

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIORDON VASCONCELOS DIAS DE SOUZA
FERNANDO SULZBACH HUPPES

**PROJETO DE PROTÓTIPO DE EXTRUSORA PARA PRODUÇÃO DE
FILAMENTO DE IMPRESSORA 3D**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc2 - N^o de Inscrição - 62)

CURITIBA

2017

DIORDON VASCONCELOS DIAS DE SOUZA

FERNANDO SULZBACH HUPPES

**PROJETO DE PROTÓTIPO DE EXTRUSORA PARA PRODUÇÃO DE
FILAMENTO DE IMPRESSORA 3D**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Doutor Silvestre Labiak Junior

CURITIBA

2017

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa "Projeto de protótipo de extrusora para produção de filamento de impressora 3D", realizado pelos alunos Diordon Vasconcelos Dias de Souza e Fernando Sulzbach Huppes, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof. Doutor Silvestre Labiak Junior
UTFPR - DAMEC

Curitiba, 12 de Junho de 2017.

TERMO DE APROVAÇÃO¹

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Projeto de protótipo de extrusora para produção de filamento de impressora 3D", realizado pelos alunos Diordon Vasconcelos Dias de Souza e Fernando Sulzbach Hupples, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Doutor Silvestre Labiak Junior
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Doutor José Aguiomar Foggiatto
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Doutor Celso Salamon
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 28 de Junho de 2017.

¹ O Termo de Aprovação assinado encontra-se em arquivo da coordenação.

RESUMO

SOUZA, Diordon; HUPPES, Fernando. Projeto de protótipo de extrusora para produção de filamento de impressora 3D. 2017. 103f. Monografia (Graduação de Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2017.

Este trabalho apresenta uma abordagem teórica e construtiva de uma máquina extrusora empregada para produção de filamento de impressora 3D bem como o comportamento do material plástico ABS utilizado no processo. Com base nas informações encontradas nas literaturas e através do benchmarking foi projetado, construído e testado um protótipo de extrusora de bancada. A extrusora isoladamente não é capaz de manter o tamanho do diâmetro constante em processo, sendo necessário o desenvolvimento de sistemas auxiliares de medição e controle, os quais poderão ser desenvolvidos em trabalhos futuros. Contudo é possível fabricar uma extrusora com componentes, os quais são encontrados no mercado, reduzindo tempo e custos de manufatura, de maneira a incentivar a impressão 3D.

Palavras-chave: extrusora de bancada, filamento, impressão 3D, ABS e produto mínimo viável.

ABSTRACT

SOUZA, Diordon; HUPPES, Fernando. Projeto de protótipo de extrusora para produção de filamento de impressora 3D. 2017. 103f. Monografia (Graduação de Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2017.

This work presents a theoretical and constructional approach of an extruder machine used for the production of 3D printing filament, as well as the plastic behaviour ABS applied to the process. Based upon the technical information available on the literature and through the benchmarking, a desktop extruder prototype was designed, built and tested. The extruder alone is not able to maintain the diameter size constant in process, which requires the development of auxiliary measurement and control systems, that can be develop in future works. Although it is possible to manufacture an extruder with components, which are found in the market, reducing time and manufacture costs, in order to foster the 3D printing.

Keywords: desktop extruder, filament, 3D printing, ABS and minimum viable product.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Ilustração conceitual de uma impressora 3D.	17
Figura 2. Ilustração do cabeçote de aplicação de material, filamento e carretel.	18
Figura 3. Hype cycle para diversos segmentos de aplicação de impressão 3D.....	19
Figura 4. Progressão de preços da matéria virgem ABS na Alemanha.	22
Figura 5. Preços do Filamento no Brasil.	23
Figura 6. Ilustração de uma extrusora e seus componentes.	26
Figura 7. Ilustração do perfil de temperatura média em um corte longitudinal da extrusora.	27
Figura 8. Ilustração de análise de volume de controle.	28
Figura 9. Entalpia de materiais amorfos, inclusive ABS.	29
Figura 10. Ilustração do perfil de temperatura no canhão para ABS.....	30
Figura 11. Ilustração da divisão de regiões do fuso.	31
Figura 12. Ilustração da construção geométrica de um fuso.	32
Figura 13. Ilustração do processo de plastificação.....	32
Figura 14. Ilustração da construção de uma resistência elétrica.....	34
Figura 15. Ilustração da construção geométrica de um fuso.	35
Figura 16. Experimento para avaliação de (a) Potência total (b) Vazão mássica (c) Consumo específico de energia, para o mesmo fuso com 3 diferentes materiais e velocidades de rotação para a mesma temperatura.	36
Figura 17. Ilustração da placa de quebra e localização na máquina.....	37
Figura 18. Ilustração do comportamento do material plástico na saída do molde.....	37
Figura 19. Descrição simplificada de um sistema de controle.....	38
Figura 20. Fluxograma de um controle em malha fechada.	39
Figura 21. Ilustração do diagrama de um controle proporcional-integral-derivativo. .	40

Figura 22. Curva de resposta ao degrau unitário para um controlador proporcional-integral-derivativo.....	40
Figura 23. Ilustração do percentual de umidade no material ABS em função da umidade relativa do ar.....	43
Figura 24. Ilustração dos compostos químicos que formam o ABS, (a) Acrilonitrila, (b) 1,3 – Butadieno (c) Estireno.....	43
Figura 25. Influência dos monômeros nas propriedades do ABS.....	44
Figura 26. Tensão x deformação de uma peça de ABS injetada.	44
Figura 27. Modelo teórico para viscosidade em função da taxa de cisalhamento.....	45
Figura 28. Experimento para avaliação de energia de impacto para material ABS com material reciclado a diferentes porcentagens.....	47
Figura 29. Fluxograma metodológico para o desenvolvimento.	53
Figura 30. Organização da metodologia Scrum.	54
Figura 31. Perfil transversal do fuso, plástico, canhão, resistência elétrica, isolante e ambiente.	60
Figura 32. Ilustração do perfil e resistências de condução dos materiais.	60
Figura 33. Perfil de temperatura radial do canhão com isolamento.	62
Figura 34. Diagrama elétrico da extrusora.	64
Figura 35. Diagrama do controle PID de temperatura da extrusora.....	65
Figura 36. Circuito Eletrônico do controle de velocidade do Motor CC.....	67
Figura 37. Controlador PWM para o motor CC.....	68
Figura 38. Estrutura de protótipo em corte.....	72
Figura 39. Modelo desenvolvido em Software CAD.....	73
Figura 40. Gabinete.....	73
Figura 41. Suporte LD, LE e PWM respectivamente.....	74
Figura 42. Funil de alimentação e presilha de fixação respectivamente.	74
Figura 43. Canhão.....	74

Figura 44. Relé de estado sólido e aleta.	75
Figura 45. Fuso.	75
Figura 46. Acoplamento geral.	75
Figura 47. Acoplamento Fuso-Motor e encosto para rolamento, respectivamente. ..	76
Figura 48. Montagem do Acoplamento geral, Fuso-motor e encosto para rolamento.	76
Figura 49. Presilha para termopar.....	76
Figura 50. Protótipo montado.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Preços de diversas resinas recicladas no mercado brasileiro.	23
Tabela 2. Diâmetros dos fusos e relação de L/D por diferentes autores.....	27
Tabela 3. Diâmetros dos fusos e relação de L/D por diferentes autores.....	27
Tabela 4. Ilustração de valores por quilograma para materiais, inclusive ABS.	42
Tabela 5. Catálogo de rolamentos axiais de esferas simples	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Benchmarking de máquinas extrusoras	50
Quadro 2. Relação de atividades a serem desenvolvidas pela metodologia Scrum para execução do projeto da extrusora.	55

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

A – Área

3D – Tridimensional

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

a(t) – Sinal de controle enviado pelo controlador

CAD – Computer aided design – Desenho assistido por computador

C – Capacitância em Faraday

C - Carga Dinâmica Básica

Cs – Coeficiente de Segurança

c(t) – Sinal de saída da planta

D – Diâmetro do fuso [mm]

D – Diâmetro interno do Vaso/Tubo

DC - Corrente Contínua

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ – Variação da Energia em função do tempo [Ws^{-1}]

$\frac{de(t)}{dt}$ – Derivada do erro no tempo

e(t) – Erro como função do tempo

f – Frequência em Hertz

Fa – Força Axial

Ra – Resistência em Ohm

Rb – Resistência em Ohm

FDM – Fused Deposition Modeling – Modelagem por fusão e deposição

g – Aceleração gravitacional [ms^{-2}]

h_{ambiente} – Entalpia a temperatura ambiente [kJkg^{-1}]

h_{natural} – Coeficiente de convecção natural médio [$\text{Wm}^{-2}\text{k}^{-1}$]

$h_{\text{plastificação}}$ – Entalpia a temperatura de plastificação [kJkg^{-1}]

$\int e(t)dt$ – Integral do erro no tempo

I – Controle Integral

$k_{\text{aço carbono}}$ – Coeficiente de condutividade térmica do aço carbono [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

K_d – Ganho derivativo

K_i – Ganho integral

$k_{\text{lã de rocha}}$ – Coeficiente de condutividade térmica da lã de rocha [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

K_p – Ganho proporcional

Kr – Fator de Confiabilidade

L – Comprimento do canhão [mm]

L/D – Quociente entre o comprimento do canhão e diâmetro do fuso [mm/mm]

LF – Largura do flanco [mm]

L_p – Vida em Fadiga expressa em milhões de revoluções

$L_{resistência}$ – Comprimento da resistência elétrica [m]

$\dot{m}_{ambiente}; \dot{m}_{plastificação}; \dot{m}$ – Vazão mássica [kgs^{-1}]

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor - Transistor de efeito de campo

MPa – Mega Pascal

η_0 – Viscosidade para pequenas taxas de cisalhamento [Pas]

η_∞ – Viscosidade para grandes taxas de cisalhamento [Pas]

$\eta(T; p; \dot{\gamma})$ – Viscosidade como função da temperatura, pressão e taxa de cisalhamento [Pas]

P – Passo da rosca[mm]

P – Controle Proporcional

P – Carga Axial Constante

p – Pressão Interna do Vaso

P_1 – Profundidade da região de alimentação [mm]

P_2 – Profundidade da região de homogeneização [mm]

PD – Controle proporcional e derivativo

PI – Controle proporcional e integral

PID – Controle proporcional, integral e derivativo

PLA – Poliláctico

PWM – Pulse width modulation - Modulação por largura de pulso

\dot{Q}_{perdido} – Taxa de calor perdido para o ambiente [W]

$q_{\text{plastificação}}$ – Taxa de calor entrando no volume de controle [W]

$\dot{Q}_{\text{vc}} - \dot{Q}_{\text{aquecimento}}$ – Taxa de calor entrando no volume de controle [W]

$\dot{Q}_{\text{resfriamento}}$ – Taxa de calor devido a resfriamento forçado do canhão [W]

r_{externo} – Raio externo da região em análise [m]

r_{interno} – Raio interno da região em análise [m]

rpm – Rotação por minuto [min^{-1}]

$r(t)$ - Sinal de entrada no controlador

$R_{t, \text{cond}}$ – Resistência de condução do material em análise [KW^{-1}]

$R_{t, \text{conv}}$ – Resistência de convecção da região análise [KW^{-1}]

σ_a – Tensão Axial

σ_c – Tensão Circunferencial

t – Espessura de parede do vaso/tubo

T_{ambiente} – Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$]

tag^{-1} – Arco tangente

$T_{\text{plastificação}}$ – Temperatura de plastificação [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{\text{resistência}}$ – Temperatura da resistência elétrica [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{\text{superfície do isolante}}$ – Temperatura na superfície do isolante térmico [$^{\circ}\text{C}$]

θ – Ângulo de hélice [$^{\circ}$]

V_{ambiente} – Velocidade na temperatura ambiente [ms^{-1}]

VC – Volume de controle

$V_{\text{plastificação}}$ – Velocidade na temperatura de plastificação [ms^{-1}]

\dot{W}_{VC} – Taxa de trabalho entrando no volume de controle [W]

z_{ambiente} – Altura no ambiente [m]

$z_{\text{plastificação}}$ – Altura na plastificação [m]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contexto do Tema	20
1.2	Caracterização da Oportunidade	22
1.3	Objetivos	23
1.4	Justificativa	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Função e componentes de uma extrusora.	25
2.1.1	Sistema de plastificação	27
2.1.2	Sistema de alimentação	34
2.1.3	Sistema de movimentação	35
2.1.4	Sistema de forma	36
2.1.5	Sistema de controle	38
2.1.6	Problemas típicos no processo de extrusão	41
2.2	Plástico ABS	41
2.2.1	Composição química	43
2.2.2	Propriedades Mecânicas	44
2.2.3	Reologia dos materiais plásticos	45
2.2.4	Degradação de materiais plásticos	46
2.3	Avaliação de potencial de mercado	47
2.4	Considerações da fundamentação teórica	51
3	METODOLOGIA	52
3.1	Descrição da Metodologia	52
3.1.1	Metodologia Scrum	53
3.1.2	Pesquisa correlacional	55
3.2	Justificativa da Metodologia	56
3.3	Produto do Projeto	56
4	DESENVOLVIMENTO	57
4.1	Necessidades do projeto	57
4.2	Estrutura do desenvolvimento	57
4.2.1	Aspectos de projeto	58
4.2.2	Estrutura do protótipo	72
4.2.3	Fabricação	73
4.2.4	Procedimento	77
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
6	AVALIAÇÃO DE MERCADO	81
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
8	REFÊRENCIAS	85
	APÊNDICE A – CONJUNTO EXTRUSORA DESKTOP	91

APÊNDICE B – CONJUNTO CANHÃO	93
APÊNDICE C – MODELO DE NEGÓCIOS – CANVAS	95
ANEXO A – LISTA DE CURSOS DE ENGENHARIA E DESIGN	97

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da manufatura aditiva tem avançado nos últimos anos, com oportunidades promissoras quando comparadas aos processos subtrativos de material da manufatura convencional. Uma técnica de manufatura é a impressão 3D de objetos, com a utilização de materiais plásticos, a qual é considerada como sendo a tecnologia impulsionadora da nova revolução industrial, segundo Kleer, Piller e Weller (2015).

A primeira ideia da construção de uma impressora 3D, pelo processo de FDM (Fused Deposition Modeling), foi patenteada nos Estados Unidos da América pelo empresário S. Scott Crump, em 9 de junho de 1992, sob o número de patente 5,121,329, como ilustrado na Figura 1.

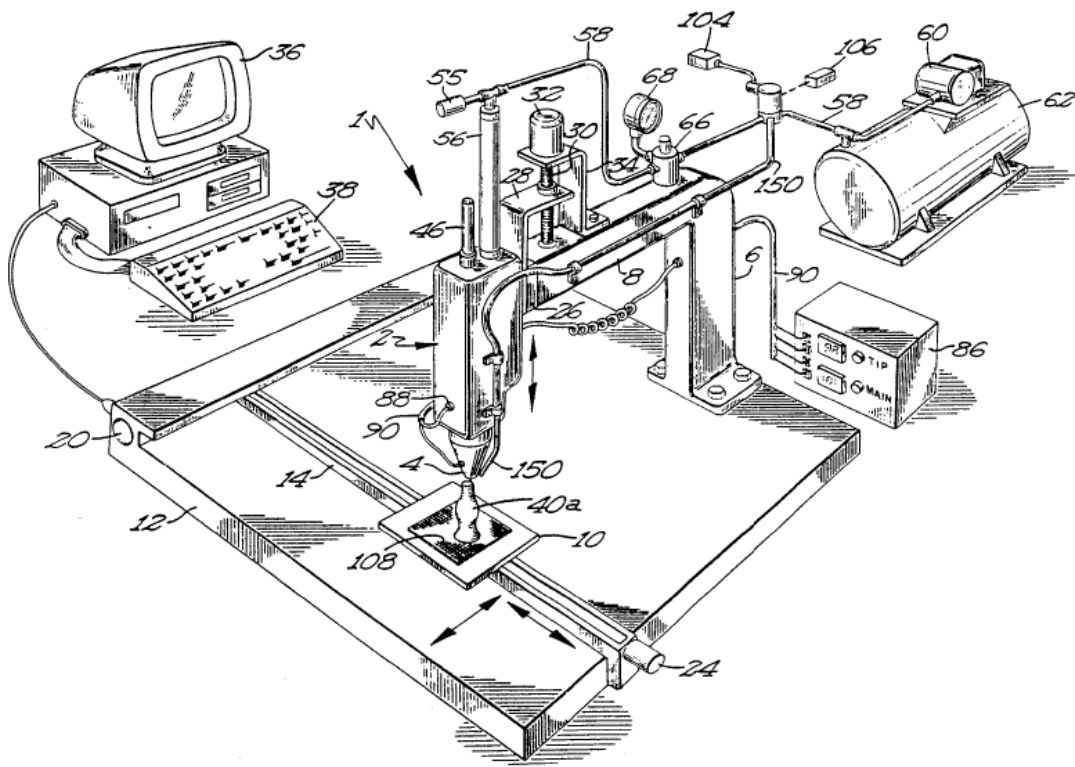


Figura 1. Ilustração conceitual de uma impressora 3D.
Fonte: Crump (1992)

O equipamento controlado por comando numérico posiciona o cabeçote de aplicação de material no local desejado, conforme desenho CAD, depositando camadas, as quais formam o objeto tridimensional.

O material plástico para o processo de impressão é previamente extrudado na forma de um filamento, cujo diâmetro comercial pode ser de 1,75 ou 3 mm. O mesmo é ilustrado com o número 110 e fornecido enrolado em um carretel indicado pelo número 114 na Figura 2.

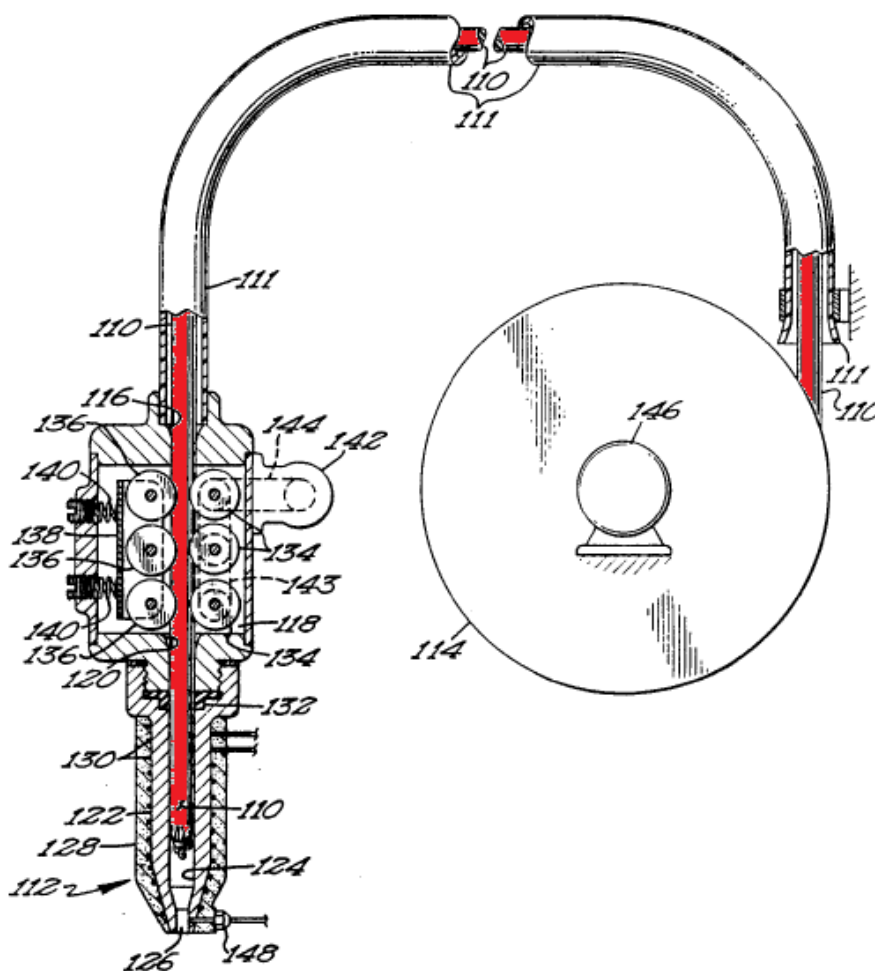


Figura 2. Ilustração do cabeçote de aplicação de material, filamento e carretel.

Fonte: Adaptado de Crump (1992)

A invenção criada por Crump (1992) na sua patente, tem o objetivo de disponibilizar um processo e aparelho para a criação de objetos tridimensionais em um ambiente de trabalho, economizando tempo e dinheiro. Inicialmente foi pensada para atender as necessidades de construção de protótipos e moldes das pessoas envolvidas com atividades de design, as quais tem a possibilidade de avaliar os objetos criados e identificar possíveis problemas e corrigi-los.

A impressão 3D, segundo Kleer *et al.* (2015), possibilita a customização de produtos com baixas barreiras financeiras, já que o processo não necessita de máquinas (torno, fresa, retífica, etc.) ou moldes, possibilita a criação de um conjunto de objetos já montados, eliminando possíveis etapas de montagem, tem impactos significativos sobre os custos de flexibilização, individualização, capital de investimento, e custos marginais de produção. Entretanto, existem limitações da impressão 3D, como a baixa velocidade de fabricação, as características finais nos produtos são inferiores aos produzidos por processos convencionais, os produtos finais precisam de um processo de acabamento superficial, e o fato de ainda não existirem sólidos padrões de qualidade e referência estabelecidos.

Estudo de mercado de 2014 realizado pela empresa Gartner (2014), mostra que a impressão 3D terá uma grande aceitabilidade no processo de prototipagem a partir 2016, em muitos casos restringindo-se a empresas e instituições de ensino, conforme reportagem da Revista Exame (2015). Entretanto, a inserção do processo para os consumidores finais apenas acontecerá entre 2019 e 2024, conforme interpretação da Figura 3.

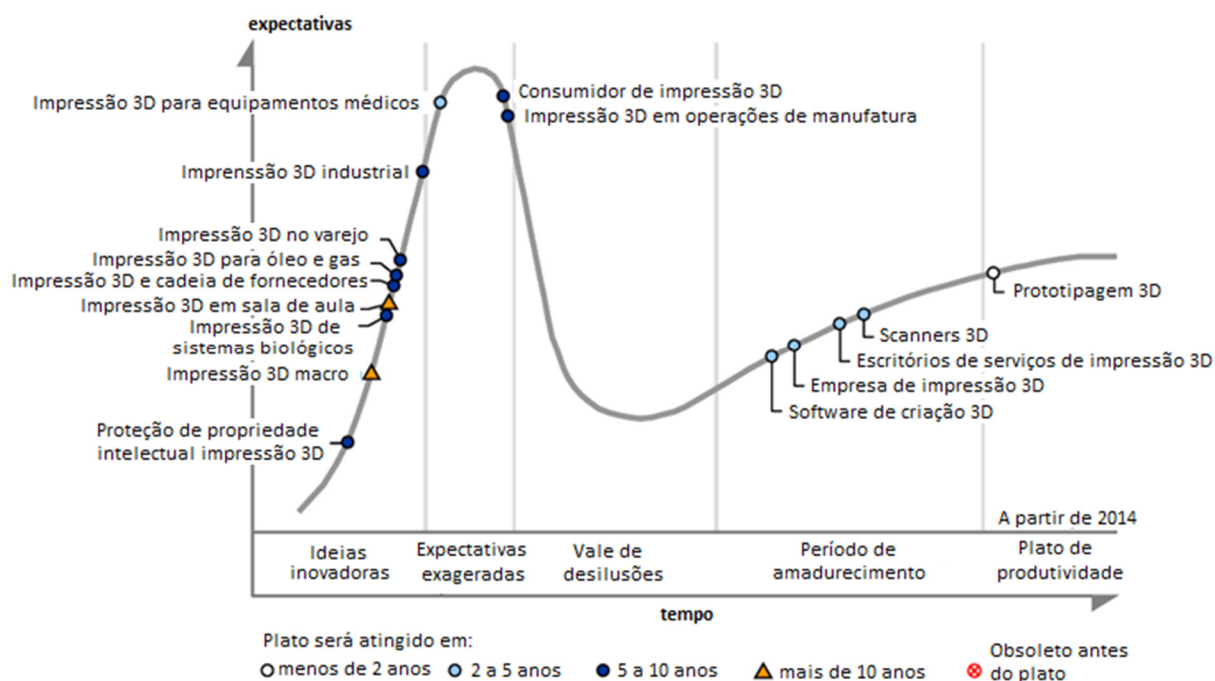


Figura 3. Hype cycle para diversos segmentos de aplicação de impressão 3D.

Fonte: Adaptado de Gartner (2014)

Segundo Gartner (2014), a aplicação da impressão 3D no ambiente doméstico é um pouco complicada, devido a complexa inter-relação de software de desenho e impressão, hardware e os possíveis materiais de impressão, sobre os quais o consumidor precisa ter conhecimento.

Além das barreiras do conhecimento que afastam a grande massa de utilizar o processo de impressão 3D em ambientes domésticos, pode-se citar os custos do filamento para o processo FDM. O preço do filamento ainda é considerado uma limitação para o processo, mas tende a reduzir com a entrada de novos fornecedores do material no mercado (KLEER, *et al.*, 2015).

De maneira geral, a impressão 3D é um processo produtivo ainda em amadurecimento, mais tem como princípios básicos a versatilidade da manufatura, a possibilidade de customização e flexibilidade sem limites, a liberdade para explorar formas complexas e redução de custos inerentes a processos produtivos de montagem, (KLEER, *et al.*, 2015).

Os materiais comumente utilizados no processo de impressão 3D por FDM são PLA e ABS. O material PLA é um material biodegradável obtido do ácido láctico, este processado da dextrose proveniente de milho ou arroz (Fried, 2003). Apesar da aplicabilidade do PLA, este trabalho dará ênfase a construção de uma máquina para extrusão do material ABS. Posteriormente poderá ser avaliada a possibilidade de utilizar o material PLA para a máquina inicialmente fundamentada para extrusão de ABS.

A extrusora com um fuso na sua construção é uma máquina de funcionamento contínuo, empregada para o beneficiamento de matéria-prima em granulado ou a confecção de perfis de seção constante. O material plástico durante o seu ciclo de vida passa pelo menos uma vez por uma extrusora, para então, ser vendido na forma de granulado.

1.1 Contexto do Tema

Visualizando a importância da impressão 3D para processo de prototipagem e o custo relativamente alto do filamento no mercado, conforme relata Yves (2014), o presente trabalho propõem-se a realizar o desenvolvimento de um protótipo de máquina extrusora para produção de filamento.

O projeto da máquina extrusora é um projeto integrador entre áreas do conhecimento do curso de Engenharia Mecânica, a saber:

- materiais metálicos e poliméricos;
- comportamento reológico do material;
- mecânica dos fluídos e transferência de calor;
- mecânica dos sólidos e projetos de máquina;
- eletrotécnica;
- sistemas eletrônicos para controlar a temperatura e a rotação do motor;
- processos de fabricação (soldagem, torneamento, fresamento, furação, corte e dobramento).

Yves (2014) relata que a máquina de extrusão para a produção de filamento 3D possui o mesmo princípio construtivo de extrusoras industriais usualmente empregadas para a produção de diversos perfis e em larga escala. Contudo, as extrusoras de filamento de uso doméstico podem ser encontradas em versões de pequeno tamanho para atender a demanda por filamentos para as impressoras 3D.

Segundo Yves (2014) devido ao alto custo do filamento e o fato que as características geométricas do filamento permitirem a construção de uma máquina menos robusta, simples e barata quando comparada as máquinas industriais, surgiu um grande número de pequenos fabricantes deste tipo de máquinas nos últimos anos, em especial no mercado chinês, europeu e americano. As máquinas encontram-se nas mais variadas faixas de valores, produção e tecnologia embarcada.

Atualmente não se encontra fabricante comercial deste tipo de máquina no Brasil de acordo com o benchmarking mostrado no Quadro 1. O cliente tem duas vias para obtenção do filamento para impressão 3D, poderá comprar filamentos em bobinas ou importar uma máquina. O cliente que opta em comprar bobinas não tem a possibilidade de reciclar o material já utilizado, conforme relata Camargo (2015), e caso importe uma máquina, esta poderá representar um alto custo e provavelmente não contará com suporte pós-venda.

1.2 Caracterização da Oportunidade

Quando comparados os preços da matéria virgem na Figura 4 e Tabela 3 do ABS no mercado Europeu, verifica-se que o mesmo se encontra dentro de uma determinada faixa de valores. Para o quilograma do material reciclado as empresas costumam praticar o valor de 50% (em média) do preço do quilograma da matéria-prima virgem. A Tabela 1, com dados disponibilizados pela empresa Termoplastic (2016), mostra os preços de diversas resinas recicladas no mercado nacional.

