi a *3Doodler*, um projeto que surgiu no *kickstarter* e teve uma aprovação muito alta, recebendo apoio de mais de 26 mil pessoas. Esse primeiro projeto trouxe ao mercado alguns concorrentes, como a *Scribbler*, a *3D Simo* e a mais recente Lix pen, cujas primeiras entregas começaram em 16 de outubro de 2015. A própria *WobbleWorks* (fabricante da *3Doodler*) já lançou uma versão 2.0, que é menor, mais leve, mais rápida e tem maior eficiência energética que a versão original, uma versão *pro*, indicada para uso profissional, e uma versão *start*, própria para crianças.(GETTING..., 2016) (LIX..., 2015)

Apesar de possuírem várias características em comum, construtivamente existem algumas diferenças consideráveis entre elas. Alguns pontos a serem destacados são o uso de bicos de extrusão cerâmicos na terceira geração da *Scribbler*, em comparação aos metálicos usados pelas outras empresas. Esse tipo de bico garante uma temperatura mais baixa no lado externo do bico, conferindo à essa *3D pen* mais segurança durante o uso. Já a *3Doodler start* utiliza um tipo específico de plástico que precisa de menos aquecimento para alcançar o *melting point*, o que significa menor risco de queimadura para crianças.

# 3 Desenvolvimento do Projeto

Com base na proposta de desenvolvimento de produto apresentada por Rozenfeld (2006), o desenvolvimento do projeto foi dividido em:

- Informacional
- Conceitual
- Detalhamento

## 3.1 Informacional

### 3.1.1 Requisitos de projeto

Devido ao tamanho diminuto, os requisitos são baseados, em grande parte, na premissa básica de que o sistema deve ser operado por mãos, de modo que há uma considerável limitação associada ao tamanho máximo, bem como ao peso limite para que não seja desagradável seu uso.

São dados como requisitos, nesse aspecto:

- Ergonômica
- Bonita
- Leve
- Fácil de manusear
- Segura
- Baixo custo
- Controlável
- Possibilidade de uso em todas as posições, inclusive sobre cabeça
- Operar com pelo menos dois materiais

- Uso de filamentos comerciais
- Baixa potência
- Alimentação de energia multi-voltagem
- Fácil controle
- Baixo número de componentes
- Possibilidade de ser replicada
- Possibilidade de ser fabricada por impressão 3D
- Mínima quantidade de peças usinadas
- Máximo número de componentes comerciais
- Alta confiabilidade
- Fácil manutenção

### 3.1.2 Especificações

Para que fosse possível a definição das especificações de projeto a partir dos requisitos anteriormente listados, foi gerada uma tabela de *benchmarking*, na qual foram comparados os modelos mais conhecidos no mercado de *3d pens*. Esta tabela encontra-se no apêndice A.

A partir dessa comparação foi possível avaliar e estabelecer um conjunto de especificações de projeto condizentes, listadas abaixo:

- Diâmetro máximo de 40mm, para que seja agradável o porte em mãos
- Comprimento máximo de 250mm, também para garantir a portabilidade
- O material a ser utilizado para impressão deverá ter diâmetro nominal de 1.75mm
- Potência máxima de 100W
- Alimentação de energia feita por rede CA (plugue de tomada) devido à potência consumida para o aquecimento do filamento
- Materiais de impressão: PLA e ABS

- Temperatura de operação no ponto de fusão do filamento: 180 a 190°C para o PLA e 215 a 230°C para o ABS
- Peso: 200g de peso máximo
- Custo máximo: R\$ 1.500,00

Para comparar os requisitos propostos com as necessidades de um usuário de *3D pen* foi utilizado o QFD (*Quality Function Deployment*). Também conhecido como casa da qualidade, o QFD é responsável por determinar as intensidade dessas relações, e compará-las com os concorrentes do mercado (*benchmarking*) (ROZENFELD et al., 2006). Desse modo é possível comparar as possíveis soluções de projeto, tomando como base as melhores opções do mercado e quão eficientes estas são para atender as necessidades do usuário. O QFD se encontra na tabela 1.

Tabela 1 – Quality Function Deployment

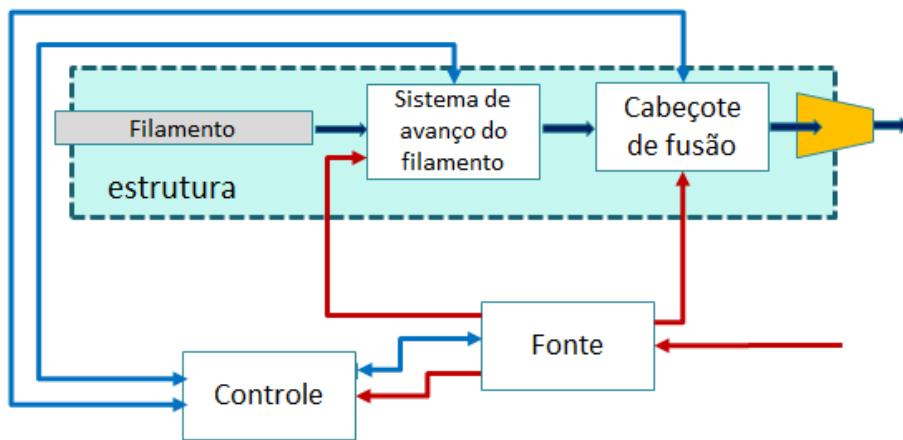


Figura 10 – Modelo funcional da impressora 3D tipo *3D pen*, com os diagramas dos respectivos subsistemas

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2016

### 3.2 Projeto conceitual

O desenvolvimento do projeto dividiu a *3D pen* em cinco subsistemas. São eles:

- **Estrutura:** Consiste no conjunto de peças que unem os outros subsistemas
- **Aquecimento:** Sistema responsável pelo aquecimento do filamento polimérico até o estado de fluido viscoso
- **Avanço:** É o conjunto que garante a extrusão do filamento polimérico pelo bico extrusor
- **Controle:** Conjunto de processador, código e componentes eletrônicos responsáveis pelo controle dos sistemas de avanço e de aquecimento
- **Energia:** Sistema de alimentação de energia

As relações existentes entre esses subsistemas estão esquematizadas na figura 10.

Combinando esses subsistemas é possível criar diferentes configurações para o projeto. Estas configurações estão esquematizadas na figura 11. A diferença entre elas é onde se localizam cada um dos subsistemas (dentro ou fora da estrutura física da *3d pen*). Ao se alterar a posição dos subsistemas dentro da *3d pen* pode-se melhorar ou piorar a

Tabela 2 – Comparação entre modelos funcionais e requisitos

	Solução 1 Figura 11a	Solução 2 Figura 11b	Solução 3 Figura 11c	Solução 4 Figura 11d
Ergonômica	1	3	3	5
Bonita	5	3	1	1
Leve	1	3	3	5
Fácil de manusear	5	5	5	5
Segura	5	3	3	3
Baixo custo	3	5	5	5
Controlável	5	5	5	5
Possibilidade de uso em todas as posições	5	3	1	1
Operar com pelo menos dois materiais	5	5	5	5
Uso de filamentos comerciais	5	5	5	5
Baixa potência	5	5	5	5
Alimentação de energia multi-voltagem	1	5	5	5
Fácil controle	5	5	5	5
Número baixo de componentes	5	3	3	1
Possibilidade de ser replicada	1	3	3	3
Fabricação por impressão 3D	3	3	3	3
Quantidade de peças usinadas	3	3	3	3
Quantidade de componentes comerciais	1	5	5	5
Confiabilidade	5	3	3	3
Fácil manutenção	3	5	5	5
<b>Soma</b>	<b>72</b>	<b>80</b>	<b>76</b>	<b>78</b>

5= muito bom e 1= ruim

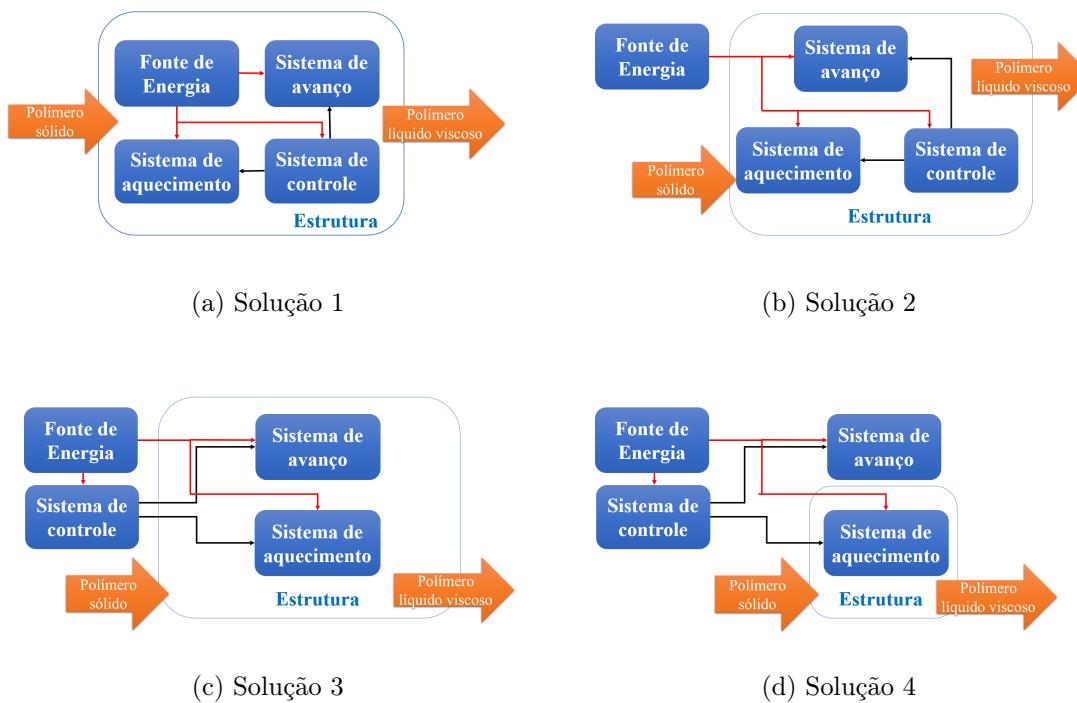


Figura 11 – Diferentes soluções possíveis

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018

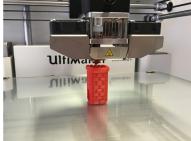
relação da solução com algum dos requisitos. Para determinar qual dentre as soluções é melhor ou pior foram dados valores às relações entre as soluções e os requisitos, onde 5 é o melhor e 1 é o pior. Desse modo, a solução com a maior soma final é a melhor dentre as opções. No caso, pode-se ver que a melhor solução para o projeto é a solução 2 (figura 11b). Nesta solução a fonte de energia é externa com relação à estrutura e os outros sistemas são internos a ela.

