



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE TELEINFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

ANTONIO FERNANDES DA SILVA JÚNIOR

**RECICLAGEM DE POLÍMEROS NA CRIAÇÃO DE INSUMO PARA IMPRESSORAS
3D**

FORTALEZA

2023

ANTONIO FERNANDES DA SILVA JÚNIOR

RECICLAGEM DE POLÍMEROS NA CRIAÇÃO DE INSUMO PARA IMPRESSORAS 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia da Computação do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Dr. José Tarcísio Costa Filho.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S578r Silva Junior, Antonio Fernandes da.
Reciclagem de polímeros na criação de insumo para impressoras 3D / Antonio Fernandes da Silva Junior. –
2023.
51 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia de Computação, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. José Tarcísio Costa Filho.

1. Impressora 3D. 2. Filamento. 3. Polímero. I. Título.

CDD 621.39

ANTONIO FERNANDES DA SILVA JÚNIOR

RECICLAGEM DE POLÍMEROS NA CRIAÇÃO DE INSUMO PARA IMPRESSORAS 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia da Computação do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia da Computação.

Aprovada em: xx/xx/xxxx.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Tarcísio Costa Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Manfredo Luiz Lins e Silva
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará
(NUTEQ)

Me. Mauri Saraiva dos Santos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus. Aos meus pais, Antonio Fernandes da
Silva e Antonia Alexandra Fernandes da Silva.

AGRADECIMENTOS

À Instituição Universidade Federal do Ceará - UFC, pela oportunidade de fazer uma graduação com ensino de qualidade.

Ao Prof. Dr. José Tarcísio Costa Filho, pela excelente orientação.

Aos participantes da banca examinadora Dr. Manfredo Luiz Lins e Silva e Mauri Saraiva dos Santos pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A minha namorada Layessa Edwiges Vieira Ferreira, por ter me apoiado e me ajudado desde o início deste sonho, não deixando faltar forças para continuar.

Aos meus pais Antonio Fernandes da Silva e Antonia Alexandra Fernandes da Silva e aos meus irmãos Kelton Fernandes da Silva e Jéssica Fernandes da Silva por terem sido inspiração e sempre estarem ao meu lado.

Aos meus amigos de dentro e fora da Universidade, que fizeram parte da minha jornada acadêmica e fazem parte da minha vida.

Aos professores do Departamento de Teleinformática (DETI), pela contribuição com a minha formação.

Ao Nutec - GEMEA e aos funcionários, em especial Francisco Renan Scott de Moura, por possibilitar a execução do projeto.

Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de
você, menos o seu conhecimento." (Albert
Einstein, 1918)

RESUMO

O descarte de polímeros no lixo doméstico ou como resíduos industriais é um fator que chama a atenção da sociedade pelo seu alto volume. Sabe-se que há muitas formas de reciclar tais materiais e uma das mais inovadoras é por meio da reutilização no processo de impressão Tridimensional (3D), uma tecnologia ascendente no mercado mundial, pois possibilita a manufatura de diversos produtos através de polímeros. Este trabalho estudou como gerar filamento plástico para impressoras 3D através de um dos polímeros mais facilmente encontrados no cotidiano, o Polietileno tereftalato (PET). Desenvolveu-se um equipamento para fabricar o filamento a partir de garradas PET e estudado as características desse filamento, como flexibilidade e resistência. O resultado dos experimentos foram positivos, conseguindo um filamento com aproveitamento de 50% da matéria prima inicial, apresentando bastante resistência mecânica. O filamento produzido é recomendado para projetos de prototipagem ou produtos de baixo custo, por ser um filamento persorvente de um processo de produção simples.

Palavras-chave: Impressora 3D; Filamento; Polímeros

ABSTRACT

The disposal of polymers in domestic waste or as industrial waste is a factor that calls the attention of society due to its high volume. It is known that there are many ways to recycle such materials and one of the most innovative is through reuse in the 3D printing process, a rising technology in the world market, as it enables the manufacture of various products using polymers. This work studied how to generate plastic filament for 3D printers using one of the most easily found polymers in everyday life, PET. Equipment was developed to manufacture the filament from PET claws and the characteristics of this filament, such as flexibility and resistance, were studied. The results of the experiments were positive, achieving a filament with use of 80% of the initial raw material, presenting a lot of mechanical resistance. The filament produced is recommended for prototyping projects or low-cost products, as it is a absorbent filament of a simple production process.

Keywords: 3D printer; Filament; polymers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de uma extrusora	15
Figura 2 – Ilustração do processo de trefilação	16
Figura 3 – Processo de modelagem	18
Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema	18
Figura 5 – Método da Resposta Transitória - Curva de Reação	20
Figura 6 – Diagrama de blocos - modelagem de um motor DC	21
Figura 7 – Trefiladora	26
Figura 8 – Resposta ao degrau com reta tangente ao ponto de inflexão	27
Figura 9 – Comparação do modelo com os dados reais	28
Figura 10 – Sinal do encoder no osciloscópio	29
Figura 11 – Comparação entre amostras	30
Figura 12 – Modelagem do sistema de tração	31
Figura 13 – Planta do controle em malha fechada com ruído	31
Figura 14 – Resposta do controle de velocidade	32
Figura 15 – Peça rompida feita com PLA	37
Figura 16 – Peça impressora com PET	38
Figura 17 – Peça impressa com PLA	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros pelo método de Ziegler e Nichols.	21
Tabela 2 – Parâmetros do controle de temperatura.	29
Tabela 3 – Parâmetros do controle de velocidade angular.	31
Tabela 4 – Performance e robustez do controle de velocidade.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
DC	corrente continua
FMD	Fused Deposition Modeling
ms	Milisegundos
PET	Polietileno tereftalato
PLA	Poliácido láctico
Td	Temperatura de fusão
Tg	Temperatura de Transição Vítreá

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos Gerais	13
1.2	Objetivos Específicos	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Processos de fabricação de filamento	15
2.2	Identificação do modelo e síntese de controle	17
2.2.1	<i>Processo de aquecimento</i>	19
2.2.2	<i>Processo de tracionamento</i>	21
2.3	Propriedades do PET: resistência mecânica e cristalização	23
3	MATERIAIS E MÉTODO	25
3.1	Materiais	25
3.2	Aplicação Metodológica	26
3.2.1	<i>Controle de temperatura</i>	27
3.2.2	<i>Controle de velocidade</i>	29
3.2.3	<i>Espessura do filamento constante</i>	32
4	RESULTADOS	35
4.1	Largura do filete	35
4.2	Combinação temperatura x tração	35
4.3	Qualidade do filamento fabricado	36
4.4	Propriedades do insumo produzido	36
4.5	Viabilidade financeira e aplicações	38
4.6	Capacidade produtiva	39
4.7	Identificação de falhas de operação produtivas	40
5	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42
	GLOSSÁRIO	44
	ANEXO A –CÓDIGO DO MÉTODO DA RETA TANGENTE	45
	ANEXO B – DEMOSTRAÇÃO MATEMÁTICA DO CÁLCULO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA UM MOTOR DC	47

1 INTRODUÇÃO

A 4ª Revolução industrial, ou Indústria 4.0, é uma realidade vivida no mundo moderno, que conecta e automatiza os meios de produção e torna as fábricas mais eficientes, seguras e produtivas. Contudo, a maior parte das fábricas usam o modelo linear de produção, extraindo matéria prima, produzindo e descartando, que vem esgotando os recursos disponíveis. Em contraponto, a economia circular é um conceito que surgiu em 1989 e tem como uma de suas propostas reutilizar recursos pós consumo, atribuindo valor a materiais descartados através do reuso ou reciclagem (SEBRAE, 2023).

Há uma diferença entre estas duas técnicas, pois o reuso ocorre quando uma embalagem é reutilizada em sua forma original ou com poucas modificações para poder ser reaproveitada. Já a reciclagem envolve a transformação do material através de algum processo para poder ser reutilizada.

A reciclagem, apesar de envolver energia no processo, tem um custo bem menor que extrair e processar um material virgem. A reciclagem é uma técnica boa para reaproveitar a energia utilizada no processamento inicial do material, pois, ao invés de desperdiçar toda a energia gasta na produção, descartando os resíduos em aterros ou reutilizando uma pequena parte por meio da incineração em usinas termelétricas, podemos utilizar o material de uma forma mais eficiente.

O plástico é um dos materiais mais utilizados na indústria e causa grande poluição no meio ambiente. Segundo o 12º censo da Associação Brasileira da Indústria de PET (ABIPET) realizado em 2021, 56,4% do volume total de PET produzido no país foi reciclado em 2021, sendo somente 29% deste volume utilizado novamente na fabricação de embalagens para o consumidor. Esse índice é alto se comparado a outros países, porém não é maior por conta de como a reciclagem é feita atualmente, necessitando da coleta seletiva e do transporte para empresas que realizam a reciclagem das embalagens.

A reciclagem de PET em ambiente doméstico tem vantagens se comparado ao ambiente industrial, como: evitar o transporte para centros de reciclagem ou afins e a descontaminação por produtos químicos, já que o material não vai mais para o lixo.

Uma das novas tecnologias que ganhou força com a indústria 4.0 foram as impressoras 3D, inventadas em 1984 pelo norte-americano Chuck Hull (MENIN, 2023), elas possibilitam a manufatura de diversos produtos com alguns polímeros ou resina. Há diversos tipos de impressoras 3D no mercado, as mais comuns são as *Fused Deposition Modeling (FMD)*, ou modelagem

por deposição fundida, por serem de fácil uso e terem os custos de manutenção e de operação baixos. Essa tecnologia está se tornando bastante acessível por conta da possibilidade do uso doméstico, sendo necessário apenas um espaço para o equipamento, o insumo para a fabricação e modelos 3D dos objetos ou peças a serem fabricados.

O mercado de impressão 3D no Brasil em 2023 cresceu 5% em relação a 2022, segundo dados do IDC (International Data Company). Um dos processos que mais consome recursos dentro da impressão 3D é a prototipagem de peças, pois comumente necessita de ajustes após a fabricação, seja para um funcionamento mais adequado da peça, um encaixe mais preciso ou mesmo um melhor design. Desta forma, agregar valor a uma embalagem, que estava destinada a virar lixo em algum aterro, por meio da sua utilização na impressão 3D e transformá-la em um objeto útil novamente, é benéfico social e ambientalmente e pode ser transformado em fonte de renda para pessoas e/ou empresas que visam a possibilidade de novas fontes de renda.

Além disso, o aumento do consumo de produtos pela sociedade e por consequência o elevado uso de embalagens plásticas com um longo ciclo de decomposição e provenientes de fontes não renováveis, é expressivamente necessário a implementação da economia circular em diversos ambientes, como empresas, instituições de ensino ou mesmo em casa.

Por fim, é importante saber que alguns materiais, como o PET, tem uma maior flexibilidade e resistência à temperatura em relação ao Políácido láctico (PLA), um dos materiais mais usados na impressão 3D. Esse fato faz com que o PET seja mais indicado para peças que sofram um maior esforço, como engrenagens, ou sejam expostas a fontes de calor, como o sol (BESKO; BILYK, 2017).