Porém após o beneficiamento, ou seja, após a transformação da matéria prima em filamento este pode apresentar variações expressivas no preço para o cliente final. Conforme a Figura 5, onde foi feita uma pesquisa de preços no site de vendas Mercado Livre (2016), pode-se averiguar uma variação de R\$60,00 até R\$150,00 do quilograma do filamento. Em média este valor fica em torno de R\$114,00 por quilograma, o que representa um alto custo no processo de impressão.

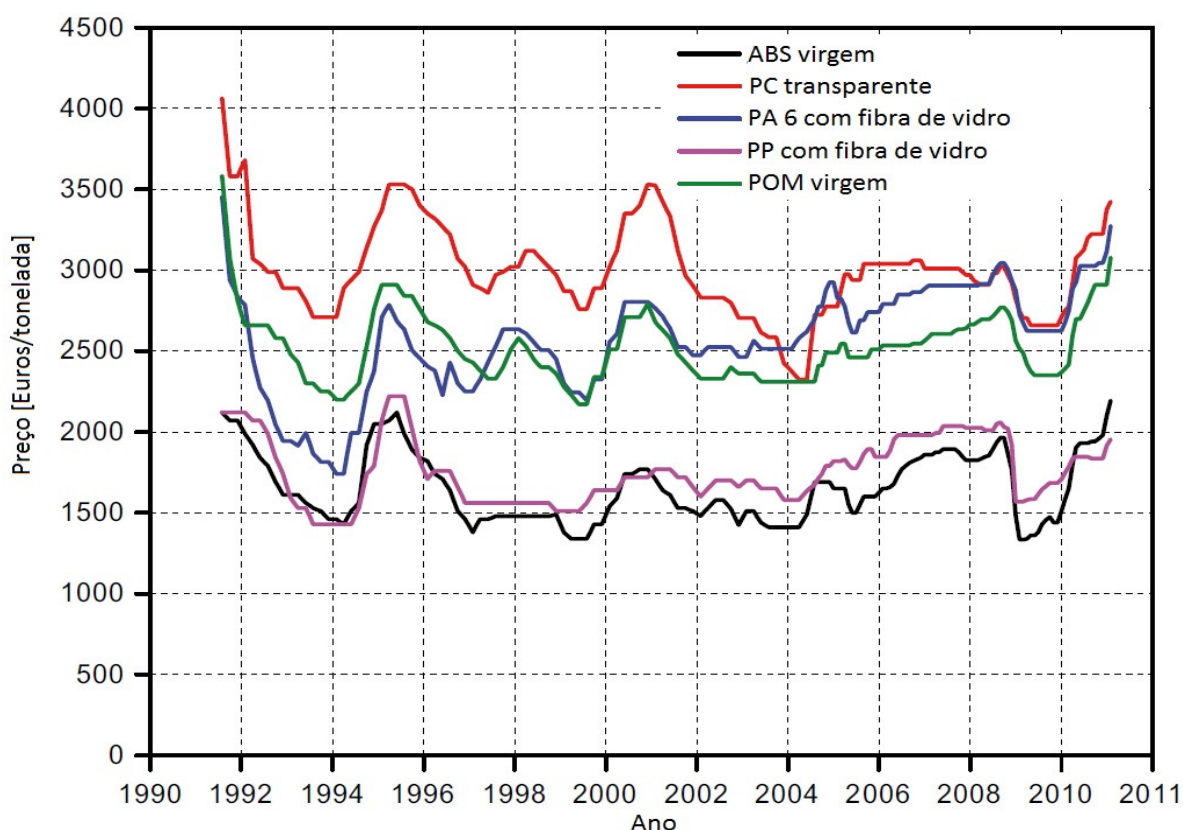


Figura 4. Progressão de preços da matéria virgem ABS na Alemanha.

Fonte: Adaptado de Ehrenstein (2011)

Tabela 1. Preços de diversas resinas recicladas no mercado brasileiro.
Fonte: Termoplastic (2016)

Resinas Recicladas		
Plástico	Cor	Preço de venda Sem ICMS/IPI/frete (R\$/kg)
ABS	Preto	4,20
ABS	Cinza	4,10

Realizando o cruzamento das informações referente ao valor da matéria prima (ABS) e preço praticado no mercado encontram-se possibilidades para atacar o problema do alto custo do filamento. No que se refere ao fato de não haver fabricantes de extrusoras de filamento 3D no mercado interno, vislumbra-se outra oportunidade no projeto, produção e comercialização deste tipo de máquina uma vez que a extrusora permite a reutilização da matéria prima, facilidade de obtenção do filamento, flexibilidade e menores custos para o cliente.

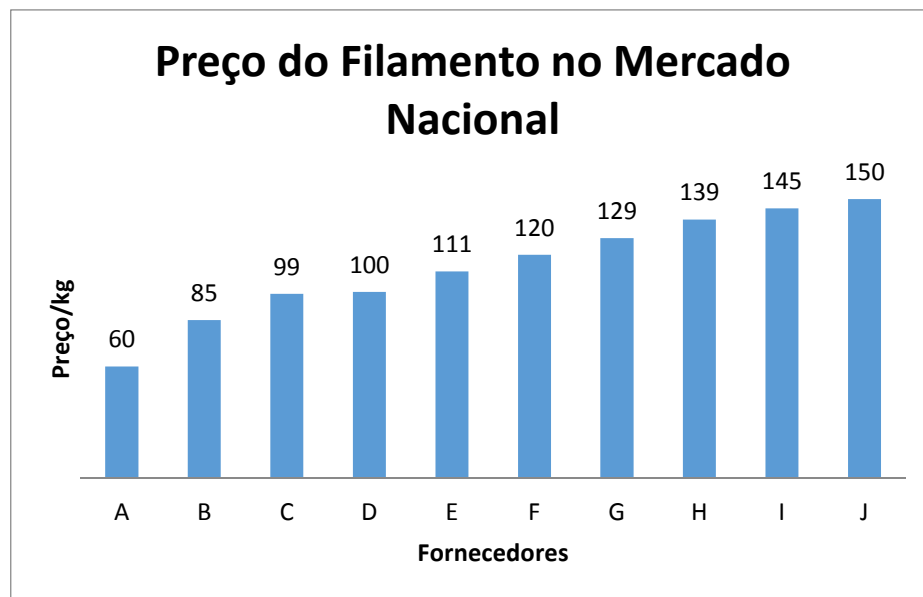


Figura 5. Preços do Filamento no Brasil.
Fonte: Autoria própria com dados disponíveis em Mercado Livre (2016)

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolver e construir um protótipo de extrusora desktop para produção de filamento ABS para fins de impressão 3D.

Para o desenvolvimento da extrusora, tem-se como objetivos específicos:

- Compreender o funcionamento do equipamento, levando em conta os seus componentes e suas respectivas funções no processo produtivo.

- Observar o comportamento do material plástico ABS, conhecendo composição química, comportamento térmico e mecânico durante o processo de transformação. No quesito comportamento mecânico deverá ser estudado como é o comportamento reológico do material. Este estudo do material tem por objetivo atender os requisitos de qualidade do material, com base no exposto na literatura e funcionamento do mesmo em uma impressora 3D.
- Identificar, com base na literatura, relações usuais dimensionais e de forma de cada componente.
- Realizar o levantamento do estado da arte dos produtos que já estão no mercado através do benchmarking.
- Determinar na fase de projeto uma configuração de parâmetros para a construção de um protótipo da máquina, analisando e comparando modelo geométrico com o modelo físico real, caso necessário realizar alterações no projeto visando atender as instruções da fundamentação teórica.

1.4 Justificativa

O desenvolvimento do projeto da máquina extrusora de filamento de impressão 3D está embasada em diversos fatores, a saber:

- Contextual e Tecnológico: Devido a relevância da manufatura aditiva, expectativas de oportunidades que a técnica impressão 3D pode proporcionar e o alto custo que representa o filamento para impressão 3D relativamente ao custo da matéria virgem do ABS, conforme relatam Kleer *et al.* (2015);
- Mercadológico: Devido as previsões de inserção e popularização das impressoras 3D no mercado nos próximos anos segundo a empresa Gartner (2014) e o atual cenário mercadológico brasileiro, o qual não possui nenhum fabricante interno visto no Quadro 1.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica será dividida em três tópicos. Primeiramente será abordada a máquina extrusora descrevendo a sua função, os componentes construtivos e análise térmica. Em seguida será abordado o material plástico, que será extrudado, levando em consideração propriedades químicas, mecânicas e térmicas e um enfoque no comportamento reológico do material. Finalmente será tratado o potencial de mercado para a máquina e benchmarking.

2.1 Função e componentes de uma extrusora.

A extrusora, segundo Giles Jr. *et al.* (2005), tem como principal objetivo produzir produtos que atendam 100% das especificações do cliente. Analisado o percurso do material dentro do equipamento é possível inferir as seguintes exigências operacionais (JAROSCHEK, 2014).

- Alimentação;
- Transporte;
- Compressão para eliminação do ar;
- Plastificação;
- Homogeneização do material plástico.

Uma máquina de extrusão empregada no meio industrial pode ser dividida em diversos componentes, sendo estes identificados na Figura 6. Os componentes serão agrupados em sistemas com funções definidas (GILES JR. *et al.*, 2005).

O sistema de plastificação é composto pelo canhão, fuso, sistema de aquecimento e ventiladores de resfriamento, os quais são responsáveis pela plastificação e homogeneização da massa.

O sistema de alimentação constituído pelo funil de alimentação, tem a função de manter o fornecimento contínuo de material para o sistema de plastificação.

A rotação do fuso se dá pelo sistema de movimentação, constituído pelo motor elétrico, conjunto de redução e mancal axial. Os três elementos têm que garantir a rotação desejada e suprir o torque resistivo.

A forma do perfil a ser extrudado é garantida pela placa de quebra e o molde, sendo chamado de sistema de forma.

O sistema de controle tem o objetivo de controlar a temperatura e a rotação do motor elétrico. O controle de temperatura objetiva manter a temperatura constante, e o controle da rotação tem como finalidade possibilitar uma faixa de rotação do fuso.

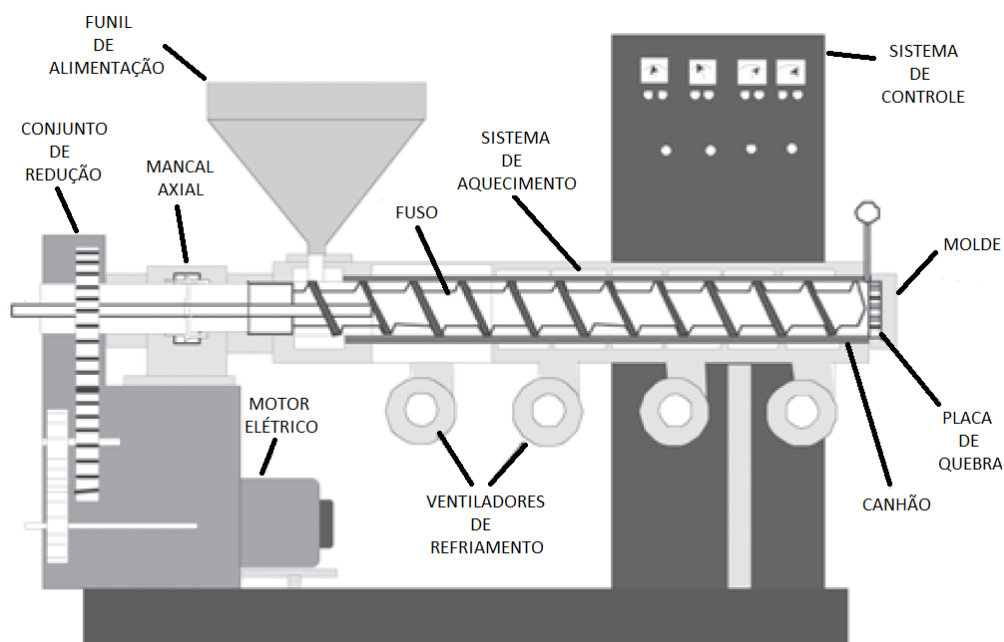


Figura 6. Ilustração de uma extrusora e seus componentes.

Fonte: Adaptado de Giles Jr., et al. (2005)

Extrusoras são comercialmente identificadas pelo diâmetro do fuso (D) e a relação L/D , sendo L o comprimento do canhão. Os diâmetros dependem de cada fabricante e sua localização geográfica. Fabricantes localizados nos Estados Unidos da América seguem medidas em polegadas, enquanto na Europa adota-se valores em milímetros.

Segundo Rauwendaal (2013), os diâmetros padrões nos USA são 3/4, 1, 1-1/2, 2, 2-1/2, 3-1/2, 4-1/2, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 e 24 polegadas, enquanto na Europa tem a seguinte sequência de diâmetros 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 e 600 milímetros. As razões de L/D também podem variar de 20 até 30, sendo o quociente 24 o mais comum. Enquanto os autores Giles Jr. et al. (2005), citam relações L/D s típicas como sendo 18:1, 20:1, 24:1, 30:1, 36:1 e 40:1 e diâmetros típicos variando de 15 até 600mm. Rosato et al. (2000) relatam relações

L/Ds variando de 16 até 24:1. Na Tabela 2 é possível observar as variações construtivas citadas por 3 autores.

Tabela 2. Diâmetros dos fusos e relação de L/D por diferentes autores.
Fonte: Rauwendaal (2013), Giles Jr. *et al.* (2005) e Rosato *et al.* (2000)

Autor	Diâmetro do fuso (mm)	Relação L/D (mm/mm)
Rauwendaal (2013)	19 até 609,6	20 até 30:1
Giles Jr. <i>et al.</i> (2005)	15 até 600	18 até 40:1
Rosato <i>et al.</i> (2000)	-	16 até 24:1

Tabela 3. Diâmetros dos fusos e relação de L/D por diferentes autores.
Fonte: Rauwendaal (2013), Giles Jr., *et al.* (2005) e Rosato, *et al.* (2000)

2.1.1 Sistema de plastificação

Segundo Giles Jr. *et al.* (2005) o sistema de plastificação tem a função de plastificar e homogeneizar o material mantendo um fluxo permanente de material a uma temperatura constante no molde. Visualizando um corte longitudinal da extrusora da Figura 7, pode-se observar o aquecimento médio do material até a temperatura de plastificação recomendada pelo fabricante.

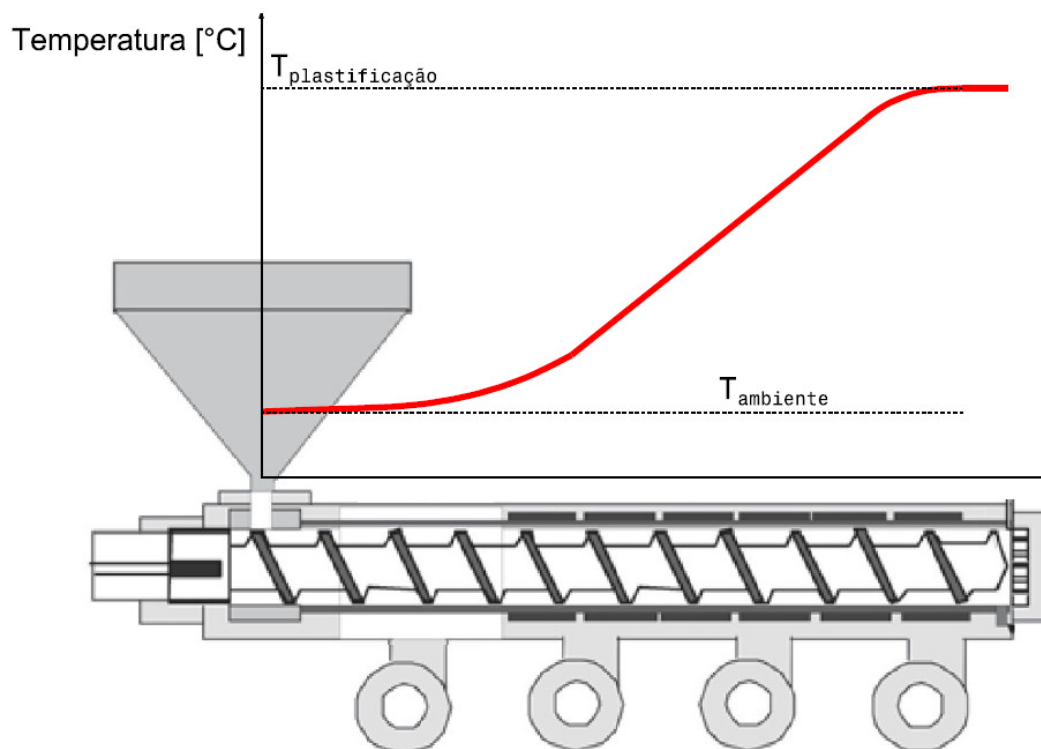


Figura 7. Ilustração do perfil de temperatura média em um corte longitudinal da extrusora.
Fonte: Adaptado de Giles Jr. *et al.* (2005)

Realizando uma análise termodinâmica discreta na Figura 8, é possível identificar duas fontes de energia entrando no volume de controle. A primeira é proveniente do sistema de aquecimento e conduzida até o material plástico, enquanto a outra é proveniente da potência mecânica entregue pelo motor, a qual gera calor por atrito com as fronteiras e o material, segundo Giles Jr. *et al.* (2005).

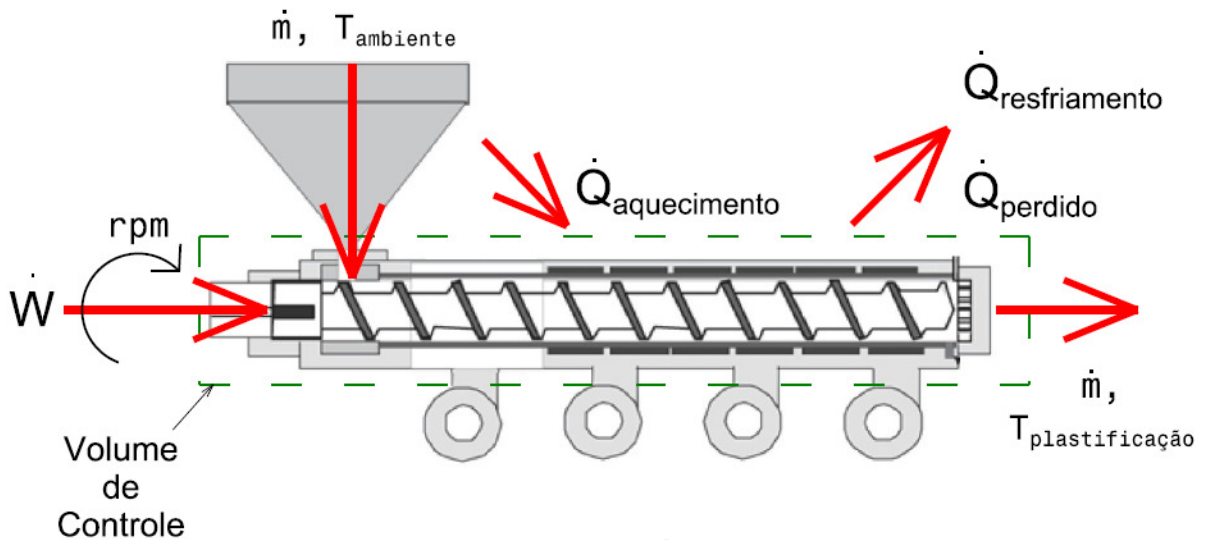


Figura 8. Ilustração de análise de volume de controle.

Fonte: Adaptado de Giles Jr. *et al.* (2005)

Jaroschek (2013) relata que para a plastificação do material, 30% da energia é suprida pelo sistema de aquecimento, enquanto 70% é fornecida pelo trabalho mecânico do motor. Abeykoon *et al.* (2016) afirmam na análise de energia consumida por um extrusora, cujo diâmetro do fuso da extrusora é de 63,5mm, que 76,2% da energia é consumida pelo motor e 20,6% é consumido pelas resistências elétricas e o restante é o consumo de outros sistemas da extrusora. Rosato *et al.* (2000) citam que pelo menos 50 % da energia para a plastificação do material plástico é fornecido pelo motor elétrico. Segundo Giles Jr. *et al.* (2005) 80 a 90% da energia é fornecida pelo motor e o restante 10 a 20% é suprido pelo sistema de aquecimento. Portanto, pode-se concluir que grande parte da energia para plastificar o material é provida pela potência mecânica entregue pelo motor ao sistema.

Aplicando a Equação 1 de conservação de energia, juntamente com as informações da Figura 8 e as considerações a seguir, tem-se a Equação 2 (MORAN e SHAPIRO, 2006).

$$\begin{aligned} \frac{dE_{vc}}{dt} = & \sum \dot{Q}_{vc} + \sum \dot{W}_{vc} \\ & + \sum \dot{m}_{ambiente} \left(h_{ambiente} + \frac{V_{ambiente}^2}{2} + gz_{ambiente} \right) \\ & - \sum \dot{m}_{plastificação} \left(h_{plastificação} + \frac{V_{plastificação}^2}{2} \right. \\ & \left. + gz_{plastificação} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Admitindo as seguintes considerações e hipóteses simplificadoras:

- O processo transcorre em regime permanente, isto é $\frac{dE_{vc}}{dt} = 0$;
- As variações de energia cinética e potencial são desprezíveis, isto é $\left(\frac{V_{ambiente}^2}{2} - \frac{V_{plastificação}^2}{2} \right) = 0$ e $(gz_{ambiente} - gz_{plastificação}) = 0$;
- Existe a conservação da massa durante a passagem do material na máquina, assim pode-se afirmar $\dot{m}_{ambiente} = \dot{m}_{plastificação} = \dot{m}$.

$$\sum \dot{Q}_{vc} + \dot{W}_{vc} = \dot{m}(h_{plastificação} - h_{ambiente}) \quad (2)$$

As entalpias para Equação 2 do material ABS podem ser coletadas da Figura 9.

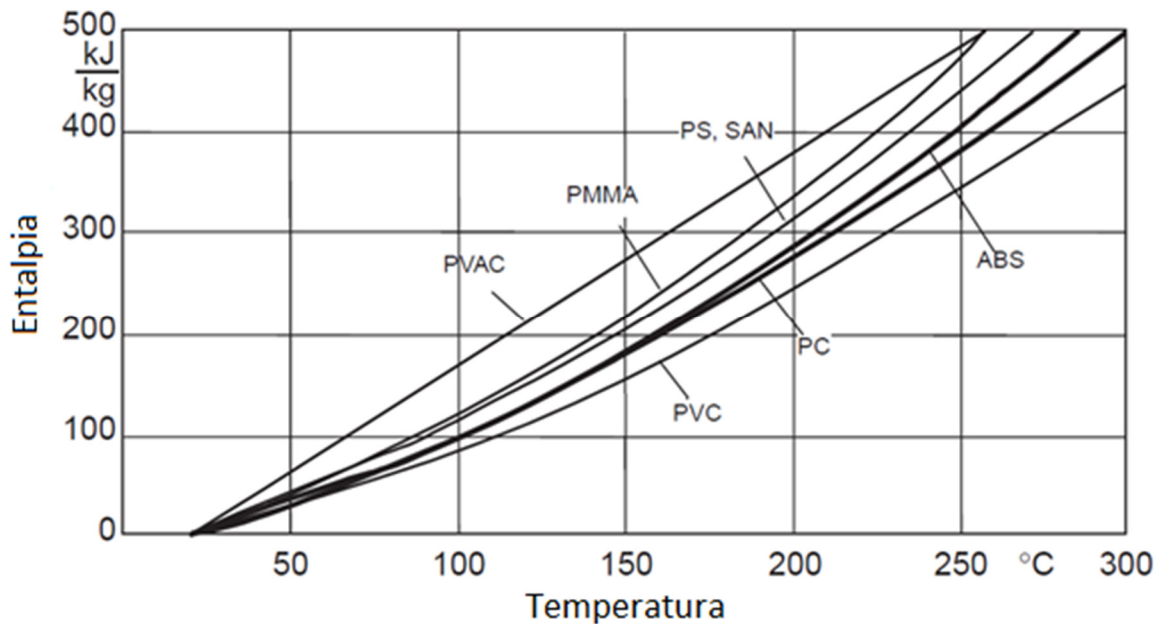


Figura 9. Entalpia de materiais amorfos, inclusive ABS.
Fonte: Adaptado de Zöllner (1997)

Considerando as temperaturas na entrada e saída do volume de controle, $T_{\text{ambiente}} = 25^{\circ}\text{C}$ e a $T_{\text{plastificação}} = 240^{\circ}\text{C}$, tem-se as respectivas entalpias $h_{\text{ambiente}}=0$ kJkg^{-1} e $h_{\text{plastificação}} = 381,21$ kJkg^{-1} , as quais podem ser aplicadas na Equação 2.

O canhão, segundo Giles Jr. *et al.* (2005), é considerado um vaso de pressão, o qual envolve o fuso e delimita a material dentro do seu diâmetro interno, sendo normalmente projetado para suportar pressão de 10.000 psi, o que equivale a 68,9 MPa.

O canhão tem a função de transferir o calor do sistema de aquecimento para o plástico, que está sendo transportado pelo fuso, e serve de base para alojamento dos sensores de medição de temperatura. Para o aquecimento é comum dividir o canhão em zonas de aquecimento com temperaturas específicas, Figura 10.

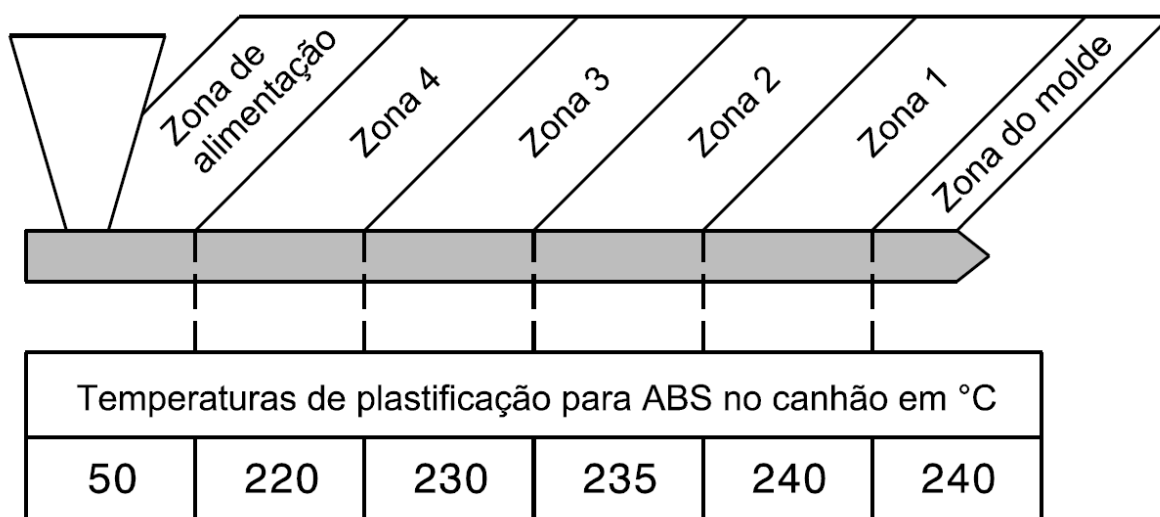


Figura 10. Ilustração do perfil de temperatura no canhão para ABS.
Fonte: Autoria própria e valores da fonte Jaroschek (2013)

Dominghaus *et al.*(2012) relatam que as temperaturas de operação para o material ABS devem variar de 190 até 210°C, enquanto o autor Giles Jr. *et al.* (2005) relatam temperaturas variando de 177 até 240°C.

Segundo Giles Jr. *et al.* (2005), o canhão pode ser construído de material aço carbono, porém devido ao atrito com o fuso, a superfície interna deve ser nitretada com uma camada de 0,3 mm, cujo objetivo é reduzir o desgaste prematuro pelo aumento da dureza. O aço inox também pode ser empregado como material para aumentar a resistência a corrosão, porém a mesma é reduzida durante o tratamento

de nitretação. Além disso, os aços resistentes a corrosão tem coeficiente de condutibilidade inferiores ao dos aços carbono.

O fuso tem a função de transportar, comprimir e homogeneizar o material, sendo o mesmo alojado dentro do canhão. A unidade de transporte é dividida em 3 regiões, sendo alimentação, compressão e homogeneização, segundo Jaroschek (2014). A região de alimentação facilita a entrada do material, apresentando uma profundidade de alimentação maior que as outras regiões, enquanto a região de compressão tem a construção cônica com uma redução gradual da profundidade para expelir o ar e compactar. Finalmente a região de plastificação tem o objetivo de homogeneizar toda a massa.