### 3.2.1 Desenvolvimento da solução

Para cada um desses subsistemas existem diferentes opções de soluções específicas que podem sanar as necessidades associadas a cada subsistema. De modo a determinar as melhores soluções para cada um deles as tabelas 3, 4, 5, 6 e 7 dispostas a seguir comparam os requisitos relevantes em cada caso com as opções de solução existentes no mercado.

Na tabela 3 é possível observar que, para o projeto em questão, é mais interessante a fabricação da estrutura da *3d pen* por impressão, uma vez que essa é a opção mais

Tabela 3 – Relação entre tipos de estrutura e requisitos

		Ergonomia	Peso	Custo	Replicável	Soma
Impressa		5	5	5	5	<b>20</b>
Injetada		5	5	1	1	<b>12</b>
Usinada		1	3	1	3	<b>8</b>

5=muito bom e 1=ruim

barata e fácil de replicar quando se trata de pequenos lotes.

A tabela 4 traz os possíveis métodos de aquecimento. Comparando-os é possível ver que o método menos complexo a ser implementado é utilizando resistências elétricas.

Comparando na tabela 5 podemos perceber que o tamanho e o custo são fatores determinantes para a solução escolhida, uma vez que o sistema não demanda processamento grande. Portanto opta-se por um Arduino Nano.

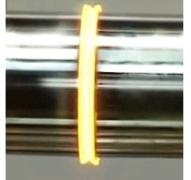
Ao se avaliar os possíveis métodos de avanço a serem usados. na tabela 6, pode-se perceber que o sistema mais recomendado é o de avanço por polias, pela fácil replicação.

Já a tabela 7 mostra a relação entre os possíveis tipos de alimentação. É possível observar que a melhor opção, no caso, é utilizar uma fonte conectada à tomada, de modo a garantir a autonomia do sistema por um período de tempo superior, além de garantir a alimentação de energia necessária durante todo o uso.

Portanto, temos como resultado parcial do processo de desenvolvimento:

- **Estrutura:** Feita por meio de impressão 3D
- **Aquecimento:** Utilizando resistência elétrica
- **Avanço:** Avanço por atrito estático entre polia e filamento
- **Controle:** Uso de Arduino Nano para avaliação e processamento de dados

Tabela 4 – Relação entre aquecimentos possíveis e requisitos

		Segurança	Custo	Controle	Tamanho	Soma
Resistência aberta		1	5	5	5	<b>16</b>
Resistência fechada		5	3	5	5	<b>18</b>
Laser		3	1	1	5	<b>10</b>
Atrito		5	1	1	1	<b>8</b>

5=muito bom e 1=ruim

- **Energia:** Uso de fonte conectada à tomada

Desse modo é possível avançar para a próxima fase do desenvolvimento: o detalhamento

### 3.3 Detalhamento

#### 3.3.1 Estrutura

A composição estrutural do projeto é a combinação de peças necessárias para união do conjunto de aquecimento e de avanço do filamento. Também esta é responsável por ser a parte da ferramenta em contato com o usuário, onde se localizam também os acionamentos do sistema e o contato com o plugue de alimentação.

Tabela 5 – Relação entre controladores/processadores e requisitos

		Tamanho	Capacidade de processamento	Custo	Soma
Arduino UNO		3	3	5	<b>11</b>
Arduino DUE(arm)		3	1	3	<b>7</b>
Arduino Nano		5	3	5	<b>13</b>
Raspberry		1	5	1	<b>7</b>

5=muito bom e 1=ruim

### 3.3.2 Projeto estrutural

O projeto estrutural será baseado em dois fatores essenciais. O primeiro deles, associado ao tamanho e ergonomia da *3D pen* é para garantir que o usuário sinta-se confortável com o formato da impressora. O segundo, associado ao peso e sua distribuição pela impressora, traz ao usuário a sensação de controle pleno sobre os movimentos.

### 3.3.3 Sistema de avanço do filamento

O projeto mecânico consiste, primeiramente, em um sistema de avanço que seja capaz de, por meio do acionamento de um motor, avançar o polímero pelo bico extrusor. Para tanto, foi necessária a avaliação das soluções possíveis, de acordo com os requisitos. Primeiramente, para que se tornasse possível essa avaliação, foram elencados diferentes tipos de transmissões de movimento. Dentre eles, encontram-se:

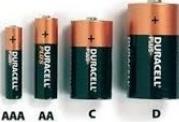
Tabela 6 – Relação entre métodos de avanço e requisitos

		Tamanho	Controle	Custo	Replicável	Soma
Manual		5	1	5	5	<b>16</b>
Roda dentada e roda de atrito		3	5	1	1	<b>10</b>
Par de rodas dentadas		5	5	3	1	<b>14</b>
Correia		3	3	5	3	<b>14</b>
Polia		5	5	5	3	<b>18</b>

5=muito bom e 1=ruim

- Engrenagem: utilizando-se de um par de engrenagens cônicas de dentes retos seria possível alterar a posição relativa entre eixos motor e movido, porém não seria possível a transmissão de movimento diretamente da engrenagem para o filamento, se fazendo necessária uma polia
- Correia: usualmente utilizada quando os eixos podem ter variação de distância relativa, ou então quando estes estão distantes entre si, correias não teriam grande utilidade uma vez que o sistema deve ser compacto
- Polia: O uso de polias motora e movida poderia ter utilidade também para a transmissão de torque entre as partes

Tabela 7 – Relação entre fontes de energia e requisitos

		Tamanho	Peso	Custo	Autonomia	Soma
Fonte		3	5	5	5	<b>18</b>
Bateria		3	3	1	3	<b>10</b>
Pilha		1	1	3	1	<b>6</b>
Fonte + bateria		3	3	3	5	<b>14</b>
Painel solar		1	3	1	5	<b>10</b>

5=muito bom e 1=ruim

- Sem fim: O uso de um sem fim para transmissão de movimento tornaria o sistema tecnicamente mais complexo, uma vez que o sem fim precisaria transmitir torque por seus dentes para o filamento polimérico.
- Roda de atrito: O contato entre o filamento e a polia acoplada ao motor pode ser denominada roda de atrito. É um método simples de se realizar a transmissão do torque, porém, devido ao possível escorregamento associado ao contato, podem ocorrer perdas significativas caso não seja bem estruturado.

Como a ideia do sistema é a transmissão final de um eixo motor para o filamento polimérico, deseja-se uma transmissão de movimento compacta e de prático acoplamento

e desacoplamento, uma vez que o objetivo final é transmitir movimento para o filamento. Deste modo, torna-se mais eficaz o uso de um sistema de avanço baseado em polias e rodas de atrito.

### 3.3.4 Sistema de aquecimento

Um sistema de aquecimento de impressora 3D, como visto no apêndice B é composto, de modo simplificado, por:

- bico redutor de diâmetro: por onde o filamento polimérico sai da impressora
- cartucho aquecedor: responsável pela transformação de energia elétrica em variação de temperatura
- *hotend*: bloco de alumínio aquecido pelo cartucho aquecedor
- termistor: semicondutor de resistência não-linear sensível à temperatura. ([MI-CHALSKI; ECKERSDORF; MCGHEE, 1991](#))
- dissipador de calor: como o próprio nome diz, é responsável por dissipar o calor excedente do *hotend*, para que não ocorra superaquecimento

Além desses itens, um sistema de controle implementado em software é utilizado para que, dada a temperatura lida a partir do termíster, seja possível controlar a tensão aplicada ao cartucho aquecedor, de modo a manter a temperatura adequada para o uso, de acordo com cada um dos possíveis materiais. Para se determinar a temperatura em função de uma resistência do tipo NTC (*negative temperature coefficient*) podem ser utilizados dois possíveis equacionamentos: a formulação de *Steinhart-Hart* ([STEINHART; HART, 1968](#)) ou a aproximação pelo fator  $\beta$ .

#### Steinhart-Hart

O equacionamento proposto por *Steinhart-Hart* é um modelo para determinar a relação entre resistência e temperatura num semicondutor. Esse modelo utiliza-se da aproximação por um sistema logarítmico de terceira ordem para relacionar resistência em temperatura.

$$\frac{1}{T} = A + B * \ln(R) + C * [\ln(R)]^3 \quad (3.1)$$

A equação acima pode ser utilizada para um grande variedade de termistores, bem como para uma variação da ordem de até algumas centenas de graus.

A determinação dos coeficientes A, B e C se dá pelo conhecimento de três temperaturas e suas respectivas resistências. Desse modo, torna-se possível resolver o sistema:

$$\begin{bmatrix} 1 & \ln(R_1) & \ln(R_1)^3 \\ 1 & \ln(R_2) & \ln(R_2)^3 \\ 1 & \ln(R_3) & \ln(R_3)^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ \frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_3} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

### 3.3.4.1 Fator Beta

A aproximação pelo método do fator Beta ( $\beta$ ) é uma simplificação da formulação de *Steinhart-Hart*, dada por:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{R}{R_0} \right) \quad (3.3)$$

onde  $R_0$  e  $T_0$  são resistência nominal a uma determinada temperatura e a respectiva temperatura. Esse modelo torna-se útil uma vez que os fabricantes de termistores os catalogam, em geral, pela resistência nominal à temperatura de 25°C. Também o fator  $\beta$  associado pode ser fornecido pela fabricante em alguns casos.

### 3.3.5 Controle

O projeto de controle consiste num conjunto de configurações básicas que permitem o funcionamento dos sistemas de avanço e aquecimento. Esse controle é necessário para garantir que a temperatura possa se manter numa faixa de valores adequada para o derretimento do filamento polimérico utilizado, e também para garantir que o uso do sistema de avanço só seja possível após o alcance da temperatura de uso.

Tanto para o controle do aquecimento quanto para o do motor optou-se pelo uso de controle de tensão, uma vez que é um controle mais simples que o de corrente, e uma ponte H e três sinais digitais são suficientes para cada um dos respectivos controles.

#### 3.3.5.1 Ponte H

Uma ponte H é um circuito de potência que tem por objetivo determinar a polaridade da tensão e seu valor aplicados a um determinado componente. O funcionamento

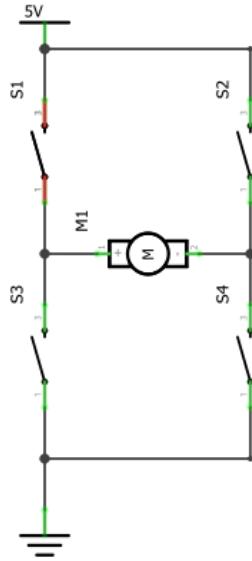


Figura 12 – Ponte H

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018

se dá pelo chaveamento de componentes eletrônicos, e é usualmente ativada por PWM (*Pulse Width Modulation*). Em geral, esse tipo de sistema é usado para controle da direção e velocidade angular de motores de corrente contínua.

A figura 12 mostra o modelo conceitual de ponte H. Esse modelo tem como risco a possibilidade de dar curto circuito na fonte. Para eliminar esse tipo de risco, um circuito lógico auxiliar é utilizado.

