

**Alvaro Augusto Ferreira**

**PROJETO DE DISPOSITIVO PARA FABRICAÇÃO DE  
FILAMENTOS PARA IMPRESSORA 3D A PARTIR DA  
RECICLAGEM DE GARRAFAS PET**

**Alvaro Augusto Ferreira**

**PROJETO DE DISPOSITIVO PARA FABRICAÇÃO DE  
FILAMENTOS PARA IMPRESSORA 3D A PARTIR DA  
RECICLAGEM DE GARRAFAS PET**

Trabalho de Graduação apresentado à  
Faculdade de Engenharia – FE/UNESP –  
Câmpus de Ilha Solteira, para  
cumprimento de requisito para obtenção  
do Grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Amarildo Tabone  
Paschoalini

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

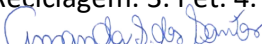
F383p Ferreira, Alvaro Augusto.  
Projeto de dispositivo para fabricação de filamentos para impressora 3D a partir da reciclagem de garrafas pet / Alvaro Augusto Ferreira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024  
75 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2024

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini

Inclui bibliografia

1. Impressão 3D. 2. Reciclagem. 3. Pet. 4. Prototipagem. 5. Arduino.

  
**Amanda Sertori dos Santos**

Bibliotecária - CRB/8-9061  
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao  
Usuário e Documentação  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

TÍTULO: PROJETO DE DISPOSITIVO PARA FABRICAÇÃO DE FILAMENTOS PARA IMPRESSORA 3D A PARTIR DA RECICLAGEM DE GARRAFAS PET

ALUNO: Alvaro Augusto Ferreira

RA: 181052334

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini

**Aprovado (x) – Reprovado ( ) pela Comissão Examinadora**

**Comissão Examinadora:**



Amarildo Tabone Paschoalini

Documento assinado digitalmente  
 HENRIQUE CORDEIRO NOVAIS  
Data: 11/01/2024 11:36:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Henrique Cordeiro Novais



Matheus Silva Proença



Alvaro Augusto Ferreira

Ilha Solteira (SP) 10 de Janeiro de 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço aos meus pais, Aparecido de Brito Ferreira e Celi Mara Polesel Ferreira e a minha irmã Raisa Giulia Ferreira, que durante a jornada da graduação me deram suporte em todas as tomadas de decisão e estiveram comigo em todos os momentos

Agradeço aos amigos que fiz durante a graduação e foram fundamentais para a minha formação pessoal e acadêmica.

Agradeço a minha namorada Maria Luiza Favarão Vieira, que esteve ao meu lado, pelo suporte, paciência e atenção durante o fim desse percurso.

Sou grata ao professor e orientador Amarildo Tabone Paschoalini, por ter aceitado a proposta do tema de estudo, pelo auxílio e disponibilidade, tornando minha conclusão de curso possível.

E por fim a UNESP, pelo maior projeto da minha vida, sou grato pelo conhecimento, pela formação, pela vivência e pelas pessoas que tive o privilégio de conhecer nessa etapa da minha vida.

## RESUMO

Com o crescente avanço tecnológico e o aumento exponencial na produção de plásticos, especialmente no caso das garrafas PET, a reciclagem desse material ganha relevância crucial. Diante desse cenário, a disseminação do conhecimento acerca da tecnologia de impressão 3D oferece uma oportunidade promissora para a reutilização das garrafas PET como matéria-prima na produção de filamentos para impressoras 3D. A ampla disponibilidade e custo acessível associados à produção e reciclagem de garrafas PET destacam a fabricação de filamentos como uma escolha atrativa, especialmente para entusiastas da impressão 3D. Conscientes da relevância e praticidade do reaproveitamento de materiais plásticos, este projeto tem como intuito o desenvolvimento de um projeto e a criação de um dispositivo dedicado à reciclagem de garrafas PET, através da produção de filamentos para impressão 3D. Dessa forma, foi pensando um dispositivo capaz de realizar o fatiamento da garrafa PET através de um corte contínuo da mesma. Seguido pelo aquecimento desse filete e transformação em um filamento de seção circular, para tracionar o filamento é utilizado um sistema de engrenagem que acionado por um motor promove o enrolamento desse filamento. Para alcançar esse propósito, adotaram-se ferramentas de prototipagem rápida, como o Arduino, juntamente com módulos e componentes eletrônicos de baixo custo. A maioria das peças foi modelada e fabricada por meio da impressão 3D, aproveitando a flexibilidade e economia desse método. A intenção desse dispositivo é ser capaz de produzir um filamento contínuo a partir da garrafa e que seja possível a produção de um objeto utilizando esse material. E dessa forma proporcionar uma abordagem mais acessível e eficiente, contribuindo para a promoção da sustentabilidade e reutilização de recursos na fabricação de objetos tridimensionais.

**Palavras-chave:** Impressão 3D, Reciclagem, PET, Prototipagem, Arduino

## **ABSTRACT**

With the growing technological advancements and the exponential increase in plastic production, especially in the case of PET bottles, recycling of this material gains crucial significance. In this scenario, the dissemination of knowledge about 3D printing technology offers a promising opportunity for reusing PET bottles as raw material in the production of filaments for 3D printers. The widespread availability and affordable cost associated with PET bottle production and recycling highlight filament manufacturing as an attractive choice, especially for 3D printing enthusiasts. Recognizing the relevance and practicality of plastic material reuse, this project aims to develop a design and create a device dedicated to recycling PET bottles by producing filaments for 3D printing. Thus, a device capable of continuously slicing the PET bottle was designed. This is followed by heating the resulting strip and transforming it into a filament with a circular cross-section. To pull the filament, a gear system is employed, driven by a motor that facilitates the winding of the filament. To achieve this purpose, rapid prototyping tools such as Arduino were adopted, along with low-cost electronic modules and components. Most of the parts were modeled and manufactured through 3D printing, leveraging the flexibility and cost-effectiveness of this method. The intention of this device is to produce a continuous filament from the bottle, allowing the creation of an object using this material. Thus, it aims to provide a more accessible and efficient approach, contributing to the promotion of sustainability and resource reuse in the manufacturing of three-dimensional objects.

**Keywords:** 3D Printing, Recycling, PET, Prototyping, Arduino

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Representação do <i>hot end</i> impressora FDM. ....             | 4  |
| Figura 2 - Representação do Funcionamento de uma Impressora FDM. ....       | 5  |
| Figura 3 - Representação de uma Impressora de Resina DLP. ....              | 7  |
| Figura 4 – Ensaio de Tração dos Principais Filamentos para Impressão 3D.... | 7  |
| Figura 5 – Diagrama de Blocos Controle PID .....                            | 13 |
| Figura 6 – Diagrama PWM .....                                               | 14 |
| Figura 7 – Conexões do Arduino UNO .....                                    | 16 |
| Figura 8 – Nomenclatura de Parâmetros para Dentes Retos .....               | 17 |
| Figura 9 – Interface <i>Software</i> Creo .....                             | 20 |
| Figura 10 – Impressora 3D Ender 3 V2 .....                                  | 22 |
| Figura 11 – Interface do Software Ultimaker Cura.....                       | 23 |
| Figura 12 – Traçado do Perfil Evolvente de Engrenagem de Dentes Retos...    | 27 |
| Figura 13 – Vista em Perspectiva do Projeto da Base.....                    | 31 |
| Figura 14 – Vista Frontal da Base .....                                     | 32 |
| Figura 15 – Rolamento 608zz .....                                           | 33 |
| Figura 16 – Modelo 3D da Peça Base de Corte .....                           | 33 |
| Figura 17 – Vista em Perspectiva do Módulo Fatiador .....                   | 34 |
| Figura 18 – Vista em Frontal do Módulo Fatiador .....                       | 35 |
| Figura 19 – Vista Frontal Módulo Fatiador Construído .....                  | 36 |
| Figura 20 – Módulo Fatiador Construído .....                                | 37 |
| Figura 21 – Vista em Perspectiva Módulo Aquecedor .....                     | 38 |
| Figura 22 – Vista em Lateral Módulo Aquecedor .....                         | 38 |
| Figura 23 – Módulo Aquecedor Construído .....                               | 40 |
| Figura 24 – Vista Frontal Módulo Aquecedor Construído .....                 | 40 |
| Figura 25 – Gráfico de Torque Motor de Passo 17H4061 .....                  | 41 |
| Figura 26 – Inserto Roscado de Bronze M3 .....                              | 44 |
| Figura 27 – Vista em Perspectiva Módulo Tractionador .....                  | 45 |
| Figura 28 – Vista em Perspectiva Alternativa do Módulo Tractionador .....   | 45 |
| Figura 29 – Módulo Tractionador Construído .....                            | 47 |
| Figura 30 – Módulo Eletrônico e Interface com Usuário .....                 | 48 |
| Figura 31 – Módulo Eletrônico e Interface com Usuário Aberto.....           | 49 |
| Figura 32 – Módulo Eletrônico e Interface com Usuário Construído.....       | 50 |



|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 33 – Módulo Eletrônico e Interface com Usuário Fabricado ..... | 51 |
| Figura 34 – Esquemático do Circuito elétrico do Dispositivo .....     | 52 |
| Figura 35 – Display Apresentado Informações da Velocidade .....       | 53 |
| Figura 36 – Display Apresentado Informações da Temperatura.....       | 54 |
| Figura 37 – Vista em Perspectiva do Projeto 3D .....                  | 54 |
| Figura 38 – Vista em Perspectiva Alternativa do Projeto 3D .....      | 55 |
| Figura 39 – Montagem do dispositivo .....                             | 55 |
| Figura 40 – Filamento Produzido em Baixa Temperatura.....             | 57 |
| Figura 41 – Filamento Produzido em Alta Temperatura .....             | 58 |
| Figura 42 – Filamento Produzido em Temperatura Adequada .....         | 58 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Parâmetros de Impressão Utilizados .....                   | 25 |
| Tabela 2 – Lista Técnicas de Materiais e Peças Módulo Base.....       | 32 |
| Tabela 3 – Lista Técnica de Materiais e Peças Módulo Fatiador.....    | 35 |
| Tabela 4 – Lista Técnica de Materiais e Peças Módulo Aquecedor .....  | 39 |
| Tabela 5 – Parâmetros para Modelagem do Pinhão e Engrenagem .....     | 43 |
| Tabela 6 – Lista Técnica de Materiais e Peças Módulo Tracionador..... | 46 |
| Tabela 7 – Lista Técnica de Materiais e Peças Módulo Eletrônico ..... | 49 |

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

3D – Três dimensões;  
ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno;  
CAD – Desenho assistido por computador;  
CNC – Controle Numérico Computadorizado;  
 $c(t)$  – Valor medido da variável controlada;  
DLP – Processamento de Luz Digital  
 $D_b$  – Diâmetro Base  
 $D_e$  – Diâmetro Externo;  
 $D_p$  – Diâmetro Primitivo;  
 $D(t)$  – Controle Derivativo;  
FDM – Modelagem por Fusão e Deposição;  
 $e(t)$  – Sinal de Erro;  
 $i$  – Razão de transmissão;  
IDE – Interface de Desenvolvimento Integrado;  
 $I(t)$  – Controle Integral;  
 $K_d$  – Constante derivativa;  
 $K_i$  – Constante integrativa;  
 $K_p$  – Constante proporcional;  
LCD – Tela de Cristal Líquido;  
LED – Diodo emissor de luz;  
 $m$  – Módulo;  
PET – Polietileno tereftalato;  
PETG – Polietileno Tereftalato Glicol;  
PID – Proporcional, integrativo e derivativo;  
PLA – Biopolímero ácido Polilático;  
 $p$  – Passo Circular;  
 $P(t)$  – Controle proporcional;  
 $r(t)$  – Valor Desejado (*set point*);  
SLA – Estereolitografia;  
TPU – Poliuretano Termoplástico;  
USB – *Universal Serial Bus*;  
 $u(t)$  – Saída Total do Sistema de Controle PID;

$z$  – Número de Dentes;

$\theta$  – Ângulo de Pressão;

## Sumário

|          |                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Reciclagem de materiais plásticos .....                  | 1         |
| 1.1.1    | Garrafas PET .....                                       | 2         |
| 1.2      | Impressão 3D .....                                       | 3         |
| 1.2.1    | Impressoras FDM .....                                    | 3         |
| 1.2.2    | Impressoras de resinas .....                             | 6         |
| 1.2.3    | Principais materiais utilizados em impressoras FDM ..... | 7         |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                       | <b>10</b> |
| 2.1      | Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID).....     | 10        |
| 2.2      | Modulação por Largura de Pulso (PWM).....                | 13        |
| 2.3      | Arduino.....                                             | 15        |
| 2.4      | Engrenagens de dentes retos .....                        | 16        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                          | <b>19</b> |
| 3.1      | Software Creo .....                                      | 19        |
| 3.2      | Ferramentas de Impressão 3D .....                        | 21        |
| 3.3      | Dimensionamento do par de engrenagens .....              | 25        |
| 3.4      | Componentes eletrônicos .....                            | 27        |
| 3.5      | Programação .....                                        | 29        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                     | <b>31</b> |
| 4.1      | Módulo Base .....                                        | 31        |
| 4.2      | Módulo Fatiador .....                                    | 32        |
| 4.3      | Módulo Aquecedor .....                                   | 37        |
| 4.4      | Módulo Tractionador .....                                | 40        |
| 4.5      | Módulo Eletrônico e Interface com Usuário.....           | 47        |
| 4.6      | Circuito Elétrico.....                                   | 51        |
| 4.7      | Código .....                                             | 52        |

|     |                                  |    |
|-----|----------------------------------|----|
| 4.8 | Dispositivo Completo.....        | 54 |
| 4.9 | Filamentos obtidos.....          | 57 |
| 5   | CONCLUSÃO.....                   | 59 |
|     | REFERÊNCIAS .....                | 60 |
|     | APÊNDICE A – Código Arduino..... | 64 |

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Reciclagem de materiais plásticos**

Plásticos são materiais, cujo elemento essencial é constituído por ligações moleculares orgânicas, que resultam de síntese ou através de transformação de produtos naturais (MICHAELI et al., 2018), esses materiais representam uma categoria crucial de materiais na indústria moderna e tornaram-se uma parte essencial da vida cotidiana devido à sua versatilidade, durabilidade e facilidade de produção. As matérias-primas para o monômero são, principalmente, o petróleo e o gás natural, (MICHAELI et al., 2018).

A relevância dos plásticos na sociedade contemporânea é inegável, sendo amplamente empregados em setores como embalagens, construção, medicina, eletrônicos e muito mais. Essa versatilidade contribuiu para um aumento exponencial na produção mundial de plásticos, que atingiu mais de 400 milhões de toneladas em 2023 (BASTOS ,2023). A demanda crescente por esses materiais é impulsionada pela sua adaptabilidade, eficiência e papel fundamental em diversas áreas, apesar dos desafios associados ao descarte e à gestão sustentável dos resíduos plásticos.

Apesar dos inúmeros benefícios proporcionados pelos plásticos à sociedade, seus resíduos apresentam desafios consideráveis. O elevado volume de materiais plásticos, a significativa quantidade de descarte pós-consumo e os impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada desses resíduos, que não são biodegradáveis, são apenas alguns dos problemas a serem destacados.

Adicionalmente, os plásticos podem ocasionar danos à saúde humana e animal, principalmente devido aos aditivos e produtos químicos utilizados em sua fabricação. Instrumentos regulatórios destinados a mitigar os efeitos negativos dos plásticos na saúde e no meio ambiente devem abranger todo o ciclo de vida desses materiais, desde a produção até o uso e descarte.

Nos últimos anos, a reciclagem de resíduos de polímeros sintéticos vem evoluindo alinhado com tecnologias disponíveis, deixando de ser apenas uma opção de redução de custos de matéria prima e energia e passando a assumir a responsabilidade social e ambiental compartilhada, em projetos de sustentabilidade das grandes empresas, tornando a reciclagem um eixo importante na economia circular. (MACEDO et al., 2020)

### 1.1.1 Garrafas PET

O Polietileno Tereftalato, conhecido popularmente pela sigla PET, é um polímero da classe dos poliésteres termoplásticos, cujo processo produtivo teve grande sucesso, sobretudo, na produção de bebidas e embalagens (SILVIA, 2023). A primeira amostra desse material foi desenvolvida pelos ingleses Whinfield e Dickson (1941). As pesquisas que levaram à produção em larga escala do poliéster começaram somente após a Segunda Grande Guerra, nos anos 50, em laboratórios dos EUA e Europa (ALMEIDA et al., 2013)

Ao longo dos anos, observou-se extraordinário crescimento do mercado de PET devido à versatilidade de suas propriedades e das possíveis aplicações, incluindo a produção de fibras têxteis e recipientes para bebidas carbonatadas, mas também de filmes para fotografia, embalagens e componentes de automóveis. (SOARES et al, 2009).

Atualmente, o PET marca presença em diversos itens, sendo a escolha primordial para a produção de garrafas destinadas a refrigerantes, águas, sucos, óleos comestíveis, medicamentos, cosméticos, artigos de higiene e limpeza, destilados, isotônicos, entre outros. Além de proporcionar elevada resistência mecânica e química, durabilidade e leveza, o PET exibe excelente barreira contra gases e odores.

Dada a relevância da reciclagem de plásticos em geral e as notáveis propriedades do PET, surge a possibilidade de empregá-lo como matéria-prima para filamentos utilizados em impressoras 3D. A disponibilidade abundante desse material e seu baixo custo de produção e reciclagem tornam a confecção de filamentos uma alternativa acessível para entusiastas da impressão 3D. Assim, a fabricação de objetos por meio da impressão 3D com base nesse material não apenas representa uma opção vantajosa, mas também um gesto ecologicamente responsável.

Uma das principais vantagens desse processo é a capacidade de reduzir a quantidade de resíduos plásticos descartados no meio ambiente, especialmente quando adotado em larga escala. Além disso, a reciclagem de garrafas PET permite economizar energia e recursos naturais, contrastando com a produção de plásticos a partir de matérias-primas virgens, que consome mais energia e água.



## 1.2 Impressão 3D

As impressoras 3D representam só uma das várias tecnologias de manufatura aditiva que existem atualmente no mercado internacional, mercado que cresce a passos largos a cada ano que passa (GONZALES, 2021). Por meio de diversas técnicas, essa abordagem possibilita a criação de objetos físicos tridimensionais, depositando material em finas camadas partindo diretamente de seu modelo 3D feito no computador, é por isso que é considerada uma tecnologia de fabricação digital. (GONZALES, 2021).

Essa versatilidade permite a obtenção de uma variedade de itens, abrangendo desde peças de máquinas e decorações até órgãos e alimentos, consolidando sua relevância em setores como odontologia, arquitetura, design e, especialmente, engenharia.

Entre as inúmeras vantagens da impressão 3D, sua viabilidade econômica e técnica se destacam. Os custos de fabricação são praticamente lineares, o que significa que o custo para produzir qualquer quantidade de produtos permanece proporcional de forma linear. Esse atributo específico tornou a impressão 3D um dos principais processos de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*). No entanto, à medida que a tecnologia evolui, ela tem se mostrado prática não apenas na prototipagem, mas também para a fabricação de uma ampla variedade de produtos (MARQUARDT & ZHENG, 2016).

Além do potencial inovador e criativo, a acessibilidade à impressão 3D aumentou consideravelmente nos últimos anos. O processo fundamental envolve a adição progressiva de material, com linhas sucessivas sendo depositadas camada por camada até a conclusão do objeto final. Esse desenvolvimento rápido e a democratização do acesso à tecnologia reforçam sua posição como uma ferramenta valiosa e transformadora em diversos campos.