Partindo dessas informações, o presente trabalho discorre sobre a construção de um equipamento de pequeno porte e que tenha adaptabilidade para diferentes materiais que eventualmente possam ser reciclados, com o intuito de fabricação de filamento de qualidade igual ou aproximada a filamentos comercializados industrialmente.

1.1 Objetivos Gerais

Produzir insumo para impressora 3D empregando embalagens plásticas de material reciclado, com qualidade similar a filamentos comerciais, em relação a espessura constante e densidade uniforme, através de uma trefladora desenvolvida em laboratório.

1.2 Objetivos Específicos

1. Propor e construir uma unidade de trefilação para produzir filamentos utilizando o PET como referência de material reciclável.
2. Analisar as propriedades do filamento reciclado e identificar as possíveis aplicações em que ele pode ser utilizado.
3. Realizar análise comparativa das peças produzidas por impressora 3D com filamento reciclado e das produzidas com filamentos comerciais, considerando os seguintes aspectos: a qualidade do acabamento e a resistência mecânica.
4. Testar e aplicar métodos de controle que viabilizem o funcionamento da trefiladora

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, será apresentado um panorama das principais abordagens teóricas adotadas na área, contextualizando o estudo dentro do campo de conhecimento em que se insere. Serão discutidos os conceitos-chave, definições e termos específicos, a fim de estabelecer uma linguagem comum e proporcionar uma compreensão clara dos fundamentos teóricos relevantes (VILELLA, 2011).

Ao final desta seção, espera-se que o leitor tenha uma compreensão aprofundada dos principais conceitos teóricos relevantes ao tema em questão, bem como da relevância do estudo no contexto acadêmico e científico.

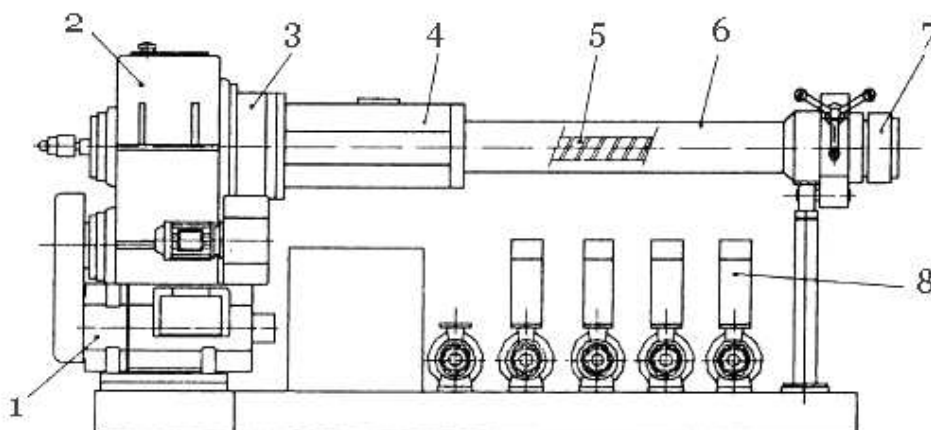
2.1 Processos de fabricação de filamento

Um dos métodos mais utilizados para a fabricação de filamento atualmente é a extrusão. Neste processo, a matéria prima é inserida em uma extrusora através do alimentador (item 4 da legenda), conduzido por um fuso (item 5) até a parte aquecida, onde ocorre a fusão. Em seguida o material aquecido é extrudado, ou seja, é forçado a passar por um orifício na espessura desejada para obter o filamento. Um modelo de extrusora está descrito na Figura 1

Os componentes identificados na figura são:

- | | |
|--------------------|----------------------------|
| 1. Motor | 5. Fuso |
| 2. Redutor | 6. Tudo aquecido |
| 3. Rolamento axial | 7. Bico extrusor |
| 4. Alimentador | 8. Processo de aquecimento |

Figura 1 – Estrutura de uma extrusora



Fonte: (VILELLA, 2011).

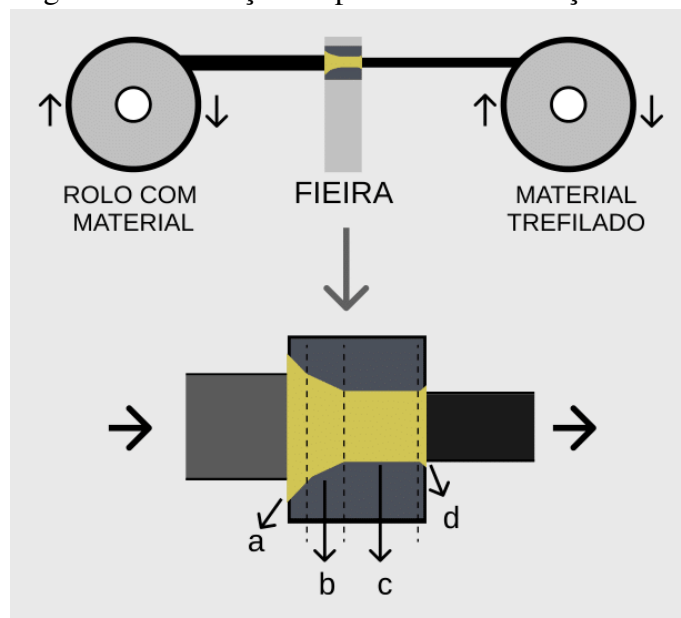
A popularidade desse processo é consequência da sua alta capacidade produtiva (PESSI, 2018), porém neste processo, o material precisa ter um tamanho pequeno o suficiente para entrar nos sucros do fuso, geralmente é usado *pellets*, granulado de resina plástica composto geralmente por material virgem (FALCÃO, 2011).

Para uma reciclagem de embalagens em ambiente domésticas seria necessário, para possibilitar a extrusão, triturar estas embalagens até adquirir o tamanho adequado.

Em geral, o processo de extrusão descrito anteriormente necessita que o material tenha um tamanho suficientemente reduzido para ser conduzido pelo fuso. Para materiais reciclados, há a necessidade da trituração do material a fim de obter um tamanho adequado, para possibilitar a extrusão. Cabe salientar que um triturador de pequeno porte não é produzido comercialmente.

A fim de evitar o processo de trituração, é possível utilizar a trefilação do material plástico para a fabricação do filamento. O processo de trefilação consiste em diminuir a seção transversal de um material por meio de sua tração através de um orifício, onde o diâmetro da saída é menor em relação ao diâmetro de entrada. (MARTINS NORBERTO. MACIEL, 2016), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Ilustração do processo de trefilação



Fonte: Autoria própria.

A fieira é o componente fundamental na trefilação, o modelo tradicional aplicado a indústria possui 4 regiões (DIETER, 1981), a saber (vide Figura 2):

- Região a: possui o ângulo mais aberto, para que o material seja inserido sem resistência

- Região b: possui um ângulo mais fechado e comprime o material
- Região c: não possui angulação e serve para moldar o material
- Região d: tem um ângulo contraposto ao de entrada com o intuito de não causar abrasão na saída.

O processo de trefilação tem poucos passos, tendo início por introduzir o material através da feira, após esse passo é feito o acoplamento do filete ao tracionador e feito o acionamento da trefiladora.

Problemas durante o processo de trefilação podem acontecer, tais como o rompimento do material por uma fragilidade no fio tracionado ou por excesso de tração e o acabamento superficial com falhas devido a impurezas ou baixa compressão. Neste trabalho, estes problemas foram remediados na proposta e implementação do processo de trefilação.

2.2 Identificação do modelo e síntese de controle

O controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é um método amplamente utilizado em sistemas dinâmicos (ASTROM; HAGGLUND, 1995). Ele foi desenvolvido como uma evolução dos métodos de controle anteriores, como o controle proporcional e o controle proporcional-integral. A combinação dos três componentes resulta em um melhor desempenho de controle (DORF; BISHOP, 2010).

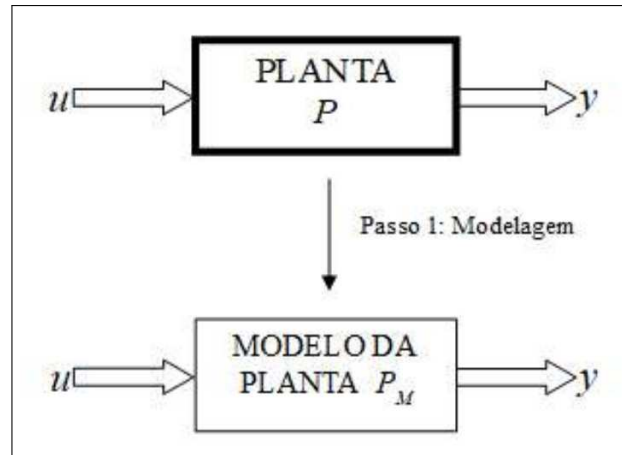
A origem do controle PID remonta ao início do século XX, com os trabalhos pioneiros de engenheiros e cientistas como Nicolas Minorsky, Harold Chestnut e outros. O controle PID foi desenvolvido para lidar com características dinâmicas complexas, como tempo de atraso e oscilações indesejadas (OGATA, 2010).

O controle PID é amplamente utilizado em diversas aplicações, como controle de temperatura, velocidade de motores, ambas utilizadas no trabalho, posicionamento de robôs e sistemas de automação industrial (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005). Sua versatilidade, simplicidade de implementação e eficácia o tornaram um dos métodos de controle mais populares e amplamente adotados na indústria.

Na Engenharia, estamos frequentemente interessados no desenvolvimento de um modelo matemático de um fenômeno físico qualquer a fim de se fazer uma previsão analítica sobre o comportamento do referido fenômeno. Nas aplicações de automação, é de grande importância a modelagem da planta física na qual se deseja controlar e prever o efeito do esforço de controle e das perturbações na planta. Pela planta, entende-se como qualquer processo

caracterizado por certo número de entradas u e de saídas y como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Processo de modelagem



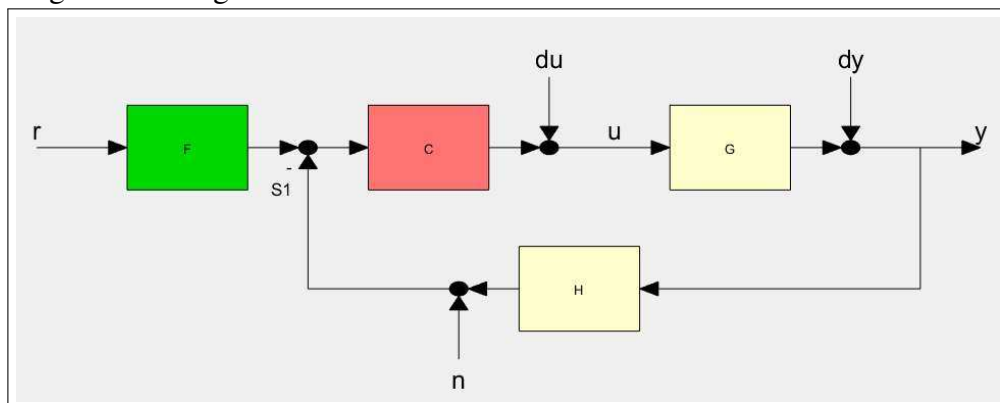
Fonte: elaborada pelo autor.