Devido a grande utilidade e da relativa simplicidade, muitas empresas fabricam pontes H em circuitos integrados. Um dos mais comuns, e o usado nesse projeto, é o L298N, um conjunto de duas pontes H num circuito integrado.

Para o controle de sinal de uma ponte H utiliza-se a modulação por largura de pulso, ou *Pulse Width Modulation*(PWM).

### 3.3.5.2 Modulação por largura de pulso

A modulação por largura de pulso (PWM) é um método muito utilizado para controle de motores elétrico, de intensidade luminosa em ou controle de aquecimento.

Isso é possível uma vez que o uso do PWM pode controlar a potência média aplicada a um componente, utilizando-se para tanto, de um driver conversor de PWM

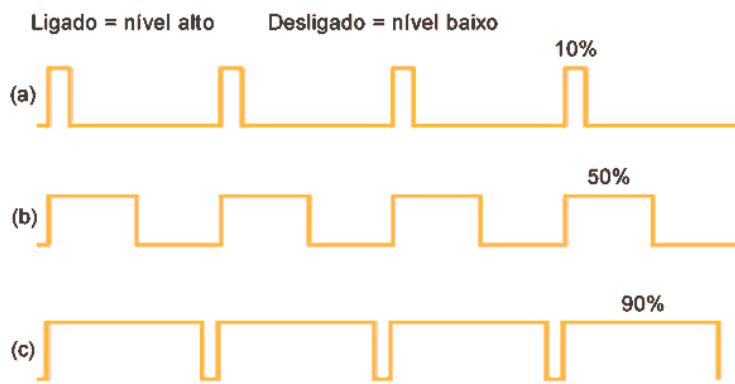


Figura 13 – Exemplos de sinais PWM

Fonte: Adaptado de ([INTRODUCTION...](#), 2001)

para tensão constante. Esse driver (usualmente uma ponte H) é controlado pelo valor da razão cíclica (mais conhecida por *duty cycle*).

O *duty cycle* é a relação entre o período de sinal digital em valor alto e o período total do sinal, ou seja, para um sinal de período  $\tau$ , e período em sinal digital alto  $t$ , o valor de *duty cycle* seria:

$$\text{duty cycle} = \frac{t}{\tau} * 100\% \quad (3.4)$$

Como pode ser visto na figura 13 o *duty cycle* pode ser variado conforme é alterado o período em sinal digital alto. Como é possível enviar um *duty cycle* entre 0 e 100%, a resposta analógica da ponte H pode variar entre 0 e Vcc, onde Vcc é a tensão aplicada na própria ponte.

### 3.3.5.3 Controle Proporcional

Um controle proporcional tem como relação entrada-saída uma constante, ou seja:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = K_p * G(s) \quad (3.5)$$

onde  $Y(s)$  é a saída do sistema,  $R(s)$  é o sinal de referência (entrada) e  $K_p$  é a constante de proporcionalidade. Usualmente, porém, um sistema de controle proporcional não é suficiente para eliminar o erro em regime do sistema. Para eliminar o erro em regime insere-se um controle integral. ([CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011](#)) ([OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003](#))

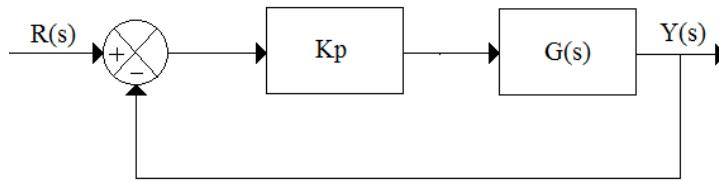


Figura 14 – Malha de controle proporcional

Fonte: Adaptado de (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003)

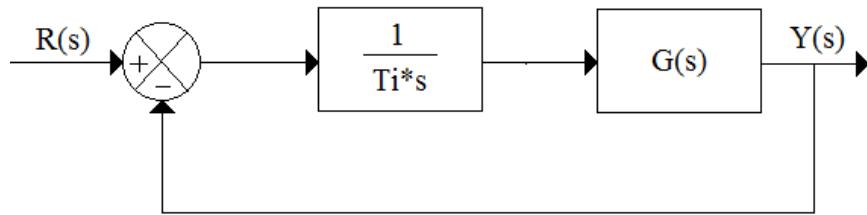


Figura 15 – Malha de controle integral

Fonte: Adaptado de (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003)

### 3.3.5.4 Controle Integrativo

Tem como relação entre entrada e saída:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = K_i \left( \frac{1}{T_i s} \right) * G(s) \quad (3.6)$$

Um controle do tipo integral, mostrado na figura 15, tem erro em regime estacionário para entrada do tipo degrau igual a zero, independentemente da planta a qual é aplicado. Porém, o controle do tipo integral diminui a estabilidade do sistema, o que pode tornar uma malha de controle instável, muitas vezes. Nesse caso, com o intuito de estabilizar a malha, opta-se por um controle derivativo.

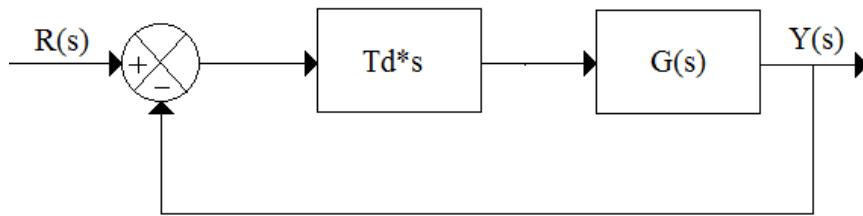


Figura 16 – Malha de controle derivativo

Fonte: Adaptado de (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003)

### 3.3.5.5 Controle Derivativo

É um controlador que aumenta a estabilidade do sistema, porém, por si só, não é capaz de eliminar o erro em regime. É altamente utilizado, em especial, em sistemas onde um sobressinal pode acarretar danos à planta, pois é capaz de eliminar o sobressinal da mesma.

Tem como relação entre entrada e saída:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = k_d(T_d s) * G(s) \quad (3.7)$$

### 3.3.5.6 Controle Proporcional-Integral-Derivativo

É um controle mais complexo que os anteriores separadamente, porém, é também mais robusto. Carrega consigo as características dos três tipos de controle anteriormente explicados. Sua função de transferência é:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) G(s) \quad (3.8)$$

# 4 Implementação

A implementação da *3d pen* terá como base a prévia divisão em subsistemas de avanço do filamento, de aquecimento, de controle, de alimentação e estrutural.

## 4.1 Sistema de avanço

Para esse sistema, a partir da escolha de se modelar os componentes no SolidWorks® e aplicar a manufatura aditiva para a fabricação da estrutura da base , partiu-se para o desenvolvimento das peças.

O conjunto como está mostrado na figura 17 é constituída de:

1. Motor, responsável pelo acionamento do avanço
2. Polia passiva, que garante o contato do filamento com a polia ativa
3. Polia ativa, conectada diretamente ao motor

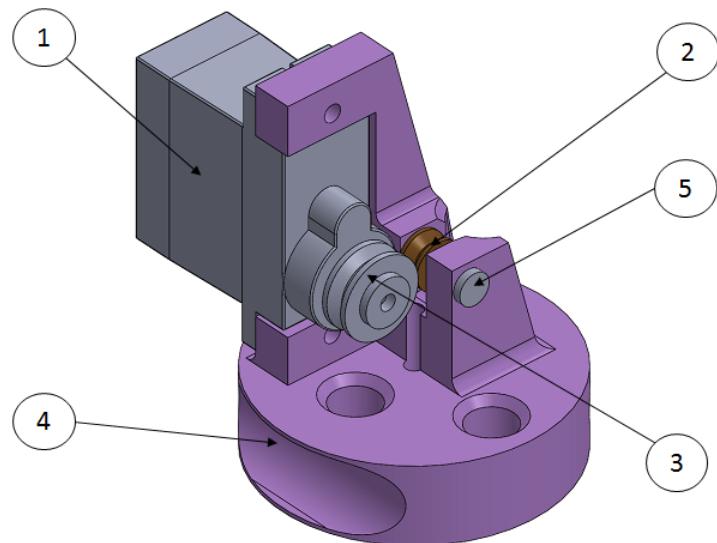


Figura 17 – Desenho de conjunto do sistema de avanço da *3D pen*

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018

4. Base de suporte para o sistema de avanço
5. Pino para travamento da polia número 2

As polias foram também impressas, para que o atrito estático entre polias e filamento seja suficiente para a movimentação do material por entre as mesmas. Esse tipo de construção para o sistema de avanço tem como grande vantagem o não travamento do motor caso haja o acionamento do mesmo sem que o material esteja na temperatura adequada, bem como em caso de travamento do filamento polimérico.

## 4.2 Sistema de aquecimento

Com a escolha de um conjunto mecânico de aquecimento pronto, proveniente de uma Rep Rap e preparado para receber tanto o cartucho aquecedor quanto o termíster, seria necessária apenas a calibração do sistema de leitura de temperatura e o projeto e codificação do sistema de controle.

Partindo da estrutura número 4, que faz parte ainda do sistema de avanço, temos:

6. Conexão do conjunto *hotend* com a estrutura do avanço
7. Dissipador de calor e bloco de aquecimento
8. Bico de extrusão
9. Furo para o cartucho aquecedor
10. Furo para o termíster

Como o aquecimento é proveniente de um sistema comercial, nenhuma das peças acima numeradas foram fabricadas. Apenas a conexão (número 6) não faz parte do sistema comprado, porém, é uma conexão tipo BSP de 1/8 de polegada e 28 filamentos por polegada.

A opção por um sistema de aquecimento comercial em vez da fabricação dos componentes separadamente deu-se, em grande parte, pela complexidade da determinação da taxa de transferência de calor entre o cartucho e o *hotend*, e também a determinação do tamanho necessário de dissipador de calor. Além disso, por ser amplamente comercializado, facilita a obtenção das peças para a replicação do protótipo e também para manutenção do mesmo, caso seja necessária.