Cada região do fuso tem comprimentos diferentes, os quais podem variar para cada aplicação, segundo Jaroschek (2014), 20 a 40 % do comprimento do fuso pode corresponder a região de alimentação, 20 a 30% pode ser o comprimento da região de compressão, e 40 a 60% pode ser o tamanho da região de plastificação, o mesmo é exemplificado na Figura 11. Rosato *et al.* (2000) relatam as seguintes variações percentuais para cada região, 33,3 até 60 para região de alimentação, 20 até 33,3 para região de compressão e 20 até 33,3 para região de homogeneização.

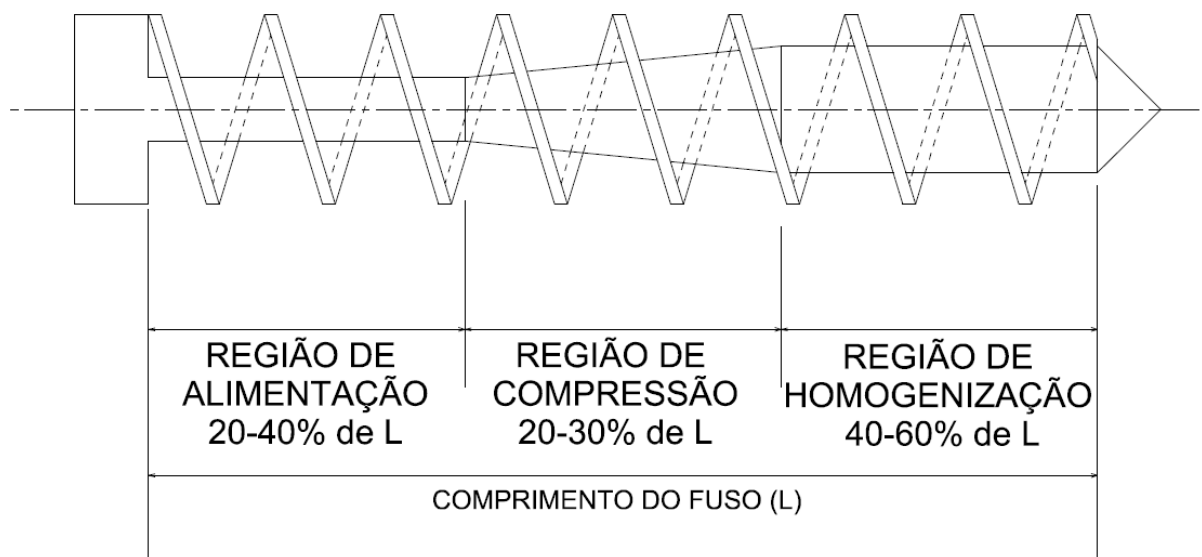


Figura 11. Ilustração da divisão de regiões do fuso.

Fonte: Autoria própria com base na literatura Jaroschek (2014)

O formato helicoidal do fuso tem as geometrias básicas identificadas na Figura 12. Pode-se citar o diâmetro (D), comprimento (L), passo (P), largura do flanco (LF),

profundidade da região de alimentação (P1) e homogeneização (P2). A profundidade de P1 pode variar de 0,1 até 0,3D e a largura do flanco é normalmente 0,1D (GILES JR. *et al.*, 2005).

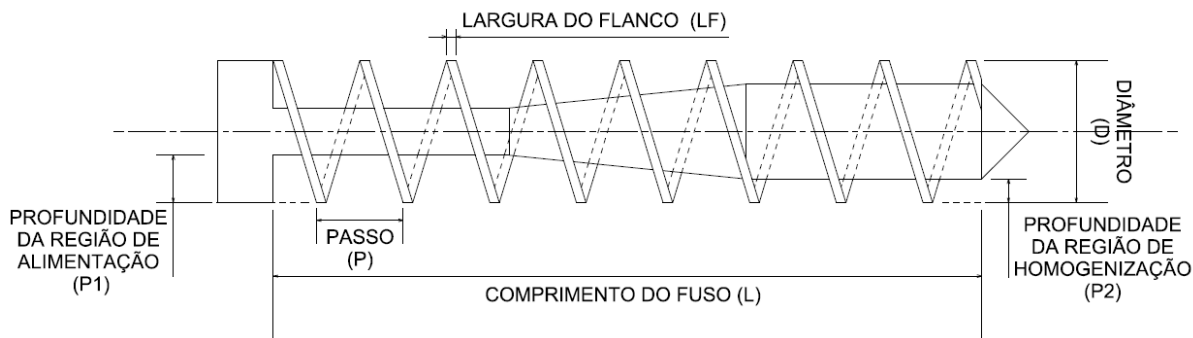


Figura 12. Ilustração da construção geométrica de um fuso.

Fonte: Autoria própria com base na literatura Giles Jr. *et al.* (2005) e Jaroschek (2014)

Com base no diâmetro do fuso (D) e no passo (P) é possível calcular o ângulo de hélice com a Equação 3. Para o material ABS é recomendado um ângulo de hélice de 17,5° (GILES JR. *et al.*, 2005; ROSATO *et al.*, 2000).

$$\theta = \text{tag}^{-1} \left(\frac{P}{\pi D} \right) \quad (3)$$

A taxa de compressão é a razão entre a profundidade da região de alimentação (P1) e a da homogeneização (P2), a qual é inversamente proporcional a densidade aparente do material. Sendo, segundo Giles Jr. *et al.* (2005), 2,75:1 a típica razão de compressão empregada para o material ABS, enquanto Rosato *et al.* (2000) relatam um fator de compressão genérico variando de 2 até 2,2.

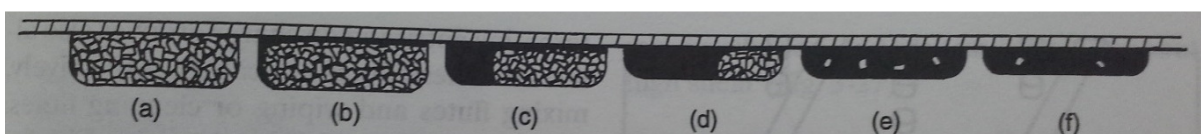


Figura 13. Ilustração do processo de plastificação.

Fonte: Rosato *et al.* (2000)

O processo de plastificação do material transcorre conforme as 6 etapas da Figura 13. No começo do fuso (a) está localizada na região de alimentação, onde o material é transportado devido ao alto atrito com o canhão e baixo atrito com o fuso, caso o material grude no fuso, o mesmo acaba não sendo transportado. No início da região de compressão, identificado em (b) o material continua sendo aquecido e é atritado contra a superfície interna do canhão, onde se inicia a formação de filme

plastificado. Na região de compressão (c) o material ainda é comprimido e plastificado, formando um filme com a parede do canhão, uma região de material plastificado e a região de material sólido. O filme plástico na parede interna do canhão é coletado pelo flanco, formando a região de material plastificado. Em (d) o material é submetido ao mesmo processo citado em (c), sendo a principal fonte de energia para plastificação proveniente do atrito de escorregamento. Na sequência em (e), a região sólida se dispersa, e partículas de material plástico ficam distribuídas na massa plastificada, necessitando de tempo para se plastificar. O material segue para a região final do fuso (f) onde ainda pode existir material não plastificado e o material pode apresentar regiões com variações de viscosidade. O material pode ser melhor misturado com menores profundidades na região de homogeneização.

No quesito material do fuso, pode-se fazer o uso de uma série de materiais, aços ligados, aço ferramenta, aço inox e metais especiais de alta temperatura (ROSATO *et al.*, 2000). Para aumentar a resistência ao desgaste é possível empregar tratamentos de superfícies ou a deposição de materiais mais duros no flanco, os quais durante o funcionamento ficam em constante atrito com o canhão.

Giles Jr. *et al.* (2005) afirmam que a superfície interna do canhão deve ser mais dura que a superfície do fuso. O fuso tende a se desgastar mais rapidamente quando comparado com o canhão, visto que a área do flanco do fuso é a décima parte da área interna do canhão, devido a menor área de contato, o fuso desgasta mais intensamente.

O sistema de aquecimento composto por resistências elétricas, as quais fornecem a energia restante para a plastificação do material, são dispostas em volta de cada região do canhão, formando o perfil de temperaturas da Figura 10. Deve-se levar em conta, caso uma resistência elétrica queime, as outras devem suprir a energia do elemento resistivo faltante até a substituição.

A Figura 14 ilustra uma resistência elétrica coleira. O elemento resistivo responsável pelo efeito Joule usualmente é uma fita metálica, cuja liga é composta por níquel e cromo. A mica tem a função de isolamento da fita resistiva de toda a carcaça, evitando curtos-circuitos, os quais podem levar a ruptura do circuito elétrico. O revestimento tem o intuito de encapsular o elemento resistivo e o isolante de mica. A fixação tem como objetivo tracionar o revestimento, comprimindo-o sobre o tubo

onde é instalada. Nos terminais é aplicada uma diferença de potencial, resultando em uma corrente elétrica, a qual aquecerá toda a estrutura.

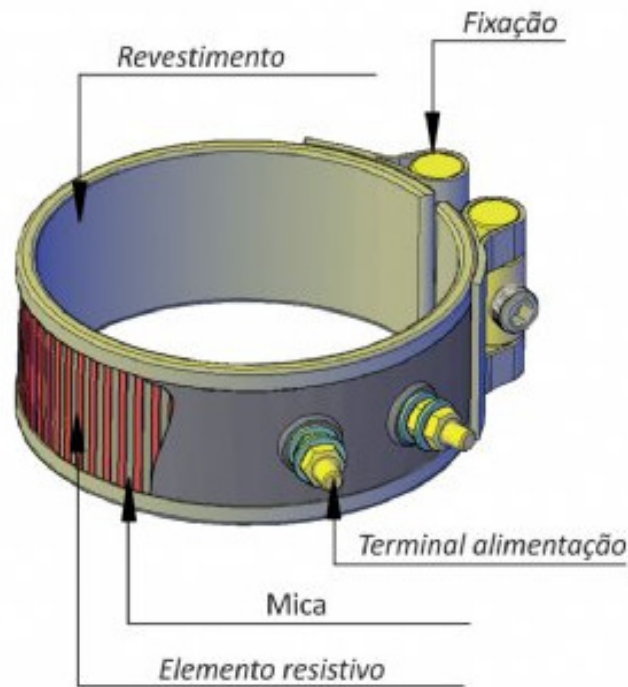


Figura 14. Ilustração da construção de uma resistência elétrica.
Fonte: Anluz (2016)

O sistema de resfriamento é acionado, quando em alguma das zonas da Figura 10 existem temperaturas acima do recomendado.

2.1.2 Sistema de alimentação

O sistema de alimentação tem a função de manter o fornecimento contínuo para a unidade plastificadora, como um reservatório de material sobre o canhão. A temperatura na região deve ser em torno de 50°C, como ilustrado na Figura 10, essa temperatura deve assegurar que o material não grude entre si e as paredes do funil, evitando possíveis entupimentos. Alguns fabricantes estendem a função do funil incorporando o processo de desumidificação, cujo intuito é extrair a umidade dos materiais higroscópicos durante o processamento (ROSATO *et al.*, 2000).

A geometria de entrada do material pelo canhão deve ser centrada com o fuso, como ilustrado na Figura 15, e deve evitar pontos de acúmulo de material.

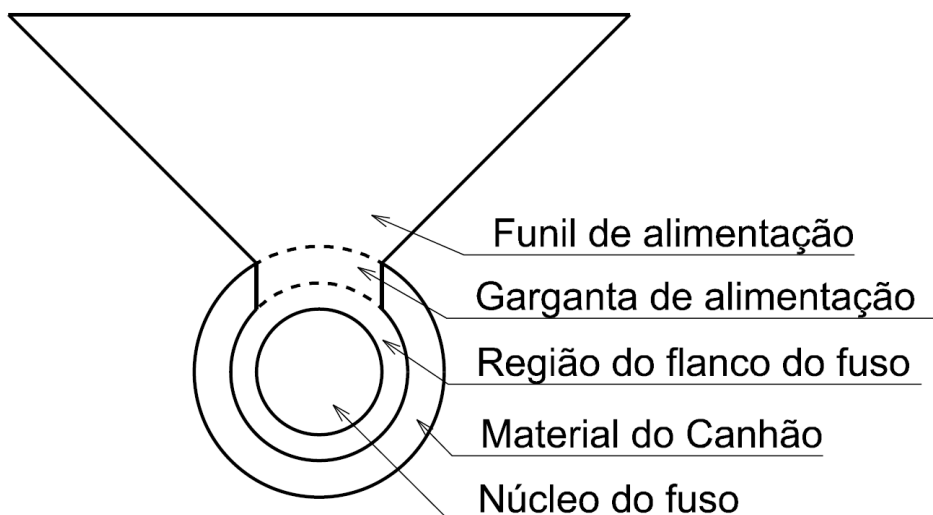


Figura 15. Ilustração da construção geométrica de um fuso.
Fonte: Autoria própria com base na literatura Giles Jr. *et al.* (2005)

2.1.3 Sistema de movimentação

O sistema de movimentação é composto por um motor elétrico, uma caixa de redução, e um mancal axial.

Segundo Abeykoon *et al.* (2016), o motor para a movimentação pode ser tanto de corrente contínua como de corrente alternada. Antigamente era dada preferência para motores de corrente contínua, devido a facilidade de funcionamento em várias velocidades, a simplicidade de controle da velocidade, o relativo baixo consumo e tamanho comparado com motores da mesma capacidade. Atualmente os motores de corrente alternada são mais comuns, devido a melhor eficiência e menor manutenção, quando comparados com motores de corrente contínua.

O conjunto de redução reduz a velocidade e aumenta o torque no eixo de saída, este acoplado no fuso possibilita a transmissão do torque e energia mecânica para o material plástico.

O mancal tem a função de sustentar a carga axial e facilitar a rotação do fuso. O fuso durante o processo transporta o material plástico para a região do molde, e o mesmo é forçado para fora do canhão. Para evitar que isso aconteça é necessário a instalação de um mancal axial para mantê-lo dentro do canhão.

Visualizando a Figura 16 (c), é observado que a eficiência do processo é maior para maiores velocidades de rotação, porém são acompanhadas por instabilidades da

temperatura da massa e a possibilidade do material não homogêneo ser extrudado (ABEYKOON *et al.*, 2016).

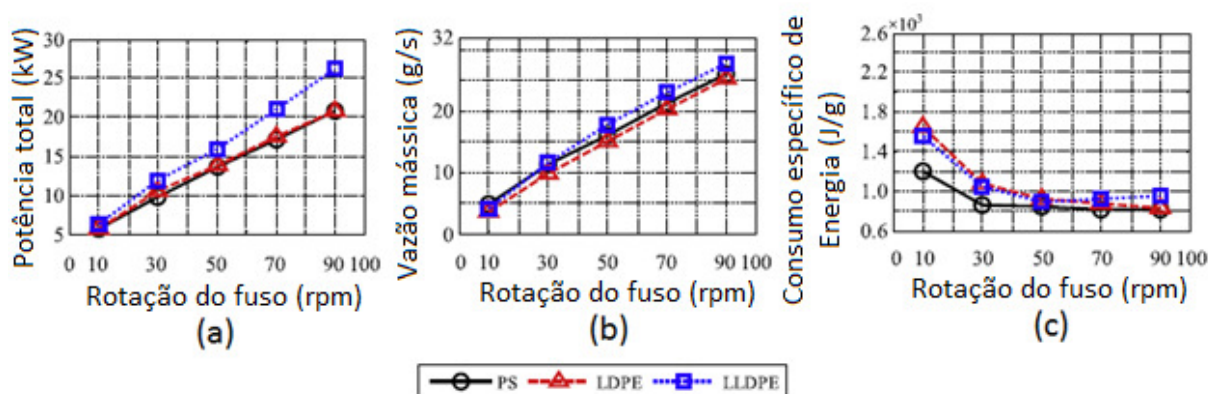


Figura 16. Experimento para avaliação de (a) Potência total (b) Vazão mássica (c) Consumo específico de energia, para o mesmo fuso com 3 diferentes materiais e velocidades de rotação para a mesma temperatura.

Fonte: Adaptado de Abeykoon *et al.* (2016)

A Figura 16 (b) ilustra a relação direta entre velocidade de rotação e vazão mássica, enquanto na Figura 16 (a) é possível observar a relação direta entre potência total e velocidade de rotação. Neste caso, como esperado, a potência total consumida pela máquina é diretamente proporcional a vazão mássica.

2.1.4 Sistema de forma

O sistema de forma é constituído por dois elementos, sendo a placa de quebra e o molde com o perfil do produto, os quais são fixados na saída do canhão.

A placa de quebra apresenta várias funções, como parar a rotação da massa plástica e direcioná-la linearmente para o molde, fornece a propriedade de vedação evitando que material escape pelo fechamento extrusora-molde, filtrar a massa e reter possíveis contaminantes e homogeneizar a temperatura do material. O molde, por sua vez, tem a função de moldar a massa plástica na forma e tolerâncias desejadas, garantindo propriedades físicas do material e qualidade superficial (Giles Jr. *et al.*, 2005).

A placa de quebra é ilustrada na Figura 17 com os furos e uma tela para retenção de material particulado, sendo montada entre a saída da extrusora e o molde para formação do perfil.

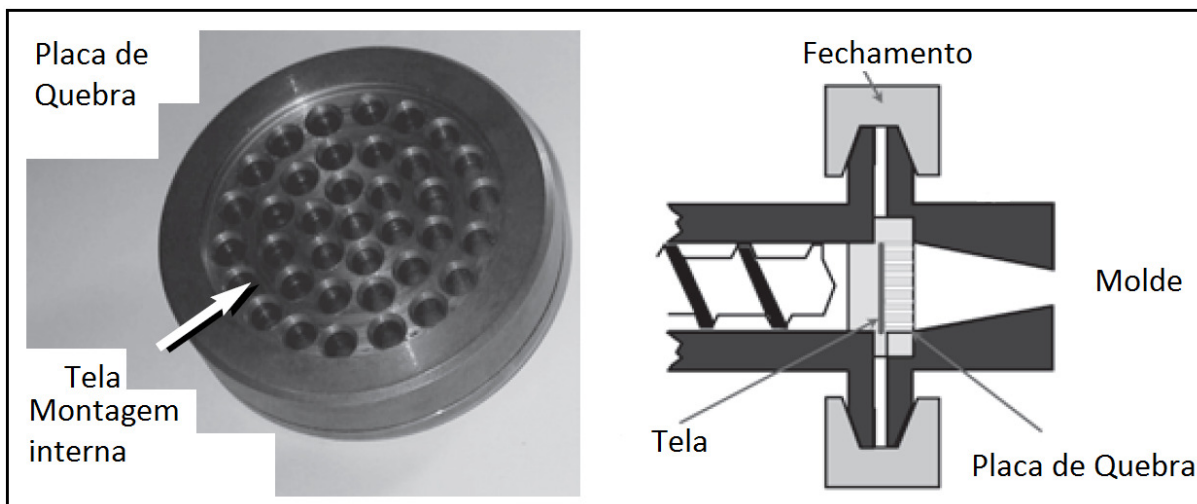


Figura 17. Ilustração da placa de quebra e localização na máquina.

Fonte: Adaptado de Giles Jr. *et al.* (2005)

Giles Jr. *et al.* (2005) explicam que o material plástico quando passa pelo molde tem as suas cadeias carbônicas alinhadas e esticadas paralelamente as linhas de fluxo, após a saída do molde o mesmo encontra-se sem as fronteiras do molde e o material acaba dilatando, devido a relaxação e o entrelaçamento das moléculas carbônicas.

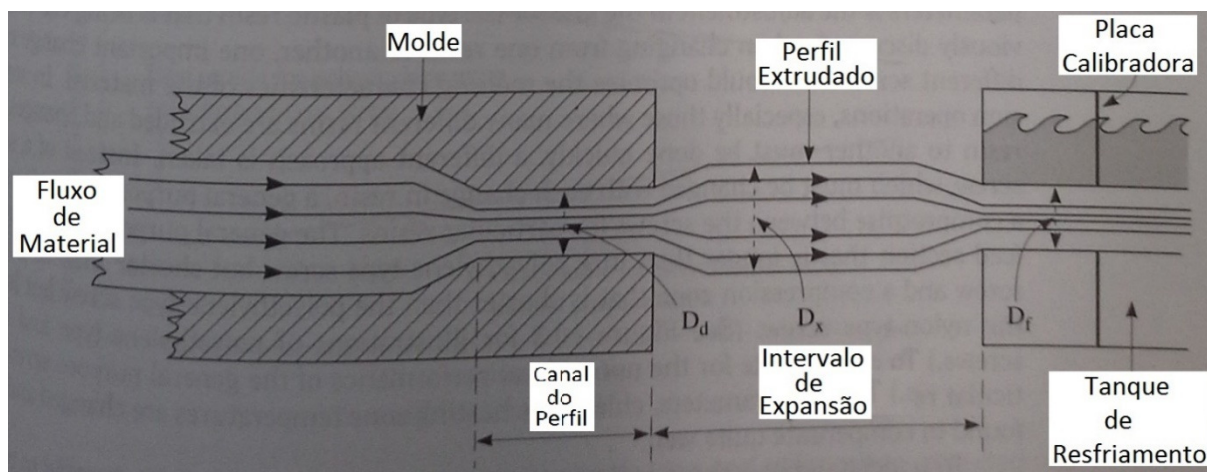


Figura 18. Ilustração do comportamento do material plástico na saída do molde.

Fonte: Adaptado de Strong (1996)

O resfriamento do material pode ser feito em um tanque de água e caso necessite de tolerâncias dimensionais apertadas é possível forçar o filamento por placas de calibração até a dimensão desejada, como ilustrado na Figura 18.

O comprimento do canal do perfil no molde para o material ABS deve ser 25 vezes maior que a espessura do perfil (GILES JR. *et al.*, 2005).

2.1.5 Sistema de controle

Segundo Nise (2012) os sistemas de controle consistem em subsistemas ou plantas montadas de forma a obter uma saída desejada com determinada performance, dada uma entrada especificada. A Figura 19 ilustra um fluxograma simples de um sistema de controle, onde a entrada é o estímulo para a resposta na saída.

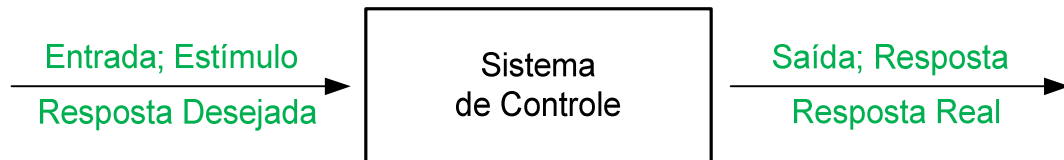


Figura 19. Descrição simplificada de um sistema de controle.

Fonte: Nise (2012)

Nise (2012) define duas configurações padrões que podem ser encontradas na arquitetura de sistemas de controle, a saber:

- Controle em malha fechada;
- Controle em malha aberta.

A Figura 20 ilustra um esquema típico do ciclo de um controle em malha fechada. A entrada refere-se ao valor desejado (setpoint) para o sistema de controle, conhecido também como variável controlada. A planta é o sistema no qual o controlador irá atuar para atingir o valor de setpoint, o controlador atuará na planta através de um parâmetro que é conhecido como variável manipulada. O controlador deverá comparar o valor medido na saída da planta, através de um sensor, com o valor estabelecido como setpoint, definindo assim o erro do ciclo, para posteriormente enviar um sinal de correção para o atuador. O controlador deverá reduzir o erro de forma que se tenha valores desejáveis ou aceitáveis na saída conforme relata Pinto (2005).

O controle de malha aberta segue o fluxograma do sistema de malha fechada, porém sem a retroalimentação, ou seja, este tipo de controle não é sensível a perturbações que podem acontecer durante o fluxo do processo.

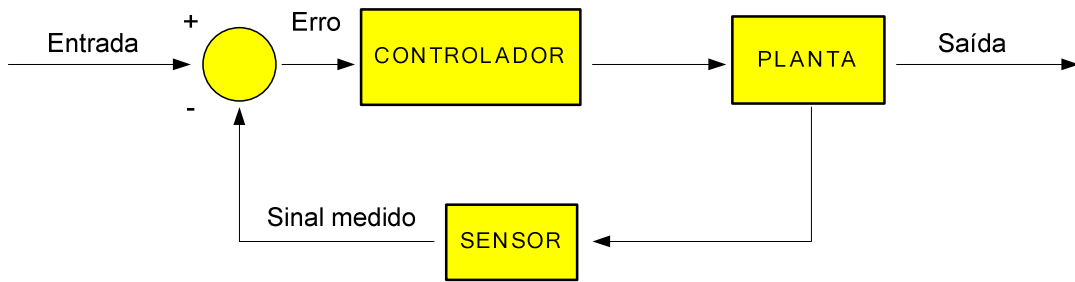


Figura 20. Fluxograma de um controle em malha fechada.
Fonte: Adaptado Pinto (2005).

Segundo Pinto (2005) o modo que o sinal de comando aos atuadores é formulado nos controladores pode variar conforme método construtivo do aparelho, a saber:

- Controladores de duas posições (liga-desliga)
- Controladores Proporcionais (P)
- Controladores do tipo Integral (I)
- Controladores do tipo Proporcional + Integral (PI)
- Controladores do tipo Proporcional + Derivativo (PD)
- Controladores do tipo Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

Giles Jr. *et al.* (2005) relatam que atualmente o controle de temperatura das máquinas extrusoras é do tipo PID.

Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

O sinal de saída do controlador, que é representado na Figura 21 por $a(t)$, é relacionado ao erro $e(t)$ pela Equação 4:

$$a(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Onde K_p representa o ganho proporcional, K_i o ganho integral e K_d o ganho derivativo. Assim o sinal de controle $a(t)$ é diretamente proporcional ao erro, a integral do erro e a derivada do erro.

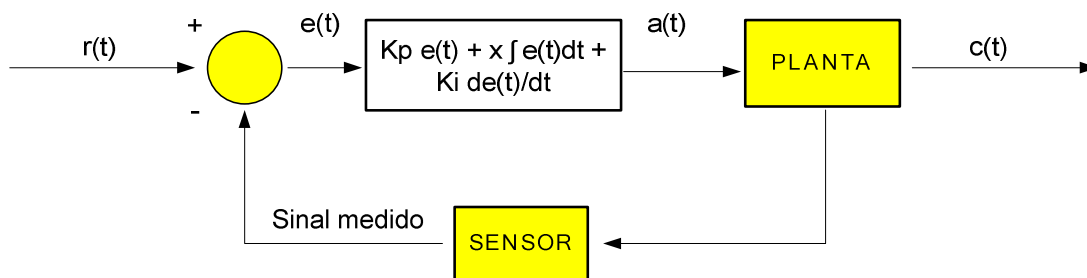


Figura 21. Ilustração do diagrama de um controle proporcional-integral-derivativo.

Fonte: Autoria própria e baseado em Pinto (2005).

Os controladores PID reúnem as características fundamentais dos três tipos de ganho: proporcional, integral e derivativo. Assim, os componentes com esta arquitetura eliminam o erro de estado estacionário (diferença entre o valor esperado e o valor real obtido do sinal) e possuem uma boa resposta dinâmica (tempo para a resposta estabilizar) trazendo maior estabilidade para o processo por compensar rapidamente as perturbações ou alterações que possam acontecer no sistema (NISE, 2012).

A Figura 22 exemplifica o comportamento da curva de um controlador PID comparativamente com outros tipos. Observar que o erro de estado estacionário é zero e a resposta dinâmica é rápida.

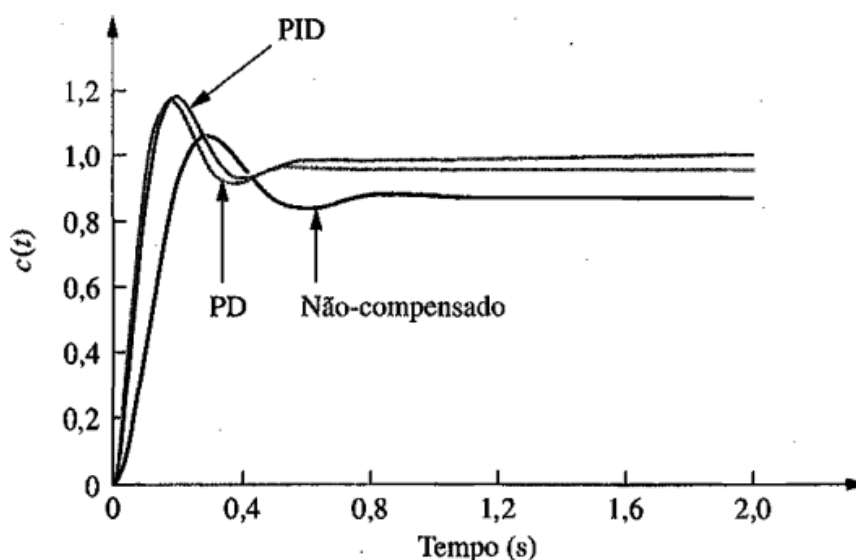


Figura 22. Curva de resposta ao degrau unitário para um controlador proporcional-integral-derivativo.