Às vezes, o modelo não pode ser obtido de argumentos físicos por causa, por exemplo, da complexidade dos processos físicos. Neste caso, recorrer-se-á ao método experimental para se obter o modelo da planta. Ao mesmo, dá-se o nome de Identificação ou Estimação de parâmetros (AGUIRRE, 2007).

A técnica utilizada emprega um sinal determinístico de entrada u e um modelo ARX (autorregressivo e entrada exógena), para a estimação dos parâmetros do modelo. Estas equações constituem o modelo matemático da planta (AGUIRRE, 2007).

Neste trabalho, será considerado o diagrama de blocos (Figura 4) representando o controle automático para os dois sistemas dinâmicos, aquecimento e tracionamento detalhados a seguir.

Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema



Fonte: elaborada pelo autor.

Onde:

G – Função de transferência da planta.

H – Função de transferência do sensor de temperatura.

C - Função de transferência do controlador.

F – Fator de escala.

r - Valor desejado da temperatura.

du - sinal de perturbação.

n – ruído no sinal medido pelo sensor.

2.2.1 *Processo de aquecimento*

No caso do aquecimento do filamento, a dinâmica pode ser satisfatoriamente aproximada por funções de primeira com tempo morto. Naturalmente, as metodologias de estimação de parâmetros podem ser utilizados para obter as funções a partir de um sinal genérico de entrada.

Modelagem do sistema

A representação do modelo matemático obtido desse sistema é descrito pelas seguintes equações dinâmicas:

Planta:

$$Y(s) = \frac{K_1}{\tau \cdot s + 1} U(s) + \frac{K_2}{\tau_1 \cdot s + 1} DU(s) \quad (2.1)$$

Sensor:

$$H(s) = \frac{Y_s}{Y(s)} = \frac{K_s \cdot e^{-\theta_s}}{\tau_2 \cdot s + 1} \quad (2.2)$$

$K_s < 1$ e τ_2 é muito pequeno.

$Y_s = Y(t - \theta)$, θ é o tempo morto.

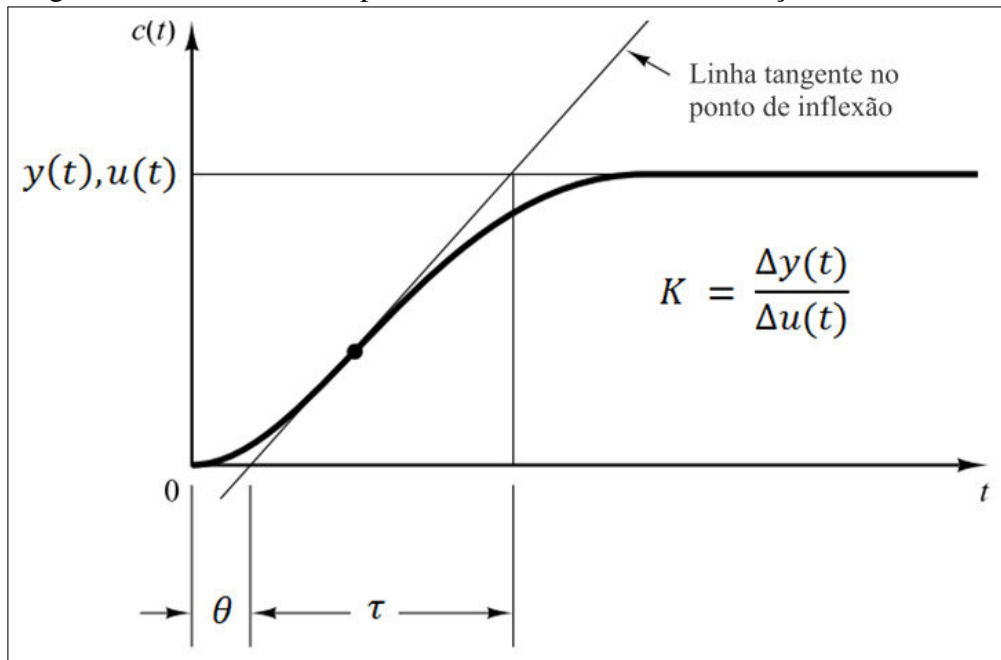
Desta forma, a função de transferência para sistema de primeira ordem com atraso é demonstrada na Equação 2.3:

$$\frac{Y_s(s)}{U(s)} = GH(s) = \frac{Y_s}{Y} \cdot \frac{Y}{U} = \frac{K \cdot K_s \cdot e^{-\theta_s}}{\tau \cdot s + 1} \quad (2.3)$$

A estimação preliminar dos parâmetros da função de transferência (F.T.) são obtidos a partir do Método da Resposta Transitória - Curva de Reação, conforme Figura 5.

A curva em S pode ser caracterizada por duas constantes, o atraso θ e a constante de tempo τ , que podem ser determinadas por uma reta tangente aplicada no ponto de inflexão

Figura 5 – Método da Resposta Transitória - Curva de Reação



Fonte: (JUNIOR *et al.*, 2019)

da curva. Nos pontos onde a tangente intercepta o eixo das abscissas e a linha horizontal com ordenada K , obtêm θ e τ , respectivamente.

Síntese do controle

Dada a grande simplicidade aliada a aplicabilidade e satisfatória qualidade em aproximar sistemas reais compostos por dinâmicas de primeira ordem em série, há várias metodologias especialmente desenvolvidas para sintonizar os controladores PIDs a partir do ganho, tempo morto e constante de tempo de uma função de transferência.

Esta classe de metodologias representa um bom compromisso entre o tempo investido no projeto do controlador e desempenho alcançado. Neste trabalho, foi aplicada a metodologia da curva de reação ou resposta ao degrau para sintonia de controladores PID desenvolvida pelo engenheiro químico e matemático Ziegler e Nichols (1942), a partir de simulações empíricas de muitos sistemas dinâmicos distintos, proporcionando um desempenho aceitável para o controle de muitos processos industriais.

Os ganhos do controlador PID são obtidos em função da determinação de algumas características por meio de expressões matemáticas simples. A motivação em apresentar esta metodologia deve-se ao fato da relevante contribuição para a consolidação e confiabilidade do controle PID na indústria, servindo de base para outras metodologias de ajuste de parâmetros.

A sintonia de um controlador P, PI ou PID proposto por Ziegler e Nichols é dado pela Tabela 1.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{0.9 \cdot \tau}{K \cdot \theta}$	∞	0
PI	$\frac{0.9 \cdot \tau}{K \cdot \theta}$	$3.33 \cdot \theta$	0
PID	$1.2 \cdot \frac{\tau}{K \cdot \theta}$	$2 \cdot \theta$	$\frac{\theta}{2}$

Tabela 1 – Parâmetros pelo método de Ziegler e Nichols.

O controlador PID sintonizado por esta metodologia fornece:

$$C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) = 1.2 \cdot \frac{\tau}{K \cdot \theta} \cdot \left(1 + \frac{1}{2 \cdot \tau_s} + 0.5 \cdot \theta\right) \quad (2.4)$$

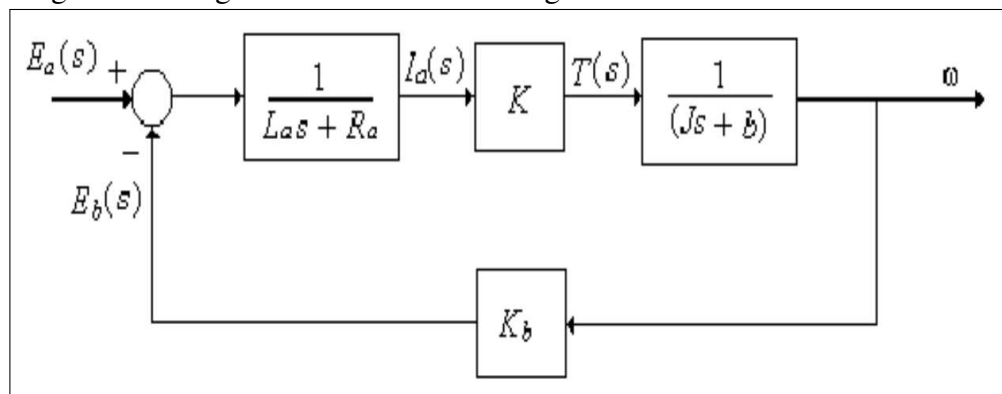
2.2.2 Processo de tracionamento

Modelagem do sistema

A função de transferência do motor apresentada abaixo, que relaciona a velocidade do movimento w com a tensão aplicada nos terminais de armadura e_a , é representada no diagrama de blocos, mostrado na Figura 6. O cálculo da função de transferência estão demonstrado no Apêndice B.

$$F(s) = \frac{W(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{(J_s + b) \cdot (L_a s + R_a) + K \cdot K_b} \quad (2.5)$$

Figura 6 – Diagrama de blocos - modelagem de um motor DC



Fonte: Autoria própria.

Onde os parâmetros associados a modelagem do motor CC são:

1. R_a - Resistência da armadura (Ω)
2. L_a - indutância da armadura (H)

3. i_a - corrente de armadura (A)
4. e_a - tensão de armadura (V)
5. e_b - f_{cem} - força contra eletromotriz (V)
6. θ - deslocamento angular do eixo do motor (rad)
7. T - torque desenvolvido pelo motor (N-m)
8. J - momento de inércia equivalente do motor Kg-m²
9. b - coeficiente de atrito viscoso equivalente do motor (N-m/rad/s)
10. i_f - representação do campo contínuo gerado pelo ímã permanente do motor (A)

Se a indutância de armadura é muito pequena, a constante de tempo elétrica pode ser desprezada frente a constante de tempo mecânica, logo a função de transferência é:

$$F(s) = \frac{W(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{(J_s + b) \cdot (R_a) + K \cdot K_b} \quad (2.6)$$

A metodologia de estimação de parâmetros utilizada neste trabalho emprega um sinal determinístico de entrada u e um modelo ARX (autorregressivo e entrada exógena). Essas equações constituem o modelo matemático da planta.

Neste trabalho, foi considerado as seguintes representações para a dinâmica de malha aberta:

$$\frac{Y_s(s)}{U(s)} = GH(s) = \frac{K}{\tau_s + 1} \quad (2.7)$$

Modelo contínuo (domínio s)

$$\frac{Y_s(z)}{U(z)} = GH(z) = \frac{b_1 z + b_2}{a_1 z + a_2} \quad (2.8)$$

Modelo discreto (domínio z)

Síntese do controle

A sintonia do controle pode ser feita através da resposta desejável de primeira ordem com um parâmetro de ajuste K , um conceito simples utilizado no projeto de sistemas de controle. É uma abordagem comum para definir um comportamento desejado em termos de uma resposta de primeira ordem e, em seguida, projetar um controlador adequado para alcançar essa resposta desejada.

O parâmetro de ajuste K é usado para controlar a velocidade de resposta do sistema e determinar a influência do controlador proporcional na resposta em malha fechada. Através do

projeto do controlador PID, é possível ajustar o valor de K para obter o desempenho desejado, como tempo de estabilização, overshoot, tempo de subida, entre outros.