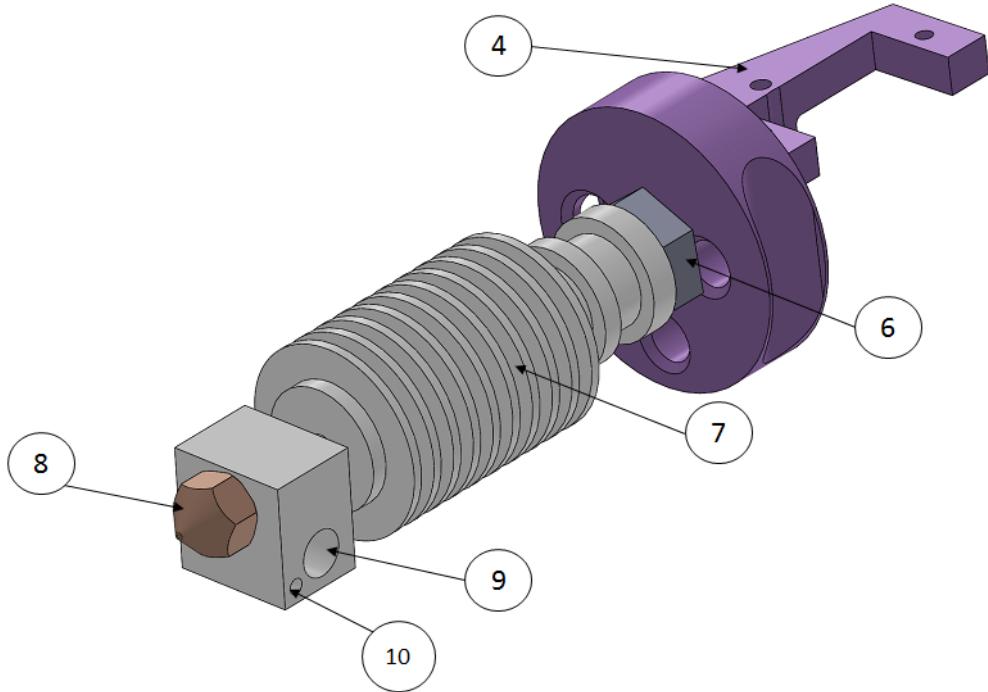


Figura 18 – Desenho de conjunto do sistema de aquecimento da 3D pen

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018

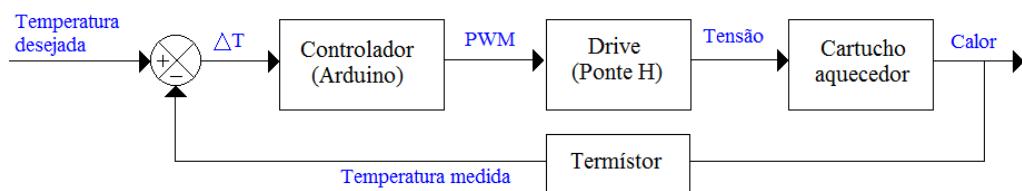


Figura 19 – Malha de controle teórica do sistema de aquecimento

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2017

Com a opção de utilizar o termíster para a leitura de temperatura, faz-se um divisor resistivo, de modo a analisar a variação da resistência do termíster em função da temperatura, e, utilizando o devido equacionamento, determinar a temperatura do conjunto.

## 4.3 Sistemas de controle

O sistema de controle se baseia em alguns pontos cruciais para o funcionamento adequado do conjunto. Dentre eles tem-se:

- Uso do controle apenas numa faixa de temperatura de 10°C para mais ou para menos
- Caso em temperatura inferior à indicada no item anterior, o sistema aplica PWM máximo na ponte H ou seja, *duty cycle* de 100%
- Caso em temperatura superior à indicada no primeiro item, o sistema aplica PWM mínimo na ponte H ou seja, *duty cycle* de 0%
- O controle do sistema de avanço e recuo do filamento só pode ser utilizado na faixa de temperatura em que o controle se aplica.
- O recuo do filamento não tem velocidade controlada pelo usuário

Para que houvesse a possibilidade de se trabalhar o sistema de controle, foi projetado um sistema elétrico de modo a permitir as devidas interações entre usuário e máquina. Um esquemático desse sistema encontra-se no apêndice D

A modelagem do sistema de controle do aquecimento é baseado no modelo da figura 19.

## 4.4 Estrutura

Além de todas as estruturas citadas anteriormente, temos, para garantir a integração e funcionamento adequados, um conjunto de peças que são responsáveis pelo encapsulamento do sistema num formato de *3d pen*. São eles, conforme a figura 21:

11. Guia para ajudar o filamento a alcançar o sistema de avanço
12. Capa protetora para a lateral 1
13. Capa protetora para a lateral 2
14. Capa protetora para o dissipador e o cartucho aquecedor

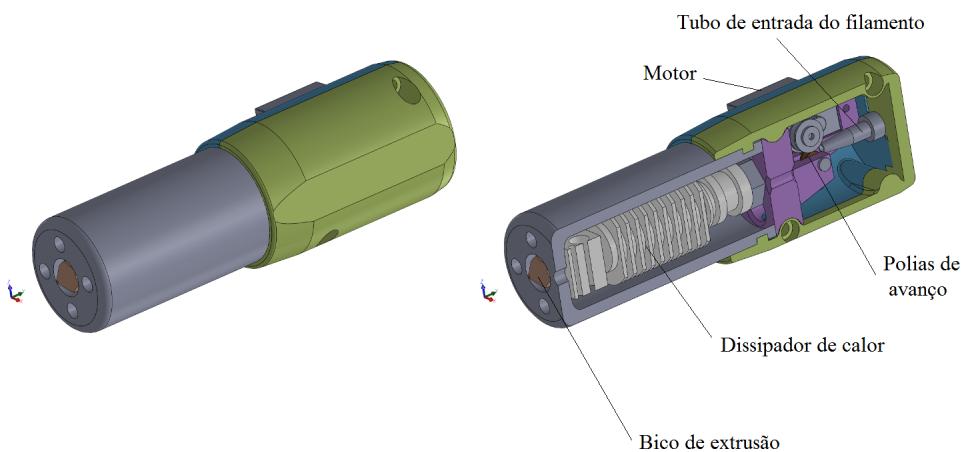


Figura 20 – Vista em corte da estrutura da *3D pen*

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018

## 4.5 Visão geral do sistema

As figuras 20 e 21 mostram a *3d pen* em corte e a vista explodida. Estas mostram as peças e como elas se encaixam dentro da estrutura.

Deve-se comparar as figuras com as suas respectivas peças fabricadas. Para tanto temos imagens das peças a seguir.

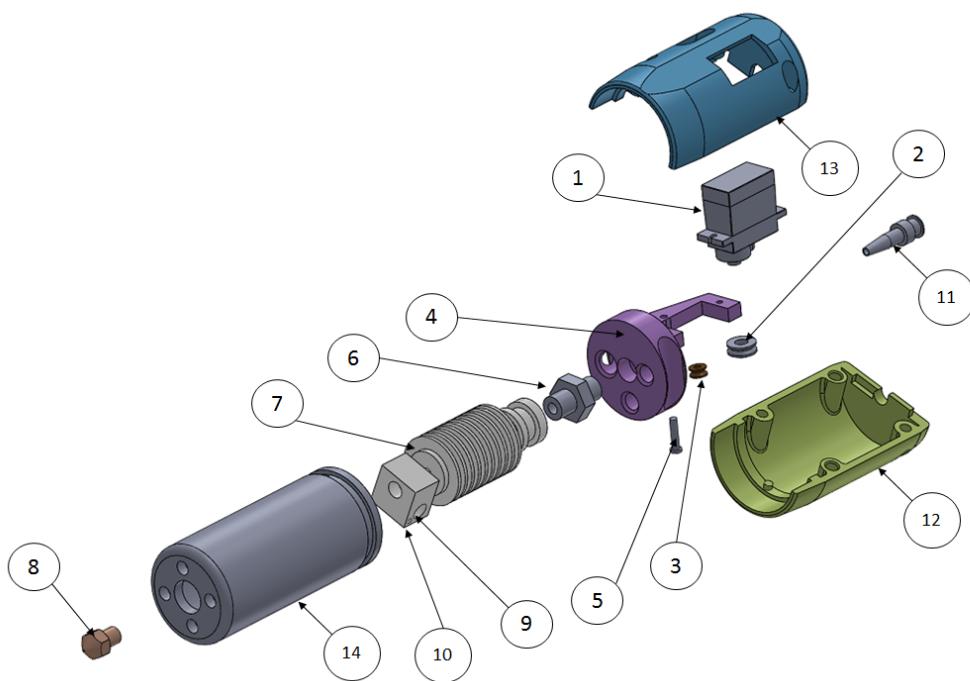
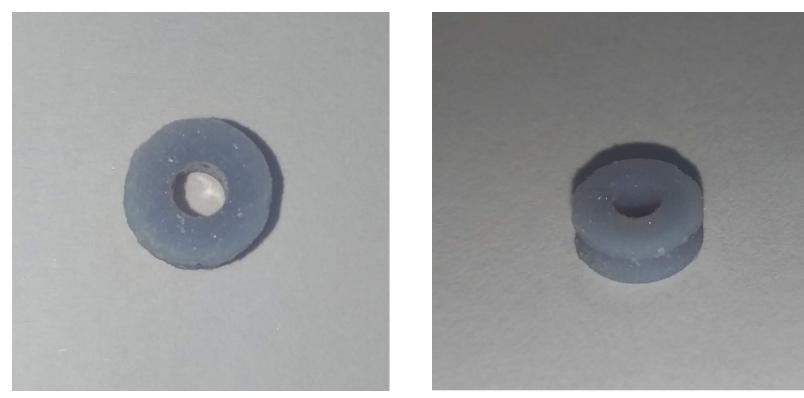


Figura 21 – Vista explodida da 3D pen

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018



(a) Frente

(b) Lateral

Figura 22 – Vistas da polia passiva

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018



(a) Lateral



(b) Ressalto



(c) Furo

Figura 23 – Vistas da polia ativa

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018



(a) Em ângulo



(b) Lateral



(c) Superior

Figura 24 – Vistas da base do sistema de avanço

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018



(a) Interior

(b) Exterior

Figura 25 – Vistas de parte da capa

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018



(a) Interior

(b) Exterior

Figura 26 – Vistas de parte da capa

Fonte: Daniela Moreira Silva, 2018

## 5 Análise dos resultados e Conclusões

Inicialmente a ideia era projetar um sistema totalmente compacto, alimentado pela rede elétrica domiciliar. Porém, as dificuldades de miniaturização dificultam o total acoplamento dos sistemas numa *3D pen*. Sendo assim, o controlador (Arduino) e os *drivers* de alimentação do motor e da resistência de aquecimento foram mantidos fora do corpo da impressora.

Combinado a isso, o projeto mecânico conta com fatores como posicionamento de botões para facilitar o uso da impressora 3D. Ainda, deve-se ressaltar que é essencial que a região em contato com as mãos do usuário não superaqueça.

# Referências

- 3DOODLER Community photos. 2016. Disponível em: <<http://the3doodler.com/stencils/eiffel-tower/>>. Citado na página 9.
- BRANCO, A. L. *Revoluções industriais: Primeira, segunda e terceira revoluções*. 2007. Citado na página 18.
- CASSAIGNAU, A. et al. *The state of 3D printing*. 2016. Citado na página 27.
- CASTRUCCI, P. d. L.; BITTAR, A.; SALES, R. M. *Controle Automático*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 43.
- CHARLES, W. H. *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. 1984. US Patent 6,638,905. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US4575330>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- CORE-BAILLAIS, M. et al. *The State of 3D Printing*. 2017. Citado 6 vezes nas páginas 3, 21, 22, 23, 24 e 25.
- CRUMP, S. *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. Google Patents, 1989. US Patent 5,121,329. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US5121329>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 21.
- GETTING teh most from your 3Doodler Create. [S.l.], 2016. Citado na página 27.
- HUANG, R. et al. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: thecase of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 1559 – 1570, 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615004849>>. Citado na página 19.
- INTRODUCTION to Pulse Width Modulation. 2001. Disponível em: <<https://www.embedded.com/embedded-electronics-blogs/beginner-s-corner/4023833/Introduction-to-Pulse-Width-Modulation>>. Citado na página 43.
- LIX - The Smallest Circular 3D Printing Pen In The World. 2015. Disponível em: <<http://lixpen.com/>>. Citado na página 27.
- MICHALSKI, L.; ECKERSDORF, K.; MCGHEE, J. *Temperature measurement*. [S.l.]: Wiley, 1991. Citado na página 40.
- NETO, P. I. *Estudo da viabilidade técnica e projeto de um mini-cabeçote de extrusão para impressoras tridimensionais portáteis*. mestrado em engenharia mecânica, 2013. Citado na página 21.
- OGATA, K.; MAYA, P. Á.; LEONARDI, F. *Engenharia de controle moderno*. [S.l.]: Prentice Hall, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 45.