Fonte: Nise (2012).

2.1.6 Problemas típicos no processo de extrusão

A operação de uma máquina extrusora pode ser acompanhada de problemas no produto final, estes citados por Giles Jr. *et al.* (2005):

- Estrias causadas pela mistura inadequada;
- Variações das propriedades mecânicas;
- Degradação térmica;
- Estrias de aparência fosca;
- Linhas de molde;
- Contaminação por cor;
- Buracos ou vazios no perfil;
- Géis;
- Variações de calibre;
- Linhas de solda;
- Empenamento;

Cada possível problema citado pode ter mais de uma ação de correção, sendo necessário a alteração de um parâmetro de cada vez para avaliação do resultado e melhoria do processo.

2.2 Plástico ABS

O material plástico ABS tem sua aplicação direcionada para a confecção de equipamentos eletrônicos e elétricos, indústria automotiva, instrumentos de telecomunicação entre outras aplicações. As propriedades mecânicas e o preço do material plástico ABS se localizam entre os materiais mais baratos e os mais caros, de acordo com Scaffaro *et al.* (2012) e Tabela 3.

Segundo Dominghaus *et al.* (2012) o material plástico ABS tem as seguintes características

- Altos valores de tensão e módulo de elasticidade;
- Alta dureza e resistência a riscos;
- Alta resistência ao impacto a baixas temperaturas;
- Alta estabilidade de forma para temperaturas;
- Relativa baixa absorção de água;

- Alta estabilidade de forma;
- Alta estabilidade contra agentes químicos;
- Estabilidade contra formação de rasgos de tensão quando comparado com o poliestireno;
- Não apresenta resistência a intempéries, devido ao 1,3-Butadieno.

Tabela 4. Ilustração de valores por quilograma para materiais, inclusive ABS.

Fonte: Adaptado de Dominghaus *et al.* (2012)

Materiais plásticos	Euro €/kg	Materiais plásticos	Euro €/kg
PE-HD	1,32–1,49	PA11	7,50–11,50*
PP	1,45–1,67	PA12	7,50–11,50 *
PS	1,75–1,96	PA 6	2,77–3,30
PVC	1,23–1,32	PA 6GF	3,11–3,40
ABS	2,10–2,85	PA 6.6	3,73–3,90
PC	3,37–4,03	PBT	3,35–3,68
PMMA	2,97–3,22	POM	2,91–3,42
PEI	10,0 –17,00*	PET	1,55–1,75
SAN	1,50–2,50*	PPS	3,00–10,50*
SB	0,90–1,50*	PTFE	Cerca 12,50*
PSU	13,50*	LCP	Cerca 50,00*
		PEEK	Cerca 60,00*
Metais	Euro €/kg		
Aço0,37%C	0,30–0,50*	TPO	2,50–5,00*
Al	0,70–1,00*	TPU	3,75–6,25*
Mg	1,50–2,00*	UP	2,60–5,00*
Ti	4,00–5,00*	PF	1,00–3,00*
Fibra de carbono	80,00–120,00*	EP	4,00–10,00*

* Valores do quilograma do material para o começo de 2007

O material é fornecido em pellets os quais apresentam uma densidade relativa de 550 até 650 kg/m³ e densidade na condição compacta é de 1030 kg/m³, conforme catálogo comercial do produto Ineos Styrosolution – Basf (2016).

O material plástico quando exposto ao ambiente acaba absorvendo umidade do ar, como ilustrado na Figura 23, antes do processamento é recomendado que o material passe pelo processo de secamento a temperatura de 85°C, por um período de 2 a 4 horas, segundo Dominghaus *et al.* (2012).

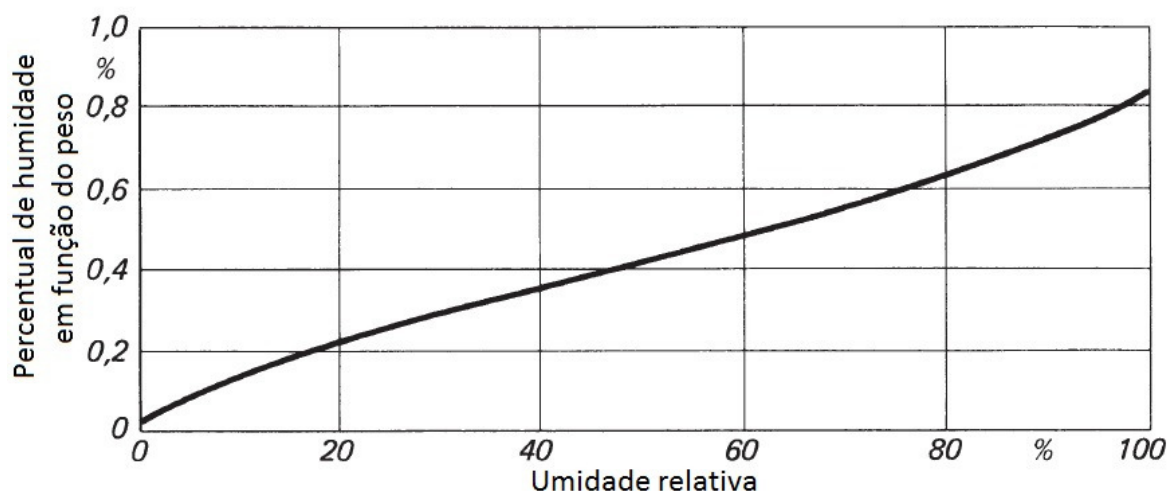


Figura 23. Ilustração do percentual de umidade no material ABS em função da umidade relativa do ar.

Fonte: Adaptado de Dominghaus *et al.* (2012)

2.2.1 Composição química

O plástico ABS é constituído por 3 monômeros, sendo estes Acrilonitrila (Inglês: **A**crylonitrile), 1,3 – Butadieno (Inglês: 1,3-**B**utadiene) e Estireno (Inglês: **S**tylene). As iniciais de cada monômero em inglês formam o acrônimo ABS. O produto final é classificado como sendo um copolímero, pelo fato de ser formado por mais de uma unidade de monômero (DOMININGHAUS *et al.*, 2012).

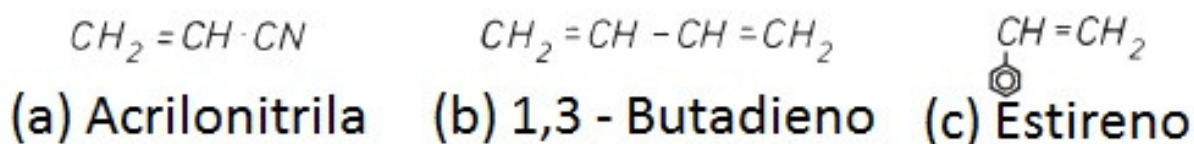


Figura 24. Ilustração dos compostos químicos que formam o ABS, (a) Acrilonitrila, (b) 1,3 – Butadieno (c) Estireno.

Fonte: Adaptado de Dominghaus *et al.* (2012)

Cada monômero tem influência sobre a qualidade do produto final ABS, quanto maior a quantidade de 1,3-Butadieno, eleva-se a tenacidade, a capacidade de alongamento e a resistência a baixa temperatura. O Estireno tem a qualidade de ser rígido, de baixo custo e transparente, enquanto o Acrilonitrila tem boa resistência a temperatura e intempéries, resistência mecânica e ação de barreira, conforme ilustrado na Figura 25.

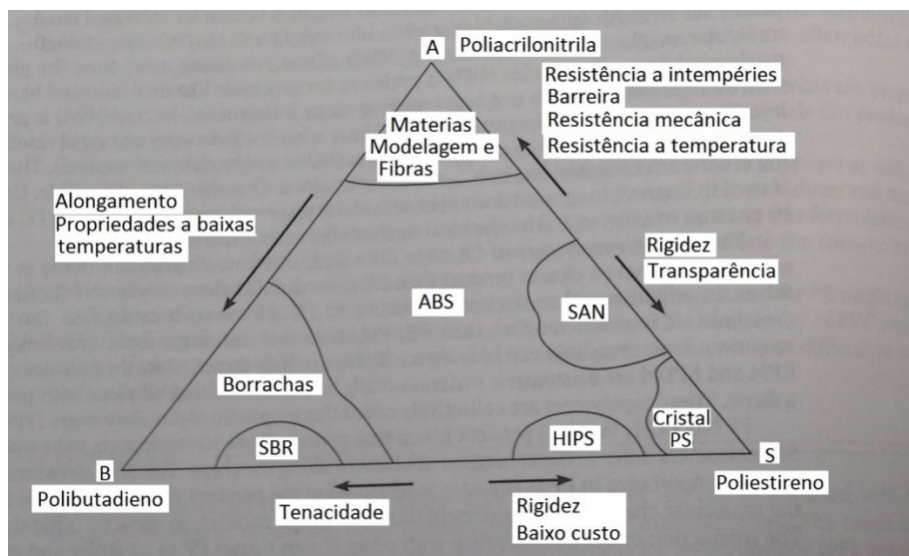


Figura 25. Influência dos monômeros nas propriedades do ABS.

Fonte: Adaptado de Strong (1996)

2.2.2 Propriedades Mecânicas

Materiais plásticos apresentam propriedades dependentes da temperatura, onde o material está exposto, quando expostos a altas temperaturas a tensão de escoamento diminui e o alongamento aumenta, como ilustrado na Figura 26.

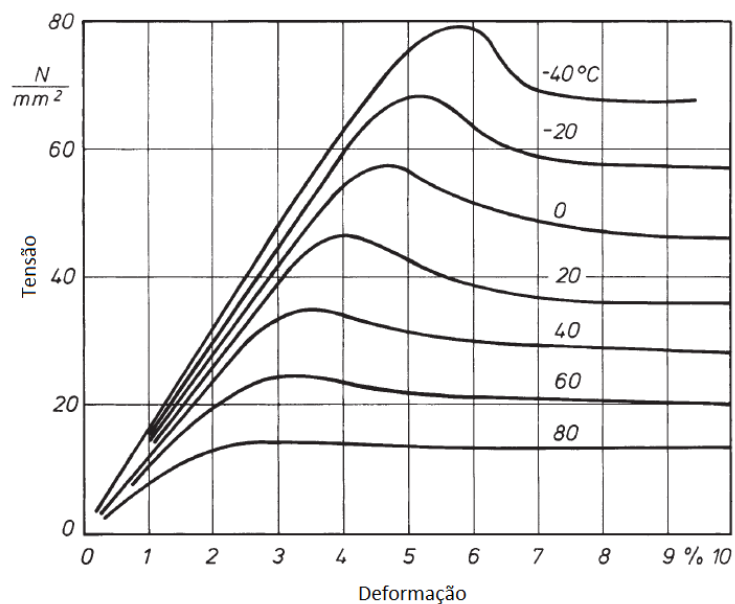


Figura 26. Tensão x deformação de uma peça de ABS injetada.

Fonte: Adaptado de Dominghaus *et al.* (2012)

2.2.3 Reologia dos materiais plásticos

Os materiais termoplásticos incluindo ABS são considerados materiais não Newtonianos, mais especificamente pseudoplásticos, os quais apresentam uma viscosidade que varia em função da taxa de cisalhamento, temperatura e pressão, ou seja $\eta(T; p; \dot{\gamma})$, conforme Fried (2003).

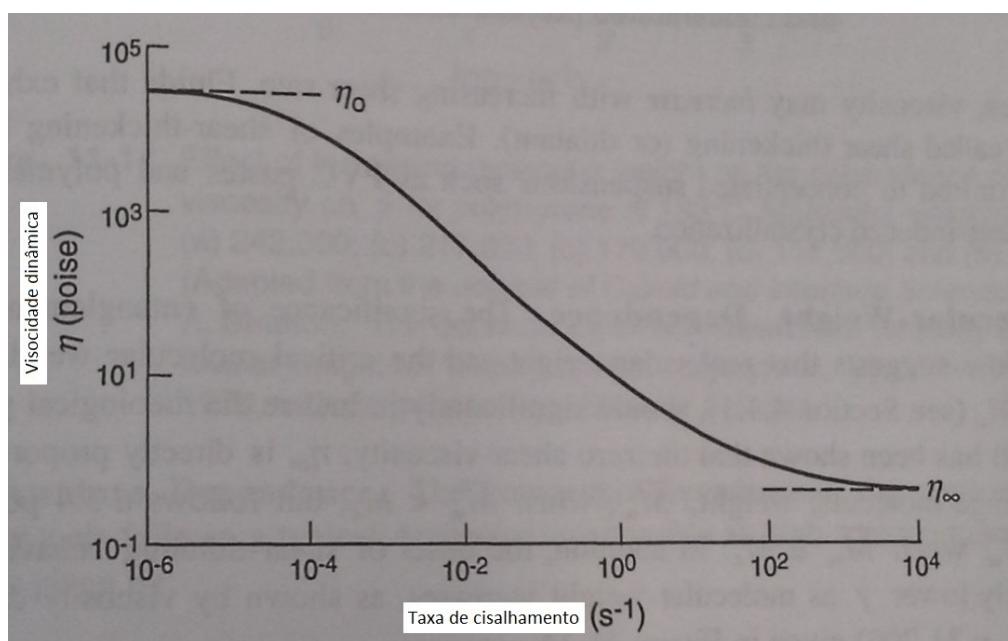


Figura 27. Modelo teórico para viscosidade em função da taxa de cisalhamento.

Fonte: Adaptado de Fried (2003)

A variação da viscosidade da Figura 27, é explicada por Fried (2003), pode ser fundamentada em função da organização das cadeias carbônicas. Quando a taxa de cisalhamento é pequena as cadeias carbônicas estão entrelaçadas entre si, dificultando a movimentação entre elas e formando o patamar de viscosidade η_0 . O aumento da taxa de cisalhamento causa o alinhamento paralelo gradual das cadeias carbônicas, reduzindo a viscosidade até o patamar constante η_∞ . Porém o segundo patamar é raramente visualizado para os materiais plásticos, pois a cadeia carbônica se rompe por degradação induzida por cisalhamento ou degradação mecânica.

As taxas de cisalhamento para processos de extrusão são usualmente delimitadas entre valores de 100 até 1000 s⁻¹, segundo Osswald (2011).

2.2.4 Degradação de materiais plásticos

Os materiais plásticos quando expostos ao meio ambiente sofrem a ação de agentes ambientais e/ou humanos, os quais acabam degradando o material de várias maneiras (FRIED, 2003).

- Degradação térmica;
- Degradação mecânica;
- Presença de oxigênio e ozônio;
- Ondas eletromagnéticas (radiações gama, radiação ultravioleta, luz visível, próximo infravermelho);
- Ondas de ultrassom;
- Umidade;
- Agentes químicos.

Os objetos quando expostos ao meio ambiente são sujeitos as seguintes intempéries (Fried, 2003).

- Radiação;
- Umidade;
- Variações de temperatura;
- Vento.

A degradação da molécula plástica acontece, de maneira geral, pela ruptura das ligações químicas na estrutura da molécula, resultando em uma molécula de cadeia carbônica de menor comprimento (SCAFFARO *et al.*, 2012). A redução do comprimento da molécula plástica, tem impactos sobre as propriedades mecânicas do material.

A reutilização de material reciclado pode ser feita com a adição de percentuais de material reciclado ao material virgem. O material plástico pode ser reciclado inúmeras vezes, e ser adicionado a qualquer quantidade com material virgem, porém suas propriedades mecânicas acabam sendo afetadas.

A degradação das propriedades mecânicas pode ser observada pela quantidade de energia passível de ser absorvida, neste caso sendo inversamente proporcional a quantidade de material reciclado acrescentado ao produto final, Figura 28.

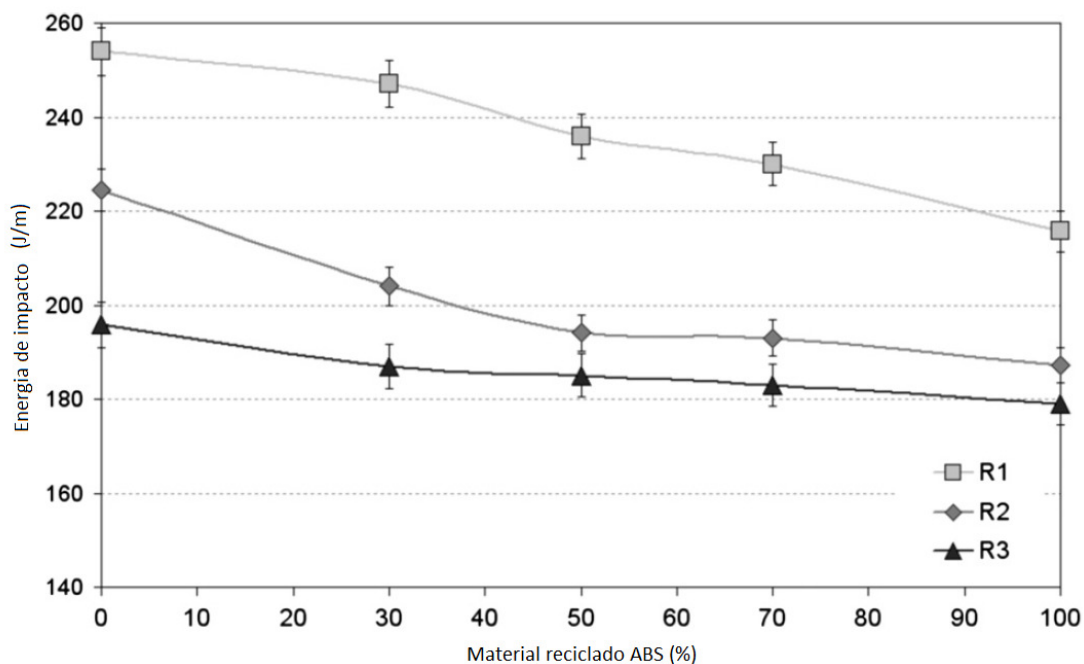


Figura 28. Experimento para avaliação de energia de impacto para material ABS com material reciclado a diferentes porcentagens.

Fonte: Adaptado de Scaffaro *et al.* (2012)

Inevitavelmente o material plástico acaba perdendo suas propriedades mecânicas com as inúmeras etapas de reciclagem. Quando as propriedades mecânicas não são relevantes para a peça final é usual a utilização de até 30% de material reciclado ao material virgem (DOMININGHAUS *et al.*, 2012)

2.3 Avaliação de potencial de mercado

Segundo Azevedo (2004) a pesquisa de mercado visa coletar informações do potencial consumidor, concorrentes e possíveis fornecedores acerca do produto ou serviço que se pretende comercializar para ter condições de tomar decisões empresariais e empreendedoras.

Normalmente o setor de marketing da empresa é responsável por fazer este estudo de potencial do mercado e utiliza de várias ferramentas para isso. Azevedo (2004) entende que a avaliação de potencial de mercado é realizada para tomadas de decisões estratégicas no negócio como:

- Expandir a área geográfica de atuação;
- Entrar em novos segmentos de mercado ou canais de distribuição;
- Lançar ou aperfeiçoar produtos e serviços;
- Dimensionar a equipe de vendas;

- Credenciar revendedores ou distribuidores;
- Escolher um ponto comercial;
- Definir qualidade e variedade dos produtos e serviços a ser comercializados;
- Definir os meios de divulgação mais adequados;
- Ajustar preços;
- Posicionar produtos e marcas;
- Iniciar um novo negócio (deve fazer parte do plano de negócios).

A nível de mercado consumidor os resultados destas pesquisas são utilizados para conhecer o comportamento dos consumidores, definir o público alvo, levantar as necessidades dos clientes, dificuldades ou expectativas que não estão sendo atendidas, satisfação, avaliar o resultado de ações de marketing, dimensionar a demanda por determinado produto ou serviço, testar produtos, etc.

Outro importante objetivo das pesquisas é o estudo dos concorrentes, quais características ou recursos os produtos concorrentes oferecem, quais são os pontos fracos, analisar o volume de mercado que estes concorrentes compartilham, verificar as patentes, o estado da arte, etc; relata Azevedo (2004). O benchmarking é uma ferramenta muito utilizada para este objetivo, Balm (1995) define o benchmarking como um processo contínuo de medir ou avaliar produtos, serviços e práticas com os concorrentes líderes no mercado.

Fundamental para o processo de avaliação do mercado são as informações referente aos potenciais fornecedores, uma vez que estes são peças fundamentais no ciclo do produto ou serviço e poderão até inviabilizar o negócio em determinadas condições segundo Azevedo (2004).

Azevedo (2004) relata que um erro muito comum é acreditar que apenas o estudo de mercado basta para viabilizar um negócio. A pesquisa de potencial de mercado é só uma parte do processo, a qual está inserida em um instrumento maior que deve ser realizado que é o plano de negócios pois este último contempla não somente informações sobre o mercado, mas também do modelo de negócios a ser implementado.

O benchmarking das extrusoras foi realizado, conforme Quadro 1, onde foi levantado diversos dados de fabricantes. Importante relatar que a patente de invenção

da tecnologia de extrusão de plástico já está em domínio público. Alguns fabricantes registraram o desenho industrial dos seus produtos e outros, que aliaram alguma melhoria no processo de extrusão, tem o registro de modelo de utilidade. Não foi encontrado nenhum fabricante deste tipo de equipamento no mercado nacional. Os preços variam entre R\$ 2.200,00 à R\$ 55.500,00 conforme recursos disponibilizados pela máquina. A máquina comercial Filastruder tem a maior competitividade econômica, porém sendo constituído por um kit para o consumidor montar em casa. Outros fabricantes concentram-se na China, Inglaterra e Estados Unidos.

ILUSTRAÇÃO						
Marca	FILASTRUDEUR	WELLZOOM	FILABOT	NOZTEK	NOZTEK (Xcalibur)	CHINA
Preço (R\$)	360	500	1399	895	6995	5387
Preço (R\$) – incluindo possíveis impostos de importação e câmbio	2208,96	3068,00	8984,26	7096,99	55467,55	33054,63
Capacidade de trabalho (kg/h)	0,154	(300- 650)mm/min	0,227	0,5		1
Dimensões (mm)	457 x 152 x 102	502 x 138 x 252	457x 180 x 229	300 x 300 x 800	1350 x 400 x 400	680 x 220 x 240
Material da carcaça	Alumínio 6061				Aço Inoxidável	
Peso (Kg)	60	150	500	13	55	100
Potência (W)					230	200
Rede Elétrica	Direto na rede 110/220 VAC 50/60 Hz	- Direto na rede 220 VAC 50/60 Hz	Direto na rede 1:0:220 VAC 50/60 Hz	- Direto na rede 220 VAC; - Caso outra tensão deverá ser solicitada.	Direto na rede 110/220 VAC 50/60 Hz	- Direto na rede 220 VAC 50/60 Hz
Disponibilidade de Matrizes (Noz) com diâmetros de filamentos variados	Sim, para 1,75mm e 3mm. Para outros tamanhos encomendar	Sim, para 1,75mm e 3mm.	Sim, para 1,75mm e 2,85mm. Para outros tamanhos encomendar	Sim, para 1,75mm e 3mm.	Sim, para 1,75mm e 3mm.	Sim, para 1,75mm e 3mm.
Tolerância do filamento (mm)	ABS (+-0,02) - PLA (+-0,03)	1,75 mm (+0,05) 3 mm (+-0,1)	PLA (+0,05)	(+ -0,04)		
Controle de velocidade	Sim via controlador PWM e Display para controle de amperagem	Sim via controlador PWM	Sim		Sim, baseado Arduino and a Raspberry Pi	
Resistência Elétrica: Potência (W) e quantidade	1 resistência instalada	2 resistências instalada		1 resistências instalada	3 resistências instalada	
Filtro de partículas sólidas	Opcional					
Montagem	Kit com relativa facilidade de montagem, requer chave de fenda, allen e alicate. Leva em torno de 2 a 3 horas para montar.	Não há necessidade	Não há necessidade	Não há necessidade	Não há necessidade	Não há necessidade
Outros comentários	Carcaça possui um cooler para resfriamento do controlador PID e do motor	- Cooler pós nozel; - Fabricante disponibiliza venda da bobinadeira e banheira	- Garantia de 1 ano; - Faixa de rotação do tpo entre 0 - 35 RPM - Fabricante disponibiliza venda da bobinadeira e trituradeira	- Garantia de 1 ano; - Fabricante disponibiliza venda da bobinadeira.	- Fuso, barril e outras peças de aço inoxidável; - Fuso de 3 estágios; - Extruda diversos termoplásticos e algumas ligas metálicas; - Torque 35 N.m a 35 RPM; - Garantia de 1 ano; - Fabricante disponibiliza venda da bobinadeira.	Conjunto completo: extrusora + banheira + bobinadeira.
Fonte	Filastruder (2016)	Wellzoom (2016)	Filabot (2016)	Noztek (2016)	Noztek (2016)	Aliexpress extrusora (2016)

Quadro 1. Benchmarking de máquinas extrusoras
Fonte: Autoria Própria com base nos sites de vendas Filastruder (2016), Wellzoom (2016), Filabot (2016), Noztek (2016) e Aliexpress extrusora (2016)

2.4 Considerações da fundamentação teórica

É possível observar uma oportunidade de pesquisa para o desenvolvimento da extrusora de filamento para impressão 3D, uma vez que foi levantada por meio de diferentes fontes, a possível viabilidade do projeto. Esta exequibilidade está embasada nos dados encontrados em literatura especializada para construção deste tipo de máquina e no benchmarking. O levantamento do estado da arte possibilitou extrair um conjunto de parâmetros e requisitos técnicos que fabricantes estão utilizando atualmente em seus produtos que embasarão a tomadas de decisões para o projeto. Também foi possível verificar o cenário em que este produto é desenvolvido globalmente, e a importância ou expectativas sobre a técnica de impressão 3D e toda a cadeia produtiva envolvida no processo.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do projeto será estruturado com base em duas metodologias, sendo uma voltada para o processo de construção da máquina extrusora e a outra faz uso da metodologia correlacional para comparar o projeto elaborado com a fundamentação teórica e avaliar as relações entre as variáveis.

3.1 Descrição da Metodologia

Na Figura 29 é ilustrado o fluxograma com os passos das atividades a serem desenvolvidas, onde as etapas identificadas de 1 a 3 são referentes ao TCC1. Após a aprovação no TCC1, foi dada sequência as atividades de modelamento e busca de fornecedores, sempre objetivando a simplicidade e menores preços de componentes.

As atividades identificadas por 4a até 7a são referentes a **metodologia da pesquisa correlacional** (SAMPIERI *et al.*, 2013). Baseado na literatura deve-se inferir e avaliar as relações entre variáveis de projeto e comparar com o projeto físico que será desenvolvido. A etapa 6a visa, comparar o projeto desenvolvido com a fundamentação teórica no intuito de validar o projeto. Terminando com a etapa 7a, momento que serão formuladas as devidas conclusões.

As atividades de construção e montagem do equipamento, identificadas por 4b até 12b, adotarão a **metodologia Scrum** do autor Sutherland (2014), cujo objetivo é desenvolver um protótipo o mais rápido possível para a avaliação do cliente. A máquina será desenvolvida na etapa 5b, sempre observando as características da fundamentação teórica e fornecedores com materiais acessíveis.

As etapas 7b e 8b correspondem a comprar os componentes dos fornecedores e iniciar as atividades de fabricação e montagem, as quais demandarão de máquinas convencionais de usinagem para a fabricação.

Nas etapas 9b, 10b e 11b ocorre o processo de teste da máquina para verificar o seu funcionamento, e o produto produzido pela máquina. Caso problemas sejam verificados, os mesmos devem ser avaliados e sanados. Novamente ocorre a finalização com as conclusões do projeto construtivo.