Sabendo que a função de transferência é dada por :

$$L(s) = P(s) \cdot C(s)$$

O intuito é projetar um controlador para que $G(s)$ seja semelhante a:

$$L(s) = \frac{K}{s}$$

Então, a função de transferência em malha fechada será :

$$G(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)} = \frac{K}{s + K} = \frac{1}{(s/K) + 1}$$

Para um controlador PI, as funções são:

$$P(s) = \frac{K_0}{\tau_0 s + 1} \text{ e } C(s) = K_P + \frac{K_i}{s}$$

Como $L(s) = K/s$, os parâmetros do controle são :

$$K_p = \frac{\tau_0 \cdot K}{K_0} \text{ e } K_i = \frac{K}{K_0}$$

2.3 Propriedades do PET: resistência mecânica e cristalização

Para a produção dos filamentos a partir do PET, foi necessário estudar as propriedades do material a fim de entender sobre a sua resistência mecânica e seu aparência, para determinar métodos adequados de manipulação e processamento e chegar a um bom resultado.

A composição do PET é formada por uma unidade química repetitiva feita de “grupos de ácido tereftálico (grupo aromático que formam o segmento rígido e do etileno glicol (grupo alifático), que é a estrutura flexível da cadeia polimérica” (WELLEN; RABELLO, 2007).

Essas características possibilitam um excelente balanço de propriedades mecânicas, térmicas e de barreiras tornando o PET um excelente material para manipulação, principalmente devido a sua estrutura molecular regular e de polaridade média, fatores que favorecem a sua cristalização a partir do estado fundido (WELLEN; RABELLO, 2007).

De acordo com Leite *et al.* (2011) “a cristalização em polímeros é o alinhamento de segmentos de cadeias em um arranjo tridimensional e, polímeros com suficiente regularidade estrutural podem cristalizar em um intervalo de temperatura, entre a transição vítrea T_g e a Temperatura de fusão cristalina T_m .”

Dessa maneira, verificamos que a cristalização em um polímero depende do tempo disponibilizado para que as moléculas se organizem para formar o cristal, da presença de agentes nucleantes em sua composição química e das condições de cristalização do polímero (LEITE *et al.*, 2011).

A temperatura de transição vítrea é um fenômeno que ocorre em polímeros amorfos ou semicristalinos, resultante da redução do movimento das cadeias moleculares à medida que a temperatura diminui. À medida que o polímero é resfriado, a transição vítrea provoca uma mudança gradual nas propriedades, passando de um estado líquido para um material com características de borracha e, finalmente, para um sólido (CALLISTER, 2002). Durante essa transição, o polímero experimenta uma alteração na sua estrutura e nas propriedades mecânicas, tornando-se menos flexível e mais quebradiço. Esse comportamento é atribuído à diminuição da mobilidade das cadeias poliméricas à medida que a temperatura diminui, levando a uma maior rigidez e resistência do material. A temperatura de transição vítrea é um parâmetro importante a ser considerado no projeto e na aplicação de polímeros, uma vez que afeta diretamente o seu comportamento mecânico e suas propriedades térmicas.

A temperatura de fusão (T_m) é o valor médio da faixa de temperaturas em que ocorre a transição de um polímero semicristalino, resultando no desaparecimento das regiões cristalinas devido à fusão dos cristalitos. Nesse ponto, a energia se torna superior às forças intermoleculares secundárias, resultando na destruição da estrutura regular de empacotamento e na transição do estado do polímero de borrachoso para viscoso. A T_m é uma propriedade que ocorre exclusivamente na fase cristalina e, portanto, faz sentido apenas para polímeros semicristalinos. Ela afeta variáveis como volume específico, entalpia e outras propriedades relacionadas à estrutura e ao comportamento térmico desses materiais. (JUNIOR, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODO

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados no presente estudo, fornecendo uma descrição detalhada da aplicação dos métodos abordados no Capítulo 2. Serão abordados os procedimentos adotados para coleta de dados e análise. A compreensão dos materiais e métodos empregados garante a validade e confiabilidade dos resultados obtidos, permitindo a replicação do estudo e o embasamento dos argumentos discutidos nas seções subsequentes.

3.1 Materiais

A trefiladora pode ser dividida em 3 partes distintas, descritas a seguir:

1. **Tracionador:** estrutura de engrenagens dimensionadas para reduzir a velocidade de um motor de corrente contínua (DC) e aumentar o torque, força que produz rotação em um corpo, para proporcionar uma força de tração adequada. Outra vantagem desta redução é a maior precisão da velocidade final de tracionamento, visto que uma alteração na velocidade do motor é amenizada pelas relações das engrenagens do tracionador. Caso a relação entre o motor e o tambor fosse 1x1, ou seja, cada rotação no eixo do motor produziria uma rotação no eixo do tambor, a variação da resistência do material ao passar pela fiação não permitiria que a velocidade de tração fosse constante, mesmo com o controle PID (*Proporcional, Integral, Derivativo*) fazendo as devidas compensações. O motor DC utilizado tem um torque de 1,76 N.m.

As relações de redução são fixas entre as engrenagens e estão descritas abaixo:

- a) Caixa de redução do motor - 30:1.
- b) Redução intermediária - 4,5:1.
- c) Redução do tambor de tracionamento - 6,87:1.

Ao final, a relação entre o motor e o tambor de tracionamento é 930:1, que proporciona um bom controle de velocidade e adaptabilidade a diferentes materiais recicláveis.

2. **Processo de aquecimento:** Composto por um bloco de alumínio com a função de acoplar o cartucho aquecedor, componente resistivo que fornece calor para o processo, a fiação, que molda o material a ser trefilado e o sensor de temperatura utilizado para medir a temperatura do conjunto. Além do bloco, existe uma estrutura de alumínio em formato de "U" para fixar o processo e suportar a força de tração exercida no material.

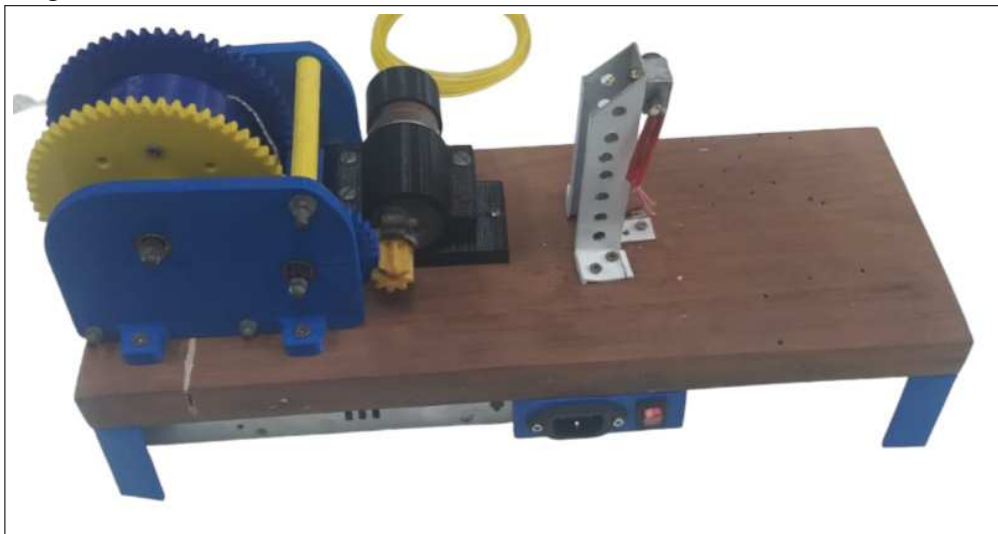
O sensor de temperatura é um termistor de 100k Ω , que varia de acordo com a alteração na

temperatura e funciona com 5V. O cartucho aquecedor é uma resistência DC com potência de 40W quando submetido a uma tensão de 12V.

3. **Central de controle:** composta por um arduino Mega, com processador ATmega2560, que possui um controlador PI individual para cada parte. O objetivo de utilizar o controlador PI neste projeto é garantir a estabilidade das duas grandezas, temperatura e tração, e a espessura constante do filamento durante o processo de extrusão. Além disso, é importante garantir a segurança do projeto e tratar os comportamentos que indicariam anomalias no sistema, tais como a não variação das grandezas dentro de um período de tempo, quando houver a excitação do sistema.

Na Figura 7 é possível observar a estrutura da trefiladora, composta pelo tracionador (Item 1) e pelo aquecedor (Item 2) na parte superior da base de madeira. A central de controle (Item 3) encontra-se na parte inferior da base do equipamento, a fim de proteger o microcontrolador e reduzir o tamanho da trefiladora.

Figura 7 – Trefiladora



Fonte: elaborada pelo autor.

3.2 Aplicação Metodológica

Esta seção tem como objetivo explicar em detalhes a aplicação dos métodos de sintonia e a obtenção dos valores ótimos para as configurações da trefilação. Busca-se ajustar os parâmetros do processo de trefilação, a fim de alcançar um desempenho ideal em termos de qualidade do produto final, eficiência e produtividade.

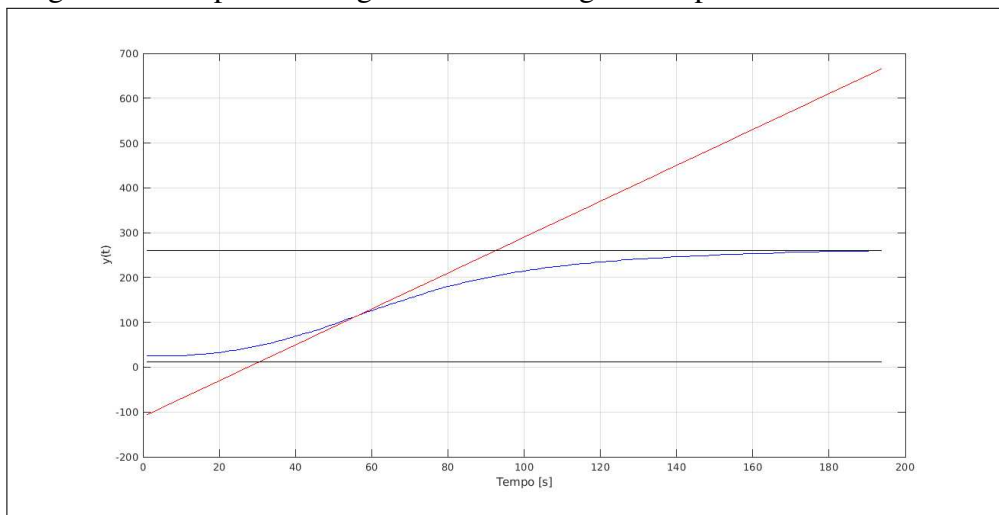
A sintonia dos controles desempenha um papel fundamental no bom funcionamento

do equipamento. Através desse processo é possível obter o ajuste preciso e otimizado dos parâmetros de controle, de modo a garantir um desempenho eficiente e confiável da trefiladora.

3.2.1 Controle de temperatura

Como citado na seção 2.2, o sistema de aquecimento é de primeira ordem com atraso, logo a função de transferência necessita apenas do ganho (k), da constante de tempo (τ) e do atraso (θ) para ser calculada. Essas constantes podem ser extraídas da curva de resposta ao degrau, aplicando o Método da reta tangente (Figura 8). O código utilizado para gerar a Figura 8 está no Apêndice A.