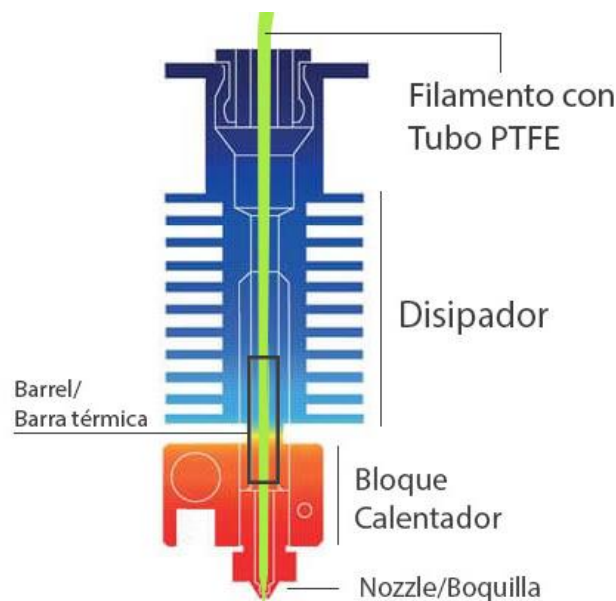
### 1.2.1 Impressoras FDM

FDM é um dos tipos de impressão 3D que usa termoplásticos adequados para produção e, portanto, os itens impressos têm excelentes atributos mecânicos, térmicos e químicos. (FERREIRA, 2020) Em uma impressora 3D FDM (Modelagem por Fusão e Deposição), a jornada de criação começa com a utilização de um filamento polimérico em estado sólido, geralmente guardado em um carretel. Esse

filamento é direcionado até o *hot end* da máquina, uma região crucial encarregada de fundir o material. A transferência do filamento ocorre por meio da extrusora, que através de um conjunto semelhante a um par de engrenagens acoplada em um motor de passo, traciona o material para o *hot end*.

O *hot end* é um componente vital, o qual desempenha um papel essencial no processo de uma impressora 3D FDM. Nessa fase, o filamento sólido é submetido a um aquecimento preciso até atingir o estado líquido. Para assegurar a integridade do filamento durante o avanço até sua fase líquida, o filamento percorre o interior de um bloco de alumínio com várias aletas, acompanhado por um ventilador que evita o superaquecimento dessa região. O aquecimento do filamento é realizado por meio de uma resistência elétrica, aquecendo um bloco de alumínio de maneira controlada. O material fundido é então extrudado por um bico de latão com um furo de diâmetro variável, adaptando-se às diferentes aplicações. A Figura 1 apresenta um esquema de um *hot end* de impressora FDM.

Figura 1 - Representação do *hot end* impressora FDM.



Fonte: Filament2print (2023)

Esse material fundido é então depositado em camadas sucessivas, cada uma com formas específicas, sobre a plataforma de impressão. À medida que o material é depositado,

À medida que o plástico é depositado na plataforma, ele endurece quase imediatamente, devido ao processo de resfriamento promovido por uma ventoinha, deixando uma base para a próxima camada. Quando uma camada é finalizada, o

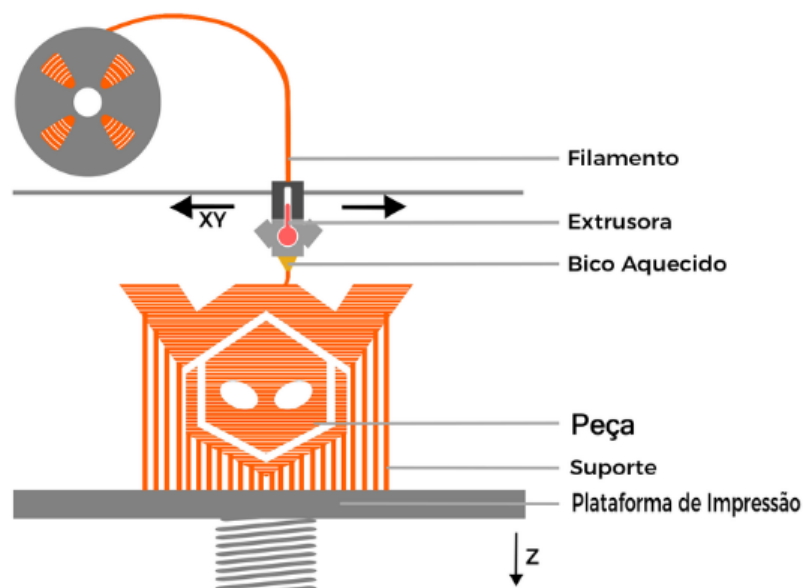
bico (ou a plataforma) se reposiciona em uma fração de milímetro, e o processo começará novamente, fundindo uma nova camada sob a camada anterior (REDAÇÃO WISHBOX, 2023).

Para moldar o objeto desejado, utiliza-se um sistema cartesiano composto por três eixos, que são acionados por motores de passo e sistema de transmissão que variam para cada modelo da impressora.

Os motores de passo movimentam o conjunto do *hot end* em três direções espaciais: X, Y e Z. O eixo X controla o movimento horizontal do *hot end* de um lado para o outro, o eixo Y controla o movimento na direção perpendicular, permitindo a cobertura de diferentes áreas na plataforma de impressão, enquanto o eixo Z controla a altura, determinando a camada específica onde o material será depositado.

Portanto, o processo de impressão 3D FDM baseia-se na deposição estratégica de material fundido em camadas sucessivas, seguindo padrões predeterminados pelo modelo virtual. Isso resulta na criação de objetos tridimensionais com precisão e detalhes. Esse método oferece versatilidade na produção de uma ampla gama de peças e protótipos, destacando-se pela simplicidade e eficácia na fabricação de objetos personalizados. O funcionamento de uma impressora FDM é esquematizado na Figura 2.

Figura 2 - Representação do Funcionamento de uma Impressora FDM.



Fonte: Redação Wishbox (2023)

### 1.2.2 Impressoras de resinas

As impressoras 3D de resina, baseadas em tecnologias como SLA (Estereolitografia), DLP (Processamento de Luz Digital) e LED-LCD (Tela de Cristal Líquido com Diodo Emissor de Luz), empregam técnicas avançadas para a fabricação de objetos tridimensionais por meio da polimerização de resinas líquidas.

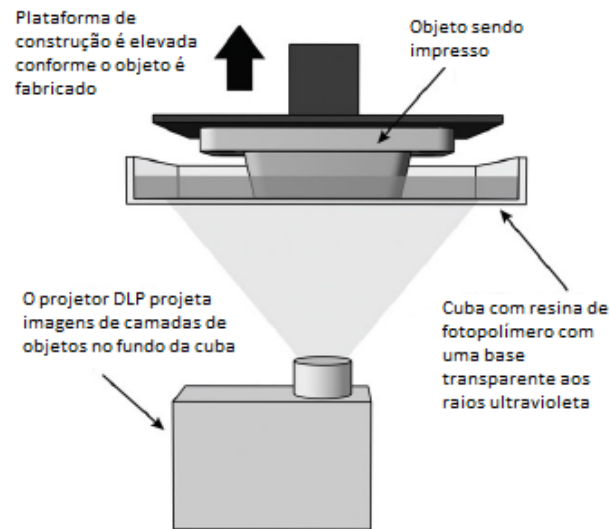
No início do processo, um modelo tridimensional digital é preparado para impressão. A resina fotossensível é despejada no tanque transparente da impressora, um material que solidifica quando exposto à luz. A plataforma de construção é posicionada pelo mecanismo de ajuste de altura de modo que entre a base de construção e o fundo da cuba exista um *gap* que corresponde a espessura da primeira camada a ser curada (OLMOS, 2018). Durante a impressão, a resina é exposta à luz ultravioleta ou projetada, resultando na solidificação em pontos específicos e formando a primeira camada do objeto 3D.

Após a exposição à luz, a resina solidificada requer cura ou endurecimento, podendo algumas impressoras possuírem uma etapa pós-processamento dedicada. Após a conclusão de todas as camadas e o término da cura, a mesa de impressão é abaixada, permitindo a remoção do objeto 3D finalizado.

Existem três tecnologias principais para realizar a solidificação das resinas:

- **Estereolitografia (SLA):** O SLA opera por meio de um laser ultravioleta que solidifica camadas finas de resina líquida. A plataforma de impressão desce gradualmente a cada camada concluída. Essa abordagem proporciona alta precisão e detalhamento, sendo especialmente adequada para aplicações que exigem acabamento de alta qualidade.
- **Processamento de Luz Digital (DLP):** As impressoras DLP utilizam uma fonte de luz digital para projetar a imagem de uma camada completa na resina simultaneamente. Esse método acelera o processo em comparação com o SLA. Oferece uma boa resolução e qualidade de impressão, sendo reconhecido pela velocidade superior.
- **Tela de Cristal Líquido com Diodo Emissor de Luz (LED-LCD):** Na tecnologia LED-LCD, um painel de LED-LCD atua como fonte de luz, expondo a resina à luz ultravioleta por meio de uma matriz de pixels. Essa abordagem é conhecida por ter um custo mais baixo em comparação com SLA e DLP, mantendo uma boa resolução e velocidade de impressão.

Figura 3 - Representação de uma Impressora de Resina DLP.

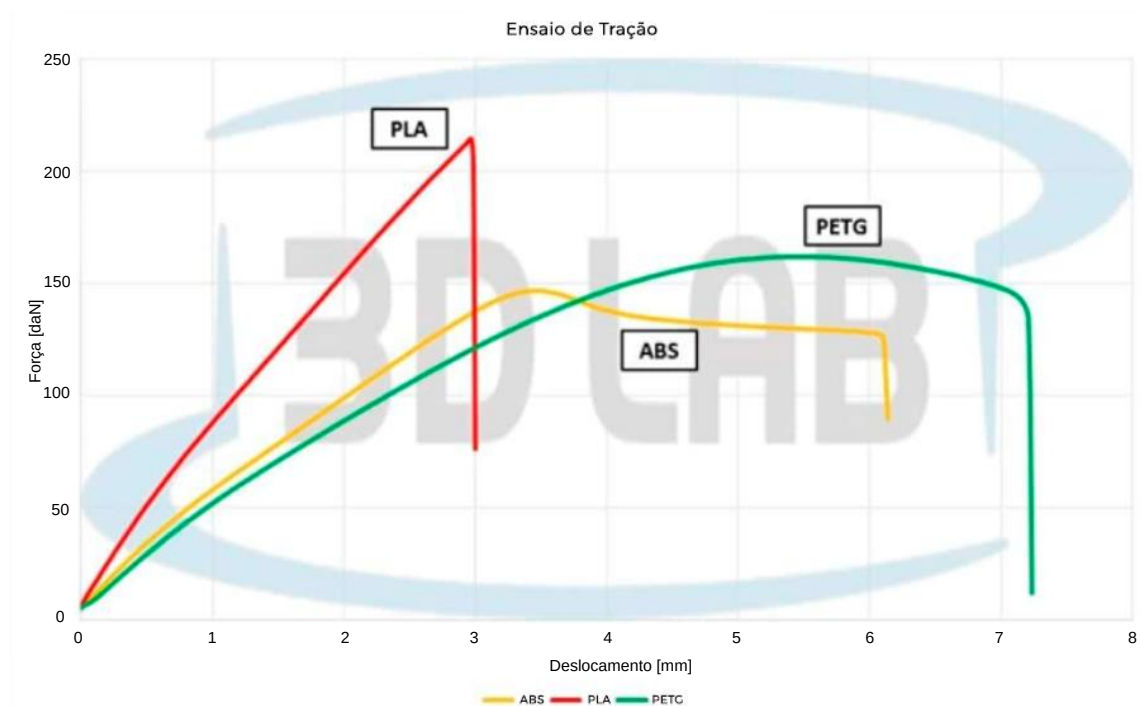


Fonte: Olmos (2018)

### 1.2.3 Principais materiais utilizados em impressoras FDM

A impressão 3D FDM é uma tecnologia revolucionária que utiliza diferentes tipos de filamentos para criar objetos tridimensionais. Entre os filamentos mais utilizados, destacam-se ABS, PLA, PETG e TPU, cada um apresentando características distintas. O gráfico apresentado na Figura 4 apresenta os dados coletados de um ensaio de tração para os principais materiais utilizados.

Figura 4 – Ensaio de Tração dos Principais Filamentos para Impressão 3D



Fonte: 3D Lab (2017)

O ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) é conhecido por sua robustez e resistência a impactos. A maioria dos ABS para FDM é extrudada em torno de 220°C, com a transição vítrea em torno de 105°C (FERREIRA, 2020), o ABS é fácil de pós-processar, permitindo lixamento e pintura, sendo uma escolha popular para aplicações que exigem resistência mecânica. Alguns desafios incluem o empenamento durante a impressão, especialmente em impressoras sem câmaras aquecidas, tornando-o um material de difícil impressão.

Já o PLA (Ácido Polilático) é um filamento biodegradável derivado de recursos renováveis, como amido de milho. O PLA funde em torno de 175°C, mas flui e é extrudado em torno de 215°C (FERREIRA, 2020), torna-o fácil de usar, e sua variedade de cores o torna ideal para impressões esteticamente agradáveis, também possui facilidade em aderir bem à mesa de impressão, reduzindo a probabilidade de empenamento e melhorando a estabilidade durante a impressão. Esse material possui uma rigidez considerável.

O PETG (Tereftalato de Polietileno Glicol) combina características do PET e do ABS, oferecendo boa resistência mecânica, transparência e resistência a impactos. A temperatura de impressão geralmente varia entre 220°C e 250°C, enquanto os fabricantes também recomendam uma temperatura da mesa de impressão entre 50°C e 75°C (FERREIRA, 2020). Esse material é amplamente utilizado em aplicações industriais, por isso oferece uma resistência térmica superior ao PLA além de ser relativamente de fácil impressão.

Para aplicações que requerem flexibilidade, o TPU (Poliuretano Termoplástico) é a escolha ideal. Este filamento flexível, elástico e resistente a abrasões possui uma faixa de temperatura de extrusão normalmente entre 200°C e 220°C. Apesar de sua flexibilidade dificultar a adesão a mesa de impressão, o TPU pode ser impresso em muitas impressoras 3D FDM padrão, desde que sejam feitas as configurações adequadas, como uma menor velocidade de impressão.

A produção de filamentos a partir de garrafas PET recicladas oferece vantagens significativas. Primeiramente, contribui para a sustentabilidade ambiental, utilizando resíduos plásticos e reduzindo o impacto no meio ambiente. Além disso, a disponibilidade abundante de garrafas PET recicladas torna essa alternativa uma escolha acessível. Em relação às propriedades, esse material apresenta uma excelente combinação de rigidez e tenacidade, alta resistência ao calor, estabilidade química e dimensional e capacidade de isolamento elétrico (FERREIRA, 2020). A

resistência química é preservada, sendo semelhante ao PET virgem, e a transparência é mantida, tornando-o adequado para várias aplicações.

Em síntese, a escolha do filamento em impressão 3D FDM depende das características específicas requeridas pelo projeto. Seja buscando resistência mecânica, flexibilidade, biodegradabilidade ou sustentabilidade, a diversidade de filamentos disponíveis oferece soluções para atender a uma ampla gama de necessidades na fabricação aditiva.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Para gerenciar a temperatura no sistema de aquecimento do dispositivo é necessário adotar uma técnica de controle do sistema. Essa abordagem possui a finalidade de estabilizar e manter a temperatura o mais constante possível em relação ao valor desejado.

Atualmente, os sistemas de controle automático são amplamente encontrados em todos os setores da indústria, tais como: controle de qualidade de produtos manufaturados, linha de montagem automática, controle de máquinas operatrizes, tecnologia espacial, sistemas de armamento e muitos outros. Dessa forma, os sistemas de controle automático têm assumido um papel progressivamente importante no desenvolvimento da moderna civilização e tecnologia (Faccin, 2004).

Uma abordagem eficaz para esse controle é o uso do PID, que combina três ações para compensar e ajustar a dinâmica da resposta temporal de um sistema. Suas aplicações abrangem desde o controle de temperatura, automóveis, eletrônicos, bioprocessos, sistemas de voo, até a medicina, sendo utilizado desde o controle de pH em fermentação até a estabilização de aeronaves não tripuladas. A versatilidade do PID o torna uma escolha amplamente adotada para otimizar processos industriais e dinâmicos.

Em diversos cenários, é viável representar o sistema por intermédio de um modelo matemático, contudo, há casos nos quais isso se torna impraticável. Os controles PID podem ser empregados em grande parte dos sistemas. Quando se depara com a incógnita do modelo matemático da planta, o controle PID clássico emerge como a alternativa mais proveitosa.

Um sistema de controle que une três modos básicos de controle contínuo produz um dos mais eficientes algoritmos de controle já desenvolvidos, o controlador PID, pois ele concilia simplicidade e atendimento às necessidades de controle para a grande maioria dos casos industriais para ajustar e otimizar a resposta de um sistema dinâmico (Faccin, 2004).

Cada componente, proporcional (P), integral (I) e derivativo (D), desempenha um papel específico no controle global, com objetivo central de minimizar o sinal de erro  $e(t)$  que se trata da diferença entre a variável controlada, medida no processo, e o seu valor desejado (*setpoint*), representado por:



$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (1)$$

onde  $r(t)$  é o set point e  $c(t)$  é o valor medido da variável controlada. Com base nesse erro, o controle gera um sinal direcionado a eliminar o desvio.

- **Controle Proporcional (P)**

O controle proporcional (P) desempenha um papel fundamental no controle de sistemas dinâmicos, sendo uma das três componentes do controlador PID. Sua função está diretamente relacionada ao erro atual, que é a diferença entre a saída desejada e a saída real do sistema. O controle é baseado no erro entre o ponto de ajuste e a variável real do processo. O ganho proporcional é multiplicado por esse erro para gerar a saída de controle. Este componente proporciona uma resposta linear, o que significa que a saída de controle é diretamente proporcional ao erro (MCALLER, 2023). No entanto, é importante notar que o controle proporcional, por si só, não pode eliminar completamente o erro estático. O controle proporcional é expresso pela equação

$$P(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2)$$

onde  $K_p$  é o ganho do controlador. Os conceitos básicos do controle proporcional incluem a capacidade de ajustar o ganho do controlador para tornar a saída sensível aos desvios desejados e a escolha do sinal de  $K_p$  para determinar se a saída do controlador deve aumentar ou diminuir com o aumento do desvio. O ganho  $K_p$  é adimensional e ajustável, sendo escolhido após a instalação e operação do controlador. Essa flexibilidade faz do controle proporcional uma ferramenta valiosa em sistemas de controle, permitindo ajustes para atender às necessidades específicas do processo.

- **Controle Integral (I)**

O controle integral (I) é uma das componentes do controlador PID e desempenha um papel crucial no controle, é baseado na integral do erro entre o ponto de ajuste e a variável real do processo. Este componente oferece uma maneira de eliminar o erro em estado estacionário no sistema. O ganho integral é multiplicado pela soma dos erros ao longo do tempo para gerar a saída de controle.

Sua característica fundamental é manter a saída constante quando o sinal de erro é nulo (MCALLER, 2023). Essa variável é representada pela equação:

$$I(t) = K_i \cdot \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

Onde  $K_i$  é o tempo integral ou tempo de reset, expresso em unidades de tempo. Em controladores comerciais, o parâmetro  $K_i$  é ajustável, permitindo a adaptação às características específicas do sistema.

A ação de controle integral, também conhecida como controle de reset, é amplamente utilizada devido a uma característica prática significativa: a eliminação do erro estacionário. Em regime estacionário, tanto o sinal de erro quanto o sinal de controle são constantes. No entanto, o termo integral na equação implica que  $I(t)$  variará com o tempo, a menos que  $e(t) = 0$ . Assim, a ação integral assegura que  $I(t)$  atinja um valor constante, resultando na anulação do erro estacionário. Essa propriedade torna o controle integral uma ferramenta valiosa na busca por respostas precisas e estáveis em sistemas de controle.