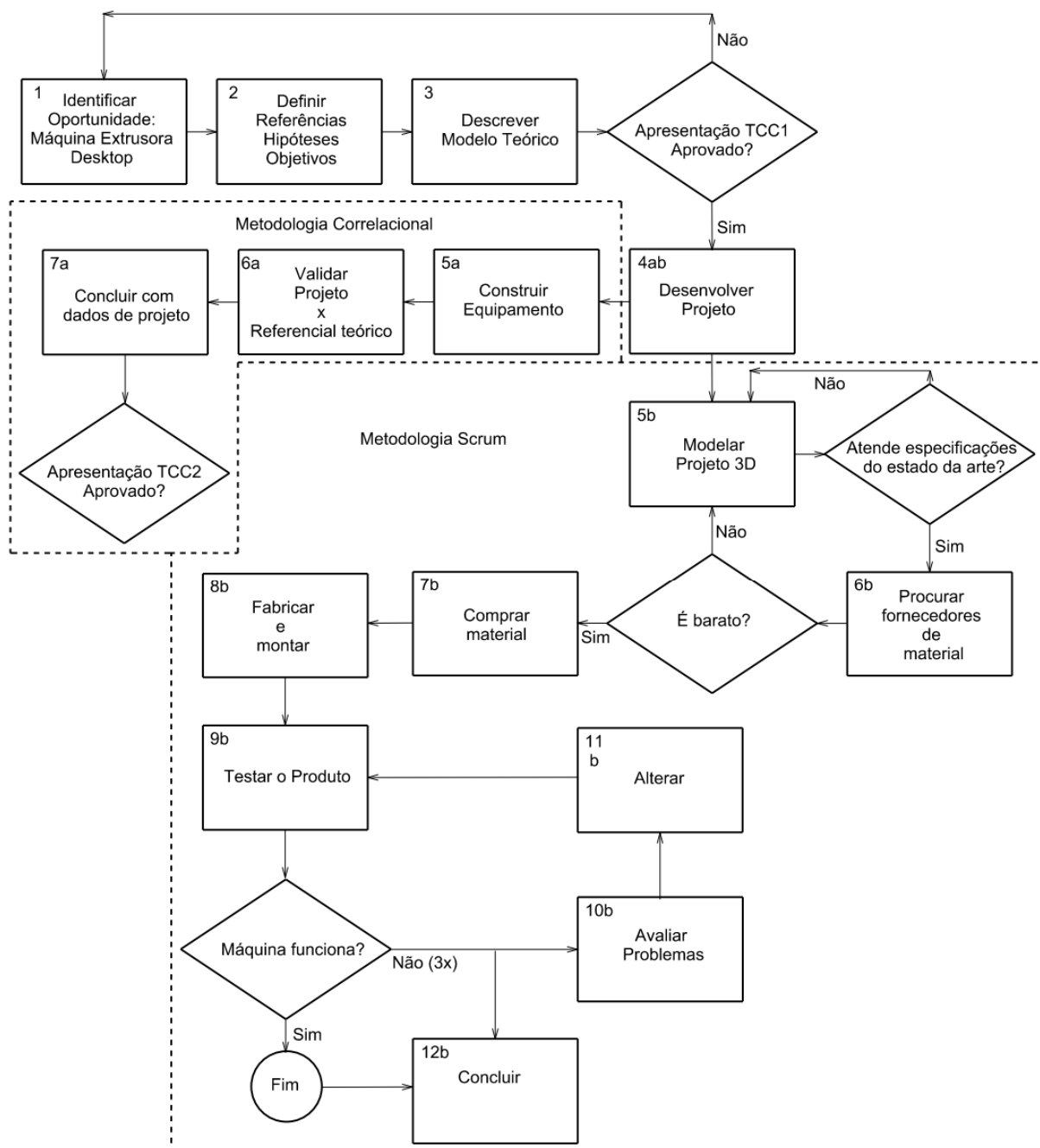


Figura 29. Fluxograma metodológico para o desenvolvimento.

Fonte: Autoria própria²

3.1.1 Metodologia Scrum

A metodologia Scrum foi aprimorada aplicando-a no ramo de desenvolvimento de software, mas atualmente pode ser utilizada para qualquer projeto nas mais diversas áreas de aplicação. Recomenda-se que as equipes de trabalho sejam de no

² As Figuras, Tabelas e Quadros sem indicação de fonte são de autoria própria.

máximo 9 pessoas, as quais são responsáveis pelo desenvolvimento de todo o trabalho, atuando nas atividades de uma maneira multifuncional. O trabalho tem duração de 1 a 4 semanas, e ao final de cada etapa de trabalho (chamado de Sprint) a equipe deve ser capaz de entregar resultados tangíveis e/ou funcionais para o cliente.

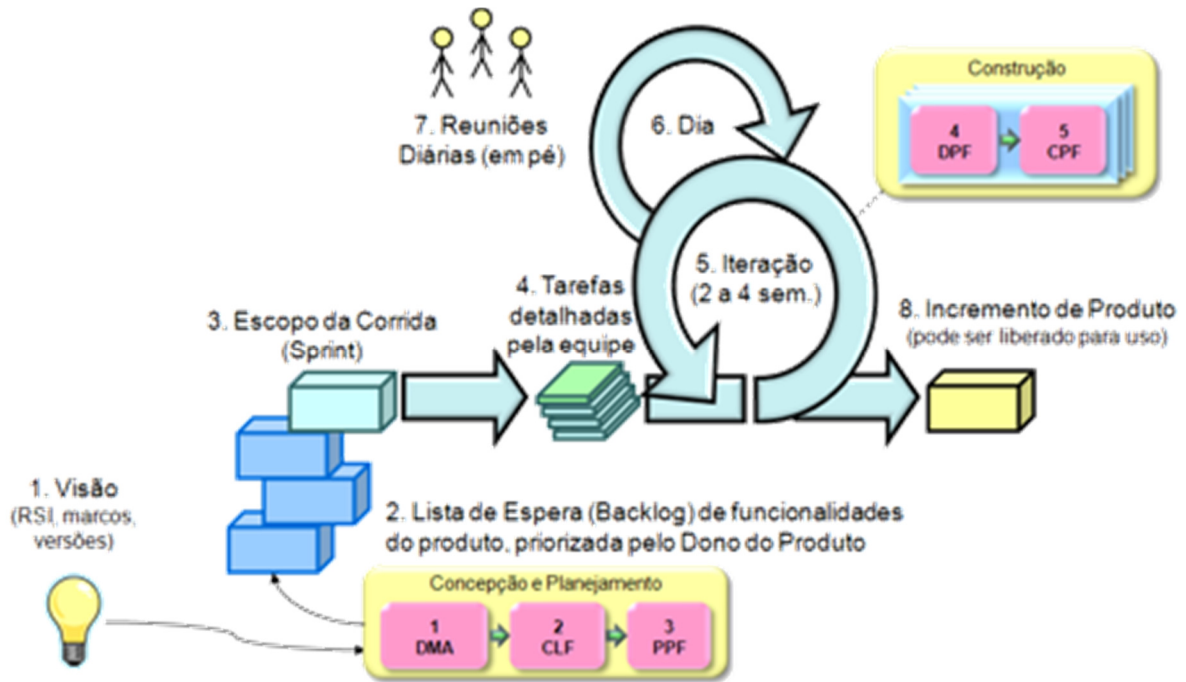


Figura 30. Organização da metodologia Scrum.
 Fonte: Heptagon – Tecnologia da informação (2015)

Os desenvolvedores do projeto definem quais são as características necessárias para o produto. A equipe de trabalho define as atividades essenciais para o desenvolvimento do primeiro Sprint do projeto, caracterizado pelo produto mínimo viável (Sutherland, 2014). O produto mínimo viável consiste em escolher 20% das características mais importantes do produto impostas pelo dono do produto nas necessidades do produto, e desenvolver a primeira versão para o consumidor que irá atender 80% das expectativas do cliente. Terminando o primeiro Sprint é possível juntamente com o dono do produto avaliar se o produto atende os seus desejos iniciais e se o consumidor final irá gostar do trabalho já realizado até o momento. Com a avaliação no final do Sprint é possível agir ativamente para direcionar o trabalho para atingir os objetivos impostos inicialmente ou reformulá-los. Um gestor irá acompanhar a equipe no desenvolvimento das atividades, identificando e eliminando os possíveis obstáculos para o desenvolvimento das atividades.

As atividades a serem desenvolvidas em um Sprint devem ser identificadas em uma tabela de colunas, classificadas nos grupos atividades a fazer, em andamento e feitas.

O Quadro 2 ilustra as atividades que foram desenvolvidas durante o projeto.

Lista de atividades	Em Andamento	Concluídas
Desenvolver do Projeto em CAD		X
Definir, comprar e construir o fuso		X
Definir, comprar e construir o canhão		X
Definir, comprar e construir o funil		X
Definir e comprar o motoredutor elétrico		X
Definir, comprar e construir acoplamento motor fuso e encosto do rolamento		X
Definir e comprar o rolamento axial		X
Definir e comprar o sistema de controle de temperatura		X
Definir e comprar o sistema de aquecimento		X
Definir, comprar construir acoplamento geral		X
Montar itens comprados e manufaturados		X

Quadro 2. Relação de atividades a serem desenvolvidas pela metodologia Scrum para execução do projeto da extrusora.

3.1.2 Pesquisa correlacional

A pesquisa correlacional objetiva interpretar qual é o grau de relação entre variáveis de um problema (Sampieri *et al.* 2013).

No caso da extrusora pode-se utilizar como exemplo a pergunta: Qual seria a relação entre a rotação do fuso e a vazão mássica? Esta resposta é visível na Figura 16 (b) onde a relação é diretamente proporcional. Para o desenvolvimento do projeto outras perguntas com intenção correlacional surgirão e sua relação deverá ser investigada.

Cada componente da extrusora tem uma função, características técnicas, as quais são específicas e podem ter influência uma sobre as outras.

3.2 Justificativa da Metodologia

A metodologia Scrum tem como objetivo fazer uso da criatividade e capacidade de improvisação de uma equipe para construção do produto, sem a imposição de regras rígidas para a execução de atividades (Sutherland, 2014). Como a equipe é constituída de dois integrantes, muitas das atividades deverão ser executadas mesmo não tendo o profundo conhecimento sobre determinada área, mas um poderá ajudar o outro nos assuntos de dificuldade.

Para conhecer o funcionamento de um equipamento com vários componentes, será necessário a identificação da influência das variáveis sobre as outras, visando explicar se existe alguma dependência direta ou inversa ou em alguns casos a identificação de dependência espúria (SAMPIERI *et al.*, 2013).

3.3 Produto do Projeto

O projeto apresentado se propõe a desenvolver e construir um produto mínimo viável de máquina extrusora de filamento para impressão 3D para avaliação do cliente.

4 DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento do projeto foram utilizadas as dependências da universidade. A construção do protótipo demandou de processos de fabricação como usinagem e soldagem e foi dada preferência para a fabricação das peças dentro da instituição de ensino, nos casos que isso não foi possível, o mesmo foi terceirizado.

4.1 Necessidades do projeto

Primeiramente foram definidos alguns requisitos de projeto, embasados no estado da arte e benchmarking, os quais direcionaram o desenvolvimento do projeto, sendo estes:

- A máquina deve ser pequena, abordando os diâmetros inferiores a 20 mm como disposto na Tabela 2;
- Maior quantidade de produtos padronizados;
- A potência elétrica total 360W;
- Vazão mássica de material termoplástico de até 1 kg/h;
- Dimensões 60x30x40 cm;
- Peso máximo até 30 kg (Correios, 2016);
- Máquina tipo "ligar e usar";
- Material do fuso, canhão, funil, etc. de aço carbono;
- Motor de corrente contínua controlado por PWM em malha aberta;
- Resistências elétricas controladas por controlador PID;
- Diâmetro do perfil do molde 1,75 mm;
- Possibilitar o uso de material ABS virgem e reciclado;
- Usar a maior quantidade de peças padronizadas, as quais são comercializadas no mercado;
- Seguir exigências dispostas em normas regulamentadoras, de forma a garantir a segurança do equipamento.

4.2 Estrutura do desenvolvimento

Para o desenvolvimento do projeto foi necessário dividir o projeto em quatro etapas, sendo estas:

- Aspectos de projeto;
- Estrutura de protótipo;
- Fabricação;
- Procedimento.

Os aspectos do projeto objetivaram a aplicação dos conceitos de engenharia aprendidos nas diversas disciplinas do curso, fazendo uso de hipóteses de simplificação, características desejadas do produto, fornecedores de materiais e componentes.

A estrutura de protótipo levou em conta quantos itens serão necessários fabricar e/comprar, organizando-os em uma lista de material.

A fabricação do produto é outro passo para o desenvolvimento da máquina, relatando quais foram os processos necessários.

Após a construção da máquina foram realizados testes, para observar e comprovar o funcionamento do equipamento.

4.2.1 Aspectos de projeto

Nesta parte conceitos estudados no curso de engenharia mecânica foram abordados para constituir o embasamento físico e técnico para o protótipo. Conhecimentos na área térmica, elétrica, eletrônica, mecânica dos sólidos, elementos de máquinas e simplificações foram descritas de forma a guiar a construção do projeto.

4.2.1.1 Potência elétrica de aquecimento

Para o dimensionamento da potência do sistema de aquecimento será assumido uma vazão mássica de material plástico ABS totalizando 1 kg/h, cujo valor é encontrado como sendo máximo entre as máquinas abordadas no benchmarking do Quadro 1. O material plástico é transportado pelo fuso, elevando gradualmente da temperatura ambiente de 25°C até a temperatura de 240°C.

Utilizando a Equação 2, e assumindo as considerações abaixo, tem-se Equação 5:

- O trabalho do motor sobre o volume de controle será considerado zero;

- As fronteiras do volume de controle da Figura 8 serão consideradas adiabáticas.

$$\dot{Q}_{\text{aquecimento}} = \dot{m}(h_{\text{plastificação}} - h_{\text{ambiente}}) \quad (5)$$

As considerações assumidas são conservadoras, pelo fato de desconsiderar o efeito do trabalho do motor no processo de plastificação, levando ao dimensionamento acima da capacidade necessária, mas é uma forma segura para estimar a potência elétrica máxima para o funcionamento. Considerando os valores das entalpias já mostrados na Figura 9, sendo $h_{\text{ambiente}}(T_{\text{ambiente}}=25^{\circ}\text{C})=0 \text{ kJkg}^{-1}$, $h_{\text{plastificação}}(T_{\text{plastificação}}=240^{\circ}\text{C})= 381,21 \text{ kJkg}^{-1}$ e a vazão mássica citada, tem-se uma potência elétrica de $\dot{Q}_{\text{aquecimento}} = 105,89 \text{ W}$.

4.2.1.2 Estimando o perfil de temperatura e a taxa de calor perdido para o ambiente

Parte da geração de calor para o aquecimento do material plástico é provido pela resistência elétrica do tipo coleira, cujo formato tubular envolve o canhão, onde ela é fixada. Para determinar o perfil de temperatura existente entre a resistência elétrica e o material plástico é necessário a aplicação de conceitos de transferência de calor, considerações de simplificação e a geometria exposta na Figura 31 com os seus materiais.

- A resistência elétrica tem um perfil de temperatura constante;
- Será considerado um contato perfeito entre o revestimento da resistência elétrica com o canhão e o isolamento térmico;
- A temperatura na parede interna do canhão não deve ser superior a temperatura de plastificação, neste caso $T_{\text{plastificação}}=240 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- O processo transcorre em regime permanente;
- Todo o calor no sistema é conduzido radialmente.

A escolha do tubo para o fuso é baseada a partir da Tabela 2, onde são ilustrados os possíveis diâmetros dos fusos, os quais variam de 15 até 610 mm, objetivando uma construção pequena, optou-se em delimitar o diâmetro interno do canhão entre 15 e 20 mm e uma maior espessura possível. Analisando o catálogo de tubos da empresa Aço ideal (2016) é possível observar uma versão comercial, cujo diâmetro externo é 26,7 mm e espessura de 3,91mm. As resistências elétricas foram compradas do fornecedor Aliexpress resistências (2016) e o isolamento foi consultado o fornecedor

Ibar – Biolã – Lã de Rocha (2013) para dados técnicos do isolamento lã de rocha. Com as informações dos fornecedores citados é possível ilustrar o perfil transversal na Figura 31, o qual é constituído pelo fuso e o plástico no centro, o canhão onde as resistências são fixadas o isolante térmico.

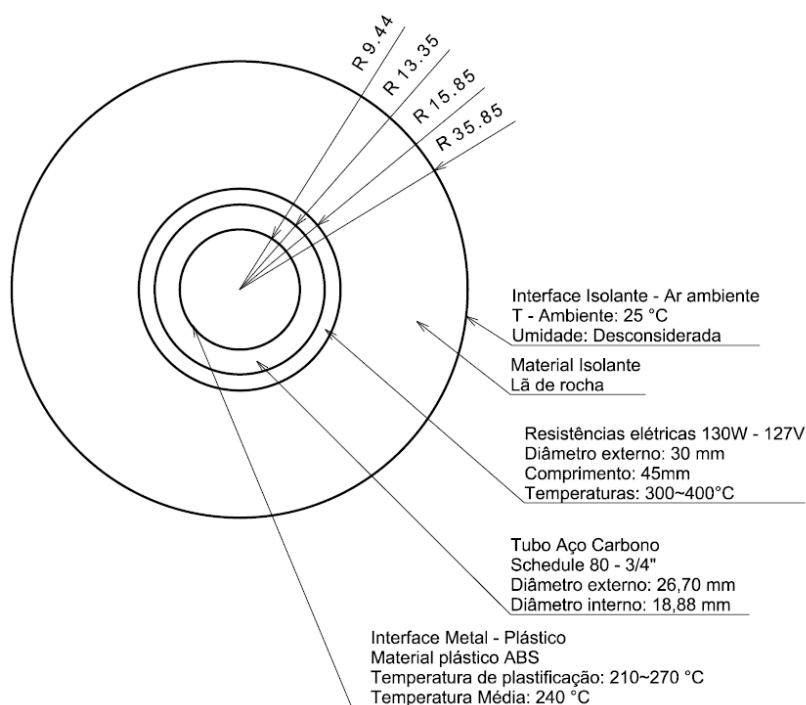


Figura 31. Perfil transversal do fuso, plástico, canhão, resistência elétrica, isolante e ambiente.
Fonte: Autoria própria com base no catálogo da Aço ideal (2016), Ibar – Biolã – Lã de Rocha (2013) e Aliexpress resistências (2016)

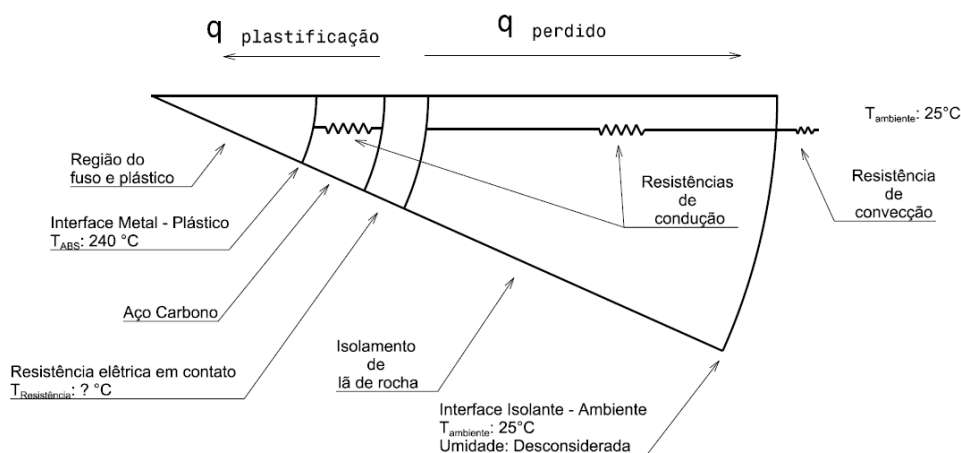


Figura 32. Ilustração do perfil e resistências de condução dos materiais.
Fonte: Autoria própria com base no Incropera *et al.* (2008)

Com o perfil de materiais é possível analisar o fluxo de energia, conforme Figura 32, onde parte da energia é conduzida para o material plástico e outra fração é perdida para o ambiente.

Será considerado que o $\dot{Q}_{\text{aquecimento}}$ calculado através da análise discreta do volume de controle tem o mesmo valor que a taxa de transferência de calor, a qual é direcionada para o plástico, neste caso, $q_{\text{plastificação}} = \dot{Q}_{\text{aquecimento}}$.

A taxa de transferência de calor para a plastificação é calculada conforme a Equação 6 (INCROPERA *et al.*, 2008).

$$q_{\text{plastificação}} = \frac{T_{\text{resistência}} - T_{\text{plastificação}}}{R_{t,\text{cond}}} \quad (6)$$

As resistências de condução para sistemas cilíndricos são calculadas de acordo com Equação 7 (INCROPERA *et al.*, 2008).

$$R_{t,\text{cond}} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{externo}}}{r_{\text{interno}}}\right)}{2\pi L_{\text{resistência}} k_{\text{aço carbono}}} \quad (7)$$

Sendo o valor de $r_{\text{interno}}=0,00944\text{m}$, $r_{\text{externo}}=0,01335\text{m}$ e o comprimento da resistência elétrica igual a $L_{\text{resistência}}=0,030\text{m}$. Considerando que a condutividade térmica do aço carbono para a temperatura de 240°C é de $k_{\text{aço carbono}}=55,6\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (INCROPERA *et al.*, 2008). Substituindo os valores na Equação 7, tem-se uma resistência de condução de $R_{t,\text{cond}} = 0,03307 \text{KW}^{-1}$.

Substituindo os valores de $q_{\text{plastificação}}$, $T_{\text{plastificação}}$ e a resistência de condução na Equação 6, tem-se a temperatura da resistência elétrica de $243,5^{\circ}\text{C}$, admitindo que a temperatura da resistência será constante para todo seu corpo.

Sabendo a temperatura da resistência é possível calcular a taxa de perda de energia para o ambiente externo. Para tanto, é necessário calcular a resistência de condução para o isolamento térmico (Equação 8) e a resistência de convecção na superfície do isolamento (Equação 9) e (INCROPERA *et al.*, 2008).

$$R_{t,\text{cond}} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{externo}}}{r_{\text{interno}}}\right)}{2\pi L_{\text{resistência}} k_{\text{lã de rocha}}} \quad (8)$$

$$R_{t,\text{conv}} = \frac{1}{2\pi r_{\text{externo}} L_{\text{resistência}} h_{\text{natural}}} \quad (9)$$

Admitindo que os valores para resistência de condução $r_{\text{externo}}=0,03585\text{m}$, $r_{\text{interno}}=0,01585\text{m}$, $L_{\text{resistência}}=0,030\text{m}$ e $k_{\text{lã de rocha}}=0,065\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$, sendo o valor da condutividade térmica obtida do fornecedor Ibar – Biolã – Lã de Rocha (2013). Para a resistência de convecção será considerado o $r_{\text{externo}}=0,03585\text{m}$, $L=0,030\text{m}$ e $h_{\text{natural}}=13,5\text{Wm}^{-2}\text{k}^{-1}$, sendo o valor do coeficiente convectivo natural um valor médio da literatura Incropera, *et al.* (2008). Aplicando os valores nas respectivas Equações 11 e 12 têm-se os resultados, $R_{t,\text{cond}}=66,61\text{KW}^{-1}$ e $R_{t,\text{conv}}=10,96\text{KW}^{-1}$.

A Equação 9 pode ser adaptada, resultando na Equação 10.

$$q_{\text{perdido}} = \frac{T_{\text{resistência}} - T_{\text{ambiente}}}{R_{t,\text{cond}} + R_{t,\text{conv}}} \quad (10)$$

Assumindo a $T_{\text{ambiente}}= 25^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{resistência}}=243,5^{\circ}\text{C}$ e aplicando as resistências equivalentes na Equação 10, tem-se que q_{perdido} resulta em $2,81\text{W}$.

Sabendo a taxa de transferência e calor para o ambiente externo, a resistência de condução do isolamento e a temperatura da resistência é possível calcular a temperatura da superfície externa do isolamento.

$$q_{\text{perdido}} = \frac{T_{\text{resistência}} - T_{\text{superfície do isolante}}}{R_{t,\text{cond}}} \quad (11)$$

Aplicando os valores já calculados na Equação 11, obtém-se um valor de $T_{\text{superfície do isolamento}}= 55,87^{\circ}\text{C}$.

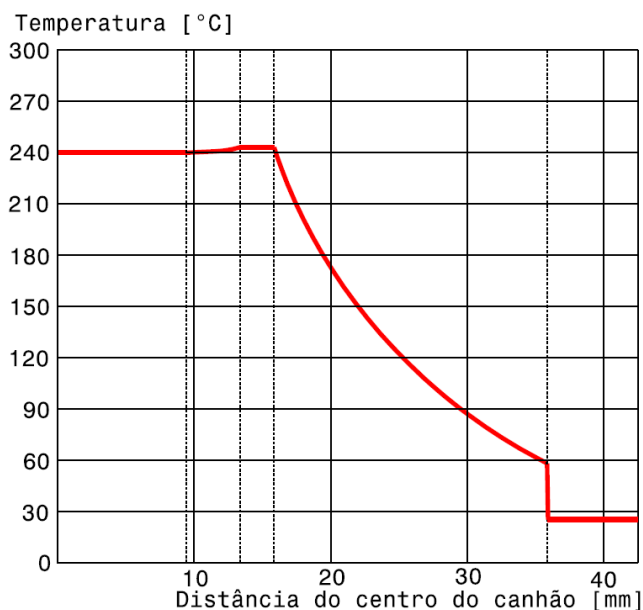


Figura 33. Perfil de temperatura radial do canhão com isolamento.

Esboçando as temperaturas calculadas anteriormente é possível observar o perfil ilustrado na Figura 33.

O perfil de temperatura de condução em uma parede cilíndrica, segue um perfil logarítmico (INCROPERA *et al.*, 2008). O perfil logarítmico na Figura 33 foi apenas ilustrado, não sendo calculado para todos os pontos da curva.

Caso se opte por não isolar as resistências elétricas, tem-se uma superfície aquecida a 243,5°C, o que impõe riscos de queimaduras ao usuário, além de perder energia para o ambiente reduzindo a eficiência energética do equipamento.

Resumindo, para uma máquina com uma vazão de 1 kg \cdot h⁻¹, é possível afirmar através de cálculos uma potência de 106 W para a plastificação do material e uma taxa de perda de calor para o ambiente externo de 2,81 W, se o canhão for isolado. É necessário lembrar que a energia para plastificação do material plástico é fornecida parcialmente pelo motor elétrico e pelo sistema de aquecimento.

Para suprir a necessidade energética estipulada é necessário fazer uso de componentes elétricos para fazer o aquecimento e movimentação do fuso, os quais são alimentados pela rede elétrica, conforme será abordado nos próximos tópicos.

4.2.1.3 Diagrama elétrico geral

O projeto elétrico consiste em alimentar 3 dispositivos, sendo estes, o controlador PID de temperatura, o motor elétrico e as resistências elétricas, conforme Figura 34.

Para a construção do diagrama elétrico foram analisados os catálogos dos fornecedores do motor elétrico Bosch I-Business (2016) e do kit do controlador de temperatura Banggood (2016). As bitolas dos fios foram dimensionadas conforme norma ABNT NBR 5410 (2008), recomendada para instalações elétricas de baixa tensão.

Na literatura é usual a divisão do canhão em zonas de aquecimento, as quais tem uma progressão da temperatura, conforme ilustrada na Figura 10, mas como o projeto é de baixo custo será adotado apenas uma zona de aquecimento com um controlador de temperatura.