PAHL, G.; BEITZ, W.; WALLACE, K. *Engineering Design: A Systematic Approach.* [S.l.]: Design Council, 1977. ISBN 9783540199175. Citado na página 12.

PARKER, R.; KMETZ, K. *3D Printing – A Transformative Opportunity for Print and Manufacturing.* 2014. Disponível em: <[https://webobjects.cdw.com/webobjects/media/pdf/3dprinting\(IDC-report.pdf\)](https://webobjects.cdw.com/webobjects/media/pdf/3dprinting(IDC-report.pdf))>. Citado na página 9.

PÁGINA da 3Doodler. 2013. Disponível em: <<https://the3doodler.com/>>. Citado na página 27.

PÁGINA da Lix Pen. 2016. Disponível em: <<https://lixpen.com/>>. Citado na página 27.

ROZENFELD, H. et al. *Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo.* Editora Saraiva, 2006. ISBN 9788502054462. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=13kSAAAACAAJ>>. Citado 5 vezes nas páginas 3, 12, 14, 28 e 30.

SAHNER, T. *Additive Fabrication.* 2015. Disponível em: <[https://indico.cern.ch/event/383382/attachments/764675/1049011/04\\_Sahner\\_AdditiveManufacturing\\_27032015.pdf](https://indico.cern.ch/event/383382/attachments/764675/1049011/04_Sahner_AdditiveManufacturing_27032015.pdf)>. Citado na página 24.

SIMON. *Northwestern University study confirms 3D printed metal parts help reduce aircraft weight by 7%.* 2015. Disponível em: <<http://www.3ders.org/articles/20150606-northwestern-university-study-confirms-3d-printed-metal-parts-help-reduce-aircraft-weight.html>>. Citado na página 19.

SLOCUM, A. H. *Precision Machine Design.* [S.l.]: Society of Manufacturing Engineers, 1992. (Precision Machine Design). Citado na página 12.

STEINHART, J. S.; HART, S. R. Calibration curves for thermistors. In: ELSEVIER. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts.* [S.l.], 1968. v. 15, n. 4, p. 497–503. Citado na página 40.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. *VDI-Richtlinie 2221: Systematic approach to the development and design of technical systems and products.* Düsseldorf, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 13.

# Apêndices

## APÊNDICE A – Benchmarking

	3Doodler	3Doodler 2.0	scribbler V1	scribbler V2	scribbler V3	3DSimo	Marcas
<b>Diâmetro (ou w x h)</b>	45mm	17.4 x 18.5 mm					15.25 mm
<b>Comprimento</b>	188mm	161mm					164 mm
<b>Peso</b>	130g	50g			67g		
<b>Materiais</b>	ABS, PLA	ABS, PLA, FLEXI	ABS, PLA	ABS, PLA	ABS, PLA	ABS, PLA, PET, HIPS, WOOD, LAYBRICK, BENDLAY, FLEXI, TERMOCHROME	ABS, PLA
<b>Temperatura</b>	190°C a 240°C	160°C a 230°C			160°C a 230°C	130°C a 255°C	até 200°C
<b>Velocidade(s)</b>	Lento ou rápido	Lento ou rápido			6 diferentes	Lento, médio e rápido	Lento ou rápido
<b>Autonomia</b>	Fio	Fio ou bateria	Fio	Fio	Fio	Fio	Fio (tomada ou USB)
<b>Acessórios</b>	Pedal, stand, bicos	Pedal, stand, bicos	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum
<b>Input</b>	110V a 240V	110V a 240V				110V a 240V	
<b>Output</b>	12V, 2A	5V, 1,25A	12V, 3A			12V, 2A	
<b>Diâmetro do filamento usado</b>	3mm	3mm	1.75mm	1.75mm	1.75mm	1.75mm	1.75mm
<b>Diâmetro do bico de extrusão</b>	0.7mm	0.7mm	0.7mm	0.7mm	0.7mm	0.7mm	0.5mm
<b>Custo</b>	US\$ 90	US\$ 99	US\$ 99	US\$ 119	US\$ 129	US\$ 100	US\$ 140

Tabela 8 – Comparaçao de características de diferentes modelos de 3d pens

## APÊNDICE B – Desenho de componentes do sistema de aquecimento do filamento



# APÊNDICE C – Desenhos de montagem e fabricação

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

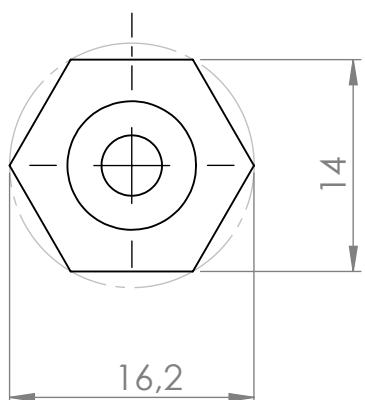
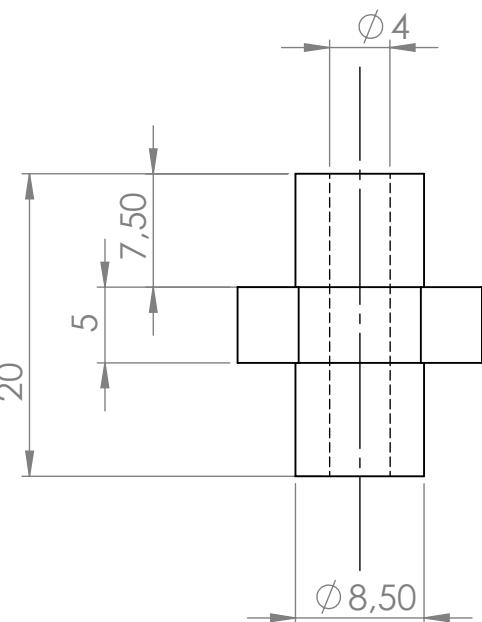
C

C

B

B

SE NÃO ESPECIFICADO:  
 DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
 ACABAM, SUPERFÍCIE:  
 TOLERÂNCIAS:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:



A4  
conexao\_base\_hotend

MATERIAL: DES. Nº

PESO:

ESCALA: 2:1

FOLHA 1 DE 1

4

3

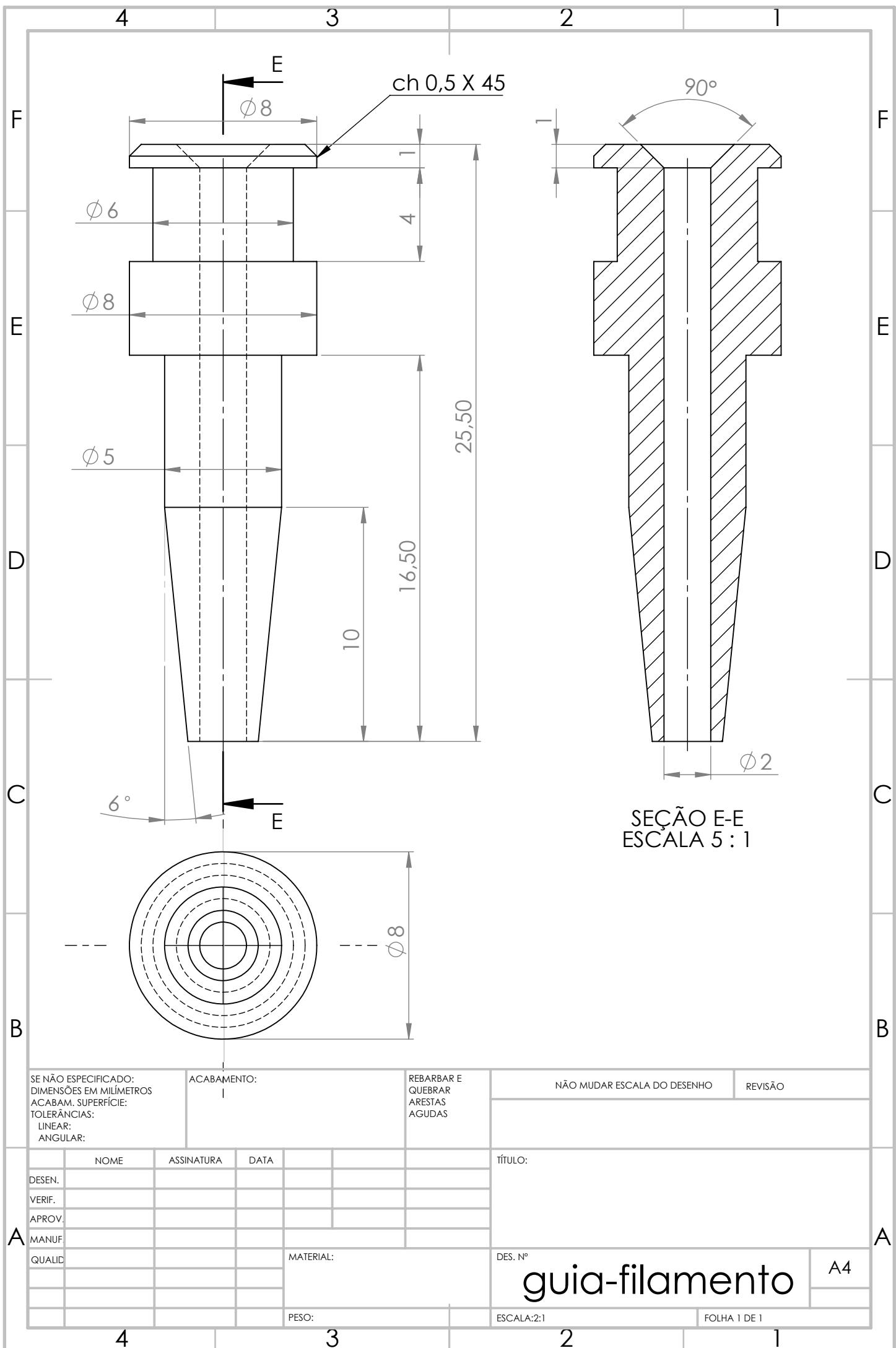
2

1

A

A

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DESEN.					TÍTULO:
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUALID.					