- **Controle Derivativo (D)**

O controle derivativo (D) é outra componente essencial do controlador PID, desempenhando um papel crucial na resposta dinâmica do sistema de controle. Enquanto o controle proporcional age proporcionalmente ao erro atual, e o controle integral lida com o acúmulo do erro ao longo do tempo, o controle derivativo reage à taxa de variação do erro entre o ponto de ajuste e a variável real do processo. Este componente oferece uma maneira de responder rapidamente às mudanças no sistema. O ganho derivativo é multiplicado pela taxa de variação do erro para gerar a saída de controle (MCALLER, 2023), representada pela seguinte equação:

$$D(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

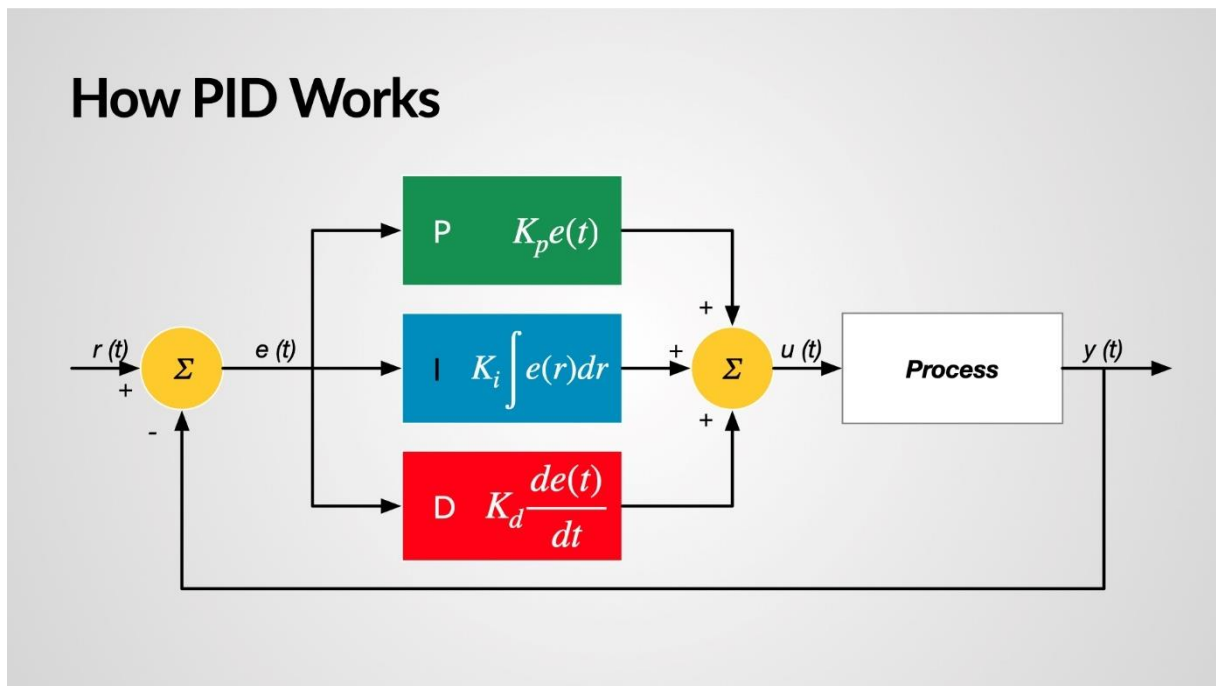
onde  $K_d$  é o ganho do controle derivativo. O ganho  $K_d$  ajusta a sensibilidade do controle à taxa de variação do erro.

A principal função do controle derivativo é prevenir oscilações excessivas e aumentar a estabilidade do sistema. Ele atua antecipando o comportamento futuro do erro, restringindo abruptas mudanças na saída do sistema. Isso é especialmente

útil em situações em que o controle proporcional pode levar a respostas excessivamente rápidas, gerando oscilações indesejadas.

Em resumo, o controle derivativo contribui para a estabilidade do sistema de controle, agindo para suavizar transições bruscas e melhorar o desempenho global do controlador PID. O controle PID pode ser esquematizado através de diagrama de blocos como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama de Blocos Controle PID



Fonte: McAller (2023)

No controle PID, a saída total do sistema  $u(t)$  é a soma ponderada dessas três componentes:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Onde  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  são os ganhos ajustáveis do controle proporcional, integral e derivativo, respectivamente. A escolha adequada desses ganhos é crucial para alcançar um desempenho ótimo do sistema de controle.

## 2.2 Modulação por Largura de Pulso (PWM)

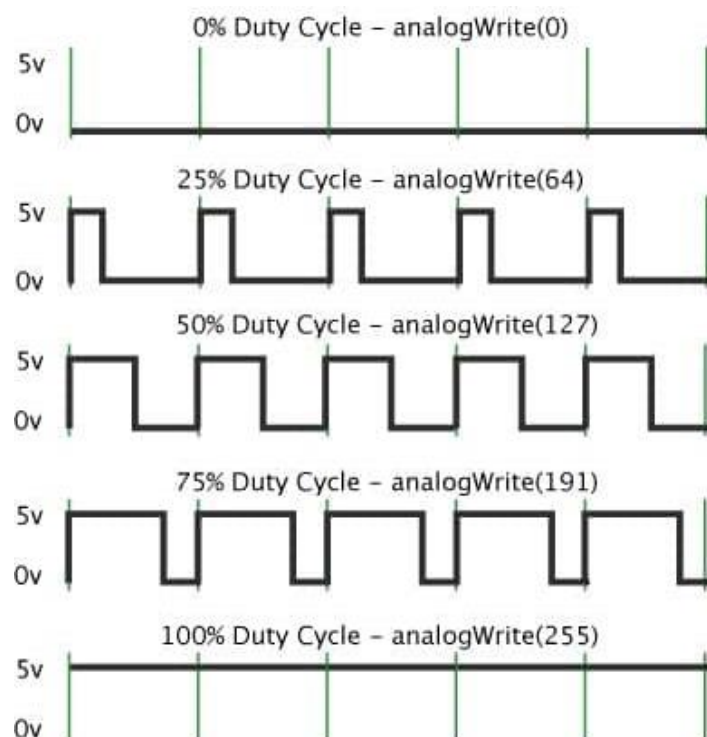
PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*, é uma técnica utilizada por sistemas digitais para variação do valor médio de uma forma de onda periódica. A técnica

consiste em manter a frequências de uma onda quadrada fixa e variar o tempo que o sinal permanece em nível lógico alto (Vargas, 201-?). Essa estratégia foi implementada no circuito de aquecimento e permite controlar a potência fornecida ao dispositivo de aquecimento. A combinação do PID com o sinal PWM, gerenciados pelo Arduino, confere ao sistema a capacidade de ajustar a temperatura conforme necessário para o projeto.

Embora seja uma abordagem considerada antiga, o PWM continua sendo uma das técnicas de controle mais empregadas para acionar conversores eletrônicos de potência, como drivers de LED, inversores de frequência, controle de velocidade de motores e ajuste de luminosidade, sendo amplamente utilizado em diversas aplicações cotidianas, como carregadores, sistemas fotovoltaicos, servo-motores e veículos elétricos.

O tempo em que o sinal fica no nível lógico alto é chamado de *duty cycle*. Quando o *duty cycle* está em 0% o valor médio da saída encontra-se em 0 V e consequentemente para um *duty cycle* de 100% a saída assume seu valor máximo, que no caso é 5 V. Para um *duty cycle* de 50% a saída assumirá 50% do valor da tensão, 2,5 V e assim sucessivamente para cada variação no *duty cycle* (Vargas, 201-?). A Figura 6 apresenta um diagrama do sinal PWM para diferentes *duty cycle*.

Figura 6 – Diagrama PWM



O PWM oferece a capacidade de ajustar a largura dos pulsos, permitindo um controle preciso sobre a potência entregue e, por conseguinte, proporcionando uma eficiência energética superior. Além disso, devido ao funcionamento em uma condição de ligado/desligado, o PWM geralmente resulta em uma dissipação de calor menor, contribuindo para a eficiência e confiabilidade do sistema. Essa versatilidade e eficácia fazem do PWM uma escolha valiosa em diversas indústrias, presente em processos industriais e sistemas de controle.

### **2.3 Arduino**

A Placa Arduino consiste em uma plataforma de microcontrolador de código aberto e linguagem padrão baseada em C/C++ e em softwares e hardwares livres (MARTINAZZO, 2014), a fim de facilitar a prototipagem e o desenvolvimento de projetos eletrônicos. No dispositivo projetado, desempenha um papel crucial de realizar o controle de todos os componentes eletrônicos, prototipagem, processamento e apresentação de dados obtidos através de sensores.

No centro do Arduino UNO está o microcontrolador ATmega328P, baseado na arquitetura AVR, oferecendo programabilidade para executar o código que direciona uma variedade de dispositivos e interações. Equipada com 6 portas analógicas e 14 portas digitais, sendo 6 PWN (MARTINAZZO, 2014), cada um configurável como entrada ou saída digital, a placa oferece flexibilidade para conectar sensores, LEDs, motores e outros componentes eletrônicos. Já as portas analógicas, para a leitura de sinais analógicos, facilitam a conexão de sensores que geram sinais de voltagem variável.

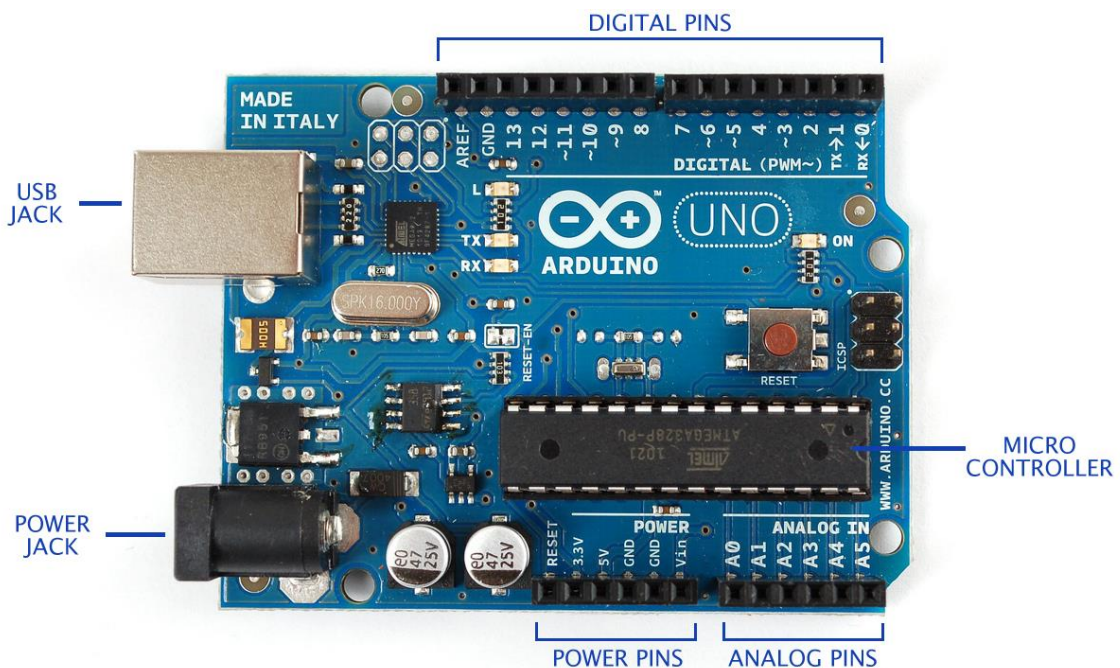
A presença de uma porta USB viabiliza a comunicação serial com o computador, tanto para programação quanto para interação. Além disso, conta com pinos de comunicação serial para se conectar a outros dispositivos.

O regulador de tensão integrado permite a alimentação da placa com uma fonte de 7 V a 12 V, regulando-a para os 5 V necessários ao funcionamento do microcontrolador. A conectividade USB não apenas facilita a programação, mas também simplifica a comunicação com o computador, eliminando a necessidade de programadores externos. Essas características tornam o Arduino UNO uma ferramenta eficaz e versátil para projetos eletrônicos, independentemente do nível de experiência do usuário.

O Arduino UNO é uma plataforma amplamente reconhecida e suportada pela comunidade de engenheiros e *makers*, beneficiando-se de uma vasta quantidade de recursos, tutoriais e bibliotecas acessíveis online. Sua popularidade está ancorada na capacidade de facilitar a prototipagem rápida, permitindo que desenvolvedores e engenheiros testem e refinem suas ideias de maneira eficiente.

A amigabilidade do Arduino com iniciantes é uma característica distintiva. Sua linguagem de programação simplificada e a interface de desenvolvimento integrado (IDE) tornam a programação e o desenvolvimento de projetos eletrônicos acessíveis mesmo para aqueles sem experiência prévia. A natureza *open source* do Arduino é um elemento essencial, abrindo seu *hardware* e *software* para o público. Essa abertura não apenas fortalece a comunidade, mas também impulsiona a inovação, permitindo que outros construam sobre a base existente, adaptem e aprimorem a tecnologia. A Figura 7 apresenta as conexões disponíveis para o Arduino UNO

Figura 7 – Conexões do Arduino UNO



Fonte: Tech Sul Eletrônicos (2021)

## 2.4 Engrenagens de dentes retos

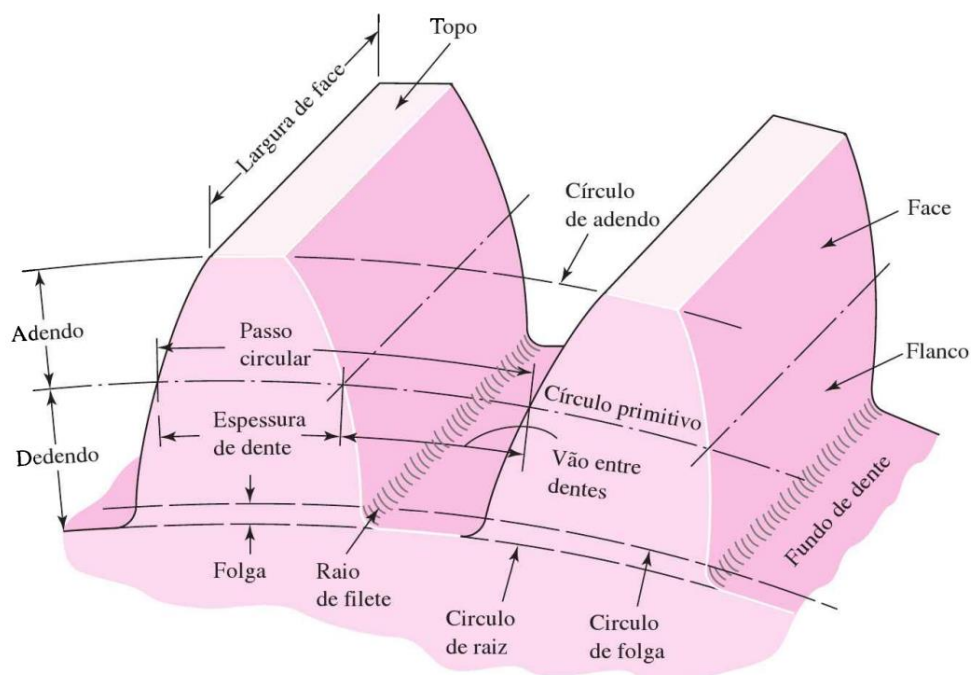
O dispositivo incluirá um sistema de transmissão de movimento, empregando um conjunto de pinhão e engrenagem de dentes retos. Este sistema, em conjunto com o motor, terá a responsabilidade de acionar o tambor de recolhimento do filamento, promovendo uma redução da rotação.

As engrenagens de dentes retos são componentes mecânicos fundamentais empregados em uma variedade de sistemas de transmissão de movimento. Essas engrenagens possuem dentes paralelos ao eixo de rotação e são utilizadas para transmitir movimento de um eixo a outro eixo paralelo ao primeiro (BUDYNAS, 2011), resultando em uma forma de dente reta e simples. Elas são muito utilizadas devido à sua simplicidade, fabricação e eficiência na transmissão de torque.

A operação das engrenagens de dentes retos é baseada na interação dos dentes entre duas engrenagens que se encaixam. Quando uma engrenagem aciona outra, ocorre uma transferência suave de movimento e torque. O tamanho e o número de dentes nas engrenagens determinam a relação de transmissão entre elas. Engrenagens de dentes retos podem ser encontradas em diversas aplicações, desde máquinas industriais até sistemas automotivos e dispositivos de transmissão.

A fabricação dessas engrenagens é relativamente simples, tornando-as economicamente viáveis. No entanto, uma consideração importante é o desgaste resultante do contato dente a dente, que pode gerar ruído e diminuir a eficiência ao longo do tempo. Apesar disso, as engrenagens de dentes retos continuam a ser uma escolha comum devido à sua confiabilidade, simplicidade e ampla aplicabilidade em diversos setores da engenharia mecânica. A Figura 8 apresenta a nomenclatura dos parâmetros dos dentes dessas engrenagens

Figura 8 – Nomenclatura de Parâmetros para Dentes Retos



Fonte: BUDYNAS (2011)

Os principais parâmetros que envolvem um sistema de engrenagem são:

- **Círculo primitivo:** O círculo primitivo é um círculo teórico sobre o qual todos os cálculos geralmente se baseiam; seu diâmetro é o diâmetro primitivo ( $D_p$ ). Os círculos primitivos de um par de engrenagens engrazadas são tangentes entre si. O pinhão é a menor das suas engrenagens. A maior é frequentemente chamada de coroa ou engrenagem (BUDYNAS, 2011);
- **Módulo:** O módulo ( $m$ ) é a razão entre o passo diametral e o número de dentes. A unidade costumeira de comprimento utilizada é o milímetro. O módulo é o índice de tamanho de dente no SI (BUDYNAS, 2011);
- **Número de dentes:** O número de dentes ( $z$ ) é valor da quantidade de dentes presente na engrenagem.
- **Passo Circular:** O passo circular ( $p$ ) é a distância, medida no círculo primitivo, do ponto de um dente ao correspondente ponto do dente adjacente. Assim, o passo circular é igual à somada espessura de dente com a largura do espaçamento (BUDYNAS, 2011);
- **Razão de Transmissão:** A razão de transmissão ( $i$ ) é uma medida que expressa a relação entre as velocidades angulares ou as velocidades lineares de duas engrenagens em um sistema de transmissão. Ela indica quantas vezes uma engrenagem gira em relação à outra em um determinado período de tempo. Vale destacar que, ao ajustar a razão de transmissão, é possível influenciar diretamente a relação entre velocidade e torque, onde a diminuição da velocidade resulta em um aumento proporcional do torque.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O conceito inicial do projeto consiste em um dispositivo capaz de transformar uma garrafa PET em um filamento que possa ser utilizado por uma impressora 3D. Para isso esse dispositivo precisará de diversos módulos, o primeiro deles é o responsável por posicionar a garrafa no dispositivo e a partir de um dispositivo de corte, filetar essa garrafa de maneira contínua à medida que o filamento é produzido. Em seguida esse filete irá passar por um bloco aquecedor que é responsável por realizar aquecimento desse material até o ponto em que esse seja moldado em um formato circular, com dimensão adequada para utilização em impressão 3D. Para fazer o tracionamento do filamento, é utilizado um motor de passo, que utiliza um sistema de redução através de engrenagens de dentes retos para mover um tambor no qual o filamento é enrolado e traciona ao longo do dispositivo. Também será necessário um interface de controle do dispositivo, onde estará acoplado o circuito e os componentes eletrônicos utilizados.

Para a elaboração deste projeto, empregou-se uma variedade de ferramentas essenciais, incluindo *softwares* especializados em modelagem 3D e na preparação de objetos para impressão tridimensional. O processo de fabricação adicionalmente contou com o suporte de uma impressora 3D, responsável pela produção das diversas peças indispensáveis ao projeto. Além do instrumental físico, a integração de componentes eletrônicos foi crucial, envolvendo elementos como resistores, transistores e botões, todos essenciais para viabilizar o controle preciso de temperatura e os movimentos dos motores de passo. Para orquestrar esse complexo sistema, recorreu-se à eficiência da placa Arduino Uno, cujas características se mostraram particularmente adequadas à natureza dinâmica e interconectada dos elementos envolvidos no projeto.