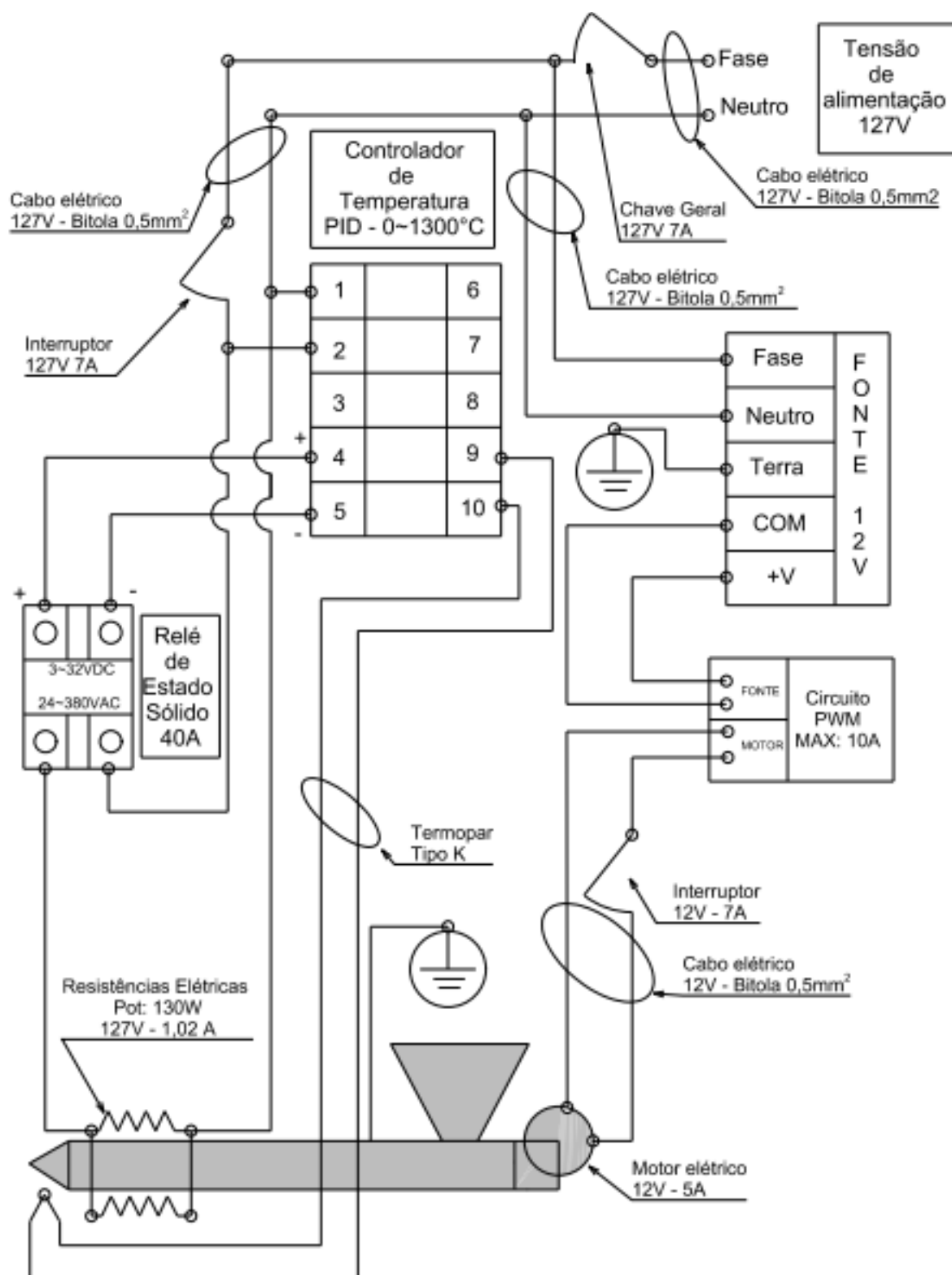


Figura 34. Diagrama elétrico da extrusora.

Fonte: Autoria própria com base ABNT NBR 5410 (2008), Bosch I-Business (2016), Banggood (2016) e Banggood (2017).

A tensão da rede, neste caso 127 Volts, alimenta a fonte, que tem a função de fornecer uma tensão de 12 Volts para o motor elétrico de corrente contínua, o qual é controlado por uma chave liga-desliga e um circuito PWM. O controlador de temperatura e a resistência elétrica também são alimentados pela tensão de rede, e controlados pela chave liga-desliga. O termopar é fixado na região do molde e o controlador analisa a diferença entre o valor medido e o valor desejado, quando o valor medido é inferior ao valor desejado, o controlador ativa um sinal de baixa tensão para o relé de estado sólido, o qual fecha o circuito das resistências elétricas, possibilitando o aquecimento do canhão.

4.2.1.4 Diagrama de controle de temperatura aplicado

Na Figura 35 pode-se verificar o fluxograma do controlador PID no controle da temperatura. Para a zona de aquecimento é estabelecida uma referência, o sensor do termopar realiza a leitura da temperatura que a planta (canhão) se encontra em determinado momento e manda um sinal elétrico para o controlador. Este por sua vez irá estabelecer o erro $e(t)$ do ciclo comparando o sinal medido com a referência (setpoint).

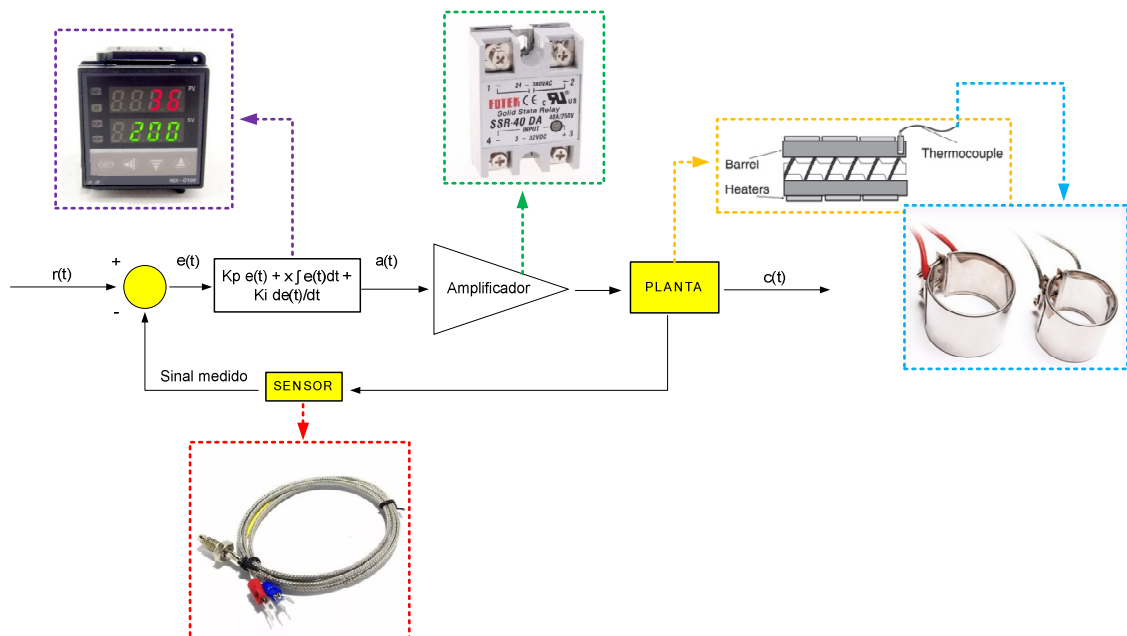


Figura 35. Diagrama do controle PID de temperatura da extrusora

Fonte: Autoria própria com base Aliexpress (2016), Banggood (2016) e Giles Jr. *et al.* (2005).

Com base no modelo matemático PID o controlador produzirá um sinal de saída $a(t)$ que é enviado ao relé de estado sólido, que por sua vez amplifica o sinal de saída

do controle e envia uma resposta para os atuadores (resistências elétrica) que atua por variação de tensão aumentando ou diminuindo a temperatura através de calor produzido por efeito joule.

4.2.1.5 Diagrama de controle de velocidade através PWM

Para o controle de velocidade do motor CC selecionado optou-se pelo projeto de modulação por largura de pulso (PWM) e transistor de Efeito de Campo (MOSFET). Esta opção foi em embasada pelo fato de haver menores perdas de torque (em baixa velocidade) e potência no circuito de trabalho neste tipo de aplicação conforme relata o Instituto Newton C. Braga (2017).

Instituto Newton C. Braga (2017) exemplifica a aplicação dos circuitos integrados 555 para geração da onda no processo de PWM. Sendo assim optou-se por este tipo de componente por ser barato e simples de trabalhar. Para maiores informações a respeito do que é PWM e circuitos integrados consultar fonte na referência bibliográfica.

Dimensionamento:

Através do catálogo técnico do circuito integrado CI555 ALLDATASHEET (2017), encontra-se as seguintes fórmulas para o dimensionamento do circuito no modo estável:

$$f = \frac{1,44}{(R_a + 2R_b) * C} \quad (12)$$

Onde:

f = frequência em Hertz;

R_a e R_b = Resistências em Ohm;

C = Capacitância em Faraday;

Isolando R_b:

$$R_b = \frac{1,44}{2 * f * C} - \frac{R_a}{2} \quad (13)$$

Dados de projeto:

- f = 1000 Hz ; frequência alta para se ter um controle mais suave;

- $R_a = 1 \text{ K}\Omega$; valor mínimo recomendado para não queimar o CI 555 segundo o autor Pinto (2011);
- $C = 10 \text{ nF}$; valor usual de capacitância para este tipo de aplicação conforme o autor Pinto (2011).

Assim:

$$R_b = 71,5 \text{ K}\Omega;$$

A Figura 36 ilustra o esquema eletrônico projetado para o controle de velocidade do motor com base nos dados calculados acima e catálogo técnico dos componentes eletrônicos.

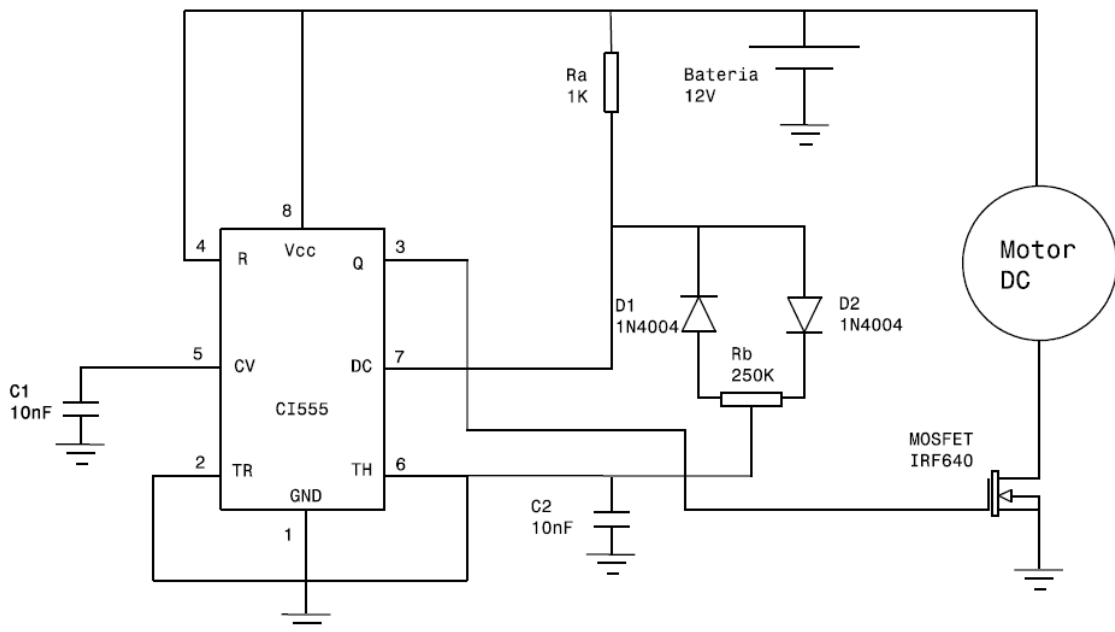


Figura 36. Circuito Eletrônico do controle de velocidade do Motor CC

Fonte: Autoria própria com base em PINTO (2011) e catálogo técnico ALLDATASHEET (2017)

Após a simulação do circuito no computador foi realizada a construção de um protótipo em matriz de contatos. O circuito funcionou conforme esperado, porém houve uma excessiva formação de calor no transistor oriundo da falta de aletas para dissipação de calor.

Devido aos problemas de custo, geração de calor excessivo, robustez e confiabilidade do protótipo optou-se por seleccionar um controlador PWM comercial com base nos seguintes dados:

- Tensão nominal do motor DC = 12 V;
- Corrente nominal do motor DC = 4.5 A;
- Ciclo de trabalho = (0 - 100) % (Requisito de projeto);

A figura 37 ilustra o controlador (Físico) selecionado com seus principais parâmetros.

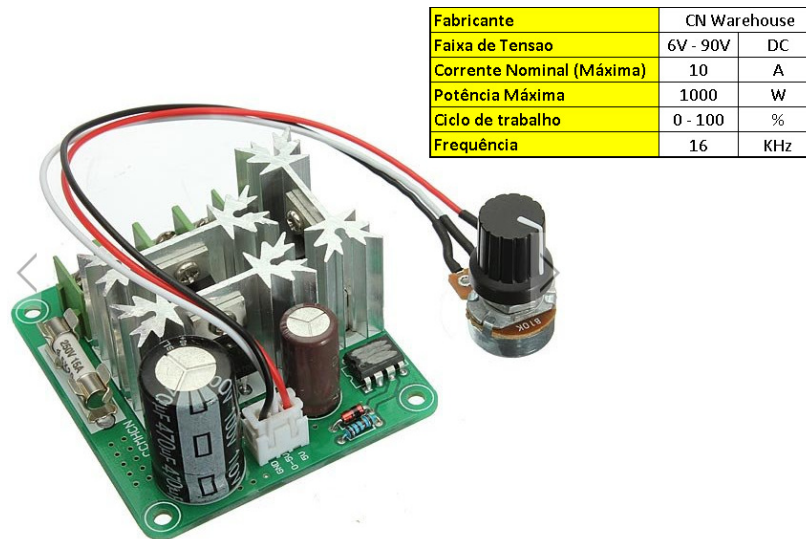


Figura 37. Controlador PWM para o motor CC

Fonte: Adaptado, ilustração disponível pelo fabricante no site comercial BANGGOOD (2017).

Finalizando os conceitos técnicos envolvendo conceitos elétricos e eletrônicos faz-se necessário analisar conceitos de resistência mecânica.

4.2.1.6 Análise Estrutural

A análise estrutural ficou restringida a dimensionar dois componentes submetidos a cargas consideráveis, a saber:

Dimensionamento do Canhão

Conforme mencionado anteriormente, o canhão é considerado um vaso de pressão projetado para uma pressão interna de 68,9 MPa.

Hibbeler (2004) define duas tensões principais atuando em vasos de pressão cilíndricos:

$$\sigma_c = \frac{p * D}{2 * t} \quad (14)$$

e

$$\sigma_a = \frac{p * D}{4 * t} \quad (15)$$

onde:

σ_c = Tensão Circunferencial ;

σ_a = Tensão Axial;

p = Pressão interna no vaso;

D = Diâmetro interno do vaso;

t = espessura do vaso;

Para o dimensionamento do canhão foi considerado as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Material é isotrópico, apresentando as mesmas propriedades em todas as direções analisadas;
- Material é homogêneo, ou seja, possui as mesmas propriedades físico-químicas em toda sua extensão;
- Material é coeso, ou seja, completamente preenchido e livre de defeitos como inclusões e porosidades interna;
- Fenômenos da fadiga desconsiderados;
- Efeitos do gradiente de temperatura nas propriedades mecânicas serão desconsideradas;
- Serão desconsiderados os possíveis defeitos de solda no canhão;

Uma vez definida a pressão interna máxima, a tensão de escoamento do material e o diâmetro do vaso (Tubo Schedule 80 - 3/4" x 3,91 mm), basta isolar a incógnita t (espessura) da Equação 14:

$$t_{min} = \frac{p * D}{2 * \sigma_c} = \frac{68,9 * 18,88}{2 * 310} = 2,09 \text{ mm}$$

A espessura mínima (tmin) foi dimensionada pela fórmula da tensão circunferencial, pois essa é o dobro da tensão axial, ou seja, é a tensão crítica no projeto.

O tubo selecionado possui uma espessura de 3,91 mm, sendo assim:

$$\sigma_c = \frac{68,9 * 18,88}{2 * 3,91} = 166,34 \text{ MPa}$$

Logo tem-se um coeficiente de segurança de:

$$C_s = \frac{310}{166,34} = 1,86$$

Dimensionamento do Rolamento

Primeiramente deve-se escolher o tipo apropriado de rolamento em função da distribuição de cargas no mancal. Assumindo que a pressão interna exerça carga axial no rolamento, escolheu-se para o projeto um rolamento axial de esferas simples.

Segundo Norton (2013) após o tipo de mancal apropriado tenha sido estabelecido pode-se selecionar o mancal através dos seguintes parâmetros:

- Carga estática e Dinâmica;
- Vida desejada em fadiga;

Norton (2013) define a seguinte expressão para vida em fadiga:

$$L_p = K_r * \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (16)$$

onde:

L_p = Vida em fadiga expressa em milhões de revoluções;

K_r = Fator de confiabilidade;

C = Carga dinâmica básica;

P = Carga constante aplicada (Força axial);

Como requisitos de projeto assumiu-se:

- Confiabilidade = 95%;
- Vida em fadiga = 1000 h;
- Coeficiente de segurança ao carregamento estático ≥ 2 ;

Sabendo que:

- Diâmetro do eixo (ponta do fuso) = 10 mm;

- Rotação média em operação = 45 rpm;

Pode-se calcular a força axial através da equação 15:

$$\sigma_a = \frac{Fa}{A} = \frac{p * D}{4 * t} = \frac{68,9 * 18,88}{4 * 3,91} = 83,17 \text{ MPa}$$

então:

$$Fa = 3,14 * ((De^2 - Di^2)/4) * \sigma_a = 3,14 * ((26,7^2 - 18,88^2)/4) * 83,17 = 23,28 \text{ kN}$$

Segundo Norton (2013) para uma confiabilidade de 95% tem-se:

Kr = 0,62 e Probabilidade de falha = 5% (Lp = L5);

Sendo que:

$$L_p = 1000h * 45 \frac{\text{rot}}{\text{min}} * 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} = 2,7 \text{ milhões de revoluções}$$

Isolando a carga dinâmica e tem-se:

$$C = P * \left(\frac{L_p}{K_r}\right)^{\frac{1}{3}} = 23280 * \left(\frac{2,7}{0,62}\right)^{\frac{1}{3}} = 38,01 \text{ kN}$$

Tabela 5. Catálogo de rolamentos axiais de esferas simples

Fonte: Catálogo eletrônico SKF (2017).

Dimensões principais			Classificações de carga básica		Limite de carga de fadiga	Classificações de velocidade		Designações	
d	D	H	H ₁	C		C ₀	Velocidade de referência	Velocidade-limite	Rolamento
mm				kN		kN	r/min		
▲	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
10	24	9		9.95	15.3	0.56	9500	13000	51100

A Tabela 4 ilustra o catálogo de rolamentos axiais disponíveis pelo fornecedor com os respectivos parâmetros. Porém verifica-se que não se encontrou uma carga dinâmica no valor calculado (C = 38,01 kN) para um diâmetro do eixo de 10 mm. Como decisão de engenharia uma vez que a força axial foi calculada com base em uma pressão máxima utilizada em máquinas de porte industrial, supõem-se que a força axial desenvolvida na extrusora desktop seja consideravelmente menor, menos assim foi selecionado o rolamento código (designação) 51100.

Caso a pressão interna chegasse ao valor de 68,9 MPa gerando uma força axial de 23280 N então o coeficiente de segurança estático seria:

$$Cs = \frac{Co}{Fa} = \frac{15300}{23280} = 0,65$$

Ou seja, as esferas entrariam em escoamento.

Já a vida em fadiga assumiria o valor:

$$L5 = 0,62 * \left(\frac{9950}{23280}\right)^3 = 0,048 * 10^6 rev * \frac{min}{45 rev} * \frac{h}{60min} = 17,9 horas$$

Nos aspectos de projeto abordou-se assuntos de caráter térmicos, elétricos e de projetos mecânicos, os quais criaram sólidos subsídios para a estruturação do produto.

4.2.2 Estrutura do protótipo

O protótipo é constituído de inúmeros componentes conforme Figura 38 e 39, dentre os itens, alguns foram comprados, enquanto outros foram manufacturados dentro e fora da universidade. A lista de materiais completa se encontra no Apêndice A – CONJUNTO EXTRUSORA DESKTOP.

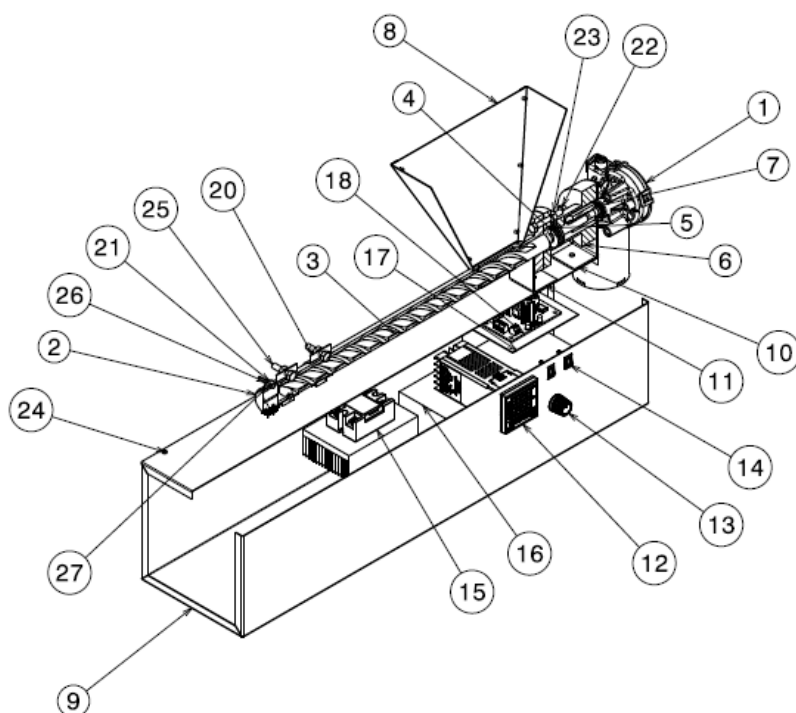


Figura 38. Estrutura de protótipo em corte.

Fonte: Ver Apêndice A.

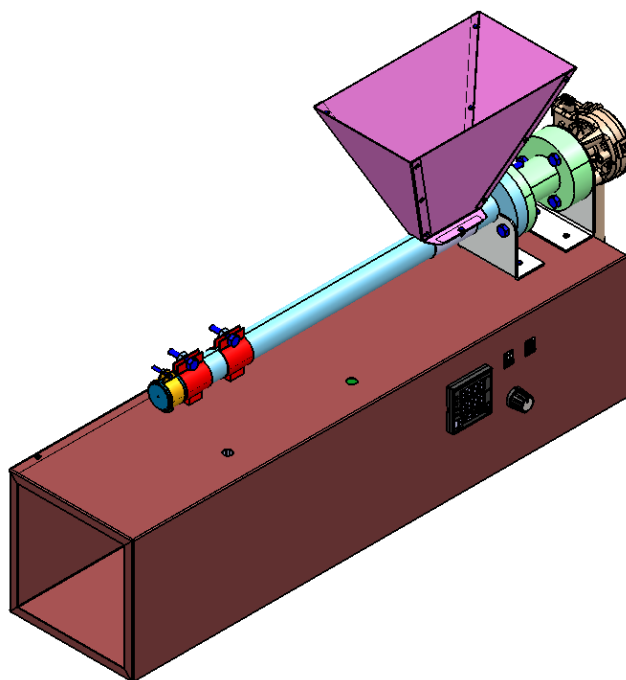


Figura 39. Modelo desenvolvido em Software CAD.

4.2.3 Fabricação

O gabinete, o funil e os suportes LD, LE e PWM foram fabricados a partir de uma chapa, sobre a qual foi desenhado o gabarito 2D e os componentes finais foram cortados com uma tesoura e dobrados na forma ilustrada nas Figuras 40, 41 e 42. Para estes itens não foram feitas considerações de caráter técnico, foram desenvolvidos de maneira a gerarem forma ao equipamento ou suportar componentes que geram baixo esforço mecânico.

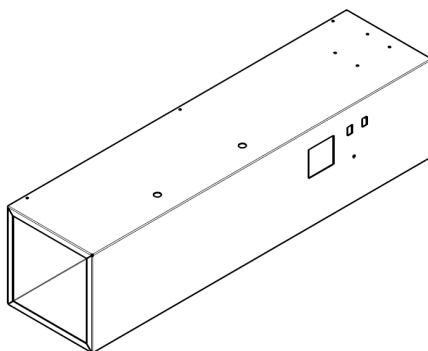


Figura 40. Gabinete.

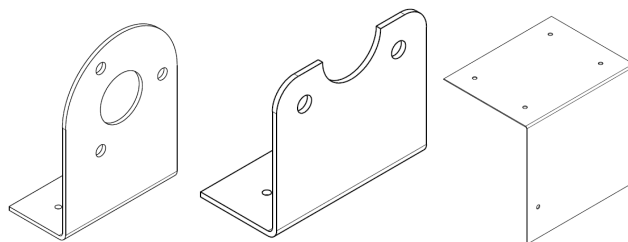


Figura 41. Suporte LD, LE e PWM respectivamente.

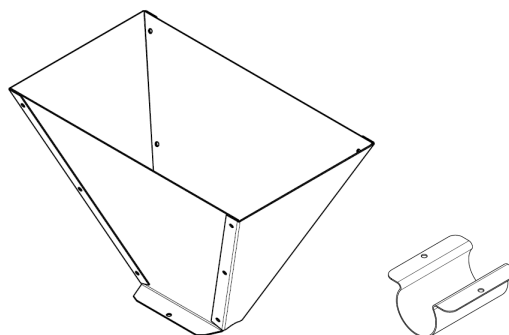


Figura 42. Funil de alimentação e presilha de fixação respectivamente.

Para a construção do canhão foi necessário comprar um tubo de 6 metros para utilizar apenas 40 cm. A superfície externa do tubo foi usinada para retirar o recobrimento existente e homogeneizar a aparência e a região de entrada do material foi fresada. Para uma das extremidades foi usinada uma peça para formar o molde com o furo de diâmetro de 1,75 mm e para a outra extremidade foi usinado uma flange, sendo ambas soldadas no tubo. Maiores detalhes podem ser visualizados no APÊNDICE B – CONJUNTO CANHÃO.

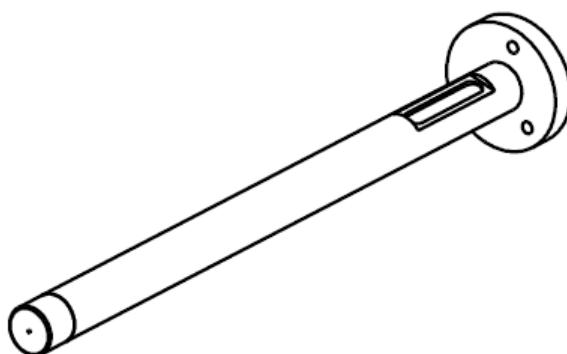


Figura 43. Canhão

O relé de estado sólido foi fixado sobre um dissipador de calor, cujo intuito é dissipar o calor produzido durante a operação. Para reduzir a resistência térmica de contato entre ambos, foi aplicado uma pasta térmica na interface das duas superfícies.

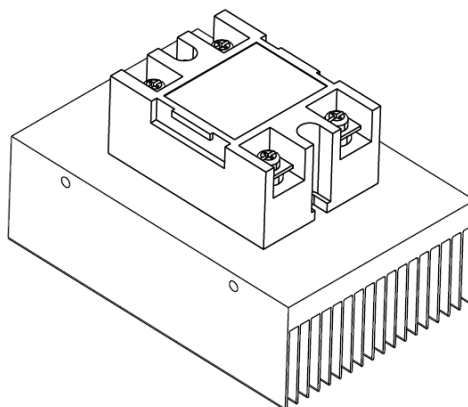


Figura 44. Relé de estado sólido e aleta.

Como fuso foi feito uso de uma broca de alvenaria e cortado a ponta onde estava alojado o inserto de aço rápido, e na sequência foi usinado um cone de 45° na região.



Figura 45. Fuso.

O acoplamento geral foi usinado a partir de uma barra de aço com diâmetro e comprimento mínimo de 70x80, respectivamente. Esta peça tem a função de ancorar o canhão com o motor e suportar a força axial do eixo.

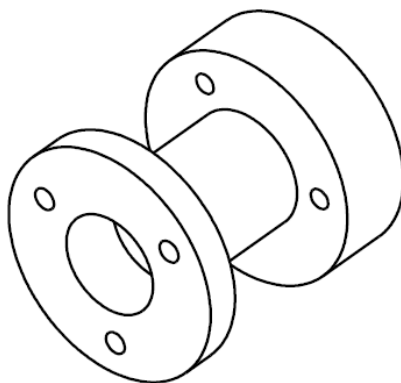


Figura 46. Acoplamento geral.

Uma peça foi usinada para possibilitar o acoplamento entre o fuso e motor e um encosto foi usinado para aumentar a área de contato entre a broca e o rolamento. O travamento do acoplamento foi feito com parafusos radiais ao eixo.

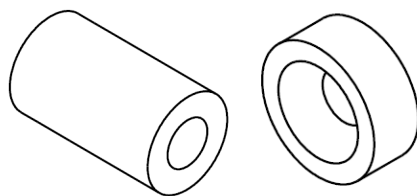


Figura 47. Acoplamento Fuso-Motor e encosto para rolamento, respectivamente.

As peças ilustradas nas Figuras 46 e 47 são posicionadas conforme Figura 48, sendo possível a identificação da sequência de elementos.