Figura 8 – Resposta ao degrau com reta tangente ao ponto de inflexão



Fonte: elaborada pelo autor.

O ganho é calculado a partir da variação da saída sobre a entrada, neste caso, a entrada é um degrau de 12V a partir do instante $t = 0s$. Neste instante, o valor da saída do sistema é 26°C e estabiliza em 268°C depois de 292s. A variação de temperatura é de 242°C, então $Ganho(k) = \frac{242}{12} = 20,16$.

A constante de tempo é equivalente ao tempo necessário para o sistema atingir 63,7% do valor final, neste projeto, atingir 205,5°C. τ corresponde a 64 s.

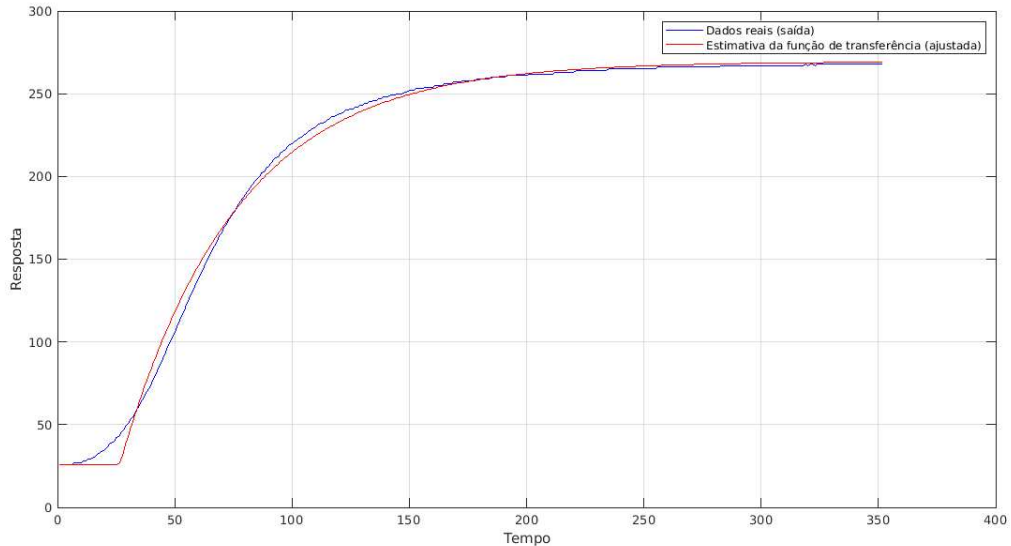
O atraso θ pode ser observado na Figura 8, onde a reta tangente toca do eixo das abscissas, equivalente a 25,5s.

Aplicando os valores extraídos da resposta transitória na função de transferência:

$$G(s) = \frac{20,16 * e^{-25.5}}{s * 64 + 1}$$

A função $G(s)$ está representada em vermelho na Figura 9 em comparação com a curva de resposta do sistema.

Figura 9 – Comparação do modelo com os dados reais



Fonte: Autoria própria

Uma vez que os parâmetros do modelo foram determinados, um algoritmo deve ser desenvolvido para calcular os ganhos do controlador PID.

Em um controlador PID a ação de controle é gerada através da soma de três termos: ação proporcional, integral e derivativa. Embora todos os controladores PID possuam esses três termos, as implementações do algoritmo PID poderão diferir consideravelmente. Neste projeto, para a implementação do controlador será empregado a forma padrão da ISA (Instrument Society of America), a qual pode ser escrita da seguinte forma:

$$C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$$

onde K_p , T_d e T_i são parâmetros do controlador e respectivamente, ganho proporcional, tempo derivativo e tempo integral.

Para realizar a sintonia do controle de temperatura, foi utilizado o método de Ziegler e Nichols, descrito na seção 2.2. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos através do método e os parâmetros usados após o ajuste fino.

Valores dos Parâmetros	Método de ZN	Ajuste Fino
K_p	0.2089	0.5
T_i	51	40
T_d	12.75	12.75

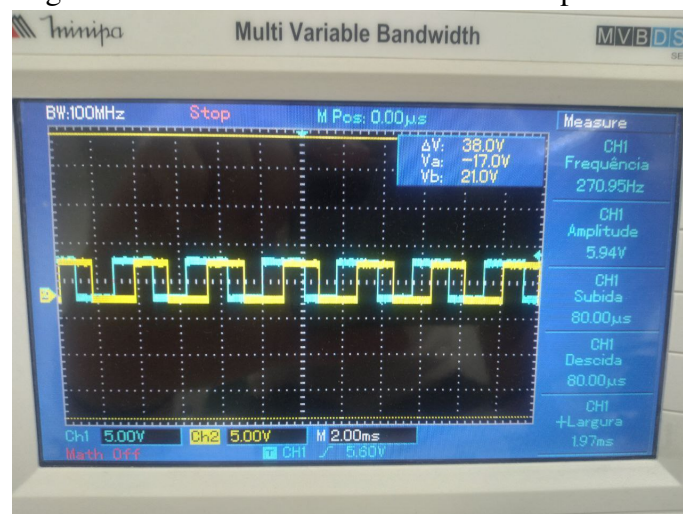
Tabela 2 – Parâmetros do controle de temperatura.

3.2.2 Controle de velocidade

O controle de velocidade é feito através da rotação do motor DC acoplado a um conjunto de engrenagens que compõem o tracionador de filamento, descrito na secção 3.1, item 1. Para criar o controle é utilizado a rotação do motor, obtida através de um encoder, um componente que possui um sensor de efeito HALL, que detecta campos magnéticos através da variação da corrente que passa por um condutor retilíneo (ENDALECIO, 2013) e uma pequena polia com ímãs internos, acoplado ao eixo do motor, gerando um pulso quando o ímã se aproxima do sensor. Através da contagem destes pulsos, é possível saber a qual rotação o motor está girando e alterar a potência fornecida ao motor de acordo com as características do material trefilado.

A Figura 10 mostra o sinal gerado no encoder. Para saber a rotação do motor é necessário fazer a conversão de pulsos por segundo em rotações por minuto, aplicando a relação da caixa de redução acoplada ao motor. Para que o eixo do motor dê uma volta completa, são necessários 24 pulsos e para que o eixo da redução dê uma volta completa, são necessárias 30 voltas no eixo do motor.

Figura 10 – Sinal do encoder no osciloscópio



Fonte: Autoria própria

Foi definido um intervalo de 50 Milisegundos (ms) para realizar a contagem de pulsos para comparação com o *setpoint*. Esse intervalo garante que sejam lidos pulsos suficientes para uma conversão correta em rpm e que a atuação do controle não seja muito lenta, tendo em vista que a resposta do motor pode ser considerada instantânea para a aplicação deste projeto.

A fórmula para a conversão está apresentada a seguir:

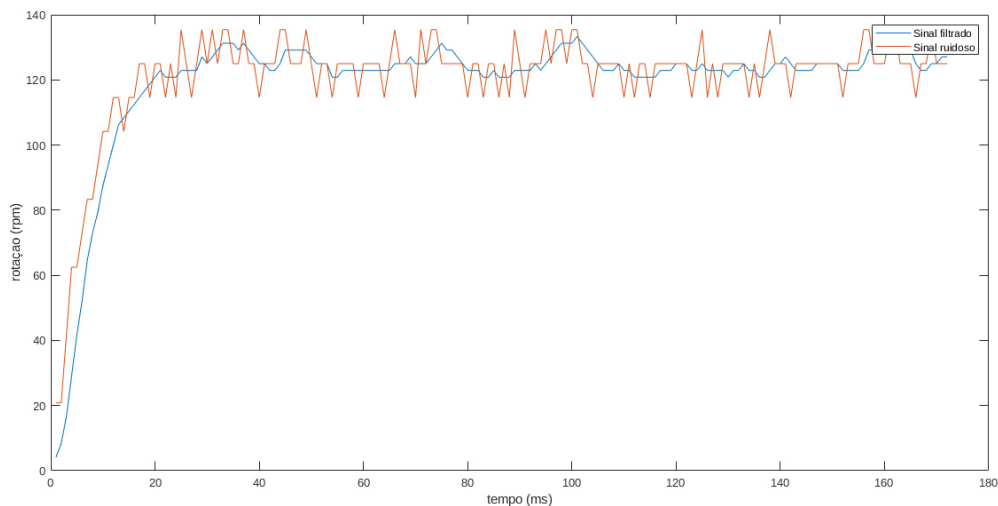
$$\text{Rotação} = \frac{20 \cdot \text{Número de pulsos no intervalo} \cdot 60 \text{ segundos}}{\text{Pulsos por rotação} \cdot \text{Relação da redução}}$$

Substituindo os valores conhecidos:

$$\text{Rotação} = \frac{1200 \cdot \text{Número de pulsos no intervalo}}{720}$$

Esta fórmula foi utilizada para fazer a coleta de dados e observar a resposta ao degrau do sistema de tração. Devido ao atrito entre as engrenagens, houve um ruído na amostra coletada, fazendo com que a contagem de pulsos variasse mesmo com o motor em estado estacionário. Sabendo disso, foi aplicado um filtro média móvel de ordem 5 para minimizar o ruído e ter um modelo melhor projetado. A Figura 11 apresenta uma comparação entre as amostras.

Figura 11 – Comparação entre amostras

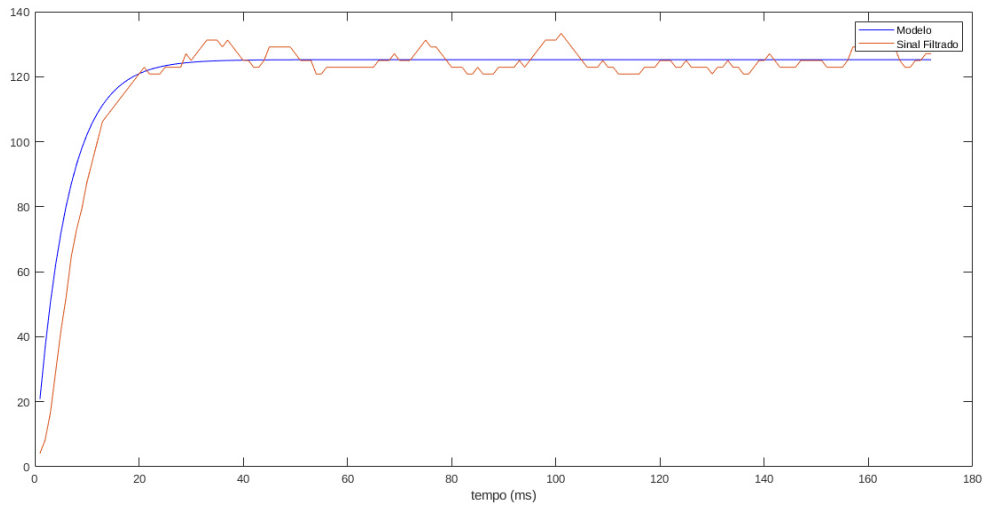


Fonte: Autoria própria

Aplicando os parâmetros do motor na Equação 2.6, é possível obter a função de transferência apresentada na Figura 12 e teve um MSE (Erro Médio Quadrático) de 0,0432.