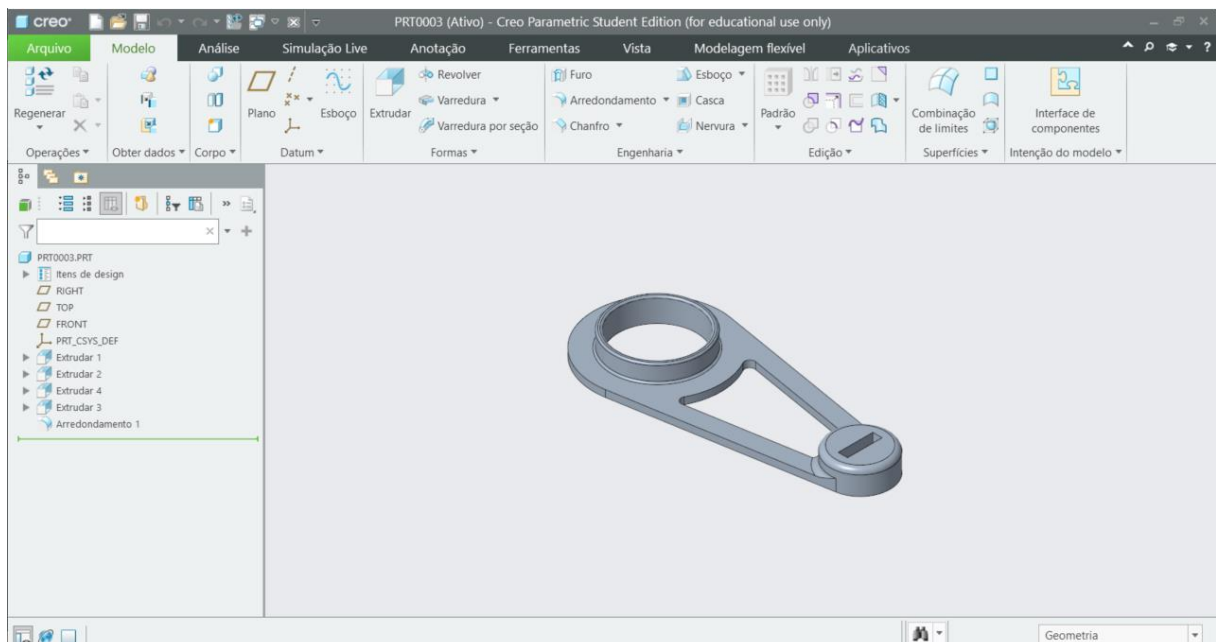
#### 3.1 Software Creo

A incorporação de modelos 3D no ciclo de desenvolvimento de projetos oferece uma série de vantagens fundamentais. A representação realista proporciona uma compreensão minuciosa e nítida do design final. Esse aspecto, aliado à capacidade de iteração rápida, acelera ajustes e refinamentos, prevenindo custos adicionais ao identificar possíveis problemas antecipadamente.

A análise de desempenho integrada ao modelo possibilita avaliações precisas, contribuindo para otimizações. Além disso, a economia de custos é evidente, uma vez que a implementação virtual de melhorias pode ocorrer antes da execução física. Os modelos 3D desempenham um papel crucial na documentação técnica, gerando desenhos detalhados e especificações. Facilitam a prototipagem rápida e são essenciais para a apresentação visual em relatórios e propostas. Em resumo, a adoção de modelos 3D enriquece significativamente o processo de desenvolvimento, oferecendo benefícios notáveis em termos de eficiência, economia e comunicação visual.

O *software* Creo, desenvolvido pela PTC (*Parametric Technology Corporation*), é uma robusta suíte de aplicativos de design assistido por computador (CAD) que proporciona ferramentas abrangentes para modelagem 3D, análise, simulação e design paramétrico. Utilizado em diversas indústrias, desde eletrônicos até automóveis e produtos de consumo, o Creo destaca-se pela sua versatilidade e eficácia no processo de desenvolvimento de produtos. A interface do *software* Creo é apresentada na Figura 9.

Figura 9 – Interface *Software* Creo



Fonte: Próprio autor

Além disso, na versão 9.0.0.0 do Creo, a PTC introduziu avanços significativos, notadamente em relação aos recursos, como o método dos elementos finitos. Essa versão elevou as capacidades de análise e simulação, proporcionando

aos usuários uma gama expandida de ferramentas para avaliar a integridade estrutural e o desempenho dos projetos. Com uma ênfase renovada na precisão e na eficiência, a versão 9.0.0.0 representa um marco no aprimoramento das funcionalidades de análise de elementos finitos no Creo.

A PTC, reconhecendo a importância da formação na área de design e engenharia, oferece uma versão estudantil do Creo. Destinada a estudantes e educadores, essa versão proporciona acesso gratuito a muitas das funcionalidades presentes na versão comercial. Essa iniciativa não apenas facilita a aquisição de habilidades valiosas em CAD, mas também incentiva a aplicação prática do conhecimento por meio de projetos e exercícios específicos.

Nesse cenário, a escolha por empregar esse software para a modelagem do projeto 3D foi motivada pela sua abrangência como uma ferramenta completa, oferecendo diversas funcionalidades para o desenvolvimento de projetos. A decisão foi influenciada pela familiaridade prévia com os recursos disponíveis, bem como pela conveniência proporcionada pela existência de uma versão gratuita direcionada a estudantes.

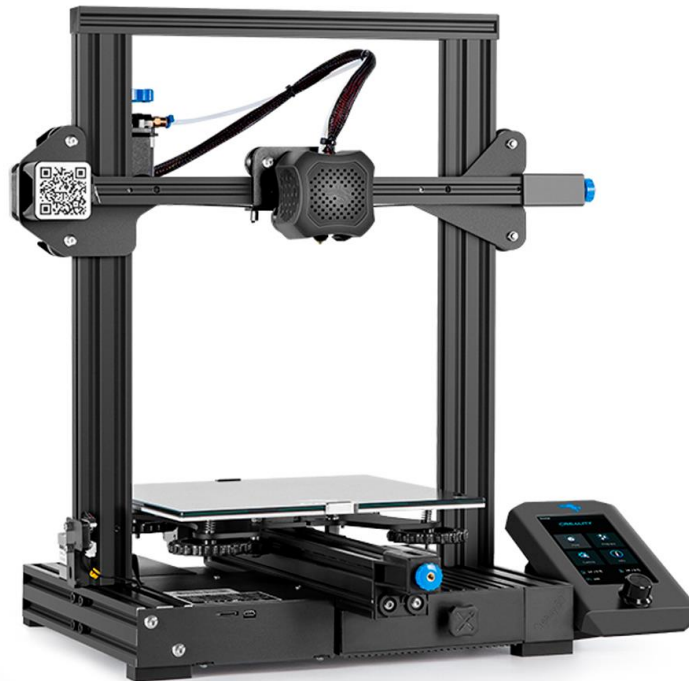
### **3.2 Ferramentas de Impressão 3D**

O desenvolvimento do projeto demandou a produção de diversos componentes por meio da tecnologia de impressão 3D. Para atender a essa necessidade, foi essencial o emprego de diversas ferramentas, incluindo o *software* de modelagem 3D.

- **Impressora Ender 3 v2**

A impressora 3D Ender 3 V2 foi a utilizada no projeto por tratar-se de uma escolha notável no universo da impressão tridimensional, destacando-se por suas características avançadas e desempenho confiável. Fabricada pela renomada empresa Creality, essa versão aprimorada da série Ender 3 mantém a reputação de ser acessível, fácil de montar e oferecer resultados de alta qualidade.

Figura 10 – Impressora 3D Ender 3 V2



Fonte: 3D LAB (2022)

O design robusto da Ender 3 V2 incorpora um quadro de alumínio, conferindo estabilidade estrutural e minimizando vibrações durante a impressão. Sua área de impressão de 220x220x250 mm proporciona um amplo espaço para a criação de uma variedade de peças e protótipos. Além disso, a cama aquecida e superfície de vidro garantem uma aderência consistente e facilitam o processo de preparação da impressão.

A compatibilidade com uma variedade de materiais, como PLA, PETG e ABS, amplia as opções de impressão. Ademais, a Ender 3 V2 suporta modificações e upgrades, permitindo aos entusiastas personalizarem ainda mais a máquina conforme suas necessidades específicas.

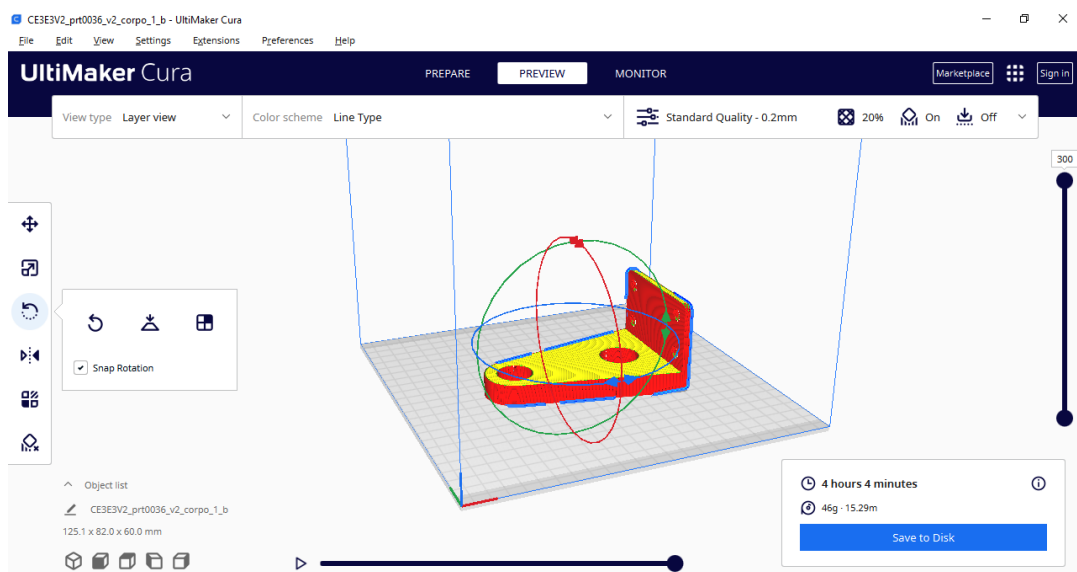
- **Software Ultimaker CURA**

Para viabilizar a produção de peças por meio de uma impressora 3D, é essencial converter o arquivo 3D para a linguagem de programação da impressora, e é aqui que entra o *software* de fatiamento. O termo "fatiamento" refere-se à divisão do modelo 3D em camadas finas, conhecidas como fatias, que a impressora 3D posteriormente construirá. Optou-se pelo Ultimaker Cura para desempenhar essa

função crucial, e essa escolha é respaldada por diversas vantagens que o destacam como uma ferramenta excepcional no cenário da impressão 3D.

- **Interface Simplificada e Amigável:** O Ultimaker Cura oferece uma interface intuitiva e de fácil utilização, tornando o processo de preparação dos modelos 3D acessível mesmo para usuários iniciantes. Essa abordagem simplificada contribui significativamente para a eficiência no fluxo de trabalho.
- **Configuração Avançada de Parâmetros:** Além da simplicidade, o *software* permite uma configuração avançada de diversos parâmetros essenciais para a impressão. Isso inclui ajustes detalhados em velocidade, resolução, suportes e outros fatores que influenciam diretamente na qualidade do produto final.
- **Conhecimento Prévio e Utilização Gratuita:** A escolha do Ultimaker Cura é facilitada pelo conhecimento prévio do *software*, proporcionando aos usuários uma transição suave e eficiente. Além disso, a versão gratuita disponível para uso geral representa uma oportunidade valiosa para explorar as capacidades do *software* sem custos significativos.
- **Atualizações Contínuas e Comunidade Ativa:** O Cura é constantemente atualizado pela Ultimaker, incorporando melhorias e novos recursos. Além disso, uma comunidade ativa de usuários compartilha experiências, dicas e soluções, enriquecendo a experiência de quem utiliza o *software*. Na Figura 11 é possível visualizar a interface do Ultimaker Cura.

Figura 11 – Interface do Software Ultimaker Cura



Fonte: Próprio autor

Ao combinar uma interface amigável, personalização avançada, conhecimento prévio e acesso gratuito, o Ultimaker Cura se destaca como uma escolha ideal para a preparação eficiente de modelos 3D para impressão, contribuindo para o sucesso e qualidade dos projetos de impressão 3D.

Para assegurar a impressão bem-sucedida e a qualidade desejada da peça, é crucial configurar diversos parâmetros na impressora 3D. Os principais parâmetros de fatiamento incluem:

- **Temperatura de Impressão:** A temperatura de impressão é determinada pela quantidade de calor aplicada ao filamento enquanto passa pelo hot end antes de ser depositado na mesa da impressora. Além disso, é possível configurar a temperatura da própria mesa de impressão. Essas temperaturas são ajustáveis de acordo com o tipo de filamento utilizado, exercendo impacto nas propriedades da peça, como aderência à plataforma e resistência do material. A precisão desses ajustes térmicos é fundamental para alcançar resultados ideais na impressão 3D.
- **Velocidade de Impressão:** A velocidade de impressão determina a rapidez com que a cabeça de impressão se move durante o processo. Uma velocidade adequada é essencial para evitar imperfeições na superfície da peça e garantir uma distribuição uniforme do material.
- **Densidade do Preenchimento:** A densidade do preenchimento representa a quantidade de material utilizado para preencher o interior da peça. Isso afeta a resistência e peso da peça. Opções comuns incluem preenchimento sólido, padrões de grade ou estruturas alveolares, permitindo ajustes conforme a aplicação desejada.
- **Espessura das Paredes Laterais e Paredes Superiores:** A espessura das paredes laterais e superiores define a robustez e detalhes da peça. Ajustar esses parâmetros é crucial para garantir a integridade estrutural da peça, especialmente em regiões críticas, como bordas e superfícies externas. Além disso esse parâmetro impacta diretamente na quantidade de material utilizada e no tempo de impressão.
- **Suportes:** O parâmetro de suporte é uma estrutura temporária incorporada durante o processo de impressão 3D para sustentar áreas elevadas da peça que não podem ser construídas diretamente no ar. A

presença desse suporte é essencial para prevenir o colapso ou a deformação de áreas críticas da peça durante o processo de fabricação. A necessidade e a configuração desse suporte dependem do modelo 3D da peça e da orientação escolhida na mesa de impressão. Posteriormente à conclusão da impressão, essa estrutura temporária é removida.

Configurar esses parâmetros de maneira adequada e personalizada para o projeto específico é essencial para obter resultados ótimos na impressão 3D. Cada parâmetro desempenha um papel fundamental na qualidade e nas características finais da peça. A Tabela 1 apresenta as configurações utilizadas para imprimir objetos em PLA e em PETG.

Tabela 1 – Parâmetros de Impressão Utilizados

| Material | Temperatura do bico | Temperatura da mesa de impressão | Velocidade de impressão | Densidade do Preenchimento | Espessura das Paredes, Camadas Superiores e Inferiores |
|----------|---------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|
| PLA      | 200 °C              | 50 °C                            | 50 mm/s                 | 10% – 20%                  | 0.8 mm                                                 |
| PETG     | 240 °C              | 20 °C                            | 50 mm/s                 | 15%                        | 0.8 mm                                                 |

Fonte: Próprio autor com base em Ferreira, 2020

### 3.3 Dimensionamento do par de engrenagens

Para realizar o dimensionamento das engrenagens do motor (pinhão) e do tambor, inicialmente, é necessário estabelecer as características do pinhão. Nesse contexto, determinamos o valor do módulo para o sistema e o número de dentes ( $Z$ ). Utilizando esses parâmetros, o diâmetro primitivo do pinhão ( $D_{p_{pinhão}}$ ) é calculado multiplicando-se o módulo pelo número de dentes do pinhão que foi estipulado ( $Z_{pinhão}$ ).

$$D_{p_{pinhão}} = m \cdot Z_{pinhão} \quad (6)$$

Outro aspecto crucial é a definição da razão de transmissão ( $i$ ). Com esse valor e empregando o módulo ( $m$ ) do sistema, calcula-se o número de dentes necessário para a engrenagem:

$$i = \frac{Z_{engrenagem}}{Z_{pinhão}} \quad (7)$$

Com a quantidade de dentes da engrenagem e o módulo estabelecido, é possível calcular o diâmetro primitivo:

$$D_{p_{engrenagem}} = m \cdot Z_{engrenagem} \quad (8)$$

Esses cálculos são fundamentais para determinar as dimensões adequadas das engrenagens, garantindo um sistema de transmissão eficiente e preciso. Para concretizar o projeto e o modelamento das engrenagens, diversos parâmetros são imprescindíveis para garantir a precisão e eficiência do sistema. Além dos mencionados anteriormente, destacam-se os seguintes:

- **Diâmetro externo:** O diâmetro externo ( $D_e$ ) representa a medida total da engrenagem, incluindo os dentes.

$$D_e = m \cdot (Z + 2) \quad (9)$$

- **Ângulo de Pressão:** O ângulo de pressão ( $\theta$ ) é o ângulo entre a linha de ação e a linha que passa pelo ponto de contato. Normalmente esse valor é de  $20^\circ$ .

- **Diâmetro base:** O diâmetro base ( $D_b$ ) é a medida essencial para o projeto dos dentes, enquanto o ângulo de pressão influencia a inclinação desses dentes.

$$D_b = D_p \cdot \cos \theta \quad (10)$$

- **Diâmetro interno:** O diâmetro interno ( $D_i$ ) é a medida interna da engrenagem, relevante para o encaixe preciso dentro de um sistema.

$$D_i = m \cdot (Z - 2,334) \quad (11)$$

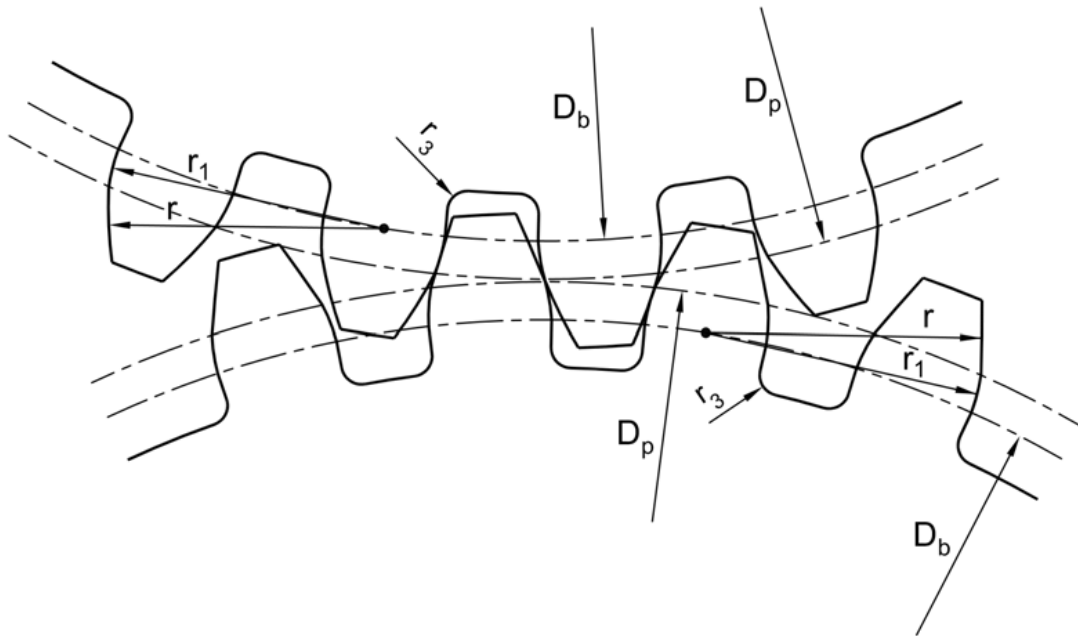
- **Ângulo do dente:** O ângulo do dente ( $\alpha$ ) determina a inclinação e formato dos dentes da engrenagem.

$$\alpha = \frac{90}{Z} \quad (12)$$

Esse conjunto de parâmetros é fundamental para garantir que as engrenagens se encaixem corretamente e desempenhem suas funções de maneira eficaz no sistema de transmissão. A Figura 12 apresenta a geometria do perfil de uma engrenagem de dentes retos.



Figura 12 – Traçado do Perfil Evolvente de Engrenagem de Dentes Retos



Fonte: Lopes (2014)

Além desses parâmetros, é essencial mencionar a importância do Odontógrafo de Grant no processo de modelagem. Conforme PROVENZA (2010), esse dispositivo é fundamental para traçar perfis evolventes de forma precisa. O Odontógrafo de Grant permite calcular os parâmetros ( $r$ ,  $r_1$  e  $r_3$ ) utilizando uma tabela padronizada para valor das constantes ( $f$  e  $f'$ ). Esses valores são determinantes para garantir a correta conformação dos dentes das engrenagens, assegurando um engajamento suave e eficiente.

$$r = f \cdot m \quad (13)$$

$$r_1 = f' \cdot m \quad (14)$$

$$r_3 = \frac{m}{6} \quad (15)$$

### 3.4 Componentes eletrônicos

No desenvolvimento do circuito elétrico para este projeto, foi empregado não apenas a plataforma de prototipagem Arduino Uno, mas também uma variedade de módulos compatíveis com o Arduino, dentre eles o driver para controle de motor de passo A4988, o módulo Max6675 acoplado a um termopar tipo K capaz de realizar a leitura de temperatura, além de diversos outros componentes que permitem realizar

o controle de temperatura e a interface com o usuário. Os componentes selecionados para este projeto incluem:

- **Display 16x2 com módulo I2C:** Um *display* LCD de 16x2 caracteres com um módulo I2C simplifica a comunicação com o Arduino, reduzindo a quantidade de pinos necessários para controlar o *display*. Ele é ideal para exibir informações de forma clara e legível.