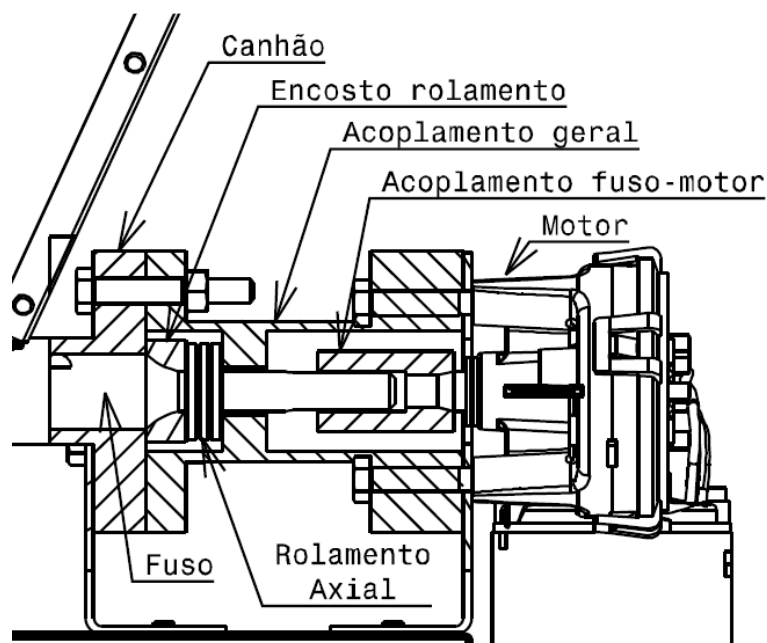


Figura 48. Montagem do Acoplamento geral, Fuso-motor e encosto para rolamento.

A presilha para o alojamento do termopar foi fabricada com uma tira de chapa e uma porca M6, sendo ambos juntados por dois pontos de solda, e a porca possibilita a fixação do sensor.



Figura 49. Presilha para termopar.

Os demais componentes necessários para o projeto foram comprados de diversos fornecedores e montados no local considerado mais adequado, para então testar o equipamento.

4.2.4 Procedimento

Um comissionamento do protótipo foi realizado quando todos os componentes foram montados de acordo com a Figura 50. O equipamento foi conectado à rede elétrica e primeiramente foi testado o sistema de movimentação, evidenciando a movimentação do fuso a diferentes velocidades. Na sequência o sistema de aquecimento foi acionado, e a temperatura de 200°C foi configuradora. Após o acionamento a temperatura no visor do controlador de temperatura eleva-se até estabilizar em 200°C. Posteriormente foi inserido material pellet ABS no funil de alimentação resultando na saída de filamento no orifício do molde.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na etapa final do projeto foi evidenciado, em teste, o funcionamento da máquina extrusora. As atividades desenvolvidas introduziram uma contextualização da importância do ambiente de prototipagem rápida, na sequência, a revisão da literatura envolvendo a máquina industrial de extrusão, material plástico ABS e avaliação de mercado fundaram a base para as inúmeras tomadas de decisões descritas no desenvolvimento e posterior processo de construção, cujo conjunto da obra resultou em um equipamento físico e funcional conforme figura 50.

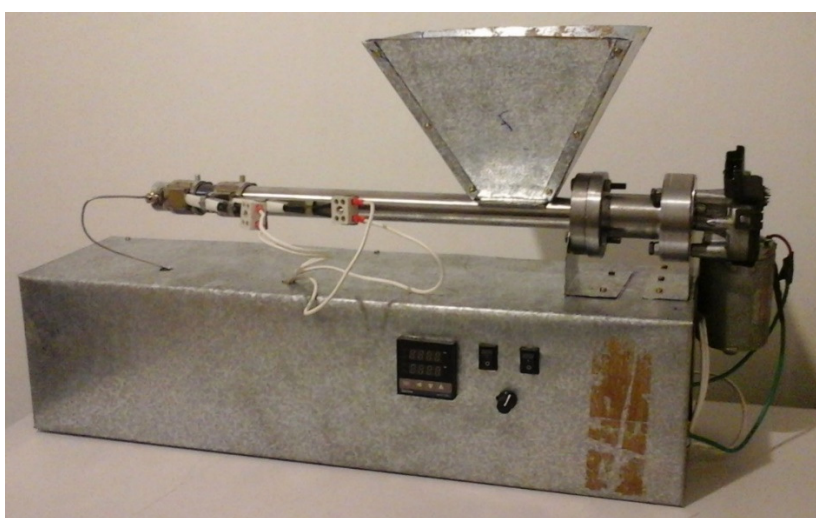


Figura 50. Protótipo montado.

Com relação a qualidade do filamento obtido foi constatado uma coloração escura, provavelmente devido a presença de impurezas como óleo e cavacos. Também notou-se que o filamento obtido possui uma rigidez elevada, em especial quando comparado ao filamento comercial, o que pode ser resultado de algum nível de degradação térmica do ABS. Além disso, também foi observado que o diâmetro do filamento não se mantém constante no processo, sendo necessário o desenvolvimento de sistemas auxiliares de calibração e controle.

Como observado durante os testes, e previsto na literatura, a extrusora isoladamente não é capaz de produzir um filamento com diâmetro consistente. Este fato apresenta necessidade de pesquisa e desenvolvimento de sistemas de controle

de saída e bobinamento do filamento, através da aplicação de conteúdos de eletrônica e controle, que serão desenvolvidos em trabalhos futuros.

A região do canhão onde estão localizadas as resistências elétricas mudou de coloração, para uma cor azul, possivelmente isso se deve ao mal posicionamento do sensor de temperatura.

O motor sobreaqueceu, devido à baixa potência elétrica, forçando assim a realizar um único teste na máquina. Devido a restrições orçamentárias foi utilizado o motor que os autores já possuíam, mesmo sabendo-se que estariam em não conformidade com necessidades do projeto. Os poucos testes ocasionaram o impedimento de resultados e análises quantitativas referentes ao protótipo, prejudicando o levantamento estatístico de parâmetros, tais como: corrente elétrica, temperaturas, vazão mássica entre outros, os quais devem ser melhor analisados em futuros trabalhos.

A solução adotada de uma zona de aquecimento, o design do fuso com fator de compressão unitário e o ângulo de hélice de aproximadamente 45° deverão ser elementos de estudo que necessitam maior profundidade de análise. No entanto nos testes realizados com essas condicionantes aparentemente não afetaram o processo plastificação e homogeneização do material plástico em forma de filamento.

Observou-se através de cálculos matemáticos que o gradiente de temperatura no raio do canhão onde a resistência elétrica é posicionada gira em torno de um valor de $1^\circ\text{C}/\text{mm}$, enquanto no isolamento térmico existe uma variação de aproximadamente de 10°C para cada unidade de milímetro. Temperaturas menores na superfície isolada são desejáveis, pelo fato de estarem em contato com o operador.

O controle de rotação por PWM para motores de corrente contínua funcionou conforme esperado, mostrando-se uma viável solução para o controle do fluxo de massa plástica neste projeto.

Muitos dos resultados expostos são qualitativos ou hipóteses técnicas, as quais apenas serão confirmadas, através dos inúmeros testes de protótipo de que deverão ser realizados, para o desenvolvimento do produto em escala comercial.

A avaliação e aplicação das Normas Regulamentadoras serão abordados em próximos trabalhos, para garantir a devida segurança do equipamento.

O protótipo no estado atual é projeto com potencial para aprimoramento e pesquisa aplicada em trabalhos futuros, como:

1 – Analisar e avaliar a substituição do atual motor, por um motor de maior potência;

2 – Desenvolver um sistema em malha fechada para medição, tração e controle do diâmetro do filamento;

3 – Avaliar vazão volumétrica de material, eficiência energética do equipamento para diferentes materiais;

4 – Analisar e avaliar a construção de um fuso e canhão de acordo com as indicações da literatura;

5 – Avaliar os efeitos da tribologia entre o fuso e canhão para diferentes materiais e tratamentos térmicos indicados na literatura;

6 – Analisar e avaliar a utilização de aquecimento por indução eletromagnética;

7 – Analisar e avaliar a força real aplicada sobre o mancal;

8 – Avaliar as tensões reais no canhão e no fuso, de forma a otimizá-los;

9 – Avaliar e analisar o comportamento da máquina e como proceder a manutenção da máquina.

10 – Avaliar a implementação de conceitos da indústria 4.0 ao projeto.

Conforme observado o Produto Mínimo Viável apresentou conceitos robustos e aplicados da engenharia mecânica, assim como, mostrou-se ser um projeto interdisciplinar aplicando conceitos elétricos e eletrônicos e de avaliação de mercado.

6 AVALIAÇÃO DE MERCADO

O produto atual é um protótipo, ou seja, ainda em processo de aprimoramento, porém todo o esforço e investimento de desenvolvido somente poderá ser recompensado economicamente se existir um mercado consumidor. O conhecimento do mercado consumidor é fundamental para traçar estratégias para a aplicação de economia de escala, objetivando a redução de custos produtivos e conseqüentemente aumentando a margem de lucro e/ou reduzindo o preço do produto final (Sebrae Nacional, 2015).

Como explicado na introdução, o processo de impressão 3D demanda conhecimentos das áreas envolvendo software de desenho e impressão, hardware e os possíveis materiais de impressão, conseqüentemente restringindo o possível mercado consumidor para pessoas envolvidas em áreas técnicas, as quais atuam em universidades, instituições de cursos técnicos, centros de pesquisa e empresas de atuação em engenharia.

Objetivando uma avaliação preliminar foram consideradas as universidades dentro do território Brasileiro como público-alvo. Contudo, apenas os cursos vinculados as áreas de engenharia e design serão consideradas potenciais consumidores de uma extrusora ou do produto filamento. Estes dados são encontrados no banco de dados do Ministério da Educação do Brasil, mais especificamente no e-MEC (2017).

Buscando por cursos de engenharia e Design registrados no MEC é possível obter uma lista com 5083 cursos de engenharia e 805 cursos de design. Os cursos foram classificados de maneira subjetiva pelos autores inferindo a necessidade do curso pelo processo FDM em 3 grupos. Foi considerado que 50% do grupo 1, 25% do grupo 2, e 12,5% do grupo 3 teriam interesse em uma máquina extrusora. Totalizando em um mercado consumidor de 1953 cursos de engenharia e 308 cursos de design, disponíveis na lista completa no Anexo A.

Com relação ao desenvolvimento de estratégias de mercado, foi elaborado um modelo de negócios conforme pode ser observado no APÊNDICE C – MODELO DE NEGÓCIOS – CANVAS, o qual prevê um segmento de mercado constituído por:

- Empresas com departamentos de projetos e prototipagem rápida (Indústria automotiva, aeroespacial, etc);
- Instituições de ensino (Universidades (áreas da odontologia, medicina, engenharia, outras), Senai e Escolas);
- Adeptos em geral da manufatura aditiva como hobby;
- Clientes nacionais e na sequência América Latina.

Atendendo os citados segmentos de mercado, tem-se a proposta de valor de possibilitar a liberdade para o cliente produzir o próprio filamento; possibilitar o uso de material reciclado, remetendo ao senso de sustentabilidade; colocar à disposição no mercado um produto e assistência nacional; e reduzir o custo em até 90% do filamento, a qual posiciona o produto como sendo potencialmente inovador e em condições de competir com produtos importados. Ademais, os processos de desenvolvimento, produção e entrega do produto, aliado a manutenção de canais de comunicação e suporte técnico tem potencial de gerar empregos diretos e indiretos no mercado de trabalho, promovendo a geração de renda e a formação de capital humano.

O projeto tem a capacidade de disponibilizar outra opção de filamento para os consumidores, acirrando a concorrência, cujos resultados são redução de preços, aumento da qualidade, maiores opções de escolha de produtos para os consumidores e exige das empresas capacidade de inovação e habilidade para lidar em um ambiente competitivo, (Comissão Europeia, 2017).

O processo de desenvolvimento e inserção de um produto no mercado é um processo interativo calcado em diversas áreas do conhecimento humano, o mesmo será sintetizado na condações finais.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto desenvolvido ilustra como é possível fazer uso da ciência básica aliada a uma percepção mercadológica para o desenvolvimento de um produto de ciência aplicada, evidenciando na percepção dos autores, oportunidades para uso industrial, de forma a fomentar a economia e promover a expansão e popularização da impressão 3D. Além disso, o desenvolvimento de um protótipo exige uma visão holística de diversas áreas das engenharias, para possibilitar a compatibilização dos diversos componentes entre si e mitigar os riscos de falhas e erros de projeto.

A extrusora isoladamente, como observado no referencial teórico e evidenciado nos testes não é capaz de beneficiar um filamento com diâmetro constante, sendo necessário o desenvolvimento de sistemas auxiliares para garantir a estabilidade dimensional do produto extrudado. Contudo, a extrusão do material ocorreu de maneira ininterrupta, aparentemente sem a formação de bolhas ou falhas de continuidade, porém isso não possibilita testar o material em uma impressora 3D.

O protótipo se utiliza dos conceitos expostos no referencial teórico, e dos cálculos desenvolvidos, porém aplica os conceitos de desenvolvimento de protótipos e de produto mínimo viável, que estabelecem que os mesmos devem ser estruturados para demonstrar de forma prática a capacidade do equipamento desenvolver os objetivos preconizados sendo fiel aos conceitos científicos, porém com custos de execução minimizados, pois a estruturação de equipamentos inovadores envolve inúmeros riscos, dentre eles tecnológicos e mercadológicos. Assim a revisão literária de equipamentos comerciais foi fundamental na execução deste projeto, tais como: a substituição de fuso usinado e tratado, por uma broca de alvenaria sem tratamento térmico e região de compressão. A relação construtiva L/D foi possível seguir as recomendações da Tabela 2, enquanto as resistências foram concentradas na saída do molde, devido a utilização de apenas um controlador de temperatura.

Para prosseguir o desenvolvimento do trabalho é necessário substituir o motor da extrusora por um de maior potência, e determinar a vazão mássica de material em funcionamento, a qual fornecerá maiores informações para determinar a velocidade de rotação do motor responsável pelo sistema de puxamento. O sistema de puxamento, neste caso, é vislumbrado por um sensor para medição do diâmetro, um

microcontrolador associado a transistores, que tem a capacidade de controlar a velocidade de rotação do motor de puxamento, objetivando o controle do diâmetro através de malha fechada.

Dentro dos objetivos inicialmente definidos foi possível compreender a constituição de uma extrusora industrial com suas relações dimensionais usuais, adicionado ao benchmarking possibilitou a construção de produto mínimo viável, viabilizando a observação do comportamento do plástico na prática. A utilização do filamento em uma impressora 3D ainda não é possível, devido aos refinamentos de projeto necessários, contudo, foi possível revisar os aspectos relevantes do material plástico ABS e observar o comportamento da máquina-material.

De maneira geral, o trabalho possibilitou a aplicação de conceitos das cinco principais áreas propostas no curso de engenharia mecânica ofertadas pela UTFPR, sendo estas ciências térmicas, manufatura, materiais, projetos e produção, além de conteúdos interdisciplinares na área de eletroeletrônica e pesquisa de mercado, ilustrando a complexidade de um projeto de engenharia na prática.

8 REFÊRENCIAS

Abeykoon, C.; Kelly, A. L.; Brown, E. C.; Coates, P. **The effect of materials, process settings and screw geometry on energy consumption and melt temperature in single screw extrusion**, Reino Unido, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 05 Novembro 2016.

ABNT NBR 5410. **ABNT NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro - Brasil: ABNT, 2008.

AÇO IDEAL. **Tubo SCH 40 e 80 NBR 5590**. Aço Ideal Ltda., 2016. Disponível em: <<http://www.acoideal.com.br/tubo-sch-40-e-80-nbr-5590/>>. Acesso em: 03 November 2016.

Aliexpress resistências. **Quality Guarantee Ceramic Plug Stainless Steel Band Heater 25*30 110V 80W**. AliExpress, 2016. Disponível em: <<https://www.aliexpress.com/item/Quality-Guarantee-Ceramic-Plug-Stainless-Steel-Band-Heater-25-30-110V-80W/32311321329.html?spm=2114.13010608.0.0.jGD7zo>>. Acesso em: 03 Novembro 2016.

Aliexpress extrusora. **Máquina extrusora desktop Desktop Mini**, 2016. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/Desktop-mini-1kg-hour-3d-Filament-extruder-machine-3d-filament-maker-filament-winder-filament-spooler/32681871111.html?spm=2114.02010208.3.26.4ULXPj&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_2_10091_10090_10088_10089,searchweb>. Acesso em: 05 NOVEMBRO 2016.

ALLDATASHEET. **NE555 Datasheet. Catálogo circuito integrado NE555**, 2017. Disponível em: <<://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/161279/TI/NE555.html>>. Acesso em: 22 Maio 2017.

ANLUZ. **Solução em Aquecimento Elétrico para Qualquer Aplicação. Catálogo resistência elétrica tipo coleira**, 2016. Disponível em: <<http://www.anluz.com.br/detalhes/20/resistencia-eletrica-tipo-coleira/#A>>. Acesso em: 19 Outubro 2016.

AZEVEDO, G. C. I. **PESQUISA DE MERCADO. SAIBA MAIS**, SÃO PAULO, n. SEBRAE-SP, 2004.

BALM, G. J. **Benchmarking um guia para o profissional tornar-se e continuar sendo o melhor dos melhores**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1995.

BANGGOOD. **REX-C100 110-240V 1300 Degree Digital PID Temperature Controller Kit**. Banggood, 2016. Disponível em: <<http://www.banggood.com/REX-C100-110-240V-1300Degree-Digital-PID-Temperature-Controller-Kit-p-965589.html?rmmds=myorder>>. Acesso em: 11 Outubro 2016.

BANGGOOD. **6V - 90 V 15A Control PWM DC Motor Speed Regulator Controller Switch**. Banggood, 2017. Disponível em: <<https://www.banggood.com/6V-90V-15A-Control-PWM-DC-Motor-Speed-Regulator-Controller-Switch-p-917304.html?rmmds=myorder>>. Acesso em: 22 Maio 2017.

BOSCH I-BUSINESS. **Motores de corrente contínua com transmissão**. Bosch I-Business, 2016. Disponível em: <<http://www.bosch-ibusiness.com/boaaelmoocsla/category/CEP/284/product/684>>. Acesso em: 03 Novembro 2016.

CAMARGO, S. **Máquina transforma plástico reciclado em filamento para impressora 3D**. SuperInteressante, 2015. Disponível em: <<http://super.abril.com.br/blogs/planeta/maquina-transforma-plastico-reciclado-em-filamento-para-impressora-3d/>>. Acesso em: 21 out. 2016.

Comissão Europeia, **Qual é a importância da política da concorrência para o consumidor ?** Disponível em: <http://ec.europa.eu/competition/consumers/why_pt.html>. Acesso em: 11 junho. 2017.

Correios, **Limites de dimensões e de peso**, 2016, Disponível em: <<https://www.correios.com.br/para-voce/precisa-de-ajuda/limites-de-dimensoes-e-de-peso>>. Acesso em: 28 nov. 2016.

CRUMP, S. S. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects**. Patente: 5121329, 9 Junho 1992. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/81abb23e45670fd3d17f/US5121329.pdf>>. Acesso em: 10 Outubro 2016.

Dominghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T.; **Kunststoffe Eigenschaften und Anwendungen**. Alemanha: Editora Springer, 2012.

EHRENSTEIN, G. W. **Polymer Werkstoffe**. 3°. ed. Alemanha: Editora Carl Hanser, 2011.

e-MEC. **Instituições de Educação Superior e Cursos Cadastrados**, 2017. Disponível em: < <http://emec.mec.gov.br/>>. Acesso em: 8 Maio 2017.

FILABOT. **Máquina extrusora desktop FILABOT**, 2016. Disponível em: <<https://www.filabot.com/collections/filabot-core/products/filabot-original?variant=570433109>>. Acesso em: 05 NOVEMBRO 2016.

FILASTRUDER. **Máquina extrusora desktop Filastruder**, 2016. Disponível em: <<https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit?variant=323882043>>. Acesso em: 05 NOVEMBRO 2016.

FRIED, J. R. **Polymer Science & Technology**. Estados Unidos da America: Editora Prentice Hall PTR, 2003.

GARTNER. **Gartner says conumer 3D printings is more than five years away**.Gartner, 2014. Disponível em: <<http://www.gartner.com/newsroom/id/2825417>>. Acesso em: 12 outubro 2016.

GILES JR., H. F.; WAGNER JR., J. R.; MOUNT III, E. M.;**Extrusion: The Defenitive Processing Guide an Handbook**.Estados Unidos da America: Editora Wiliam Andrew, Inc., 2005.

Heptagon – Tecnologia da informação, **Scrum**, 2015. Disponível em: <<http://www.heptagon.com.br/scrum>>. Acesso em: 05 Outubro 2016.

HIBBELER R.C; **Resistência dos Materiais**. 5°. ed. Brasileira: Editora Pearson Prentice Hall, 2004.

IBAR - BIOLÃ - LÃ DE ROCHA. **Folha de dados técnicos - Manta de Lã de Rocha Mineral Biolã com Tela**. Brasil: Biolã, 2013.

Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S.; **Fundamentos de Transferência de Calor e de massa**. 6. ed. Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.

INEOS STYROSOLUTION - BASF. **Terluran SP-6 - Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) - TECHNICAL DATASHEET**. BASF. ALEMANHA. 2016.

INSTITUTO NEWTON C. BRAGA. **O que é PWM**. 2017. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5169-mec071a.html>>. Acesso em: 22 Maio 2017.

JAROSCHEK, C. **Spritzgießen für Praktiker**. Alemanha: Editora Hauser, 2013.

JAROSCHEK, C. **Notas de Aula da disciplina Polymerverarbeiten: Schmelze Erzeugung**. Alemanha: Fachhochschule Bielefeld, 2014.

KLEER, R.; PILLER, F. T.; WELLER, C. **Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited**. Alemanha: Int. J. Production Economics, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 12 outubro 2016.

MERCADO Livre. **Lista de filamentos para impressão 3D**, 2016. Disponível em: <[http://lista.mercadolivre.com.br/filamento-imprensa-3d#D\[A:filamento-imprensa-3d,L:1\]](http://lista.mercadolivre.com.br/filamento-imprensa-3d#D[A:filamento-imprensa-3d,L:1])>. Acesso em: 17 out. 2016.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5. ed. Estados Unidos da America: Editora John Wiley & Sons Ltd, 2006.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6 Edição, WILEY, 2012.

NORTON R.L; **Projeto de Máquinas**. 4°. ed. Brasileira: Editora Bookman, 2013.

NOZTEK. **Máquina extrusora desktop Noztek**, 2016. Disponível em: <<http://www.noztek.com/product/the-noztek-pro-abs-and-pla-filament-extruder-for-3d-printers/>>. Acesso em: 05 NOVEMBRO 2016.

OSSWALD, T. A. **Understanding Polymer Processing**. Estados Unidos da America: Hanser Publications, 2011.

PINTO, F. D. C. **Sistemas de Automação e Controle**. CST, 2005.

RAUWENDAAL, C. **Polymer Extrusion**. Estados Unidos da America: Editora Carl Hanser, 2013.

REVISTA EXAME. **Impressoras 3D serão comuns como smartphones, diz diretor da 3D Systems.** Revista Exame, 2015. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/tecnologia/impressoras-3d-serao-comuns-como-smartphones/>>. Acesso em: 17 Setembro 2016.

ROSATO, D. V.; ROSATO, D. V.; ROSATO, M. G.; **Injection Molding Handbook.** Estados Unidos da America: Editora Kluwer Academic, 2000.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. D. P. B. **Metodologia de pesquisa.** Porto Alegre - Brasil: Editora Penso, 2013.

SCAFFARO, R.; BOTTA, L.; DI BENEDETTO, G. **Physical properties of virgin-recycled ABS blends: Effect of post-consumer and of reprocessing cycles.** European Polymer Journal, Itália, Janeiro 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 20 Outubro 2016.

Sebrae Nacional. **Economia de escala: gaste menos e produza mais.** 2015. Disponível em: < <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/economia-de-escala-gaste-menos-e-produza-mais,b23732f8d0cbf410VgnVCM1000004c00210aRCRD>>. Acesso em: 24 Maio 2017.

SKF. **Rolamento axiais de esferas, escora simples.** 2017. Disponível em: < <http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/single-direction/index.html>>. Acesso em: 22 Maio 2017.

STRONG, A. B. **Plastics: materials and processing.** Estados Unidos da America: Editora Prentice-Hall, 1996.

SUTHERLAND, J. **Scrum - A Arte de fazer o dobro do trabalho na metade do tempo.** Brasil : Editora do Grupo LeYa, 2014.

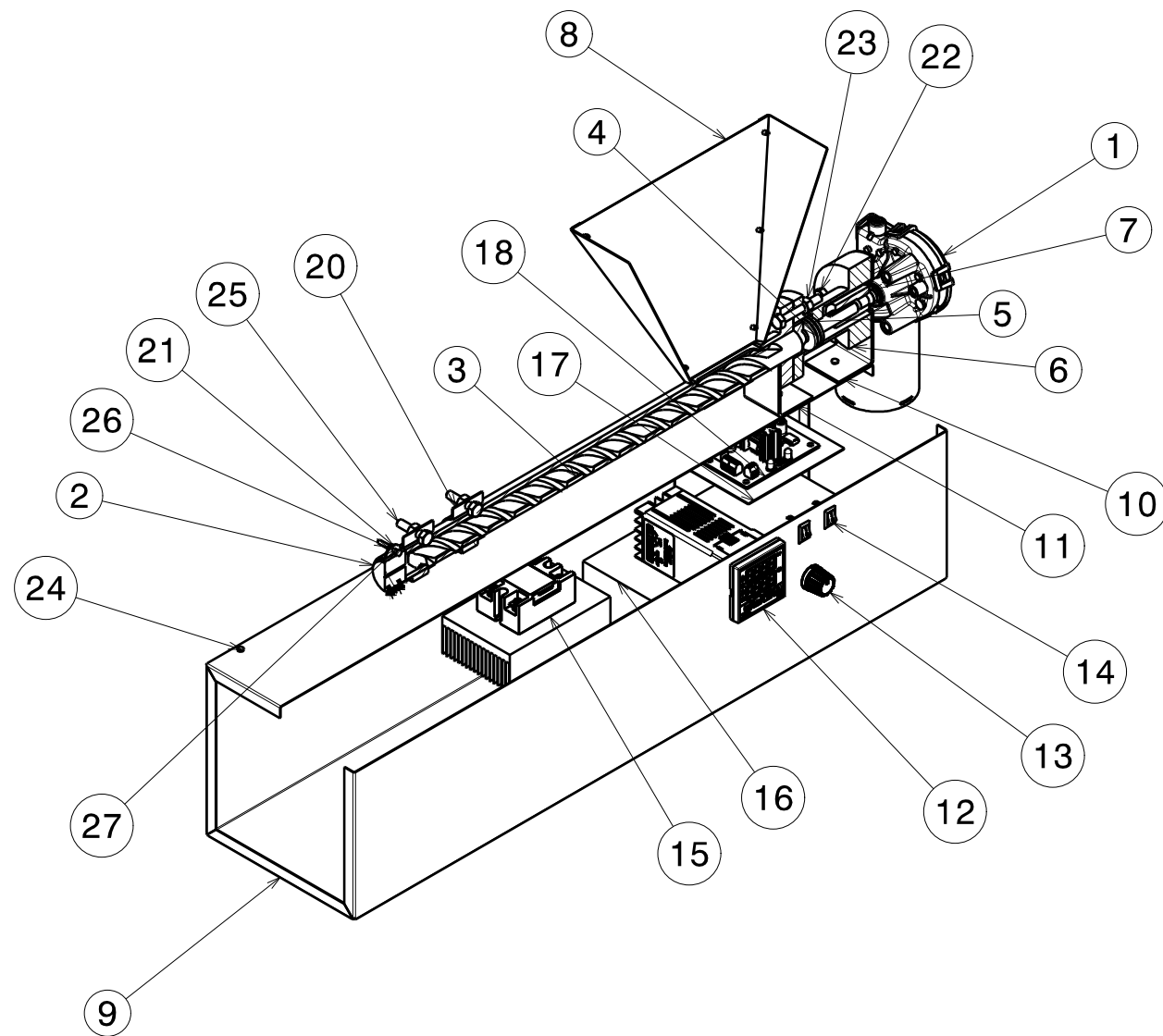
TERMOPLASTIC. **Preços de Produtos Termoplástico.** Termoplástico, 2016. Disponível em: <<http://www.termoplástico.com.br/producao/interface/php/precos.php>>. Acesso em: 25 nov. 2016.

WELLZOOM. **Máquina extrusora desktop Wellzoom,** 2016. Disponível em: <<http://www.desktopextruder.com/En/ProductView.asp?ID=18>>. Acesso em: 05 NOVEMBRO 2016.

YVES, M. A. **How to make DIY Filament for your 3D Printer.** 3dprintingforbeginners, 2014. Disponível em: <<http://3dprintingforbeginners.com/how-to-make-diy-filament-for-your-3d-printer/>>. Acesso em: 21 out. 2016.