4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

SE NÃO ESPECIFICADO:  
 DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
 ACABAM, SUPERFÍCIE:  
 TOLERÂNCIAS:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E  
 QUEBRAR  
 ARESTAS  
 AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

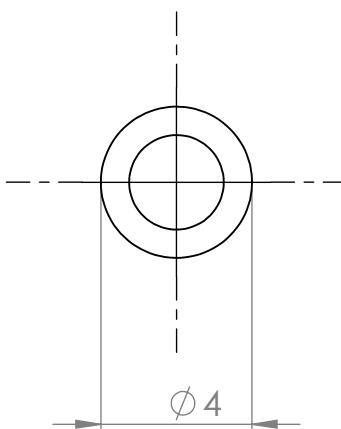
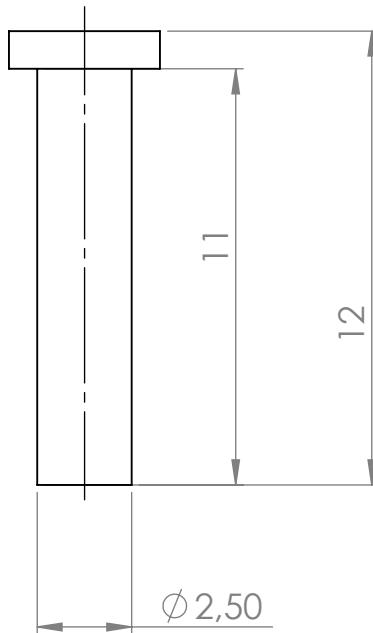
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:
VERIF.						
APROV.						
MANUF.						
QUALID.				MATERIAL:	DES. Nº	eixo2maior
				PESO:	ESCALA: 5:1	A4
						FOLHA 1 DE 1

4

3

2

1



4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

SE NÃO ESPECIFICADO:  
 DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
 ACABAM, SUPERFÍCIE:  
 TOLERÂNCIAS:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR  
E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

DESEN.

NOME

ASSINATURA

DATA

TÍTULO:

VERIF.

APROV.

MANUF.

QUALID.

MATERIAL:

DES. Nº

nova capa - D

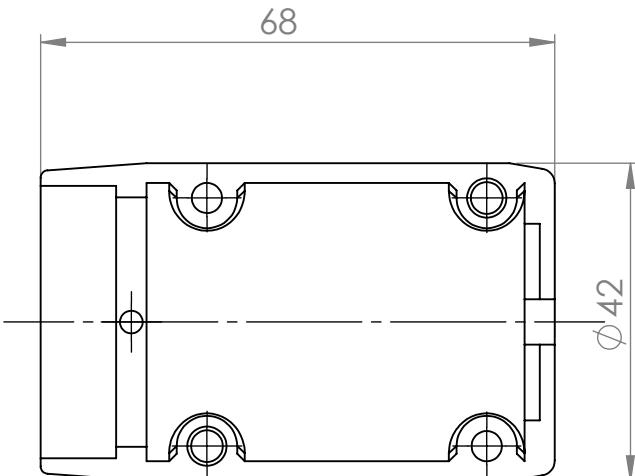
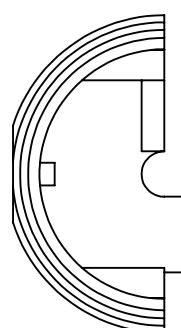
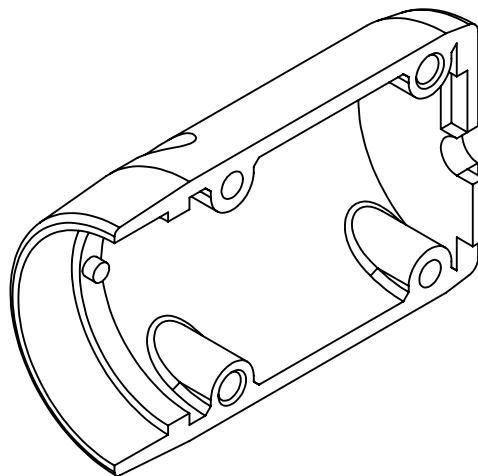
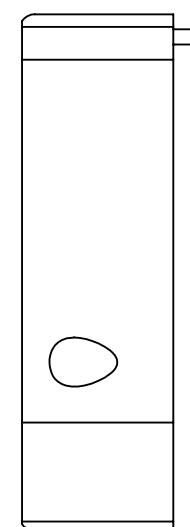
A4

4

3

2

1



PESO:

ESCALA: 1:2

FOLHA 1 DE 1

4

3

2

1

F

E

D

C

B

A

F

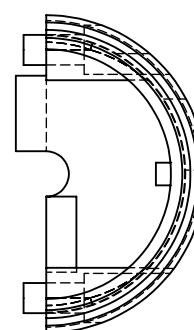
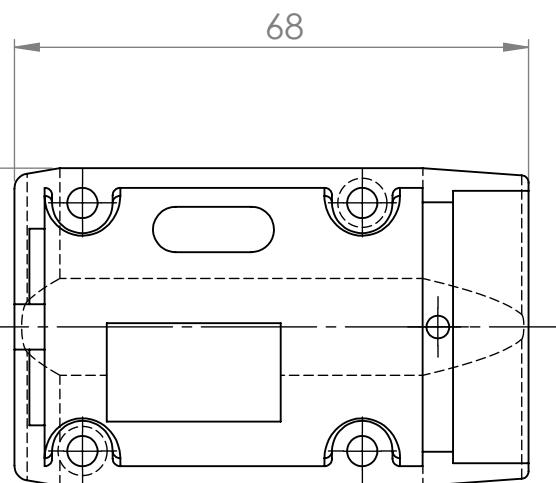
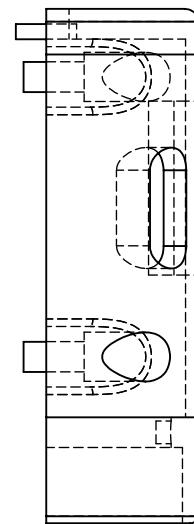
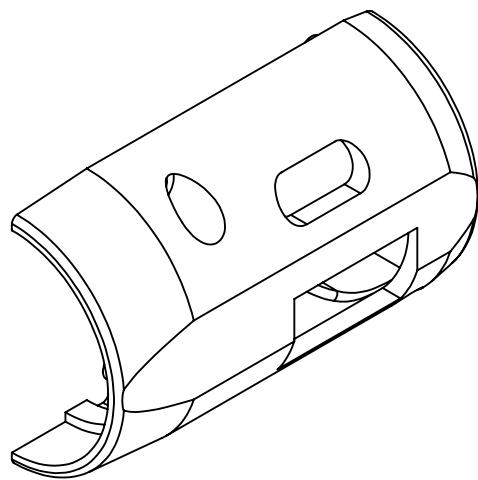
E

D

C

B

A



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAMENTO:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

DESEN.

NOME

ASSINATURA

DATA

TÍTULO:

VERIF.

APROV.

MANUF.

QUALID.

MATERIAL:

DES. Nº

nova capa - E

A4

4

3

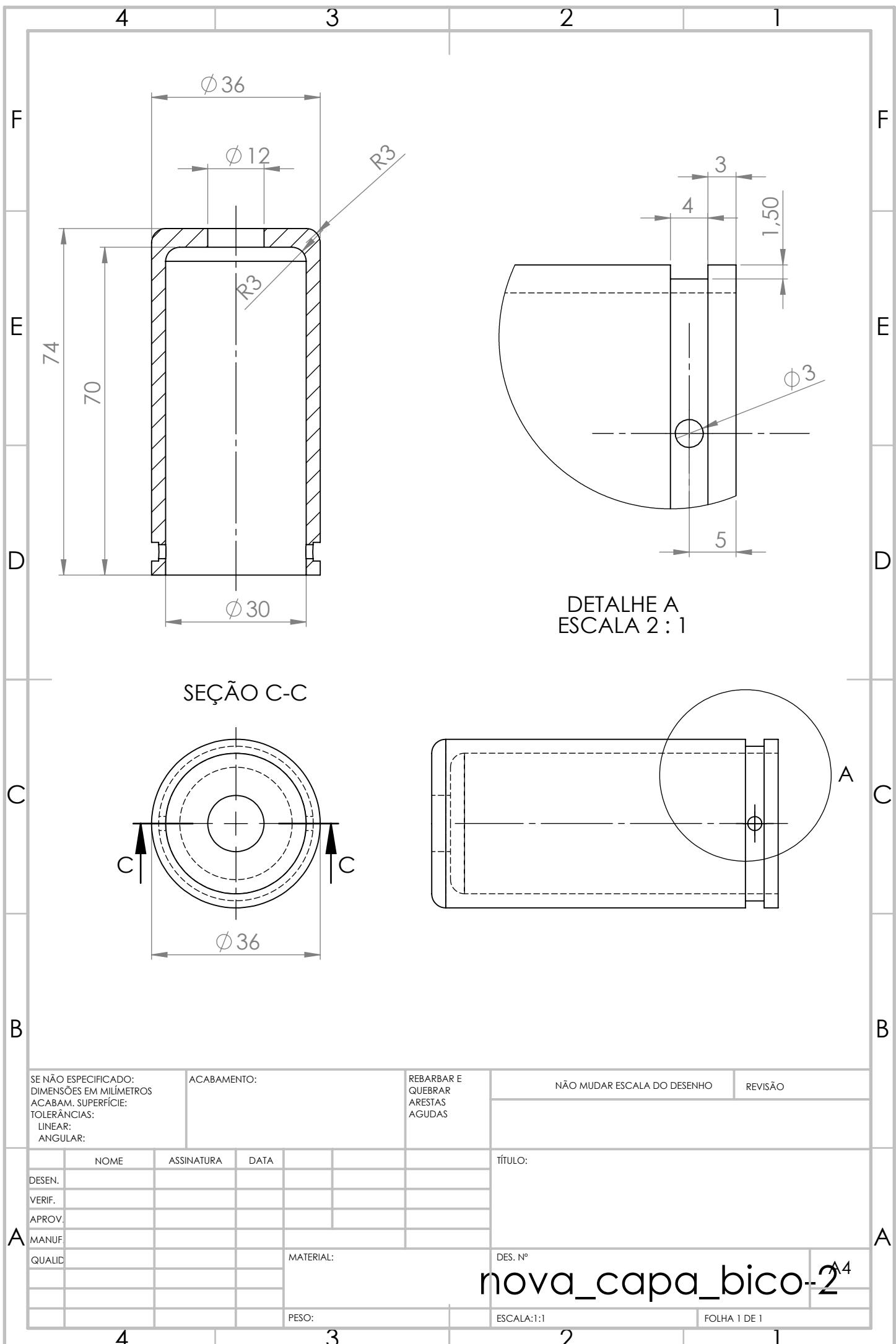
2

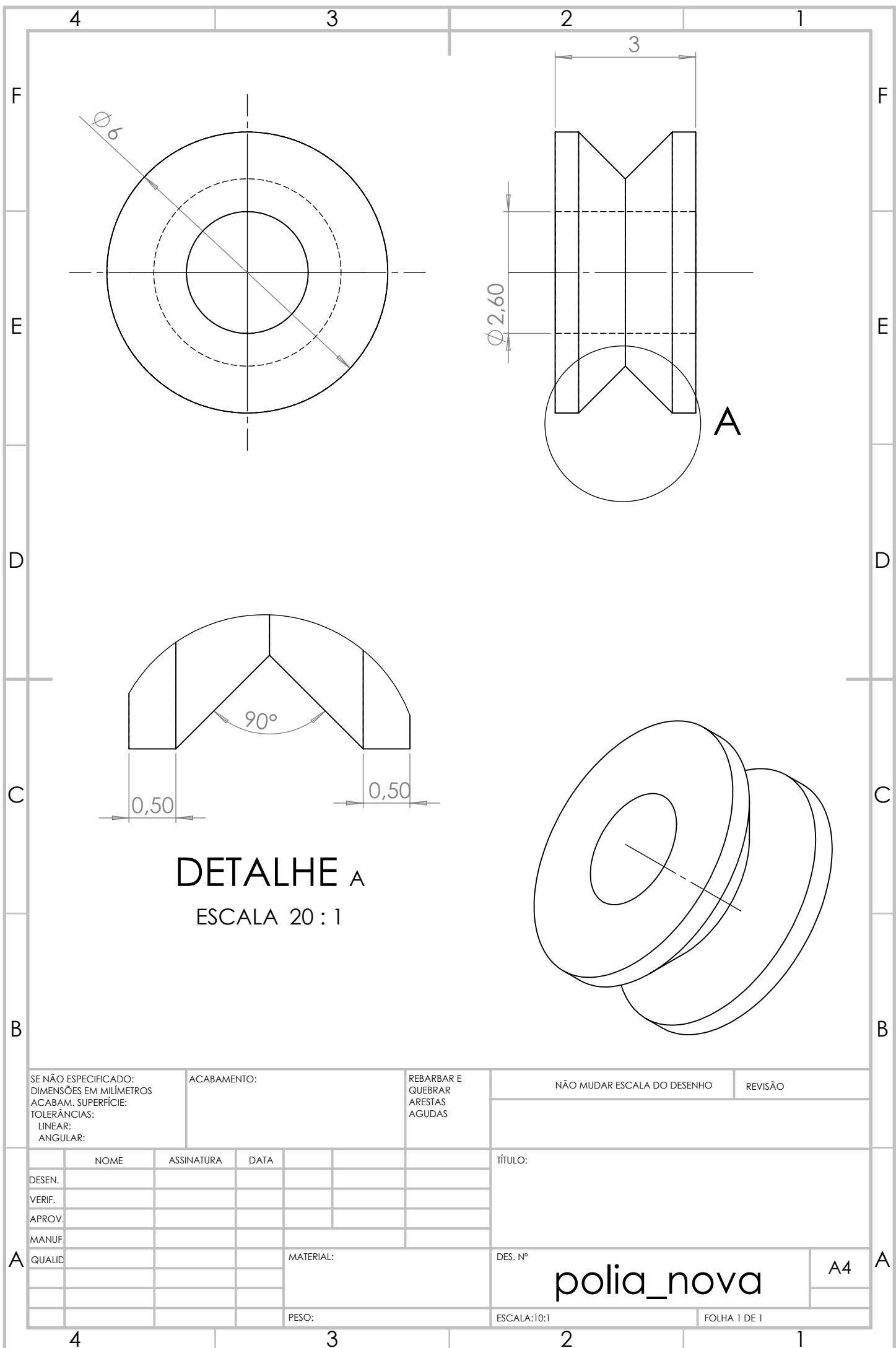
1

PESO:

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1





4

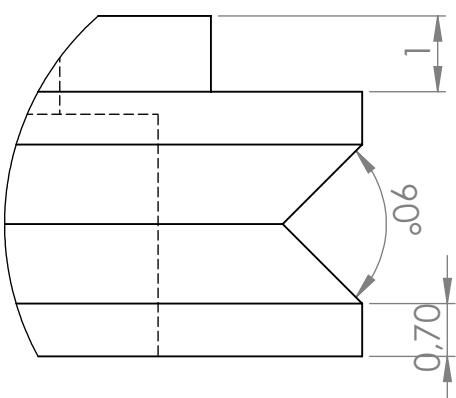
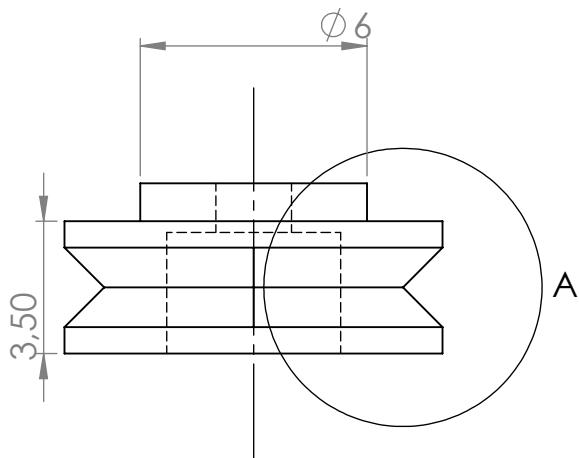
3

2

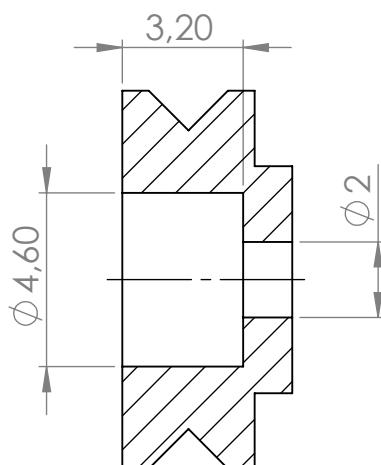
1

F

F



DETALHE A  
ESCALA 10 : 1



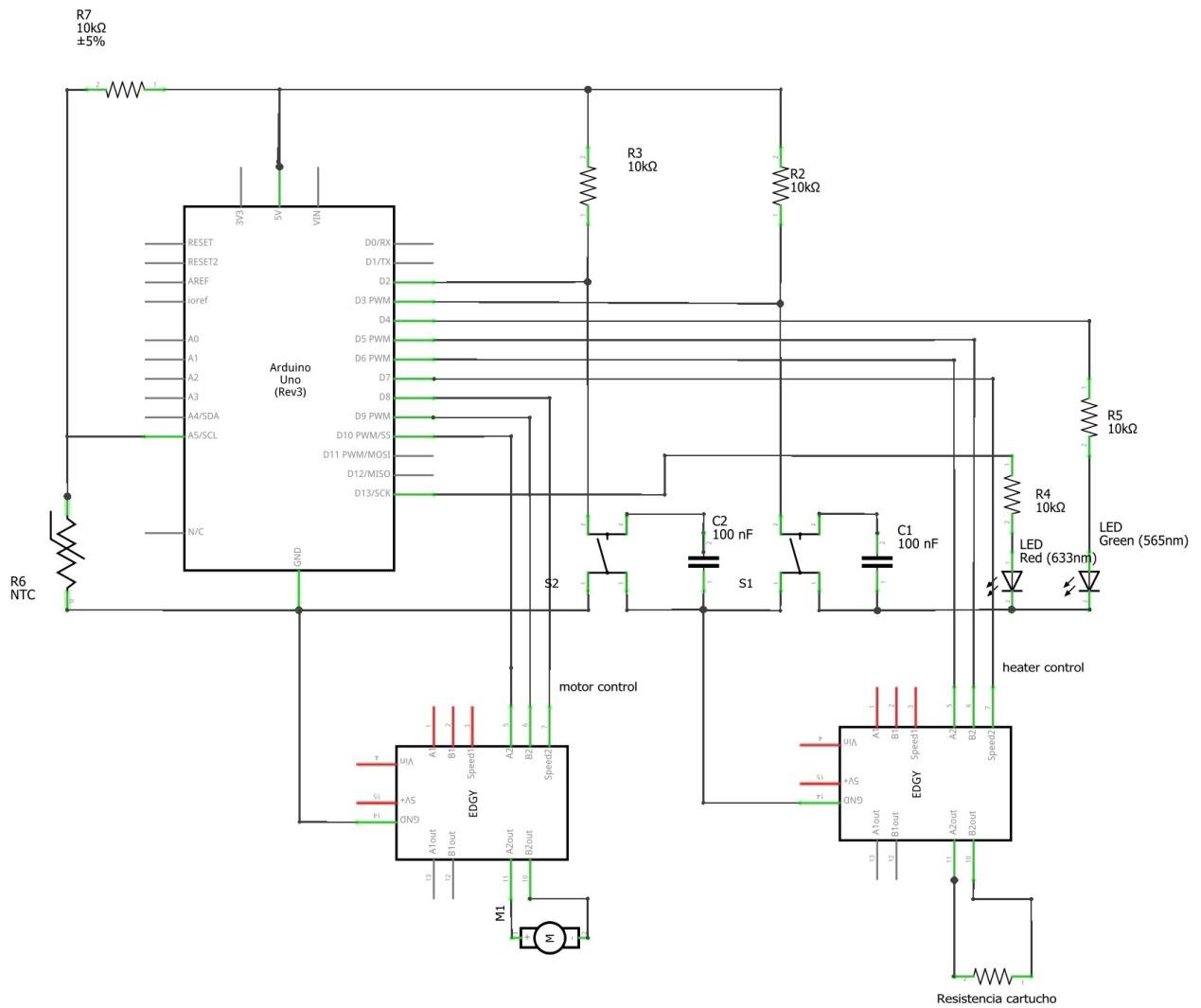
SEÇÃO B-B

B

B

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:			REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
A	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:	
	DESEN.						
	VERIF.						
	APROV.						
	MANUF.						
	QUALID.				MATERIAL:	DES. Nº	poliat2
				PESO:	ESCALA:5:1	FOLHA 1 DE 1	
4	3	2	1				