- **Max6675:** O Max6675 é um sensor de temperatura que converte a temperatura de um termopar em um sinal elétrico que pode ser lido pelo Arduino. É comumente utilizado para medir altas temperaturas, como em aplicações de controle de temperatura em fornos ou churrasqueiras.

- **Motor de passo NEMA 17:** O motor de passo Nema 17 é um tipo de motor que move sua posição em incrementos discretos (passos). Ele é amplamente utilizado em projetos de automação, impressoras 3D, CNC, entre outros, devido ao seu controle preciso de posição e velocidade.

- **Driver A4988:** O *Driver* A4988 é um componente essencial para o controle de motores de passo, notadamente o Nema 17. Sua função primordial consiste em fornecer a corrente necessária para o motor, possibilitando um controle extremamente eficiente e preciso. Este dispositivo desempenha um papel crucial em sistemas que demandam movimentos precisos, garantindo uma operação suave e confiável do motor de passo.

- **Codificador Rotativo KY-040:** O codificador Rotativo (*Rotary encoder*) KY-040 é um dispositivo amplamente utilizado para detectar rotação em projetos Arduino. Este componente é composto por um potenciômetro rotativo acoplado a um botão de pressão, oferecendo funcionalidades versáteis. O potenciômetro rotativo converte movimentos rotativos em sinais elétricos, permitindo uma medição precisa da rotação. Além disso, o KY-040 é equipado com um botão de pressão integrado, tornando-o ideal para projetos que exigem não apenas a detecção, mas também a interação imediata por meio de pressionamentos de botão.

- **Botão de pressão:** Um botão de pressão é um interruptor momentâneo que fecha o circuito quando pressionado e o abre quando solto. Pode ser utilizado para entradas de usuário simples, como iniciar ou parar uma ação em um programa Arduino.

- **IRFZ44N:** O IRFz44n é um transistor *MOSFET* utilizado como interruptor eletrônico. Ele é comumente utilizado para controlar cargas de alta potência, como motores ou lâmpadas, através do Arduino.

- **Transistor s8050:** O transistor S8050 é um transistor NPN que pode ser utilizado para amplificação de sinais ou como chave eletrônica. Ele é utilizado em diversos circuitos eletrônicos, incluindo projetos com Arduino, para controlar corrente entre a carga e o GND.

Além dos componentes fundamentais mencionados, foram utilizados resistores de 10k Ohm, indispensáveis para ajustes e condicionamento de sinais. A interligação entre os elementos foi efetuada por meio de jumpers, proporcionando uma integração eficaz entre os dispositivos e a plataforma de prototipagem Arduino. Adicionalmente, utilizou-se uma placa de fenolite perfurada para a montagem precisa e organizada do circuito, garantindo eficiência no desenvolvimento do projeto.

Para suprir a demanda energética do sistema, optamos por uma fonte de bancada de 12 V, assegurando uma alimentação estável e adequada às especificações dos componentes utilizados.

### 3.5 Programação

Com o intuito de simplificar a elaboração do código e a programação do Arduino, recorreu-se a uma variedade de bibliotecas acessíveis na internet, as quais oferecem diversas funções que não apenas simplificam o código, mas também agilizam o desenvolvimento do projeto. As bibliotecas adotadas e sua respectiva utilização no projeto são descritas a seguir:

- **Wire.h:** A biblioteca *Wire.h* é essencial para a comunicação I2C, permitindo a interação eficiente entre dispositivos conectados ao barramento I2C. É frequentemente utilizada para conectar periféricos, como sensores e *displays*, ao Arduino.

- **LiquidCrystal\_I2C.h:** A biblioteca *LiquidCrystal\_I2C.h* é uma extensão da biblioteca *LiquidCrystal* que facilita a interface com *displays* LCD, especialmente aqueles que utilizam comunicação I2C. Simplifica a configuração e o controle desses *displays*.

- ***RotaryEncoder.h***: A biblioteca *RotaryEncoder.h* é empregada para simplificar a leitura de codificadores rotativos, como o KY-040 mencionado anteriormente. Facilita a interpretação dos pulsos gerados pelo codificador durante a rotação.

- ***AccelStepper.h***: A biblioteca *AccelStepper.h* é utilizada para controlar motores de passo de forma suave e eficiente, oferecendo recursos avançados como aceleração e desaceleração controladas. Essencial para projetos que envolvem movimentação precisa.

- ***PID\_v1.h***: A biblioteca *PID\_v1.h* implementa um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo), utilizado para controlar processos e sistemas automaticamente. É aplicável em projetos que demandam controle preciso e dinâmico.

- ***SPI.h***: A biblioteca *SPI.h* é fundamental para a comunicação com dispositivos periféricos utilizando o protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*). É frequentemente utilizada para interagir com sensores e outros dispositivos que seguem esse protocolo.

A incorporação dessas bibliotecas simplifica o desenvolvimento do código, pois fornece funções pré-desenvolvidas para diversas tarefas comuns, permitindo uma abordagem mais eficiente e modular na implementação do projeto Arduino.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

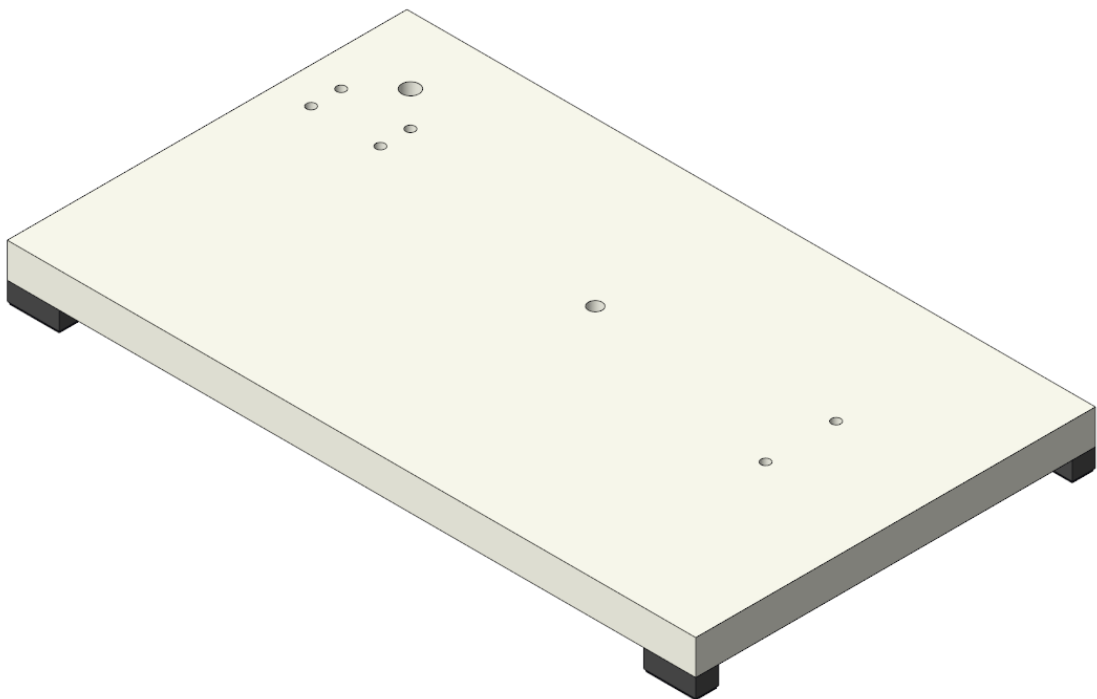
### 4.1 Módulo Base

O desenvolvimento do modelo começou com a criação do modelo 3D no software Creo. Optou-se por utilizar um recorte de madeira para o módulo base do dispositivo, devido à sua acessibilidade financeira e ampla disponibilidade. A escolha da madeira oferece vantagens, como a capacidade de customização, permitindo diversas furações e a fixação de elementos do projeto mesmo durante a fase de construção do dispositivo. Além disso, o compensado utilizado possui um acabamento de qualidade, apresentando uma superfície branca.

Na construção da base, quatro peças foram estrategicamente posicionadas nas extremidades para proporcionar suporte ao dispositivo. Essas peças foram fixadas com parafusos de madeira, e para prevenir deslizamentos e minimizar vibrações indesejadas, foram aplicados pedaços de placas emborrachadas.

Essa abordagem não apenas oferece estabilidade estrutural ao dispositivo, mas também considera a praticidade na montagem, permitindo ajustes e adições mesmo após o início da construção. O projeto 3D é apresentado na Figura 13 e Figura 14, com duas vistas diferente.

Figura 13 – Vista em Perspectiva do Projeto da Base



Fonte: Próprio autor

Figura 14 – Vista Frontal da Base



Fonte: Próprio autor

Em seguida, é possível elaborar uma lista completa dos materiais e peças empregados na construção deste módulo. A Tabela 2 exibe a lista técnica específica para o referido módulo.

Tabela 2 – Lista Técnicas de Materiais e Peças Módulo Base

| <b>Código da Peça</b> | <b>Descrição</b>                        | <b>Módulo</b> | <b>Material predominante</b> | <b>Quantidade</b> |
|-----------------------|-----------------------------------------|---------------|------------------------------|-------------------|
| PRT0001               | Base de Montagem Dispositivo            | Base          | Madeira Compensado           | 01                |
| PRT0002               | Suporte da Base                         | Base          | PLA                          | 04                |
| PRT0049               | Acabamento Emborrachado Suporte da Base | Base          | EVA                          | 04                |
| PRT0053               | Parafuso Madeira 3 x 16,0 mm            | Base          | Aço                          | 04                |

Fonte: Próprio autor

#### 4.2 Módulo Fatiador

O módulo fatiador desempenha um papel crucial ao posicionar a garrafa PET em sua base e realizar um corte preciso para gerar uma única tira com altura determinada. Para alcançar esse propósito, empregou-se uma barra rosca 5/16" com comprimento adequado, garantindo que o componente abrangesse toda a extensão da garrafa, aproximadamente 400 mm. Esta barra é fixada em um furo, posicionada perpendicular à superfície da mesa e presa por meio de arruelas e parafusos. Essa configuração permite a rotação livre da garrafa enquanto a tira é tracionada, facilitando um corte contínuo em toda a sua superfície.

Para realizar o corte preciso, foram utilizados dois rolamentos 608zz, com diâmetro interno de 8 mm, apresentados na Figura 15. As superfícies destes componentes foram cuidadosamente desbastadas e posteriormente lixadas até a gramatura 800, resultando em bordas afiadas e superfícies bem-acabadas. Essa preparação das superfícies promove um contato eficiente durante o corte da garrafa, conforme ela passa entre esses dois elementos.

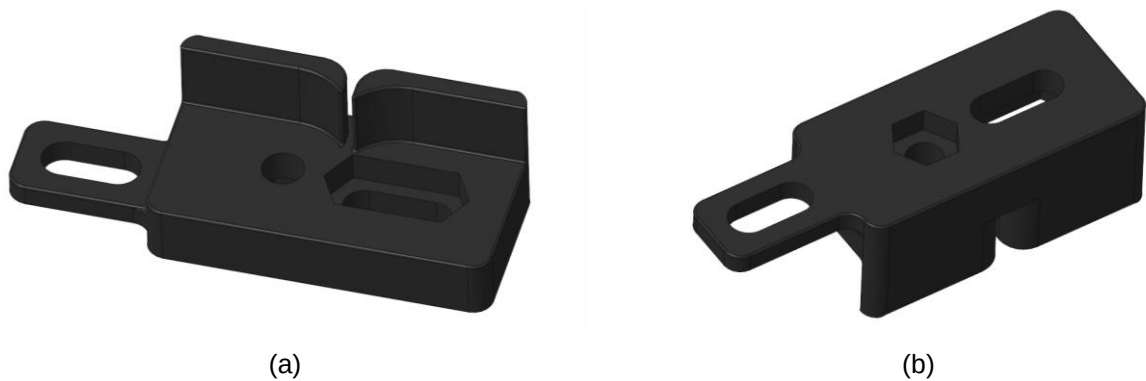
Figura 15 – Rolamento 608zz



Fonte: IRC Rolamentos (2024)

A última peça deste conjunto é responsável por posicionar os rolamentos na altura ideal. Além disso, é projetada para possibilitar ajustes tanto a altura dos rolamentos, visando a possibilidade obter uma tira mais alta, quanto no posicionamento da barra e do parafuso de fixação. Isso se revela crucial devido ao tamanho do conjunto, onde a barra é utilizada para fixar esta peça à base do dispositivo. Esses ajustes garantem a precisão e adaptabilidade do módulo durante o processo de corte da garrafa. A Figura 16 apresenta a visualização 3D da peça base de corte do módulo fatiador.

Figura 16 – Modelo 3D da Peça Base de Corte



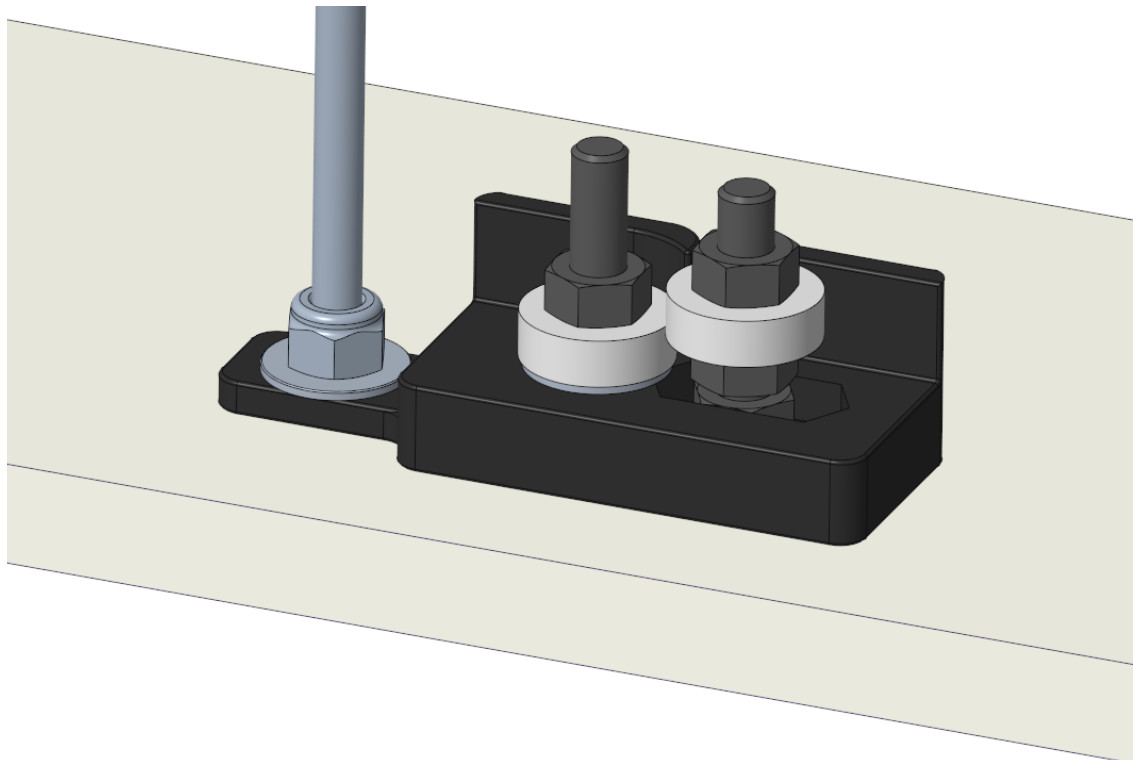
(a) – Vista em Perspectiva; (b) - Vista em Perspectiva Alternativa

Fonte: Próprio autor

Com essas considerações, a peça foi estrategicamente projetada com uma furação destinada ao uso de um parafuso M8x45 mm embutido nela. Esse parafuso tem a função de fixar o primeiro rolamento à peça, com a assistência de uma arruela atuando como espaçador e uma porca para fixar. Quanto ao segundo rolamento, sua fixação ocorre através de um parafuso M8x60 mm, cuja cabeça fica posicionada sob a base do dispositivo, e uma porca embutida na peça garante a fixação desta base à mesa. Acima dessa porca, encontra-se outra responsável por ajustar a altura do segundo rolamento, enquanto, por fim, a terceira porca desse parafuso é utilizada para firmar o rolamento no lugar.

Essa configuração detalhada possibilita um ajuste preciso na posição dos rolamentos, visando alcançar um contato ideal entre eles. Isso resulta em um corte eficaz, eliminando a necessidade de aplicar uma força de tração significativa. O design cuidadoso desse módulo fatiador visa, portanto, proporcionar um ajuste de qualidade que contribui para a eficiência do processo de corte. O Projeto 3D desse módulo é apresentado na Figura 17 e 18.

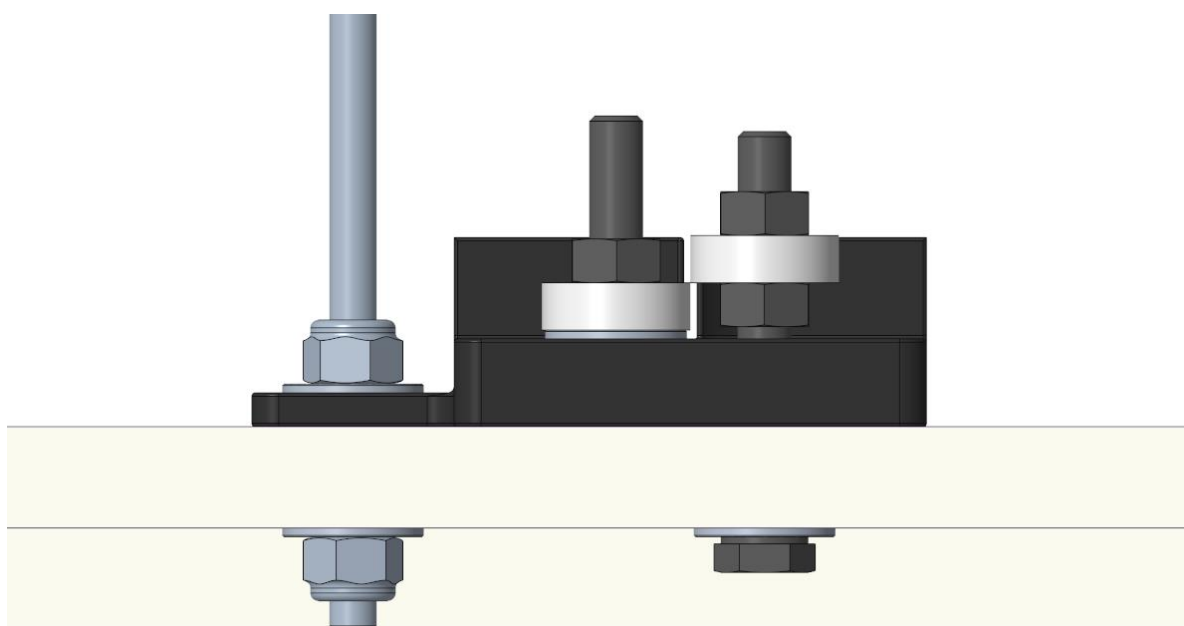
Figura 17 – Vista em Perspectiva do Módulo Fatiador



Fonte: Próprio autor



Figura 18 – Vista em Frontal do Módulo Fatiador



Fonte: Próprio autor

Com o modelo 3D do projeto elaborado, torna-se viável a criação da lista técnica, seguindo a mesma abordagem utilizada para o módulo anterior. A Tabela 3 apresenta de forma detalhada essa lista.