ZÖLLNER, O. **Optimised Mould Temperature Control.** Alemanha: Application Technology Information - Bayer AG, 1997.

APÊNDICE A – CONJUNTO EXTRUSORA DESKTOP



Vista isométrica com corte
Escala: 1:5

Lista de Materiais: Conjunto Extrusora Desktop para Filamento

Número	Quantidade	Código	Descrição do produto	Revisão
1	1	10101234	Motor CC 12 V 48W BOSH (C)	A
2	1	10101236	Canhão Schedule 80 D26,7 mm (M)	A
3	1	10101237	Fuso Helicoidal Passo duplo (M)	A
4	1	10101238	Rolamento SKF (51100) (C)	A
5	1	10101239	Encosto de aço (M)	A
6	1	10101240	Acoplamento Geral (M)	A
7	1	10101241	Acoplamento motor-eixo (M)	A
8	1	10101242	Conjunto Funil de Alimentação (M)	A
9	1	10101243	Gabinete de aço galvanizado (M)	A
10	1	10101244	Suporte LD de aço galvanizado (M)	A
11	1	10101245	Suporte LE de aço galvanizado (M)	A
12	1	10101235	Controlador de Temperatura (C)	A
13	1	10101246	Potenciômetro angular (C)	A
14	2	10101247	Botão ON/OFF (C)	A
15	1	10101248	Relé de estado sólido/trocador de calor (C)	A
16	1	10101249	Fonte CA/CC 12 V (C)	A
17	1	10101250	Suporte de aço PWM (M)	A
18	1	10101251	PWM DC 12V - 10A (C)	A
19	1	10101252	Presilha de aço p/ Funil (M)	A
20	2	10101253	Resistência elétrica 127 V 80W (C)	A
21	1	10101254	Conjunto Presilha p/ sensor termopar (M)	A
22	6	10101255	Parafuso Sex. M6x40 (C)	A
23	5	10101256	Porca Sex. M6 (C)	A
24	24	10101257	Parafuso Sex. M3x6 (C)	A
25	2	10101258	Parafuso Sex. M6x25 (C)	A
26	10	10101259	Porca Sex. M3 (C)	A
27	1	10101260	Parafuso Sex. M3x20 (C)	A

ATENÇÃO:

A utilização dos desenhos sem o consentimento e o não acompanhamento in loco dos autores para construção e reprodução de outro protótipo, isenta os autores de qualquer responsabilidade técnica e/ou civil e/ou criminal.

NOTA 1: CONDIÇÕES GERAIS

- 1.1 - NÃO DEVE CONTER RESPINGOS DE SOLDA
- 1.2 - LIVRE DE REBARBAS
- 1.3 - COTAS FALTANTES ENCONTRAM-SE NO MODELO GEOMÉTRICO (CAD)

NOTA 2: MATERIAL

- 2.1 - QUALIDADE DE RESPONSABILIDADE DO FORNECEDOR

NOTA 3: TOLERÂNCIA E ACABAMENTO SUPERFICIAL

- 3.1 - TOLERÂNCIA GERAL: NORMA ISO 2768
- 3.2 - QUANDO NÃO ESPECIFICADO, DIMENSÕES EM MM E RUGOSIDADE EM MICROMETROS RA

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Data: 03/04/2017

Trabalho de Conclusão de Curso - Eng. Mecânica

Nome: Conjunto Extrusora Desktop

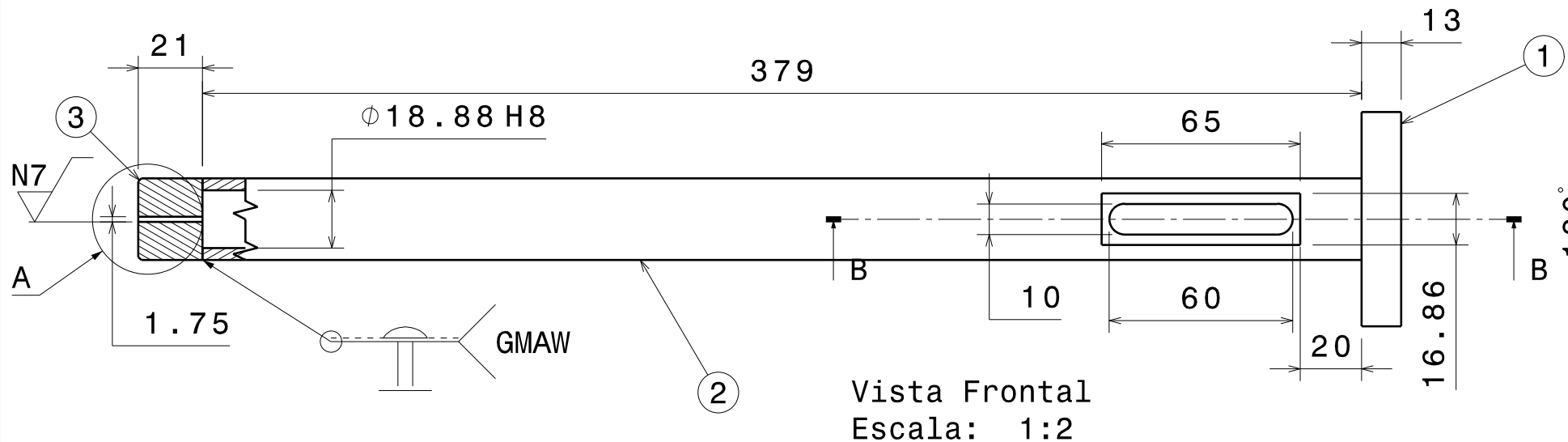


Projetistas: Diordon Vasconcelos Dias de Souza e Fernando Sulzbach Hupples

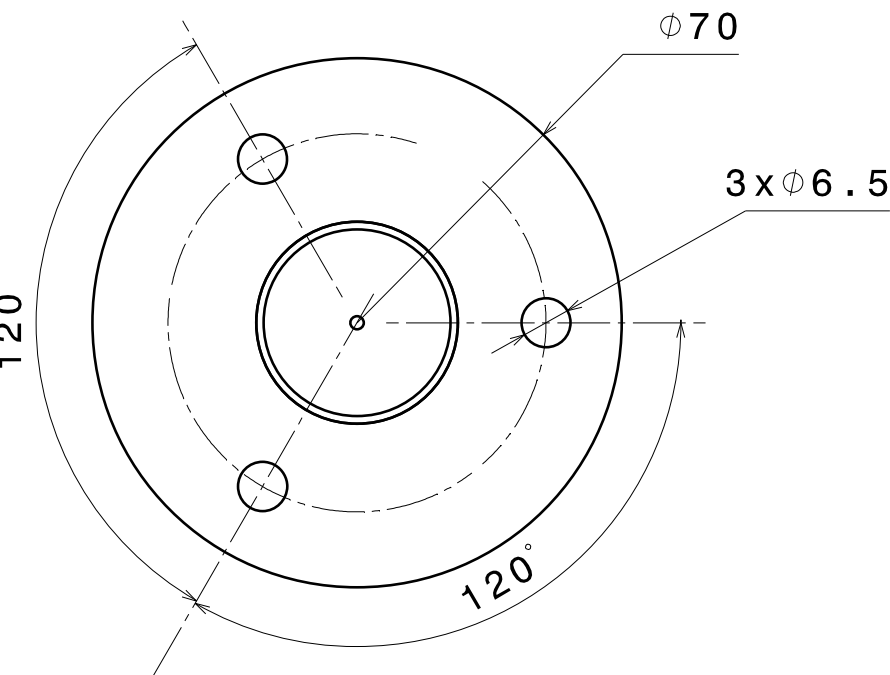
rev01

APÊNDICE B – CONJUNTO CANHÃO

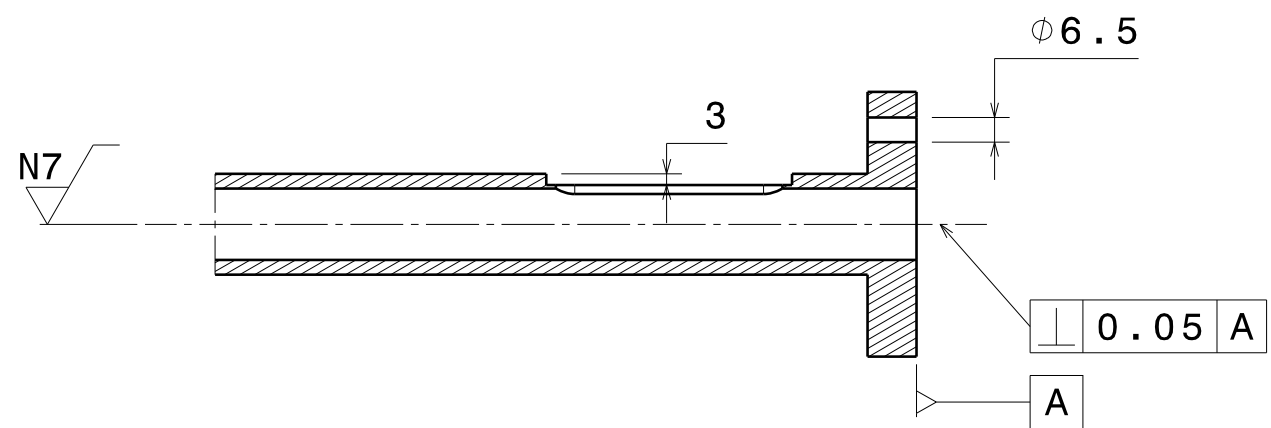
N7 () N9



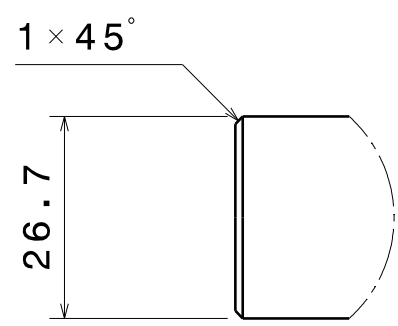
Vista Frontal
Escala: 1:2



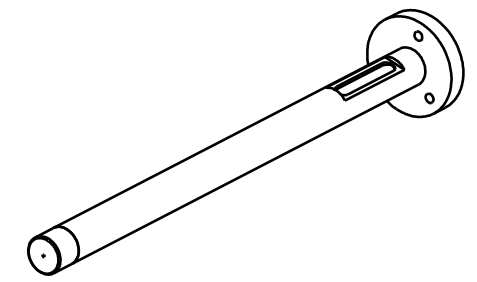
Vista Esquerda
Escala: 1:1



Corte B-B
Escala: 1:2



Detalhe A
Escala: 1:1



Vista Isométrica
Escala: 1:5

ATENÇÃO:

A utilização dos desenhos sem o consentimento e o não acompanhamento in loco dos autores para construção e reprodução de outro protótipo, isenta os autores de qualquer responsabilidade técnica e/ou civil e/ou criminal.

NOTA 1: CONDIÇÕES GERAIS

- 1.1 - NÃO DEVE CONTER RESPINGOS DE SOLDA
- 1.2 - LIVRE DE REBARBAS
- 1.3 - COTAS FALTANTES ENCONTRAM-SE NO MODELO GEOMÉTRICO (CAD)

NOTA 2: MATERIAL

2.1 - QUALIDADE DE RESPONSABILIDADE DO FORNECEDOR

NOTA 3: TOLERÂNCIA E ACABAMENTO SUPERFICIAL

- 3.1 - TOLERÂNCIA GERAL: NORMA ISO 2768
- 3.2 - QUANDO NÃO ESPECIFICADO, DIMENSÕES EM MM E RUGOSIDADE EM MICROMETROS RA

Número	Quantidade	Número da peça	Descrição	Revisão
1	01	10101270	Flange de Aço D70 x 13	A
2	01	10101280	Tubo Schedule 80 - 3/4" x 3,91 mm	A
3	01	10101290	Molde D26.7 x 21	A

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Data: 10/03/2017

Projeto Fiofácil - Trabalho de conclusão de curso

Nome: Conjunto Canhão



Projetistas: Diordon Vasconcelos Dias de Souza e Fernando Sulzbach Huppes

rev02

APÊNDICE C – MODELO DE NEGÓCIOS – CANVAS

The Business Model Canvas

Designed for:

Designed by:

On: Day Month Year

Iteration: No.

Key Partners



Who are our Key Partners?
Who are our key suppliers?
Which Key Resources are we acquiring from partners?
Which Key Activities do partners perform?

MOTIVATIONS FOR PARTNERSHIPS:
Optimization and economy
Reduction of risk and uncertainty
Acquisition of particular resources and activities

- 1 – Fornecedores de componente elétricos e eletrônicos, motores, materiais metálicos, resistências elétricas e isolamentos térmicos.
- 2 – Empresas prestadoras de serviços de usinagem, pintura, dobra e soldagem.
- 3 – Sites de venda online (Exemplo: OLX ou mercado livre).
- 4 – Empresas de marketplace, para venda do equipamento em grandes redes de varejo.
- 6 – Empresas de transporte do produto para o cliente.
- 5 – UTFPR para uso dos laboratórios e o Hotel Tecnológico.

Key Activities



What Key Activities do our Value Propositions require?
Our Distribution Channels?
Customer Relationships?
Revenue streams?

CATEGORIES
Production
Problem Solving
Platform/Network

- 1 – Desenvolvimento e aprovação do protótipo.
- 2 – Desenvolvimento de fornecedores (Qualidade x Preço e tempo de fornecimento).
- 3 – Montagem do produto.
- 4 – Transporte/entrega do produto.
- 5 – Marketing e vendas

Key Resources



What Key Resources do our Value Propositions require?
Our Distribution Channels? Customer Relationships?
Revenue Streams?

TYPES OF RESOURCES
Physical
Intellectual (brand patents, copyrights, data)
Human
Financial

- 1 – Auxílio do Hotel Tecnológico para o desenvolvimento da capacidade empreendedora.
- 2 – Recurso humano técnico e comercial.
- 4 – Computador + Internet + Software de desenho 3D.
- 5 – Ambiente para montagem do Produto.
- 6 – R\$ 1000,00 para construção do primeiro protótipo.

Value Propositions



What value do we deliver to the customer?
Which one of our customer's problems are we helping to solve?
What bundles of products and services are we offering to each Customer Segment?
Which customer needs are we satisfying?

CHARACTERISTICS
Newness
Performance
Customization
"Getting the Job Done"
Design
Brand/Status
Price
Cost Reduction
Risk Reduction
Accessibility
Convenience/Usability

- 1 – Liberdade para o cliente produzir o próprio filamento.
- 2 – Reduzir o custo em até 90% do filamento.
- 3 - Colocar a disposição no mercado um produto e com assistência nacional.
- 4 – Possibilitar o uso de material reciclado, remetendo ao senso de sustentabilidade.

Customer Relationships

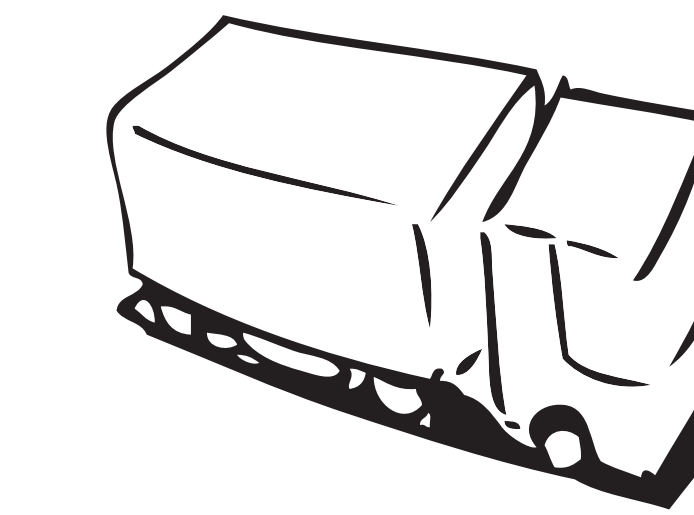


What type of relationship does each of our Customer Segments expect us to establish and maintain with them?
Which ones have we established?
How are they integrated with the rest of our business model?
How costly are they?

EXAMPLES
Personal assistance
Dedicated Personal Assistance
Self-service
Automated Services
Communities
Co-creation

- 1 - Boa descrição do produto online, facilitando ao máximo a decisão do cliente no momento da compra.
- 2 - Suporte para peças, as quais sofrem desgaste durante o funcionamento.

Channels



Through which Channels do our Customer Segments want to be reached?
How are we reaching them now?
How are our Channels integrated?
Which ones work best?
Which ones are most cost-efficient?
How are we integrating them with customer routines?

CHANNEL PHASES
1. Awareness
How do we raise awareness about our company's products and services?
2. Evaluation
How do we help customers evaluate our organization's Value Proposition?
3. Purchase
How do we allow customers to purchase specific products and services?
4. Delivery
How do we deliver a Value Proposition to customer?
5. After sales
How do we provide post-purchase customer support?

- 1 - Website Próprio
- 2 - Anúncios online (Ads).
- 3 - Contato por telefone ou conferência.
- 4 - Utilização de marketplaces para exposição dos produtos nos principais sites de venda (Walmart, extra...)
- 5 – Transporte por encomenda.

Cost Structure

What are the most important costs inherent in our business model?
Which Key Resources are most expensive?
Which Key Activities are most expensive?

IS YOUR BUSINESS MORE:
Cost Driven (leanest cost structure, low price value proposition, maximum automation, extensive outsourcing)
Value Driven (focused on value creation, premium value proposition)

SAMPLE CHARACTERISTICS:
Fixed Costs (salaries, rents, utilities)
Variable costs
Economies of scale
Economies of scope

- 1 – RH.
- 2 – Montagem.
- 3 – Custos com fornecedores (1º protótipo de R\$1000,00).
- 4 – Custo de entrega.
- 5 – Custo de marketing.
- 6 – Custo para Website.



Revenue Streams

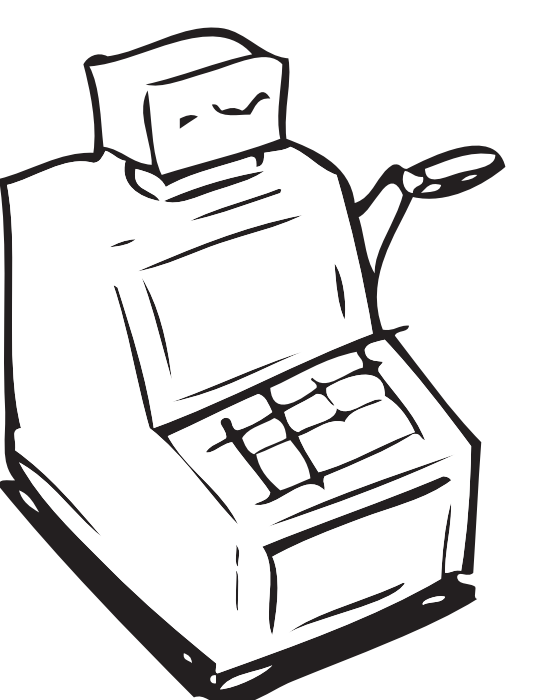
For what value are our customers really willing to pay?
For what do they currently pay?
How are they currently paying?
How would they prefer to pay?
How much does each Revenue Stream contribute to overall revenues?

TYPES
Asset sale
Usage fee
Subscription Fees
Lending/Renting/Leasing
Licensing
Brokerage fees
Advertising

FIXED PRICING
List Price
Product feature dependent
Customer segment dependent
Volume dependent

DYNAMIC PRICING
Negotiation/Bargaining
Yield Management
Real-time-Market

- 1 – A fonte de renda virá da venda do produto, por preço fixo no varejo e negociação para empresas e instituições de ensino.



ANEXO A – LISTA DE CURSOS DE ENGENHARIA E DESIGN

Nomes dos cursos de engenharia	Quantidade no Brasil
ENGENHARIA AERONÁUTICA	10
ENGENHARIA AEROESPACIAL	6
ENGENHARIA MECÂNICA AERONÁUTICA	2
ENGENHARIA AERONÁUTICA E ESPAÇO	1
ENGENHARIA ACÚSTICA	1
ENGENHARIA BIOMÉDICA	19
ENGENHARIA DE BIOPROCESSOS E BIOTECNOLOGIA	15
ENGENHARIA DE BIOPROCESSOS	6
ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS	5
ENGENHARIA BIOQUÍMICA	2
ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA	2
ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS	1
ENGENHARIA QUÍMICA	230
ENGENHARIA INDUSTRIAL QUÍMICA	2
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO QUÍMICA	2
ENGENHARIA DE MATERIAIS	55
ENGENHARIA METALÚRGICA	31
ENGENHARIA CERÂMICA	1
ENGENHARIA DE PLÁSTICOS	1
ENGENHARIA DE MATERIAIS E NANOTECNOLOGIA	1
ENGENHARIA MECÂNICA - ÊNFASE EM MATERIAIS METÁLICOS	1
ENGENHARIA ELÉTRICA	576
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO	213
ENGENHARIA ELETRÔNICA	51
ENGENHARIA MECATRÔNICA	41
ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA	5
ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE	3
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA	3
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES	3
ENGENHARIA ELÉTRICA - ELETROTÉCNICA	2
ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO	1
ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	1
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS	1
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO ELÉTRICA	1
ENGENHARIA DE MECATRÔNICA	1
ENGENHARIA DE INSTRUMENTAÇÃO, AUTOMAÇÃO E ROBÓTICA	1
ENGENHARIA ELETROTÉCNICA	1
ENGENHARIA ELÉTRICA - ÊNFASE EM ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICA	1
ENGENHARIA ELÉTRICA - ÊNFASE AUTOMAÇÃO E CONTROLE	1
ENGENHARIA ELÉTRICA - ÊNFASE EM ELETRÔNICA	1
ENGENHARIA ELÉTRICA - ÊNFASE EM SISTEMAS DE ENERGIA E AUTOMAÇÃO	1
ENGENHARIA ELÉTRICA - ÊNFASE EM TELECOMUNICAÇÕES	1
ENGENHARIA ELÉTRICA - ROBÓTICA E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	1

ENGENHARIA ELÉTRICA - SISTEMAS DE POTÊNCIA	1
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO	875
ENGENHARIA MECÂNICA	507
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA	41
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA	10
ENGENHARIA FÍSICA	9
ENGENHARIA AUTOMOTIVA	7
ENGENHARIA NAVAL	5
ENGENHARIA NUCLEAR	1
ENGENHARIA MECÂNICA NAVAL	1
ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA	1
ENGENHARIA MECÂNICA E DE AUTOMÓVEIS	1
ENGENHARIA MECÂNICA AUTOMOTIVA	1
ENGENHARIA MECÂNICA E DE ARMAMENTO	1
ENGENHARIA MECÂNICA EMPRESARIAL	1
ENGENHARIA DE PRODUCAO - HABILITACAO MECANICA	1
ENGENHARIA DE MANUFATURA	1
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E QUALIDADE	1
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS	1
ENGENHARIA MECÂNICA - ÊNFASE EM MECÂNICA PLENA	1
ENGENHARIA MECÂNICA - ÊNFASE EM PROJETOS	1
ENGENHARIA DE ALIMENTOS	110
ENGENHARIA AGROINDUSTRIAL INDÚSTRIAS ALIMENTÍCIAS	1
ENGENHARIA CIVIL	970
ENGENHARIA AMBIENTAL	190
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA	180
ENGENHARIA DE MINAS	29
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL	12
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL	5
ENGENHARIA DE TRANSPORTES	5
ENGENHARIA GEOLÓGICA	4
ENGENHARIA HÍDRICA	4
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL	3
ENGENHARIA SANITÁRIA	3
ENGENHARIA AMBIENTAL E URBANA	2
ENGENHARIA DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA	2
ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA	2
ENGENHARIA CIVIL COSTEIRA E PORTUÁRIA	1
ENGENHARIA CIVIL DA MOBILIDADE	1
ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA	1
ENGENHARIA CIVIL EMPRESARIAL	1
ENGENHARIA DA MOBILIDADE	1
ENGENHARIA PORTUÁRIA	1
ENGENHARIA FERROVIÁRIA E LOGÍSTICA	1
ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA	1
ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO	1
ENGENHARIA DE MINAS E MEIO AMBIENTE	1

ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E DO MEIO AMBIENTE	1
ENGENHARIA AGRÔNOMICA	66
ENGENHARIA AGRÍCOLA	24
ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL	12
ENGENHARIA AGROINDUSTRIAL AGROQUÍMICA	1
ENGENHARIA DE AGRONEGÓCIOS	1
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL	3
ENGENHARIA DE PESCA	23
ENGENHARIA DE AQUICULTURA	10
ENGENHARIA FLORESTAL	74
ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA	8
ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO	210
ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO	46
ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES	45
ENGENHARIA DE SOFTWARE	35
ENGENHARIA DE SISTEMAS	4
ENGENHARIA ELÉTRICA - TELECOMUNICAÇÕES	3
ENGENHARIA DE COMUNICAÇÕES	2
ENGENHARIA DE REDES DE COMUNICAÇÃO	2
ENGENHARIA COMPUTACIONAL	1
ENGENHARIA EM SISTEMAS DIGITAIS	1
ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E INFORMAÇÃO	1
ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO - ÊNFASE SISTEMAS CORPORATIVOS	1
ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO EMPRESARIAL	1
ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS	1
ENGENHARIA DE INFORMAÇÃO	1
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE COMPUTAÇÃO	1
ENGENHARIA ELÉTRICA - SISTEMAS ELETRÔNICOS	1
ENGENHARIA ELÉTRICA - ÊNFASE EM COMPUTAÇÃO	1
ENGENHARIA ELÉTRICA - ÊNFASE EM ELETRÔNICA E SISTEMAS	1
ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA	1
ENGENHARIA DE PETRÓLEO	66
ENGENHARIA DE ENERGIA	19
ENGENHARIA DE PETRÓLEO E GÁS	8
ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS	5
ENGENHARIA AMBIENTAL E ENERGIAS RENOVÁVEIS	4
ENGENHARIA BIOENERGÉTICA	2
ENGENHARIA DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO	1
ENGENHARIA EM ENERGIA	1
ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E AMBIENTE	1
ENGENHARIA ELÉTRICA - ENERGIA	1
ENGENHARIA TÊXTIL	6
ENGENHARIA DE AGRIMENSURA	7
ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA	6
ENGENHARIA CARTOGRÁFICA	5

ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA	5
ENGENHARIA	53
TECNOLOGIA EM ENGENHARIA	1
ENGENHARIA INDUSTRIAL	1
ENGENHARIA DE GESTÃO	1
ENGENHARIA DE INOVAÇÃO	1
ENGENHARIA DE SEGURANÇA NO TRABALHO	2
ENGENHARIA DE SAÚDE E SEGURANÇA	1

Estimativa de cursos	Total	Fração
Grupo 1 - 50%	2772	1386,00
Grupo 2 - 25%	2228	557,00
Grupo 3 - 12,5%	83	10,38
Total:	5083	1953,38
Razão:		38,4%

Nome dos cursos de design	Quantidade no Brasil
DESIGN	172
DESIGN DE INTERIORES	197
DESIGN DE PRODUTO	53
DESIGN - INDUSTRIAL	1
DESIGN DE MÓVEIS	1
DESIGN DIGITAL	8
DESIGN DE AMBIENTES	2
DECORAÇÃO & DESIGN	1
ARTES VISUAIS - DESIGN DE INTERIORES	1
MODA, DESIGN E ESTILISMO	1
DESENHO INDUSTRIAL - DESIGN DIGITAL	1
INTERDISCIPLINAR EM ARTES E DESIGN - BI/LI	1
DESIGN DE CALÇADOS	1
DESIGN DE CARNAVAL	1
DESIGN DE MODA	166
DESIGN - MODA	1
DESENHO INDUSTRIAL - DESIGN DE MODA	1
DESIGN DE MODA - ESTILISMO	1
DESIGN DE MODA - MODELAGEM	1
MODA E DESIGN	1
DESIGN GRÁFICO	168
COMUNICAÇÃO VISUAL DESIGN	1
ARTES VISUAIS - DESIGN GRÁFICO	1
DESIGN PROGRAMAÇÃO VISUAL	1
DESIGN VISUAL	1
DESIGN DE GAMES	2
DESIGN DE ANIMAÇÃO	4
WEB DESIGN	6
COMUNICAÇÃO EM CRIAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE WEB SITES E	1
WEB DESIGN E INTERNET	1
WEB DESIGN E PROGRAMAÇÃO	1
WEB DESIGNER	1
WEB DESIGNER E WEB MASTER	1
TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO EM WEB-DESIGNER	2
PROJETO EM WEB DESIGN	1
DESIGN EDUCACIONAL	1

Estimativa de cursos	Total	Fração
Grupo 1 - 50%	439	219,50
Grupo 2 - 25%	345	86,25
Grupo 3 - 12,5%	21	2,63
Total:	805	308,38
Razão:	38,3%	