Utilizando o método de ajuste de alocação de polos aplicado em malha fechada que possibilita encontrar os parâmetros para o controlador utilizando apenas os valores de K_0 e τ e variando um ganho K .

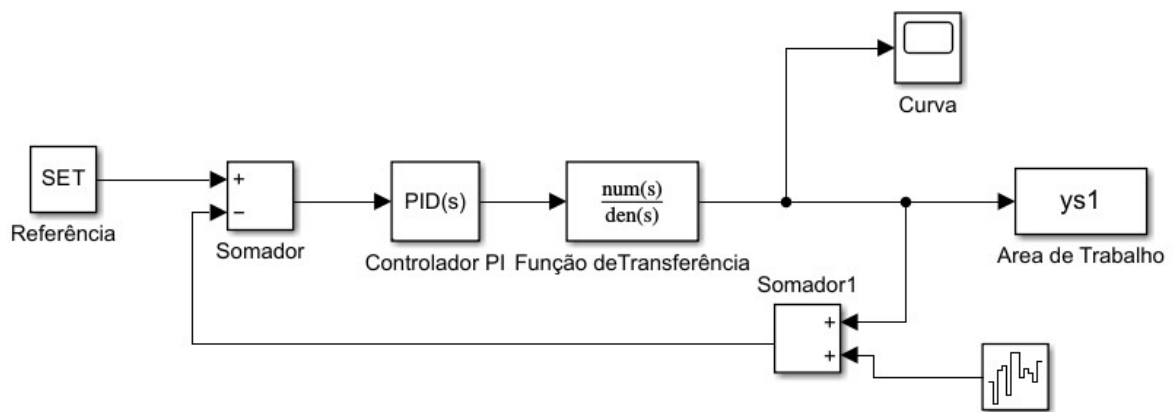
Figura 12 – Modelagem do sistema de tração



Fonte: Autoria própria

Como citado anteriormente, a tração necessita ser constante para que a espessura do filamento não possua variações. Logo, o tempo de resposta do sistema deve ser o menor possível. Contudo, o comportamento transitório do sistema não pode ser agressivo a ponto de causar uma oscilação antes do regime estacionário. A figura Figura 13 apresenta o sistema em malha fechada utilizado para a sintonia do controlador.

Figura 13 – Planta do controle em malha fechada com ruído



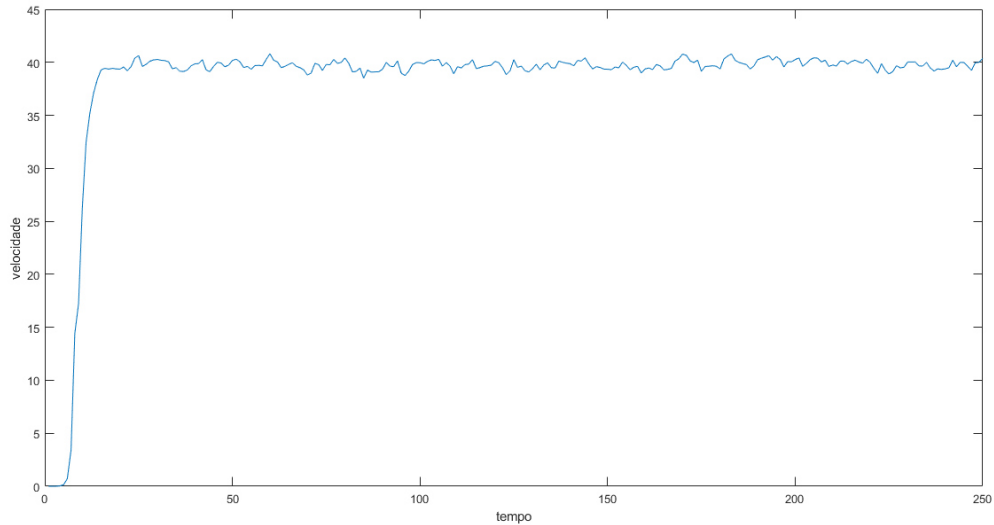
Fonte: Autoria própria

Na Tabela 3 estão apresentados os parâmetros do controle.

Parâmetros	Valores
K_p	0.70088
K_i	0.37695

Tabela 3 – Parâmetros do controle de velocidade angular.

Figura 14 – Resposta do controle de velocidade



Fonte: Autoria própria

A resposta do controle de velocidade pode ser observado na Figura 14.

Na Tabela 4 fornece os parâmetros de performance e robustez do controle:

Métricas	Valores
Tempo de subida	0.07s
Tempo de acomodação	0.13s
Sobressinal	6.86%
Pico	1.07

Tabela 4 – Performance e robustez do controle de velocidade.

3.2.3 Espessura do filamento constante

Quando se aplica uma força de tração sobre um material é normal que ao ultrapassar o limite de resistência do material, ele se deforme. O princípio da trefiladora doméstica é usar o estado maleável do material para molda-lo no formato cilíndrico. As embalagens são transformadas em filetes, fio de formato retangular, com largura constante a fim de garantir que não haja excesso de material e também que o material seja suficiente para a formação do filamento.

A espessura do filamento é uma das características mais influentes na impressão, pois está diretamente relacionada ao fluxo de material e deve ser constante. Para que o filamento possa ser produzido com espessura uniforme, o filete de material reciclado também deve ser uniforme. Para calcular a largura ideal, o filamento reciclado deve possuir o mesmo volume,

0.240cm³ em 10cm de comprimento, e espessura 1,75mm, que o comercial. A fórmula a seguir foi utilizada para calcular a largura do filete:

$$\text{Volume} = \text{Largura}(L) \cdot \text{Espessura}(\phi) \cdot \text{Comprimento}(C) = 0.240 = L \cdot 0.10$$

$$\text{Largura} = 0.240/0.3 = 0.8\text{cm}$$

A Temperatura de fusão (Td) do material somente é atingida no momento da impressão, quando há a necessidade que o material seja bastante fluido para possibilitar a extrusão e formar o objeto impresso. Durante a trefilação, é necessário atingir a Temperatura de Transição Vítreo (Tg), pois não implica mudança de fase do material, porém caracteriza uma forma mais borrachosa (Sebastião V. Canevarolo,), sendo esta uma característica dos polímeros em geral.

Para o PET amorfo, a temperatura de transição vítreo é a partir de 67°C, já para o PET cristalino é a partir de 81°C.

Caso o material aqueça demais, sua resistência mecânica diminui ao ponto da compressão e tração do material provocar um rompimento no filete, inviabilizando a trefilação neste caso. Contudo, caso o material não aqueça o suficiente, não obtém maleabilidade para ser moldado no formato cilíndrico que o filamento possui, apresentando uma maior resistência ao passar pela feira, acarretando alguns problemas, como maior esforço no tracionador, alteração da espessura para uma medida menor que a desejada ou mesmo inviabilidade de passagem pela feira, resultando no estiramento ou rompimento do fio.

Aquecendo o material a um ponto entre a temperatura de transição vítreo e a temperatura de fusão e aplicando uma força de tensionamento ao material, forçando-o a passar pelo bico de extrusão, o material, antes em formato retangular, agora passa a ficar em formato cilíndrico, ideal para a impressão. A relação de tração e temperatura é inversamente proporcional à espessura do filamento. Quanto mais temperatura e mais tração, maior será a deformação do material e menos espesso ele ficará. Contudo, quanto menos tração e menor temperatura, mais espesso será o filamento.

Essas duas grandezas possuem valores mínimos e máximos e dependem do material a ser reciclado. Caso a tração aplicada seja menor que a mínima necessária para vencer a resistência do material que impede a deformação, o material mantém a sua forma original e não é trefilado. É possível aplicar uma temperatura maior para que o material fique mais maleável, porém a maleabilidade excessiva também é um problema, pois a região aquecida é mais suscetível a deformações, ao ponto de sofrer um estiramento e ter a sua seção transversal muito pequena, causando o rompimento do material. Por outro lado, temperaturas baixas não proporcionam

ao material a maleabilidade ideal para a trefilação, necessitando de uma maior força de tração, podendo ocasionar o mesmo problema citado anteriormente, sofrer um estiramento e ter a seção transversal muito pequena, causando o rompimento do material.

4 RESULTADOS

Nesta seção, serão discutidos e interpretados os resultados de acordo com os objetivos estabelecidos no início do estudo. Ao final espera-se que o leitor tenha uma visão clara dos principais resultados obtidos, suas implicações e contribuições para a área de pesquisa. Esses resultados serão fundamentais para responder às questões de pesquisa e direcionar as conclusões finais do estudo.

4.1 Largura do filete

Como visto na subseção 3.2.3, a largura calculada foi de 0,8cm de largura para que o filamento produzido tenha o mesmo volume que o comercial. Nos testes realizados em laboratório, essa largura não foi suficiente para preencher todo o filamento, necessitando de uma adição de material. A largura ideal encontrada empiricamente com base na largura calculada foi de 1.0cm, garantindo mais material para que o filamento não fique oco.

Essa medida é aplicável para um conjunto restrito de garrafas, mais especificamente garrafas de material transparente que atendam a medida de 0.3mm de espessura. Essas embalagens normalmente são utilizadas para armazenar bebidas gaseificadas, devido ao fato da embalagem ser mais espessa e resistente para suportar a pressão interna do líquido. Garrafas de volume menor, que armazenem bebidas não gaseificadas e/ou tem um material colorido podem não ser compatível com a medida de 1.0cm, já que a espessura do material pode diferente ou a sua resistência pode ser diferente se comparada ao material transparente, resultando na diminuição do largura do filete.

4.2 Combinação temperatura x tração

Um desafio do projeto é encontrar uma combinação apropriada para temperatura e tração, pois como o PET pode vir de várias empresas, sua composição pode variar e, consequentemente, as suas características também.

As garrafas de material transparente sem coloração precisam de menos temperatura e mais velocidade, pois ela não apresenta elevada resistência durante a trefilação. Já outras, como a garrafa pigmentadas, tem uma espessura maior e apresentam mais resistência ao ser trefilada, tendo rompimento em 92% das tentativas de trefilação realizadas no laboratório.

4.3 Qualidade do filamento fabricado

A qualidade do insumo reciclado depende de alguns fatores antes e durante o processo de trefilação, começando com a qualidade da garrafa a ser reciclada, quanto mais íntegra a garrafa estiver, melhor será a qualidade final obtida.

O PET, ou qualquer outro material a ser reciclado, deve estar totalmente limpo, não podendo ter resquícios da bebida que antes era armazenada, de cola dos rótulos ou outro tipo de sujeira que possa ser adquirida, como poeira ou gordura, caso contrário, problemas durante a impressão podem surgir. No ambiente doméstico a etapa de limpeza é facilitada, visto que as embalagens podem ser separadas para a reciclagem sem ter o contato com o restante do lixo doméstico, evitando a contaminação por contato com resíduos orgânicos ou afins.