Tabela 3 – Lista Técnica de Materiais e Peças Módulo Fatiador

| Código da Peça | Descrição                        | Módulo   | Material predominante | Quantidade |
|----------------|----------------------------------|----------|-----------------------|------------|
| PRT0006        | Barra roscada 5/16" x 400 mm     | Fatiador | Aço                   | 01         |
| PRT0030        | Base de corte                    | Fatiador | PLA                   | 01         |
| PRT0032        | Rolamento 608zz - Lixados        | Fatiador | Aço                   | 02         |
| PRT0050        | Parafuso Sextavado M8 x 60 mm    | Fatiador | Aço                   | 01         |
| PRT0051        | Parafuso Sextavado M8 x 40 mm    | Fatiador | Aço                   | 01         |
| PRT0040        | Arruela Ø8,5 x Ø21,0 x1,2 mm     | Fatiador | Aço                   | 04         |
| PRT0048        | Porca Sextavada M8 Rosca MA 1,25 | Fatiador | Aço                   | 04         |
| PRT0052        | Porca Auto Travante UNC 5/16"    | Fatiador | Aço                   | 03         |
| PRT0020        | Guia de Tira de Garrafa PET      | Fatiador | PLA                   | 02         |
| PRT0053        | Parafuso Madeira 3 x 16,0 mm     | Fatiador | Aço                   | 04         |

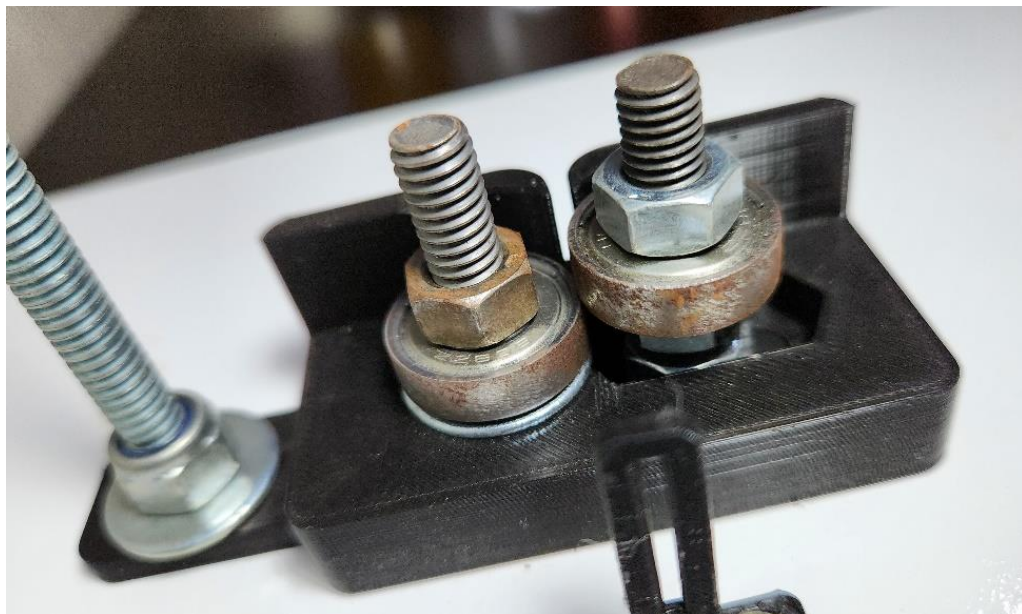
Fonte: Próprio autor

A construção desse módulo teve início com o corte preciso da barra roscada, utilizando uma esmerilhadeira, no comprimento adequado. A base de corte, dada a sua geometria complexa e a ausência de forças significativas aplicadas a esta peça, foi confeccionada através da técnica de impressão 3D.

Quanto à montagem do módulo, o processo é iniciado montando o parafuso que fixa o primeiro rolamento, utilizando uma arruela para garantir o espaçamento adequado e apertando-o com a porca. Em seguida, esse conjunto é meticulosamente alinhado com os furos presentes na base de madeira. A barra roscada, juntamente com as arruelas, é posicionada sem realizar o aperto nesse estágio. Posteriormente, o parafuso M8x60, acompanhado de uma arruela, é posicionado abaixo da base de madeira, e a arruela é inserida no rebaixo até fixar sem apertar. Em seguida, adiciona-se a segunda porca, o rolamento e, por fim, a última porca.

Em seguida, é necessário realizar o ajuste de posicionamento dos rolamentos, movimentando a peça até que estes fiquem tangentes. Adicionalmente, ajusta-se a altura através das arruelas para garantir que as superfícies usinadas dos rolamentos estejam em contato. Finalizando o processo, realiza-se o aperto definitivo do parafuso e da barra roscada. Este método de montagem, cuidadoso e sequencial, assegura uma integração precisa das peças, resultando em um módulo funcional e bem ajustado.

Figura 19 – Vista Frontal Módulo Fatiador Construído



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Módulo Fatiador Construído



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3 Módulo Aquecedor

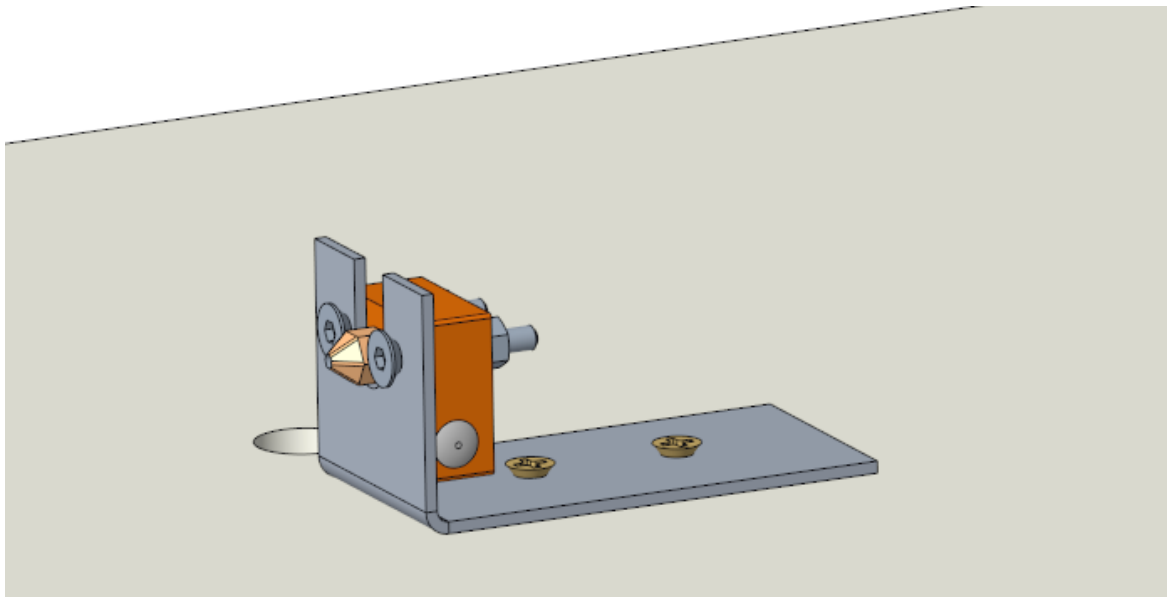
O segundo módulo desempenha a função crucial de aquecer a fita de garrafa PET a uma temperatura específica, induzindo uma fusão parcial do material e conformando-o em uma seção circular com um diâmetro aproximado de 1,75 mm.

O princípio de funcionamento deste módulo é fundamentado em um *hot end* de impressora 3D, caracterizado por um bloco de alumínio que abriga uma resistência elétrica, responsável pelo aquecimento global do conjunto. Além da resistência, esse componente possui uma perfuração destinada a acomodar um sensor de temperatura para coleta de dados para fins de controle. Para este propósito, foi integrado um termistor do Tipo K. O bloco de alumínio apresenta, também, uma abertura que permite a passagem do filamento em seu interior, seguido por uma rosca onde se acopla um bico de latão, este último responsável pela conformação final do filamento.

Para fixar esse conjunto à base do dispositivo, foi concebido um suporte utilizando uma chapa de metal dobrada em um ângulo de 90°, equipado com

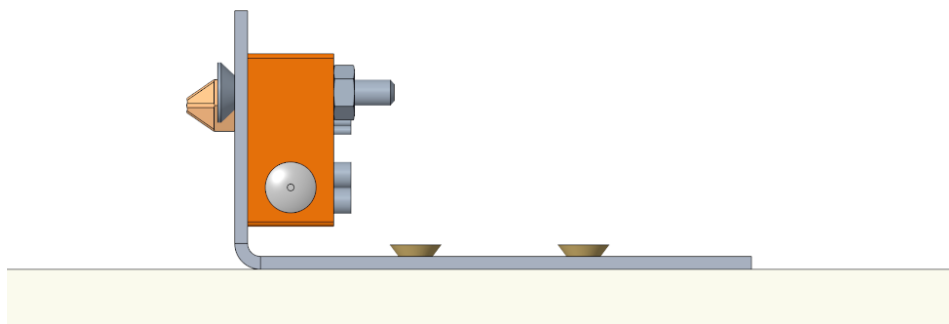
furações para acomodar o bico do *hot end*. Dois parafusos M3x20mm, junto com porcas, foram empregados para garantir a fixação na estrutura. Além disso, dois parafusos de madeira foram utilizados para ancorar firmemente esse suporte à base do dispositivo. Essa configuração proporciona estabilidade e segurança ao conjunto, assegurando seu desempenho durante a operação. As Figuras 20 e 21 apresentam vistas do projeto do módulo aquecedor.

Figura 21 – Vista em Perspectiva Módulo Aquecedor



Fonte: Próprio autor

Figura 22 – Vista em Lateral Módulo Aquecedor



Fonte: Próprio autor

A lista técnica completa desse módulo é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Lista Técnica de Materiais e Peças Módulo Aquecedor

| <b>Código da Peça</b> | <b>Descrição</b>                       | <b>Módulo</b> | <b>Material predominante</b> | <b>Quantidade</b> |
|-----------------------|----------------------------------------|---------------|------------------------------|-------------------|
| PRT0033               | Suporte Módulo aquecedor               | Aquecedor     | Aço                          | 01                |
| ASM0004               | Conjunto Hot End                       | Aquecedor     | Alumínio                     | 01                |
| PRT0054               | Porca Sextavada M3 Rosca MA 0,5        | Aquecedor     | Aço                          | 02                |
| PRT0055               | Parafuso Allen Cabeça Chata M3 x 20 mm | Aquecedor     | Aço                          | 02                |
| PRT0053               | Parafuso Madeira 3 x 16,0 mm           | Aquecedor     | Aço                          | 02                |

Fonte: Próprio autor

Para adaptar o diâmetro do furo do bico ao projeto, inicialmente, foi realizada uma ampliação utilizando uma broca de 1,5 mm. Posteriormente, empregou-se uma lixa para aprimorar o acabamento e atingir o diâmetro desejado. O suporte, por sua vez, foi confeccionado com o auxílio de uma esmerilhadeira equipada com disco de corte. Em seguida, foram efetuadas as perfurações necessárias para o projeto utilizando um conjunto de brocas.

Para facilitar a entrada da tira de garrafa PET, foram criados diversos furos parciais com diâmetros variados, culminando em um furo cônico que atingiu o diâmetro final desejado. Adicionalmente, foram incorporados dois direcionadores de tiras logo após o módulo fatiador. Essa estratégia visa assegurar um corte preciso, ocorrendo antes do módulo aquecedor. Isso garante que a fita de PET que entra no *hot end* permaneça na posição correta, sem dobrar antes desse módulo.

No que diz respeito ao acabamento dos fios do sensor e da resistência elétrica, a base do dispositivo foi projetada com um furo que permite a passagem desses elementos até alcançarem o circuito elétrico. Essa abordagem contribui para uma organização eficiente e uma conexão elétrica adequada no sistema. A construção desse módulo pode ser visualizada nas Figura 23 e 24

Figura 23 – Módulo Aquecedor Construído



Fonte: Próprio autor

Figura 24 – Vista Frontal Módulo Aquecedor Construído



Fonte: Próprio autor

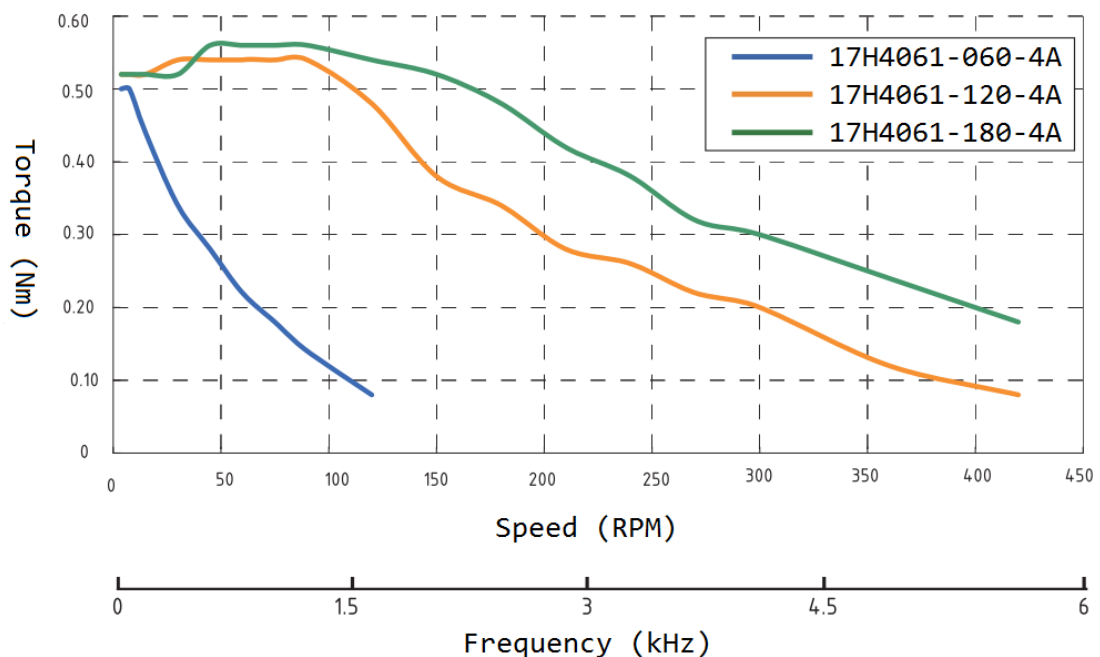
#### 4.4 Módulo Tracionador

Este módulo desempenha a função de tracionar o filamento ao longo de todo o dispositivo. Para isso, utiliza um motor de passo que, por meio de um par de

engrenagens, transmite movimento ao tambor rotativo. Esse carretel fixa uma ponta do filamento e, ao girar, traciona o filamento, enrolando-o.

Ao projetar esse sistema, o dimensionamento do par de engrenagens é o primeiro passo. Inicialmente, é crucial conhecer as características do motor de passo utilizado, que possui uma rotação máxima de 500 rpm. Dadas as condições do processo do dispositivo, é viável trabalhar com baixa velocidade de recolhimento, visando obter o máximo de torque para tracionar o filamento por todo o dispositivo. Em motores semelhantes, a curva de torque atinge seu máximo em rotações próximas a 50 rpm, conforme é apresentado na Figura 25. Portanto, considerando que a rotação pode ser ajustada posteriormente, esse valor foi escolhido como ponto de partida.

Figura 25 – Gráfico de Torque Motor de Passo 17H4061



Fonte: Dings Motion (2020)

Definida a rotação para obter o máximo torque no motor, o próximo passo foi projetar o tambor onde o filamento será enrolado. Este carretel tem um diâmetro de 40 mm e é concebido em conjunto com a engrenagem responsável pela redução da rotação, tornando-se diretamente responsável pela velocidade de recolhimento do filamento.

Considerando que o recolhimento deve ocorrer lentamente, a uma taxa próxima de 10 mm/s, e que a redução não pode ser excessiva para evitar

componentes muito grandes, foi escolhida uma redução que gere um recolhimento de cerca de 16 mm/s. Com base nisso, é possível calcular a rotação necessária para o conjunto eixo/tambor. É relevante destacar que essa rotação pode ser facilmente ajustada posteriormente.

$$v = \pi \cdot D_{tambor} \cdot \omega_{tambor} \rightarrow \omega = \frac{16}{\pi \cdot 40}$$

$$\omega = 0,13 \frac{\text{rotações}}{\text{segundo}} \rightarrow \omega = 7,64 \text{ rpm}$$

Com a rotação do motor definida e com a rotação do eixo projetada, calcula-se facilmente a razão de transmissão necessária para o sistema:

$$i = \frac{\omega_{motor}}{\omega_{eixo}} = \frac{50}{7,64} \rightarrow i = 6,5$$

Com a razão de transmissão calculada, visto que se trata de um valor elevado, definiu-se o módulo ( $m$ ) com valor pequeno e o menor número de dentes para o pinhão ( $z_{pinhão}$ ) possível.

$$m = 2,5 \text{ mm}$$

$$z_{pinhão} = 8 \text{ dentes}$$

Com o módulo e o número de dentes é possível calcular o, o diâmetro primitivo do pinhão ( $D_{p_{pinhão}}$ ) utilizando a Equação (6)

$$D_{p_{pinhão}} = m \cdot Z_{pinhão} = 2,5 \cdot 8 = 20 \text{ mm}$$

Com a razão de transmissão ( $i$ ) calculada e o número de dentes do pinhão ( $z_{pinhão}$ ) definido, a Equação (7) permite calcular o número de dentes necessário para a engrenagem:

$$i = \frac{Z_{engrenagem}}{Z_{pinhão}} \rightarrow Z_{engrenagem} = 6,5 \cdot 8 = 52 \text{ dentes}$$

Com a quantidade de dentes da engrenagem, o módulo estabelecido e a Equação (8), é possível calcular o diâmetro primitivo:



$$D_{p_{engrenagem}} = m \cdot Z_{engrenagem} \rightarrow D_{p_{engrenagem}} = 130 \text{ mm}$$

Na sequência, foram calculados os valores para o modelamento da engrenagem, utilizando as equações de (9) a (15), tanto para o pinhão quanto para a engrenagem. Os resultados desses cálculos estão apresentados de forma detalhada na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros para Modelagem do Pinhão e Engrenagem

| Parâmetro                      | Pinhão   | Engrenagem |
|--------------------------------|----------|------------|
| Diâmetro Externo ( $D_e$ )     | 25 mm    | 135 mm     |
| Ângulo de Pressão ( $\theta$ ) | 20°      | 20°        |
| Diâmetro Base ( $D_b$ )        | 18,8 mm  | 122,2 mm   |
| Diâmetro Interno ( $D_i$ )     | 14,16 mm | 124,16 mm  |
| Ângulo do Dente ( $\alpha$ )   | 11,25°   | 1,73°      |
| $r$                            | 5,25 mm  | 12,65 mm   |
| $r_1$                          | 1,12 mm  | 12,65 mm   |
| $r_3$                          | 0,42 mm  | 0,42 mm    |

Fonte: Próprio autor

Com base nos valores calculados anteriormente, realizou-se o modelamento das engrenagens para o sistema de transmissão. Adicionalmente, projetou-se uma peça que sustenta o conjunto eixo/tambor. Esse componente incorpora dois rolamentos 608zz para aumentar a espessura e proporcionar uma área de contato mais ampla com o eixo. A base dessa peça apresenta uma superfície na qual o motor de passo é posicionado e fixado por meio de outra peça colocada acima do motor.

O eixo, responsável pelo movimento do tambor, foi confeccionado utilizando uma barra roscada de 5/16". Ele foi unido à segunda parte do eixo por meio de cola epóxi, e esta última possui quatro ressalto que se conectam ao tambor, prevenindo deslizamentos entre eles.

O tambor, encarregado do enrolamento do filamento, foi modelado junto com a engrenagem para simplificar o conjunto. Utilizando dois parafusos Allen M3x8 mm, o carretel se une à flange do lado oposto à engrenagem, impedindo que o filamento escape do tambor durante o enrolamento.

Para efetuar essa fixação, foram empregados dois inserts roscados de bronze M3, exemplificado na Figura 26, uma vez que não é viável usar parafusos diretamente em objetos de impressão 3D. Essa prática é uma alternativa comum para a aplicação de parafusos. Para incorporar esses elementos nas peças, foi projetado um furo ligeiramente menor que o diâmetro externo do componente. Após a impressão, um ferro de solda foi utilizado para aquecer o inserto e posicionar adequadamente na peça.