# APÊNDICE D – Esquema elétrico do sistema



## APÊNDICE E – Código do Arduino

```
//Usados para controle da velocidade
#define MOTORPIN1 9
#define MOTORPIN2 10 //Pinos 9 e 10 – sinais de input para o motor
#define ENMOTOR 8 //Enable

//Usados para o controle do aquecimento
#define PWMAQUEC 6 //Pino 6 – sinal de input para o cartucho
#define ENAQUEC 7 //Enable

//Pino conectado ao potenciometro
#define POTPIN A0

// Pino onde o Termistor esta conectado
#define PINOTERMISTOR A5

//Pino do led interrupcao botao acionado
#define PINOLED 13

//Pino do led verde – verificacao de pronto para uso
#define PINOLEDREADY 4

// Valor do termistor na temperatura nominal
#define TERMISTORNOMINAL 85506
// Temp. nominal descrita no Manual
#define TEMPERATURENOMINAL 25
// Numero de amostragens para determinar a temperatura
#define NUMAMOSTRAS 20
// Beta do nosso Termistor
#define BCOEFFICIENT 3970.78 //valor aproximado tabela
// valor do resistor em serie
#define SERIESRESISTOR 10000

//usados para o avanco
int a;
int valorpot;
```

```
float motorvel = 0;

//Usados pra temperatura
int amostra[NUMAMOSTRAS];
int i;

//Usados pro controle do botao
volatile int numInterruptav = 0;
volatile int numInterruptret = 0;

volatile int flagbotaoA = 0; //botao de avanco
volatile int flagbotaoR = 0; //botao de retorno

int avanco = 0;// Interrupt.0 encontra-se no pino digital 2
int recuo = 1;// Interrupt.1 encontra-se no pino digital 3

void setup(void) {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(PINOTERMISTOR, INPUT);
    pinMode(PINOLED, OUTPUT);
    pinMode(MOTORPIN1, OUTPUT);
    pinMode(MOTORPIN2, OUTPUT);
    pinMode(POTPIN, INPUT);
    pinMode(ENAQUEC, OUTPUT);
    pinMode(PWMAQUEC, OUTPUT);
    pinMode(PINOLEDREADY, OUTPUT);
    attachInterrupt(avanco, botao_avanco, RISING);
    // attachInterrupt(recuo, funcaobotaor, RISING);
    desliga();
}

void loop(void) {
    float media, erro=0;
    float setPoint=180;// valor esperado de temperatura

    for (i=0; i< NUMAMOSTRAS; i++) {
        amostra[i] = analogRead(PINOTERMISTOR);
        delay(20);
```

```
}

media = 0;
for ( i=0; i< NUMAMOSTRAS; i++) {
    media += amostra [ i ];
}
media /= NUMAMOSTRAS;

// Converte o valor da tensao em resistencia

media = 1023 / media - 1;
media = SERIESRESISTOR / media;
// Serial.print (media);
// Serial.print ("°");

//Faz o calculo pela formula do Fator Beta
float temperatura;
temperatura = media / TERMISTORNOMINAL;      // (R/R0)
temperatura = log(temperatura); // ln(R/R0)
temperatura /= BCOEFFICIENT;                  // 1/B * ln(R/R0)
temperatura += 1.0 / (TEMPERATURENOMINAL + 273.15); // + (1/T0)
temperatura = 1.0 / temperatura;                // Inverte o valor
temperatura -= 273.15;                         // Converte para Celsius

Serial.print("Temperatura:°");
Serial.println(temperatura);

if(temperatura<25){ //Abaixo do valor
    digitalWrite(ENAQUEC, LOW);
    analogWrite(PWMAQUEC, 255);
    digitalWrite(ENAQUEC, HIGH);
    Serial.println("Aquecendo");
    if(flagbotaoA==1){
        flagbotaoA=0;
    }

    digitalWrite(PINOLEDREADY,LOW);
}

if(temperatura>=25 &&temperatura<=50){ //Valor certo
    digitalWrite(ENAQUEC, LOW);

/*

```

```
* Aqui fica a função para avaliação do controle
*/
int pwm= controloutput(temperatura, setPoint);
analogWrite(PWMAQUEC, pwm); //Precisa trocar
digitalWrite(ENAQUEC, HIGH);

//debugs
Serial.println("Ta na faixa certa");
digitalWrite(PINOLEDREADY,HIGH);

if(flagbotaoA==1){
    Serial.println ("Funciona vel");
    valorpot = analogRead(POTPIN);
    Serial.print("Valor lido do potenciometro:");
    Serial.println(valorpot);

    if(valorpot>100){
        motorvel= map(valorpot, 100,1023, 0, 255);
        sentido1(motorvel);
    } else{
        desliga();
    }
    Serial.print("velocidade:");
    Serial.println(motorvel);
}

if(flagbotaoR==1&&flagbotaoA==0){
    sentido2(80); //velocidade de recuo do filamento e' constante
}

if(temperatura>50){ //Superaquecimento
    digitalWrite(ENAQUEC, LOW);
    Serial.println("Quente demais");
}

delay(100);
}
```

```
//funcoes de movimento de avanco e retorno
void sentido1( int taxa){
    digitalWrite(ENMOTOR, LOW);
    analogWrite(MOTORPIN1, taxa);
    digitalWrite(MOTORPIN2, LOW);
    digitalWrite(ENMOTOR, HIGH);
}

void sentido2(int taxa){
    digitalWrite(ENMOTOR, LOW);
    digitalWrite(MOTORPIN1, LOW);
    analogWrite(MOTORPIN2, taxa);
    digitalWrite(ENMOTOR, HIGH);
}

void desliga(){ //Desliga o motor

    digitalWrite(ENMOTOR, LOW);
    digitalWrite(MOTORPIN1, LOW);
    digitalWrite(MOTORPIN2, LOW);
    digitalWrite(ENMOTOR, HIGH);
}

// Funcao de interrupcao do botao
void botao_avanco(){ //interrupcao do avanco
    Serial.print("Interrupcao_numero_");
    Serial.println(numInterruptav);
    if(digitalRead(PINOLED)==HIGH){
        digitalWrite(PINOLED,LOW);
        flagbotaoA=1;
    }else if (digitalRead(PINOLED)==LOW){
        digitalWrite(PINOLED,HIGH);
        flagbotaoA=0;
    }
    numInterruptav++;
}
```

```
int controloutput( int setPoint , int temperatura){  
    int pwm=0;  
    pwm=-5*(temperatura-setPoint );  
  
    return(pwm);  
}  
  
void funcaobotaor(){  
    Serial.print("Interrupcao de retorno ");  
    Serial.println(numInterruptr);  
    if(flagbotaor==0){  
        flagbotaor=1;  
    } else{  
        flagbotaor=0;  
    }  
    numInterruptr++;  
}
```

## **Anexos**

# ANEXO A – Patentes sobre SLA

## **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**

Grant US4575330A Charles W. Hull Uvp, Inc.

Priority 1984-08-08 • Filing 1984-08-08 • Grant 1986-03-11 • Publication 1986-03-11

A system for generating three-dimensional objects by creating a cross-sectional pattern of the object to be formed at a selected surface of a fluid medium capable of altering its physical state in response to appropriate synergistic stimulation by impinging radiation, particle bombardment or chemical reaction, successive adjacent laminae, representing corresponding successive adjacent cross-sections of the object, being automatically formed and integrated together to provide a step-wise laminar buildup of the desired object, whereby a three-dimensional object is formed and drawn from a substantially planar surface of the fluid medium during the forming process.

## **Apparatus and method for making three-dimensional articles using bursts of droplets**

Grant US5555176A Herbert E. Menhennett Bpm Technology, Inc.

Priority 1994-10-19 • Filing 1994-10-19 • Grant 1996-09-10 • Publication 1996-09-10

An apparatus includes a processor for controlling a build material dispenser and a dispenser positioner to construct a three-dimensional article in successive layers based upon article defining data, and wherein the processor operates the dispenser to dispense a series of bursts of build material at a series of respective target positions as the dispenser is advanced along a predetermined path of travel. Each burst is defined by a plurality of droplets dispensed in relatively rapid succession so that the build material thereof combines at a respective target position. The build material dispenser is preferably a jet including a piezoelectric actuator for ejecting a droplet of build material responsive to a corresponding firing signal. Accordingly, the processor generates a predetermined number of firing signals for the piezoelectric actuator corresponding to a desired number of droplets in each burst. Method aspects of the invention are also disclosed.

**Method of combining metal and ceramic inserts into stereolithography components**

Grant US5705117A Kurt Francis O'Connor Delco Electronics Corporaiton

Priority 1996-03-01 • Filing 1996-03-01 • Grant 1998-01-06 • Publication 1998-01-06

A stereolithography process for developing a prototype part in which inserts of a non-photopolymer material are included within the resulting part so as to develop a functioning prototype part. In order to allow the inserts to be placed within the developing prototype part, a series of STL files are defined for forming the prototype part in individual sections. A non-photopolymer insert is manually positioned on one section of the developing part each time a section is formed. In order to align one section to a subsequent section, alignment structures are developed by the STL files. In order to prevent the STL files from developing supporting structures in the cavities intended for the inserts, a supporting structure file is defined for a parent design, and then later combined with the STL files.

**Forming structures from CAD solid models**

Grant US6811744B2 David M. Keicher Optomec Design Company

Priority 1999-07-07 • Filing 2002-04-22 • Grant 2004-11-02 • Publication 2004-11-02

A method and apparatus for embedding features and controlling material composition in a three-dimensional structure is disclosed. The invention enables the control of material characteristics, within a structure made from a plurality of materials, directly from computer rendering of solid models of the components. The method uses stereolithography and solid model computer file formats to control a multi-axis head in a directed material deposition process.

## ANEXO B – Patentes sobre impressão 3D

# ANEXO C – Patentes de 3D pens

## **Hand-held three-dimensional drawing device**

Application US20180009161A1 Daniel Cowen Wobbleworks, Inc.

Priority 2016-07-06 • Filing 2016-07-06 • Publication 2018-01-11

A hand-held three-dimensional drawing device can include an anti-rotation mechanism that can restrict rotation of a filament moving through the device. The anti-rotation mechanism can have a filament-engaging component in a passage of the anti-rotation mechanism and positioned to engage and restrict rotation a filament extending through the passage. The drawing device can also include a moveable member to control an operation of the drawing device. The moveable member can include a rotatable control mechanism including a portion of an outer profile of a housing of the device. Finally, the drawing device can also include a cover member comprising a portion of an outer profile of housing of the device and positioned adjacent to an actuator to control an operation of the device.

## **Hand-held three-dimensional drawing device**

Grant US9102098B2 Peter Dilworth Wobble Works LLC

Priority 2012-12-05 • Filing 2013-03-14 • Publication 2014-06-05

A three-dimensional (3D) drawing device having a housing configured for manipulation by a user's hand and to accept a feed stock that is, in certain embodiments, a strand of thermoplastic. The drawing device has a nozzle assembly with an exit nozzle and a motor connected to a gear train that engages the strand of thermoplastic feed stock such that rotation of the motor causes the feed stock to be extruded out of the exit nozzle to form a three-dimensional object.

## **3D printing pen**

Application EP2957420A1 Anton Suvorov Lix Pen Ltd.

Priority 2014-06-19 • Filing 2014-06-19 • Publication 2015-12-23

A three-dimensional printing pen comprising a barrel open on a first end and comprising an opening for receiving a melt-substrate on a second end, opposite to the first end, a nozzle configured to receive and melt said melt-substrate and arranged to

be connected to the first open end of the barrel, a channel inside the barrel comprising a first opening adjacent and aligned with the opening in the barrel for receiving said melt-substrate and a second opening, opposite to said first opening, adjacent to the nozzle, and a transport mechanism comprising a rotatable transport member which is, in use, in contact with the melt-substrate for moving the melt-substrate through towards the nozzle.