Outro fator importante é a filetagem, ato de transformar as garrafas em filetes, já que a espessura do filete, como mencionado na seção 4.1, deve ser fundamentalmente constante. Diversas garrafas não possuem uma forma homogênea, tendo diversas curvas ou desenhos em sua superfície para enrijecer a estrutura. Durante a filetagem, a garrafa pode ser manipulada para que o filete saia uniforme.

O último fator é a configuração da trefiladora. A combinação de temperatura e tração é imprescindível para uma boa qualidade final, já que é essa relação que garante a constância da espessura do filamento. Caso a tração esteja muito forte ou a temperatura muito baixa, há uma alta chance de que o filete se rompa durante o processo, como observado nos testes em laboratório.

4.4 Propriedades do insumo produzido

O insumo produzido em laboratório utilizou exclusivamente o PET como prova de conceito para os demais materiais que poderiam ser reciclados pela trefiladora. Por sua vez, o PLA foi utilizado como material de referência para a análise das características do insumo reciclado.

O PET foi selecionado como o material principal para a prova de conceito devido à sua ampla aplicação e reciclabilidade comprovada. Sua escolha permitiu explorar a viabilidade da trefiladora em lidar com materiais reciclados, ao mesmo tempo em que fornecia um ponto de comparação significativo com o PLA.

Utilizar o PLA como base de comparação permitiu avaliar a qualidade e as caracte-

rísticas do insumo reciclado em relação a um material bem conhecido.

Em termos de características mecânicas, o PLA é conhecido por sua facilidade de impressão e sua rigidez. Ele possui uma boa resistência à tração e é capaz de suportar cargas moderadas, o que o torna adequado para uma ampla gama de aplicações. No entanto, o PLA pode ser mais propenso a quebrar ou rachar sob tensões repetidas, o que pode limitar sua utilização em algumas situações de alta exigência mecânica.

Por outro lado, o PET possui uma maior resistência à tração em comparação com o PLA. Ele é capaz de suportar cargas mais pesadas e tem uma maior resistência ao impacto, o que o torna mais adequado para aplicações que exigem maior robustez. O PET também é conhecido por sua alta resistência química e à umidade, o que o torna uma opção preferida para projetos que envolvem ambientes adversos.

A Figura 15 apresenta uma engrenagem feita de PLA com o preenchimento de 100%. Esta engrenagem fazia parte do tracionador da trefiladora, porém devido a tração ela se rompeu.

Figura 15 – Peça rompida feita com PLA



Fonte: elaborada pelo autor.

Já em relação ao aspecto estético, o PET apresenta algumas desvantagens em comparação ao PLA. Devido ao processo de cristalização durante a impressão, o PET pode adquirir um aspecto opaco em determinados pontos da peça, como pode ser observado nas Figuras 16 e 17.

Essa opacidade pode resultar em uma aparência menos homogênea e menos translúcida, afetando o acabamento estético da peça. Esses pontos opacos podem ocorrer devido a diferentes taxas de resfriamento ou outros fatores durante o processo de impressão em 3D.



Figura 16 – Peça impressora com PET

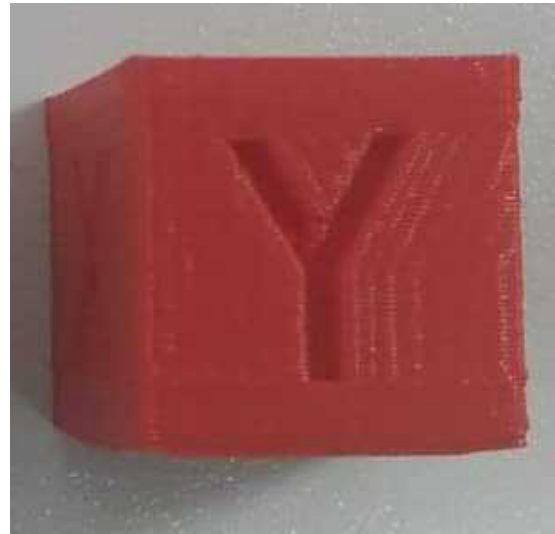


Figura 17 – Peça impressa com PLA

Em contrapartida, o PLA geralmente oferece um acabamento esteticamente mais agradável. Ele apresenta uma maior transparência e um aspecto mais uniforme, resultando em peças com uma aparência mais suave e translúcida, como pode ser visto na Figura 17.

No entanto, é importante ressaltar que o aspecto estético pode variar dependendo das configurações de impressão, como temperatura, velocidade e camadas de deposição. A otimização dessas configurações pode minimizar os pontos opacos no PET e aprimorar a aparência das peças impressas.

4.5 Viabilidade financeira e aplicações

Devido a sua baixa capacidade de produção, abordada na seção 4.6, e as condições necessárias para que o material seja processado, a trefiladora tem uma aplicação reduzida, focada em no uso doméstico ou de laboratórios de pequeno porte, onde a quantidade de filamento é moderada.

O equipamento é de fácil construção e custo financeiro acessível, suas peças podem ser substituídas e/ou adaptadas a necessidade do usuário. O custo total da trefiladora ficou em R\$430,00, tendo como base preços do mercado brasileiro. Esse preço ainda pode ser reduzido, caso algumas peças sejam reutilizadas ao invés de adquiridas novas. Não existem trefiladoras de plástico no mercado, pois esta técnica é voltado mais para o aço, porém para comparação de valores, a extrusora Filmaq3D CV possui um custo de aquisição de R\$5.500,00, tendo uma capacidade produtiva de $5,8 \text{ g/min}$, porém com a desvantagem de necessitar que o material

esteja triturado.

Para fazer o cálculo do custo do quilo de filamento, é preciso saber o rendimento do processo de reciclagem através da trefilação.

Uma garrafa de 2 *lt* tem 52 g, porém o fundo e o gargalo não podem ser trefilados, correspondendo a 26 g, 50 % do material. Então são necessários 2 kg de material para cada 1 kg de insumo produzido.

O custo do PET reciclado em Fortaleza-CE no ano de 2023, segundo alguns catadores do bairro Jóquei Clube, é de R\$4,00/kg. Algumas garrafas podem ser pedidas durante o processamento, portanto adiciona-se 15% representando as percas de material. Assim, são necessários 2,3 kg de PET para fabricar 1 kg de filamento, totalizando R\$9,20 de material.

O consumo do equipamento é baixo, variando de 70 a 90 *watt/hora*. Para calcular o custo com energia para fabricar 1 kg de insumo, podemos usar a seguinte fórmula:

$$\text{Energia} = \frac{\frac{1000 \text{ g}}{\text{peso garrafa}}}{\text{garrafas processadas/hora}} \cdot \text{consumo/hora}$$

Como mencionado acima, são aproveitadas 26 g da embalagem, cada g leva 1 *min* para ser trefilada, então são 2 garrafas processadas por hora. O consumo pode ser feito a média e considerar 80 *whatt/hora*. Aplicando na fórmula:

$$\text{Energia} = \frac{\frac{1000 \text{ g}}{26 \text{ g}}}{2} \cdot 80 = 1538 \text{ whatt/kg}$$

A tarifa do *kwh/hora* altera de acordo com a região do país, em Fortaleza-CE, no 2 trimestre de 2023, esta tarifa é de R\$0,70. Pode-se adicionar R\$2,00 ao custo do filamento, finalizando R\$11,20/kg.

Se comparado com o PETg, solução comercial que adiciona glicol ao PET para evitar a cristalização do material, que custa R\$120,00 em média, o filamento de PET tem o melhor custo benefício do mercado.

4.6 Capacidade produtiva

A capacidade produtiva do projeto varia de acordo com a configuração da máquina e o tipo do material. Utilizando a garrafa de material transparente de refrigerante como caso base, foi utilizado uma rotação de 30 *rpm* no tracionador, garantindo uma baixa probabilidade

de estiramento ou ruptura, o tempo médio é de 1 *min* para cada 1 *g* trefilada, ou 25 *min* totais. Esse tempo pode ser reduzido elevando a rotação para 35 ou 40 *rpm*, aumentando também as chances de rompimento.

Embalagens mais ou menos espessas apresentaram tempos diferentes de processamento. Garrafas de suco ou água sem gás não necessitam de uma espessura maior e oferecem menos resistência para ao passar pela feira.

4.7 Identificação de falhas de operação produtivas

Algumas medidas de segurança foram aplicadas na trefiladora para evitar acidentes ou falhas na operação.

A primeira é identificar comportamentos não habituais nos processos de aquecimento e tração.

Para isso, foi usado como referência para a criação do módulo de proteção, o sistema de proteção do software Marlin, um software OpenSource para impressoras 3D, que verifica a variação de temperatura a partir de uma excitação do sistema durante um intervalo definido para cada tipo de impressora, caso não seja registrado uma variação de temperatura durante o estado transitório dentro do intervalo observado, o sistema pode estar com algum problema e então o processo de aquecimento é cancelado.

Para o sistema de tração, uma variação abrupta de rotação no motor significa que o filamento se rompeu ou chegou ao final, independente do caso, o motor deve ser desligado.

5 CONCLUSÃO

A trefiladora de embalagens plásticas desenvolvida no laboratório permitiu cumprir os objetivos de produzir m filamento com qualidade similar aos comerciais, sendo possível o uso em impressoras 3D.

Sua construção simples garante um fácil manuseio, sem a necessidade de um treinamento prolongado e com riscos minimizados de acidentes, além de evitar o risco de queimadura na parte aquecida ou choque por meio de contato humano em partes internas eventualmente desprotegidas.

Devido a possibilidade de mudança na relação de tração e temperatura e na precisão do controle destas grandezas, o objetivo de ter um filamento de espessura constante foi alcançado, o que contribui para uma boa impressão com o material reciclado.

A viabilidade financeira do projeto é um fator importante a ser considerado, tendo em vista que contribui positivamente para a adesão da reciclagem pelos usuários da tecnologia de impressão 3D, público crescente no Brasil. Também é válido ressaltar a valorização do material reciclado por meio da transformação em peças com valor agregado, desde engrenagem para projetos científicos à objetos de decoração.