Figura 26 – Inserto Roscado de Bronze M3



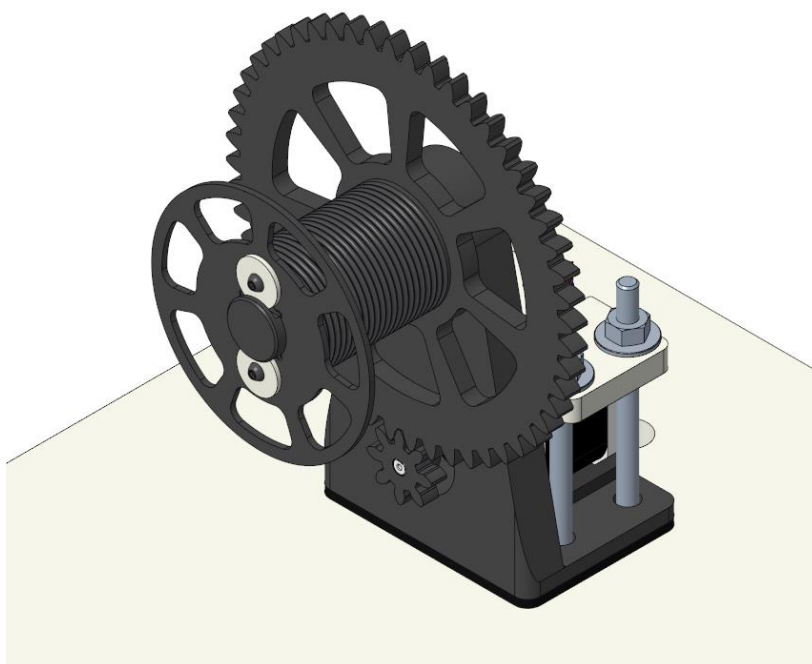
Fonte: Acelera3D (2020)

O tambor é posicionado concentricamente ao eixo, e para prevenir movimentos axiais do carretel, foram utilizadas duas arruelas nos parafusos. Essas arruelas encaixam nos rebaixos do eixo com ajuste por interferência, eliminando folgas.

O pinhão é diretamente acoplado ao eixo do motor, uma vez que este possui um rebaixo que permite esse tipo de montagem.

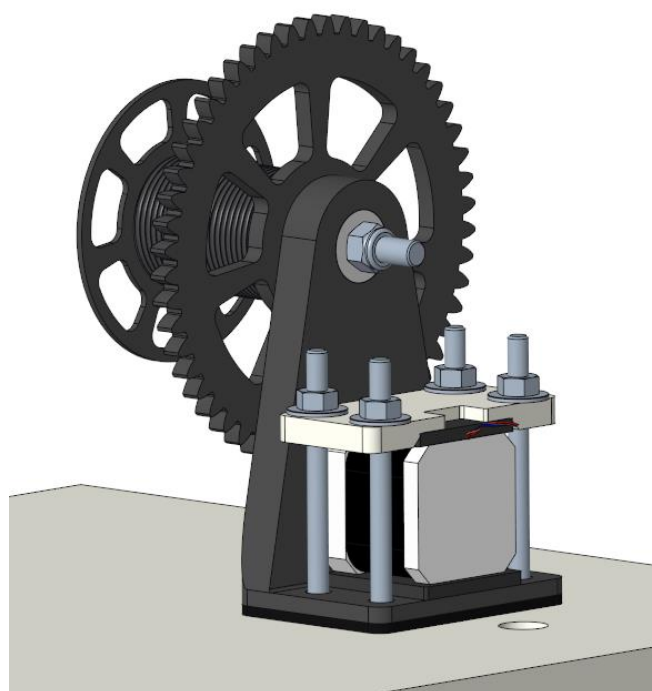
Para reduzir a transmissão excessiva de vibração, foi adicionado um material emborrachado acima e abaixo do motor de passo, assim como na base que suporta todo o conjunto. Além disso, foi incluído um guia após o módulo de aquecimento para garantir que, à medida que o filamento é produzido, ele não seja tracionado em direção ao tambor, mas sim puxado linearmente. Esse ajuste tem como objetivo melhorar a qualidade do filamento. O projeto 3D desse módulo é apresentado em duas vistas em perspectivas na Figura 27 e 28.

Figura 27 – Vista em Perspectiva Módulo Tracionador



Fonte: Próprio autor

Figura 28 – Vista em Perspectiva Alternativa do Módulo Tracionador



Fonte: Próprio autor

Com o modelo e o projeto finalizados, torna-se possível compilar a lista técnica de peças e materiais utilizados na construção dos módulos. A Tabela 6 a seguir apresenta detalhadamente esses componentes.

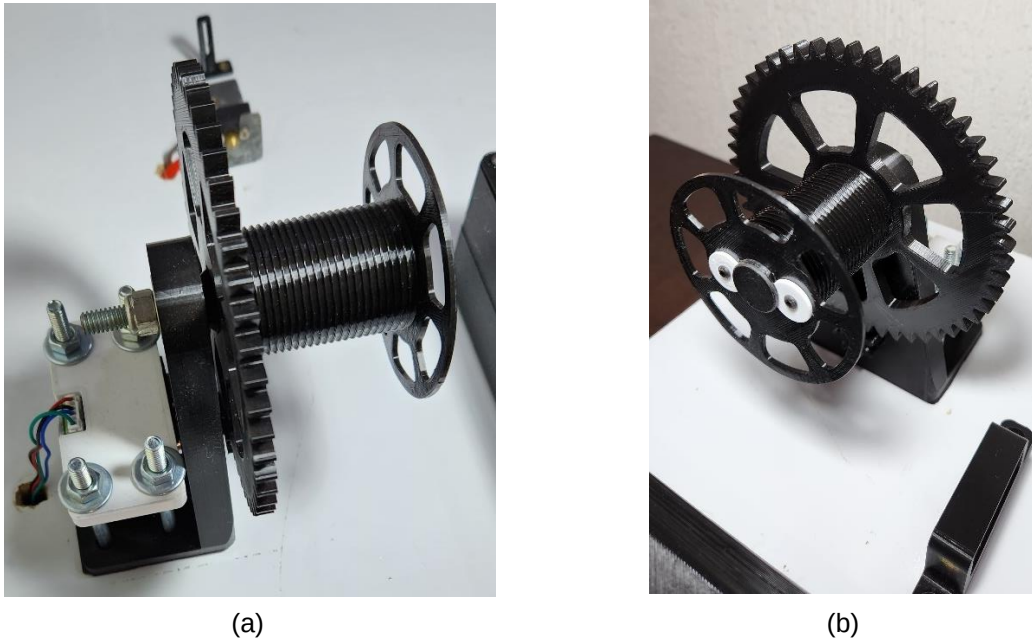
Tabela 6 – Lista Técnica de Materiais e Peças Módulo Tracionador

| <b>Código da Peça</b> | <b>Descrição</b>                         | <b>Módulo</b> | <b>Material predominante</b> | <b>Quantidade</b> |
|-----------------------|------------------------------------------|---------------|------------------------------|-------------------|
| PRT0021               | Guia de filamento                        | Tracionador   | PLA                          | 01                |
| PRT0025               | Pinhão                                   | Tracionador   | PLA                          | 01                |
| PRT0026               | Suporte Superior Motor de Passo          | Tracionador   | PETG                         | 01                |
| PRT0056               | Parafuso Allen Abaulado M3 Rosca MA 0,5  | Tracionador   | Aço                          | 02                |
| PRT0044               | Barra roscada 5/16" x 80 mm              | Tracionador   | Aço                          | 01                |
| PRT0032               | Rolamento 608zz                          | Tracionador   | Aço                          | 02                |
| PRT0033               | Motor de passo NEMA 17 12v               | Tracionador   | Componentes eletrônicos      | 01                |
| PRT0034               | Eixo com ressalto e rebaixo              | Tracionador   | PLA                          | 01                |
| PRT0036               | Suporte para motor e conjunto do tambor  | Tracionador   | PLA                          | 01                |
| PRT0037               | Tambor de Filamento / Engrenagem         | Tracionador   | PLA                          | 01                |
| PRT0038               | Flange para Tambor                       | Tracionador   | PLA                          | 01                |
| PRT0039               | Arruelas Ø5,0 x Ø16,0 x1,5 mm            | Tracionador   | PETG                         | 01                |
| PRT0045               | Antivibração Motor de Passo              | Tracionador   | EVA                          | 02                |
| PRT0052               | Porca Auto Travante UNC 5/16"            | Tracionador   | Aço                          | 01                |
| PRT0053               | Parafuso Madeira 3 x 16,0 mm             | Tracionador   | Aço                          | 02                |
| PRT0058               | Parafuso Francês com Porca UNC 1/4" X 4" | Tracionador   | Aço                          | 04                |
| PRT0059               | Arruelas Ø7,0 x Ø18,0 x1,2 mm            | Tracionador   | Aço                          | 08                |
| PRT0060               | Porca Sextavada Zincada 1/4"             | Tracionador   | Aço                          | 04                |
| PRT0061               | Antivibração Módulo Tracionador          | Tracionador   | EVA                          | 01                |

Fonte: Próprio autor

Para a fabricação deste módulo, a impressora 3D foi amplamente empregada, proporcionando uma construção simplificada e econômica. As peças localizadas na parte superior do motor e as arruelas que conectam o tambor ao eixo foram produzidas com o material PETG, escolhido devido à sua capacidade de deformação, enquanto as demais peças foram confeccionadas em PLA. O módulo construído e montado é mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Módulo Tracionador Construído



(a) – Vista Traseira do Módulo Tracionador; (b) – Vista frontal do Módulo Tracionador

Fonte: Próprio autor

#### 4.5 Módulo Eletrônico e Interface com Usuário

Para criar uma interface que permitisse um controle fácil e intuitivo de todo o dispositivo, foi concebida uma caixa que contém claramente os componentes de controle e as informações visuais necessárias. Além de servir como alojamento para proteger todos os componentes eletrônicos do dispositivo, o projeto visava proporcionar uma forma simples de atualizar o *software* e alimentar o circuito, sem a necessidade de remover componentes ou parafusos.

Para atender a esses requisitos, foi desenvolvida uma caixa com uma tampa angulada, facilitando a visualização e interação do usuário. A tampa foi projetada para fixar o display LCD 16x2 em conjunto com o módulo I2C. Além disso, ela conta com furações adequadas para a passagem do pino do codificador rotativo e espaço para a fixação dos botões de pressão. Essa abordagem não apenas oferece uma solução esteticamente agradável, mas também otimiza a praticidade de operação e manutenção do dispositivo. A Figura 30 apresenta a vista em perspectiva do módulo eletrônico montado.

Figura 30 – Módulo Eletrônico e Interface com Usuário

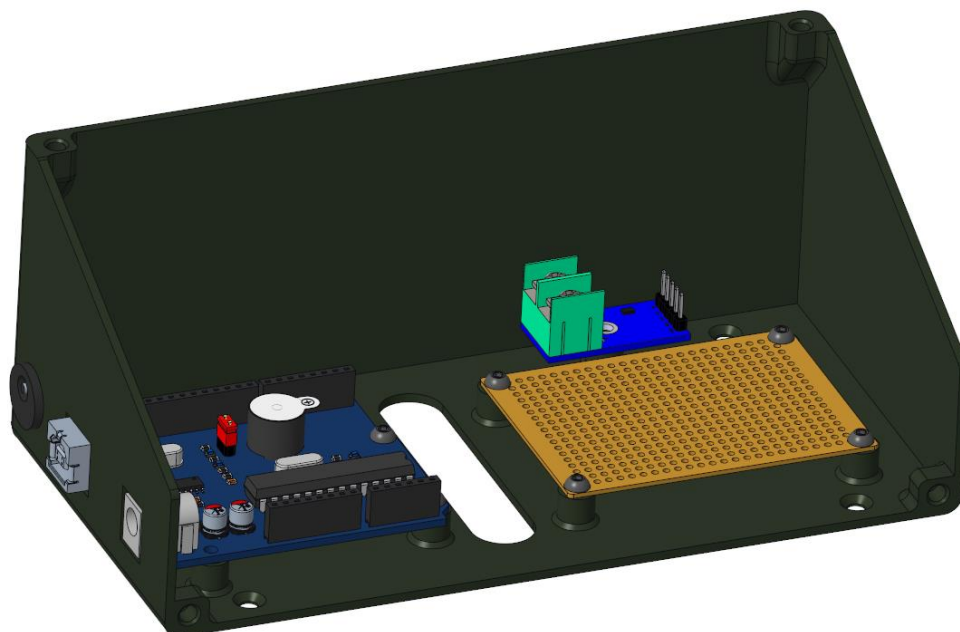


Fonte: Próprio autor

A base dessa caixa foi estrategicamente projetada com ressaltos, proporcionando pontos de fixação por meio de parafusos para o Arduino e a placa cobreada que contém o circuito. Além disso, nesses pontos de fixação, foi incluído o módulo de leitura de temperatura Max6675. Na lateral da caixa, foram incorporados três orifícios para possibilitar a alimentação e a conexão do Arduino, bem como a alimentação do circuito de 12 V através de um conector tipo *jack*. Na superfície da caixa e na base do dispositivo, foi incorporado um oblongo para facilitar a passagem de cabos em direção ao motor e ao módulo aquecedor, proporcionando um acabamento mais refinado ao dispositivo.

Esse design cuidadoso não apenas assegura a fixação estável dos componentes eletrônicos fundamentais, mas também simplifica a conexão elétrica e a manutenção do sistema. A presença dos orifícios estrategicamente posicionados facilita o acesso aos pontos de alimentação e conexão, contribuindo para a eficiência operacional do dispositivo. A representação tridimensional do interior da caixa pode ser observada na Figura 31.

Figura 31 – Módulo Eletrônico e Interface com Usuário Aberto



Fonte: Próprio autor

A montagem da caixa e da interface com o usuário requer a utilização de diversos componentes. As informações pertinentes a essas peças estão detalhadas na lista técnica apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Lista Técnica de Materiais e Peças Módulo Eletrônico

| Código da Peça | Descrição                                    | Módulo     | Material predominante   | Quantidade |
|----------------|----------------------------------------------|------------|-------------------------|------------|
| PRT0041        | Base da caixa                                | Eletrônico | PLA                     | 01         |
| PRT0042        | Tampa da caixa                               | Eletrônico | PLA                     | 01         |
| PRT0046        | Placas Prototipo de Fenolite 5x7cm perfurada | Eletrônico | Fenolite                | 01         |
| PRT0047        | Conector Dc Jack Fêmea Pino Painel           | Eletrônico | Componentes eletrônicos | 01         |
| PRT0056        | Parafuso Allen Abaulado M3 Rosca MA 0,5      | Eletrônico | Aço                     | 14         |
| PRT0057        | <i>Knob</i> para codificador rotativo        | Eletrônico | PLA                     | 01         |
| PRT0058        | Transistor NPN S8050                         | Eletrônico | Componentes eletrônicos | 01         |
| PRT0059        | Transistor <i>MOSFET</i> IRFZ44N             | Eletrônico | Componentes eletrônicos | 01         |
| ASM0005        | Módulo MAX6675                               | Eletrônico | Componentes eletrônicos | 01         |
| ASM0006        | Botão de Pressão                             | Eletrônico | Componentes eletrônicos | 02         |
| ASM0007        | Arduino UNO                                  | Eletrônico | Componentes eletrônicos | 01         |
| ASM0008        | Display Lcd 16x2 com Módulo I2C              | Eletrônico | Componentes eletrônicos | 01         |
| ASM0009        | Módulo Codificador Rotativo KY-040           | Eletrônico | Componentes eletrônicos | 01         |

Fonte: Próprio autor



A confecção da caixa foi realizada por meio de impressão 3D em PLA, garantindo uma qualidade satisfatória para o projeto. Essa escolha não apenas atendeu de maneira eficaz à complexidade da forma do projeto, mas também proporcionou uma solução rápida e econômica. Para a fixação da caixa à base do dispositivo, mais uma vez, optou-se pela utilização de parafusos de madeira. As fixações dos módulos e placas foram realizadas com o auxílio de insertos roscados.

Para a montagem deste módulo, é necessário iniciar parafusando a base da caixa com os parafusos para madeira. Posteriormente, fixa-se a placa cobreada e o Arduino UNO usando parafusos Allen M3x80 mm. Da mesma forma, o display LCD e o módulo I2C são fixados na tampa. O módulo KY-040, dotado de uma arruela e porca em seu conjunto, possibilita uma fixação simples. Após a fixação desses elementos, procede-se à conexão de todo o circuito elétrico, incluindo a fixação do conector de alimentação.

Por fim, posicionam-se os botões na tampa da caixa e, em seguida, realiza-se o fechamento utilizando mais quatro unidades dos parafusos Allen M3x8 mm nas extremidades da tampa. Esse processo de montagem assegura uma estrutura robusta e bem fixada, contribuindo para a integridade e o bom desempenho do dispositivo. O módulo Eletrônico e a interface com usuário é apresentado nas Figura 32 e 33.

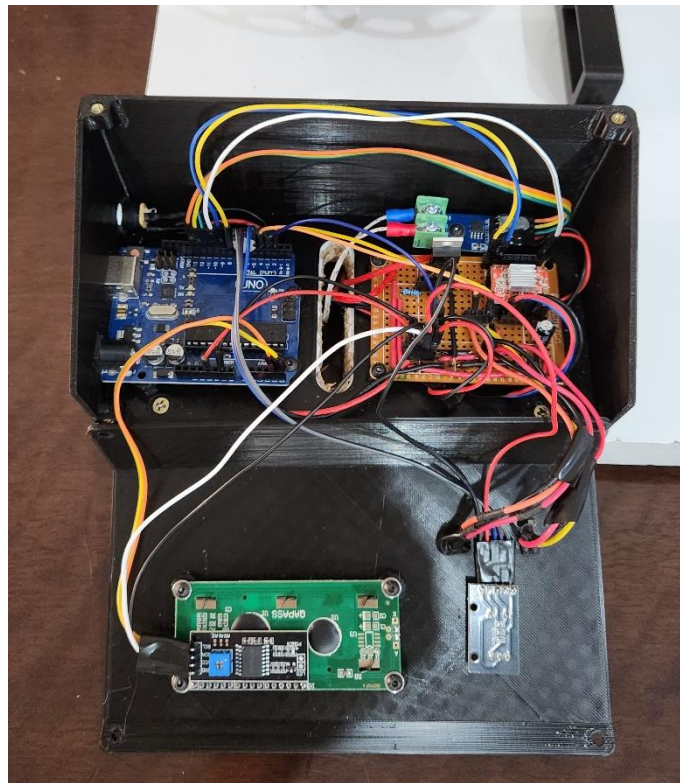
Figura 32 – Módulo Eletrônico e Interface com Usuário Construído



Fonte: Próprio autor



Figura 33 – Módulo Eletrônico e Interface com Usuário Fabricado



Fonte: Próprio autor

#### 4.6 Circuito Elétrico

Para garantir a funcionalidade do projeto, é essencial contar com um circuito que permita a conexão de maneira precisa. Cada um dos módulos, drivers e sensores possui seu próprio circuito, tendo o Arduino como o cerne central de todos.

A conexão do Display LCD e módulo I2C com o Arduino ocorre de maneira direta, utilizando apenas as portas Analógicas A4 e A5, além da alimentação de 5 V e o GND.

O módulo codificador rotativo KY-040 possui uma conexão simplificada, com 3 pinos (SW, DT, CLK) conectados nas saídas digitais D5, D6 e D7, respectivamente, além da alimentação de 5 V e GND, seguindo o padrão do módulo I2C.

Para o módulo MAX6675, a conexão é semelhante ao KY-040, com 3 pinos (SCK, CS, DO) conectados nas portas digitais D11, D12, D13, respectivamente. Ele também é alimentado com 5 V. No entanto, possui duas conexões adicionais para ligação do termistor tipo K.

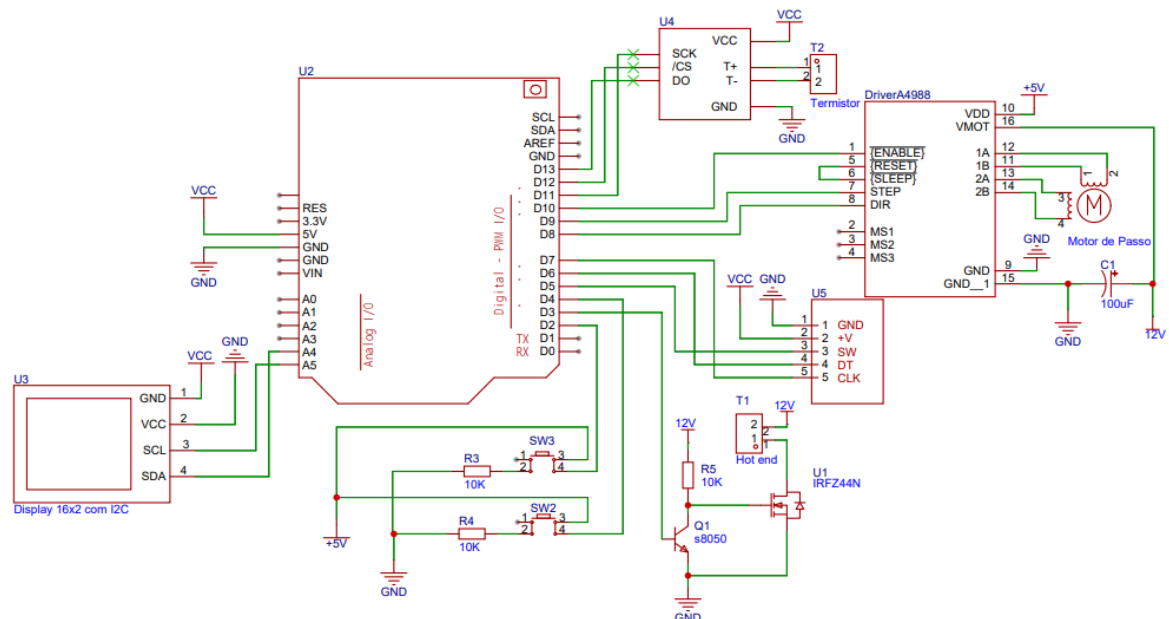
As portas 2 e 4 são utilizadas como entrada para os sinais dos botões de pressão, responsáveis por ligar e desligar o motor e o aquecimento. Esses botões

são conectados utilizando um resistor Pull-down, funcionando como naturalmente abertos e enviando um sinal lógico HIGH (1) quando pressionados.