Algumas funcionalidades são potencialmente interessantes para enriquecer o projeto futuramente, por exemplo:

- Medição do comprimento do filamento: Ter a possibilidade de saber quantos metros de filamento foram fabricados, isso ajudaria a saber se o filamento é suficiente para a impressão que será realizada.
- Controles externos: Possibilidade de ajustar os parâmetros da trefiladora antes de começar os processo de fabricação, sem a necessidade de usar o monitor serial em um computador.
- União de filetes: Unir filetes antes ou depois do processamento para conseguir um filamento de maior comprimento.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas**. 3ª ed.. ed. [S. l.]: Editora da UFMG, 2007.
- ASTROM, K. J.; HAGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**. [S. l.]: Instrument Society of America, 1995.
- BESKO, M.; BILYK, C. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. **Revista Engenharias**, 2017.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. Inclui bibliografia.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Modern Control Systems**. [S. l.]: Pearson Education, 2010.
- ENDALECIO, A. D. d. M. **Estudo e Implementação de um Sistema de Levitação Eletromagnética Utilizando Sensores de Efeito Hall**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/11506/1/monopoli10008691.pdf>.
- FALCÃO, C. R. D. G. S. P. M. AVALIAÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE A PRESENÇA DE GRÂNULOS PLÁSTICOS (PELLETS) EM ÁREAS LITORÂNEAS DO MUNDO: 1970-2011. **XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário ABEQUA**, p. 2, 2011.
- JUNIOR, A. G. C.; SILVA, E.; CORDEIRO, F.; BRAZ, W.; ARAUJO, I. **Utilização da aprendizagem baseada em projetos aplicada em um torno CNC didático para o ensino de identificação de sistemas**. [S. l.: s. n.], 2019.
- JUNIOR, S. V. C. **Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros**. 2. ed. [S. l.]: Editora Artliber, 2006.
- LEITE, I.; MALTA, O.; RAPOSO, C.; CANEDO, L.; CARVALHO, L. d.; SILVA, S. d. L. Efeito de diferentes tipos de argilas e modificadores orgânicos na morfologia e propriedades térmicas dos nanocompósitos de pet. **Polímeros**, v. 21, n. 3, p. 195–203, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000035>.
- MARTINS NORBERTO. MACIEL, D. d. C. Elementos finitos aplicado ao processo de trefilação de uma liga de cobre eletroítico. **XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, CILAMCE 2016, p. 1, 2016.
- MENIN, R. **Como a impressão 3D facilita a nossa vida?** 2023. Disponível em: <https://www.ifsc.edu.br/web/ifsc-verifica/w/como-a-impressao-3d-facilita-a-nossa-vida->.
- OGATA, K. **Modern Control Engineering**. [S. l.]: Pearson Education, 2010.
- PESSI, F. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA MINI EXTRUSORA DE FILAMENTOS**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2018. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/15242>.

Sebastião V. Canevarolo. **Temperatura de Transição Vítreia (T_g)**. Disponível em: {<https://afinkopolimeros.com.br/temperatura-de-transicao-vitrea-tg>}.

SEBRAE. **Economia circular para pequenas empresas**. 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/economia-circular-para-pequenas-empresas,86b8ed1f09858810VgnVCM1000001b00320aRCRD#:~:text=Conceito%20busca%20superar%20limita%C3%A7%C3%B5es%20da,reciclagem%20e%20reaproveitamento%20de%20materiais.&text=O%20conceito%20de%20%E2%80%9Ceconomia%20circular,Pearce%20e%20R.%20Kerry%20Turner>.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. **Multivariable Feedback Control: Analysis and Design**. [S. l.]: Wiley, 2005.

VILELLA, F. **Extrusora de alimentação a frio**. [s. n.], 2011. Figura ilustrativa de um modelo de extrusora com alimentação a frio. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/processos/extrusao/extrusoras-tipo-fuso/>. Acesso em: 04 abril 2023.

WELLEN, R. M. R.; RABELLO, M. S. Redução da velocidade de cristalização a frio do pet na presença de poliestireno. **Polímeros**, v. 17, n. 2, p. 113–122, 2007.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. **Trans. ASME**, v. 64, p. 759–768, 1942.

GLOSSÁRIO

3D Tridimensional

DC corrente contínua

FDM Fused Deposition Modeling

ms Milisegundos

PET Polietileno tereftalato

PLA Poliacido láctico

Td Temperatura de fusão

Tg Temperatura de Transição Vítrea

ANEXO A – CÓDIGO DO MÉTODO DA RETA TANGENTE

```

%Adicione os dados a variável yy
y=yy; % Valores de temperatura y(t)
dimy=max(size(y));
%dtm=(max(tm))/ntm;
tempo=1:max(size(y));
for i=1:(dimy-1);
dev(i)=(y(i+1)-y(i))/(tempo(i+1)-tempo(i));
%cálculo da derivada
end
pinflex=max(dev);% cálculo do ponto de inflexão,ou seja, o ponto de maior
%derivada
n=1;
%n é um contador. Ele vai contar o vetor dev afim de descobrir a posição do
%ponto de inflexao.Passo seguinte.
while dev(n)<pinflex
n=n+1;
end
n; % Posição do ponto de inflexão.
m=dev(n); % coeficiente angular da reta no ponto de inflexão
i=1:(dimy);
w(i)=m*(tempo(i)-tempo(n))+y(n);
%Cálculo da reta que passa pelo ponto(n,y(n))
z(i)=max(y);
figure
set(gcf,'color','w');%fundo branco
alldatacursors = findall(gcf,'type','hgroup');
set(alldatacursors,'FontSize',14)% tamanho da fonte do cursor
set(gca,'FontSize',14)% Tamanho da fonte do título e eixos
plot(tempo,y,'b',tempo,w,'r',tempo,z,'k');
grid;
title('Resposta ao degrau com reta tangente ao ponto de inflexão')

```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('y(t)')
```

**ANEXO B – DEMOSTRAÇÃO MATEMÁTICA DO CÁLCULO DA FUNÇÃO DE
TRANSFERÊNCIA PARA UM MOTOR DC**

Anexo

FUNDAMENTAÇÃO - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DINÂMICO

O esquema do modelo adotado para o estudo do motor CC, controlado por armadura, está mostrado na Fig. 1.

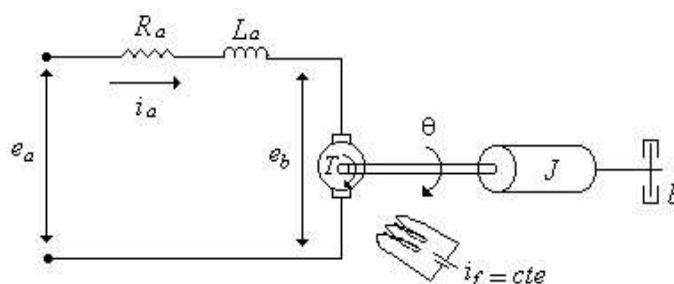


Figura 1 - Diagrama elétrico de um motor de corrente contínua

A Fig.1 ilustra um diagrama de circuito de um motor CC com excitação independente. A armadura é modelada por um circuito de uma resistência R_a em série com uma indutância L_a , e uma fonte de tensão e_b representando a tensão gerada (f_{cem}) na armadura, quando o rotor gira. A seguir, um resumo das variáveis e parâmetros associados a modelagem do motor CC:

1. R_a - Resistência da armadura (Ω)
2. L_a - indutância da armadura (H)
3. i_a - corrente de armadura (A)
4. e_a - tensão de armadura (V)
5. e_b - f_{cem} - força contra eletromotriz (V)
6. θ - deslocamento angular do eixo do motor (rad)
7. T - torque desenvolvido pelo motor (N-m)
8. J - momento de inércia equivalente do motor Kg-m^2
9. b - coeficiente de atrito viscoso equivalente do motor (N-m/rad/s)
10. i_f - representação do campo contínuo gerado pelo ímã permanente do motor (A)

Cálculo da Função de Transferência

A modelagem do motor é realizada através da definição de equações elétricas, mecânicas e eletromecânicas. A partir da Fig.1, pode-se obter as seguintes equações:

- Equação Elétrica

$$e_a = e_b + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (1)$$

- Equação Mecânica

$$T = b\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

- Equações Eletromecânicas

O torque desenvolvido pelo motor é proporcional ao produto da corrente de armadura i_a pelo fluxo ϕ do entreferro de ar, que por sua vez é proporcional à corrente do campo ou,

$$\phi = K_f i_f \quad (3)$$

K_f é uma constante de proporcionalidade.

logo:

$$T = K_m \phi(t) i_a(t) = K_m K_f i_f i_a(t) = K i_a(t) \quad (4)$$

onde:

K é a constante de torque (N-m/amp).

Observar que se o sinal de corrente i_a for invertido, o sinal de torque T será invertido, o que resultará na inversão do sentido de rotação do rotor.

Quando o rotor estiver girando, uma tensão proporcional ao produto do fluxo pela velocidade angular é introduzida na armadura. Para o fluxo constante, a tensão induzida e_b é diretamente proporcional à velocidade angular

$$e_b = K_b \omega \quad (5)$$

K_b é a constante de força contra eletromotriz (f_{cem})

O calculo da função de transferência do motor que relaciona a velocidade do movimento ω com a tensão aplicada nos terminais de armadura e_a , pode ser obtida através da aplicação da Transformada de Laplace nas equações (1),(2),(4) e (5), resultando:

$$E_a(s) = E_b(s) + R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) \quad (6)$$

$$T(s) = bW(s) + JsW(s) \quad (7)$$

$$E_b(s) = K_b W(s) \quad (8)$$

$$T(s) = KI_a(s) \quad (9)$$

Substituindo (8) em (6)

$$E_a(s) = k_b W(s) + R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) \quad (10)$$

De (9) e (7), obtém-se:

$$\begin{aligned} KI_a(s) &= bW(s) + JsW(s) \\ I_a(s) &= \frac{b}{K} W(s) + \frac{J}{K} sW(s) \end{aligned} \quad (11)$$

Substituindo (11) em (10)

$$\begin{aligned} E_a(s) &= K_b W(s) + \frac{R_a b}{K} W(s) + \frac{R_a J}{K} sW(s) + \frac{L_a b}{K} sW(s) + \frac{L_a J}{K} s^2 W(s) \\ E_a(s) &= W(s) \left(K_b + \frac{R_a b}{K} + \frac{R_a J}{K} s + \frac{L_a b}{K} s + \frac{L_a J}{K} s^2 \right) \\ KE_a(s) &= W(s) (K_b + R_a b + R_a Js + L_a bs + L_a Js^2) \\ F(s) &= \frac{W(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{L_a Js^2 + (L_a b + R_a J)s + R_a b + KK_b} \end{aligned}$$

$$F(s) = \frac{W(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{(Js + b)(L_a s + R_a) + KK_b} \quad (12)$$

O diagrama de blocos, mostrado na Fig.3, pode ser construído a partir das equações (6), (7), (8) e (9).

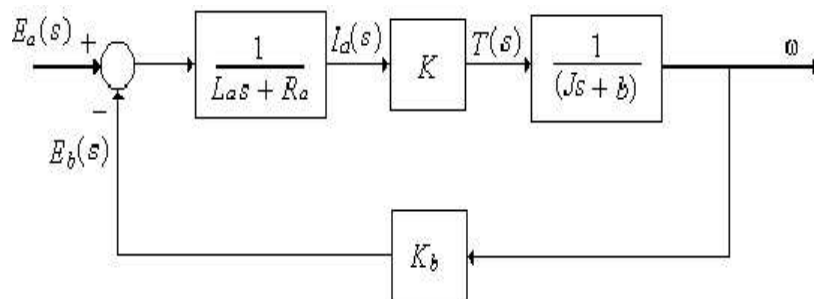


Figura 2 – Diagrama de blocos

Para a variável de saída sendo a posição do seu eixo do motor, temos a seguinte função de transferência:

$$\begin{aligned}\theta(t) &= \int \omega(t) dt = \frac{1}{s} W(s) \\ F_{\theta}(s) &= \frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{W(s)}{sE_a(s)} = \frac{F(s)}{s} \\ F_{\theta}(s) &= \frac{K}{s((Js+b)(L_a s + R_a) + KK_b)}\end{aligned}\tag{13}$$