O driver A4988 controla o motor de passo de 12 V, conectando as bobinas do motor, alimentação de 12 V e GND, utilizando um capacitor de 100  $\mu$ F. Também possui uma alimentação de 5 V para o circuito interno. As conexões SLEEP e RESET são conectadas entre si, e os pinos DIR, STEP e ENABLE são conectados nas portas digitais D8, D9 e D10 do Arduino.

Finalmente, o circuito responsável por aquecer o bloco utiliza um transistor MOSFET IRFZ44N e um transistor NPN, s8050. O transistor s8050 é conectado ao GND e a um resistor de 10 k $\Omega$ , ligado a 12 V. O MOSFET é diretamente conectado a um polo da resistência responsável pelo aquecimento, enquanto o outro polo do aquecedor é ligado ao 12 V. A terceira saída do transistor s8050 é conectada à saída PWM D3 do Arduino para controlar a temperatura. Todos os circuitos elétricos mencionados estão esquematizados na Figura 34.

Figura 34 – Esquemático do Circuito elétrico do Dispositivo



Fonte: Próprio autor

#### 4.7 Código

O desenvolvimento da programação para o dispositivo foi realizado na IDE do Arduino. Inicialmente, são incluídas as bibliotecas necessárias para simplificar todo o processo de programação. Em seguida, ocorre a declaração de funções, sendo três delas destinadas ao controle adequado do menu por meio do codificador rotativo.

Essencialmente, essas funções verificam se o botão está sendo pressionado ou movimentado e, em caso afirmativo, o display é atualizado. Outra função é utilizada para realizar a leitura do termistor por meio dos dados obtidos pelo módulo.

Posteriormente, são definidas as portas para cada um dos módulos, juntamente com a especificação de diversas variáveis utilizadas no código para controle de velocidade, avaliação de temperatura e as constantes do PID. Além disso, são empregadas funções específicas das bibliotecas, como "AccelStepper", "RotaryEncoder", "LiquidCrystal\_I2C" e outras.

Dentro do bloco "void setup()", que ocorre apenas uma vez no código, são definidas as portas como entradas ou saídas de dados, configurados parâmetros para o uso do motor e do PID, e exibida uma mensagem inicial no display.

No bloco "void loop()", é desenvolvida a programação para um menu com três interfaces. A primeira apresenta uma mensagem inicial "menu" no display, enquanto as outras duas telas são destinadas a exibir a velocidade de recolhimento do filamento e a terceira apresentar as temperaturas definida e real no *hot end*.

Figura 35 – Display Apresentado Informações da Velocidade



(a)

(b)

(a) – Motor desligado; (b) - Motor Ligado com recolhimento de 16,1mm/s

Fonte: Próprio autor

Figura 36 – Display Apresentado Informações da Temperatura



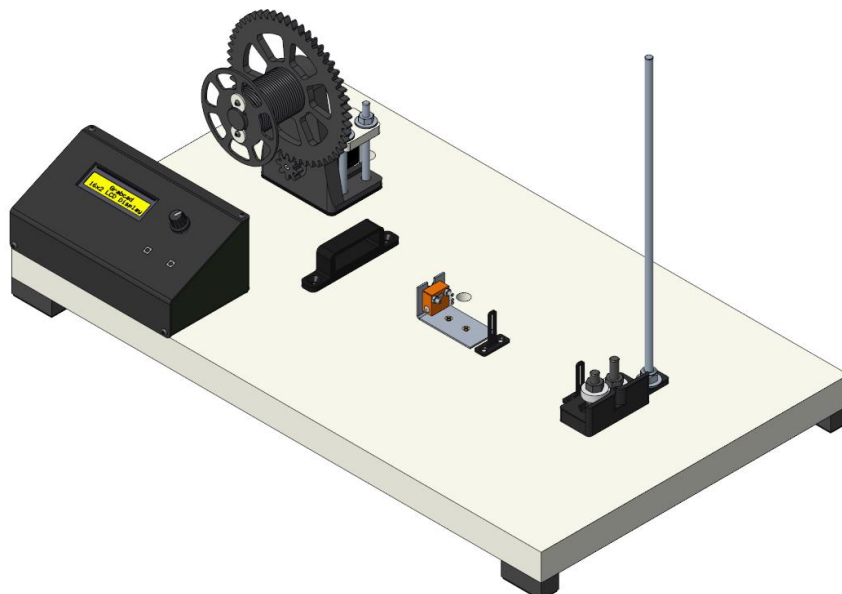
Fonte: Próprio autor

Em seguida, são utilizadas condicionais aninhadas com a função "if" para garantir que, ao pressionar o botão pela primeira vez, o motor ligue, e ao pressioná-lo novamente, o motor desligue. Um conceito semelhante é aplicado para criar a condição de ligar e desligar o aquecimento do *hot end*, bem como para realizar o controle por PID. O código completo pode ser encontrado no Apêndice A.

#### 4.8 Dispositivo Completo

Com a conclusão do design e modelagem de todos os módulos, foi criado um modelo 3D representando a montagem completa, incorporando todos os componentes do dispositivo. O resultado é apresentado nas Figura 37 e 38.

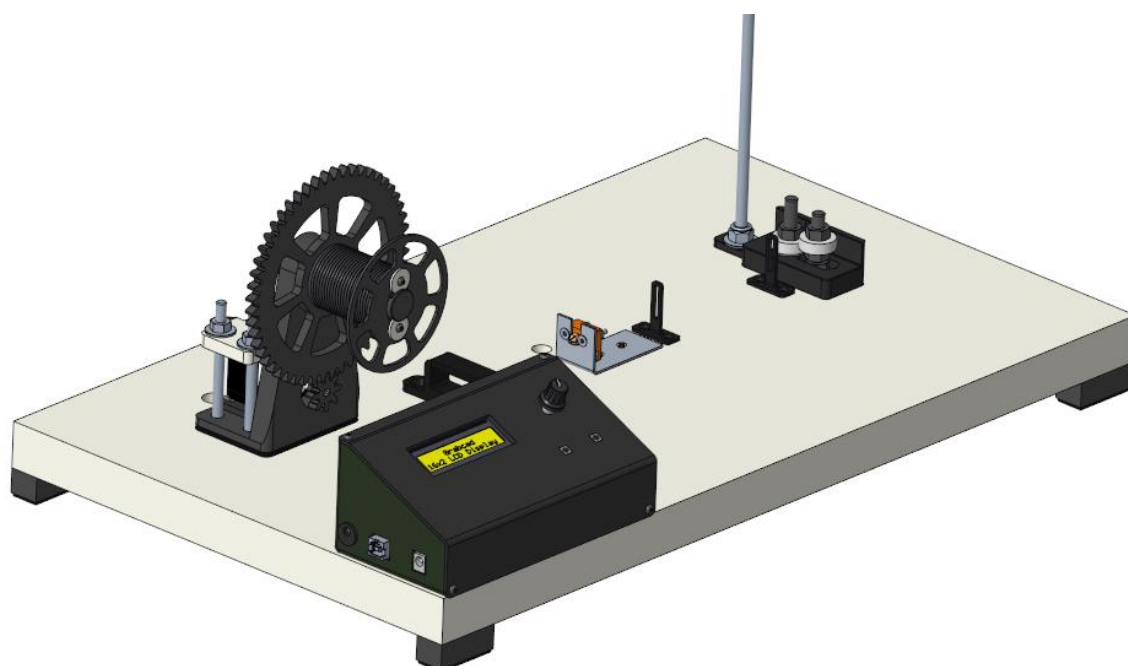
Figura 37 – Vista em Perspectiva do Projeto 3D



Fonte: Próprio autor



Figura 38 – Vista em Perspectiva Alternativa do Projeto 3D



Fonte: Próprio autor

Após a fabricação de todos os módulos, estes foram diretamente montados no módulo base, que desempenha o papel de unir todos os componentes e estruturar o dispositivo. A Figura 39 apresenta o dispositivo completamente fabricado e montado.

Figura 39 – Montagem do dispositivo



Fonte: Próprio autor

Para a produção de filamentos, é imprescindível realizar uma preparação adequada da garrafa PET. Inicialmente, é essencial realizar a limpeza da garrafa, removendo o rótulo e a cola associada, a fim de preservar as propriedades do material e não prejudicar a formação do filamento. Posteriormente, é necessário remover o fundo da garrafa para permitir o encaixe no módulo fatiador, recomendando-se também iniciar o corte em forma de filete para facilitar a passagem pelos rolamentos e assim dar continuidade mais facilmente. Por último, é necessário criar um chanfro na ponta do filete para que ultrapasse o módulo aquecedor, possibilitando assim que o filamento seja tracionado adequadamente de forma manual.

O circuito elétrico foi montado com o auxílio da placa de fenolite, e em seguida, o Arduino foi programado com o código desenvolvido. Isso permitiu a realização de testes utilizando os controles da interface do usuário, confirmando que o menu respondia corretamente aos comandos do codificador rotativo. Os testes de funcionamento do botão liga/desliga para o motor e o aquecimento também apresentaram resultados satisfatórios, conforme programado.

O motor e o sistema de transmissão operam adequadamente quando acionados, no entanto, evidenciaram uma vibração e um ruído excessivos. A origem desse problema pode estar na vibração proveniente do próprio motor quando este opera em baixas rotações, acumulada com as folgas presentes entre as engrenagens e o material plástico desses componentes, que acabam contribuindo para o ruído, porém não trouxeram prejuízos para o dispositivo.

Nos primeiros testes de temperatura, configurados para atingir 100 °C, o circuito e o controle PID responderam corretamente, variando a temperatura em poucos graus próximos ao definido. No entanto, ao configurar temperaturas mais elevadas, como 240 °C, a temperatura alcançava cerca de 200 °C e estagnava, não atingindo o valor desejado. Foi avaliada a saída do controle PID e o sinal PWM, os quais estavam em conformidade com o esperado. Entretanto, a temperatura limitava-se a esse valor.

A possível origem desse problema está no circuito elétrico, mais especificamente na utilização do transistor s8050, pois quando este era removido do circuito, a temperatura atingia valores elevados, próximos a 280 °C, significando que a potência necessária era entregue na ausência e que possivelmente esse transistor estava limitando o circuito. No entanto, nessa situação, a temperatura não se

estabilizava conforme configurado devido à ausência do sinal PWM no circuito. Foram realizados alguns testes em circuitos alternativos sem a presença do s8050, na qual o sinal PWM era conectado diretamente o MOSFET, porém o aquecimento do módulo não atingiu temperaturas próximas as configuradas.

#### 4.9 Filamentos obtidos

A dificuldade enfrentada no controle de temperatura limitou a produção contínua de filamentos a partir das garrafas PET, não sendo possível a produção de filamento com comprimento adequado. Entretanto, foram feitos diversos testes, nos quais foi possível fabricar alguns pedaços de filamento à medida que a temperatura variava na ausência do transistor, atingindo, por um determinado período, a faixa adequada para o processo de produção do filamento.

Inicialmente, tentou-se realizar a fabricação com uma temperatura abaixo da ideal, próxima a 200 °C. No entanto, além da necessidade de uma força de tração extremamente elevada para promover o deslocamento do filamento, a medida em que este era dobrado no interior do *hot end* resultava na não fusão das extremidades da tira. Isso ocasionava a presença de uma abertura no filamento, que não atingia a seção circular desejada, como mostrado na Figura 40.

Figura 40 – Filamento Produzido em Baixa Temperatura



Fonte: Próprio autor

Outro teste foi realizado com uma temperatura mais elevada, aproximadamente 250 °C. Nesse caso, observou-se a presença significativa de



bolhas em todo o filamento, juntamente com irregularidades em sua superfície. Além disso, o filamento exibia diversas deformações no pedaço fabricado, e algumas regiões apresentavam variação na pigmentação, resultando em uma coloração mais escura devido à queima do material, filamento esse apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Filamento Produzido em Alta Temperatura



Fonte: Próprio autor

Por fim, quando o *hot end* alcançava uma temperatura entre 240 °C e 245 °C, o filamento produzido demonstrou uma qualidade significativamente superior em comparação com os testes anteriores. O diâmetro do filamento permaneceu aproximadamente constante ao longo do comprimento, sem muitas irregularidades. Além disso, foi observado que o filete da garrafa conseguia se fundir de forma mais uniforme, sem deixar aberturas no filamento, conforme observa-se na Figura 42.

Figura 42 – Filamento Produzido em Temperatura Adequada



Fonte: Próprio autor



## 5 CONCLUSÃO

Com o contínuo avanço do mercado de impressoras 3D e o aumento expressivo na geração de resíduos plásticos, uma iniciativa que visa reutilizar garrafas PET, tradicionalmente destinadas ao descarte, por meio de um processo de reciclagem caseira torna-se uma opção viável na atualidade.

Nesse contexto, foi concebido um dispositivo de fácil construção e baixo custo, destinado à produção de filamentos a partir de garrafas PET. A base desse dispositivo desempenha o papel de fixar todos os componentes, enquanto o módulo fatiador, utilizando de dois rolamentos em contato com o material, realiza o processo de filetagem da garrafa PET.

O filamento resultante, ao passar pelo módulo aquecedor, é submetido à temperatura próximo a fusão, adquirindo uma forma circular com o diâmetro característico do filamento. Esse filamento é tracionado e enrolado por um tambor acionado por um motor de passo, por meio de um par de engrenagens.

Embora o dispositivo tenha apresentado resultados satisfatórios no que diz respeito ao módulo fatiador e à interface com o usuário, enfrentou desafios no controle de temperatura durante o processo de aquecimento. O circuito elétrico desenvolvido para o controle PID não permitiu atingir as temperaturas adequadas, comprometendo a produção de filamentos adequados para a impressão 3D.

Não obstante, foi possível realizar avaliações utilizando segmentos de filamentos produzidos com variações de temperatura. A comparação entre diferentes temperaturas e a qualidade dos filamentos destacou a faixa de temperatura ideal para a produção, situada aproximadamente entre 240 °C e 245 °C. Nessa faixa, o filamento demonstrou fusão mais uniforme, resultando em uma seção mais consistente e com menos irregularidades no processo.

Para trabalhos futuros, recomenda-se revisar e desenvolver um novo circuito responsável pelo aquecimento do hot end, visto que foi um ponto limitante neste projeto, impedindo a produção de filamentos longos e a impressão de peças com esse material. Sugere-se, ainda, uma nova fixação do motor de passo e da estrutura do módulo tracionador para minimizar o ruído e a vibração. Por fim, é viável conduzir testes adicionais na produção de filamentos visando obter uma qualidade aprimorada. Esses testes podem proporcionar melhorias para permitir a produção de filamentos mais extensos, viabilizando a criação de peças maiores.

## REFERÊNCIAS

3D LAB. **Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D.** [S. l.], 6 out. 2017. Disponível em: <https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>. Acesso em: 3 jan. 2024.

3D LAB. **Impressora 3D Ender 3 V2.** [S. l.], ca. 2022. Disponível em: <https://3dlab.com.br/produto/ender-3-v2/>. Acesso em: 16 abr. 2023.

ACELERA3D. **INSERTOS DE BRONZE M3 5MM.** [S. l.], 2020. Disponível em: <https://acelera3d.com/produto/insertos-de-bronze/>. Acesso em: 3 jan. 2024.

ALMEIDA, Igor Santos de *et al.* **RECICLAGEM DE GARRAFAS PET PARA FABRICAÇÃO DE TELHAS.** [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/897/569>. Acesso em: 3 jan. 2024.

BASTOS, Fernanda. **Poluição plástica: 350 milhões de toneladas viram resíduos a cada ano, diz Credit Suisse.** [S. l.], 6 jun. 2023. Disponível em: <https://exame.com/esg/impacto-da-poluicao-plastica-no-mundo-e-medido-em-estudo-do-credit-suisse/>. Acesso em: 3 jan. 2024.

BOJORGE, Ninoska. **Sintonia de malhas de controle.** Disponível em: [https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/10/Control\\_Aula16\\_Sintonia\\_2sem17-1.pdf](https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/10/Control_Aula16_Sintonia_2sem17-1.pdf). Acesso em: 3 jan. 2024.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica.** [S. l.: s. n.], 2011.

ELECTRONOBS. **Temperature PID controller - Arduino.** [S. l.], 8 abr. 2018. Disponível em: [http://electronoobs.com/eng\\_arduino\\_tut24.php#google\\_vignette](http://electronoobs.com/eng_arduino_tut24.php#google_vignette). Acesso em: 3 jan. 2024.

FACCIN, Flávio. **Abordagem inovadora no projeto de controladores PID.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/12544>. Acesso em: 3 jan. 2024.

FERREIRA, Fyllipe Felix. **Estudo e desenvolvimento de filamento de PET reciclado para impressoras 3D FDM.** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em:

[https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/12937/1/DISSERTAÇÃO\\_Estud\\_oDesenvolvimentoFilamento.pdf](https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/12937/1/DISSERTAÇÃO_Estud_oDesenvolvimentoFilamento.pdf). Acesso em: 3 jan. 2024.

FILAMENT2PRINT. **O hotend. Funcionamento e rendimento térmico.** [S. l.], 22 fev. 2023. Disponível em: [https://filament2print.com/pt/blog/142\\_hotend-operacao-termica-desempenho.html](https://filament2print.com/pt/blog/142_hotend-operacao-termica-desempenho.html). Acesso em: 3 jan. 2024.

GONZALES, Miguel Angel Calle. **Impressão 3D: Tecnologia revolucionária ou hobby bacana?** [S. l.], 28 out. 2021. Disponível em: <https://ufabcdivulgaciencia.proec.ufabc.edu.br/2021/10/28/impressao-3d-tecnologia-revolucionaria-ou-hobby-bacana-v-4-n-10-p-8-2021/>. Acesso em: 3 jan. 2024.

INSTITUTO FEDERAL SANTA CATARINA. **AULA 6 - Microcontroladores - Engenharia.** [S. l.], 14 set. 2023. Disponível em: [https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA\\_6\\_-\\_Microcontroladores\\_-\\_Engenharia](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_6_-_Microcontroladores_-_Engenharia). Acesso em: 3 jan. 2024.

IRC ROLAMENTOS. **608 ZZ Rolamento.** [S. l.], 2024. Disponível em: <https://ircrolamentos.com.br/produto/608-zz-rolamento/>. Acesso em: 3 jan. 2024.

KLEMENTS, Michael. **I Turned PET Bottles Into A 3D Printed Pi Case – PET Bottle Recycler Part 2.** [S. l.], 12 out. 2023. Disponível em: <https://www.the-diy-life.com/i-turned-pet-bottles-into-a-3d-printed-pi-case-pet-bottle-recycler-part-2/>. Acesso em: 3 jan. 2024.

KLEMENTS, Michael. **PET Bottle Recycler Part 1 – Using An Arduino Uno R4 To Control A 3D Printer's Hotend.** [S. l.], 19 jul. 2023. Disponível em: <https://www.the-diy-life.com/pet-bottle-recycler-part-1-using-an-arduino-uno-r4-to-control-a-3d-printers-hotend/>. Acesso em: 3 jan. 2024.

LOPES, Cláudio Parreira; OLIVEIRA, Wagner Custódio de; BRAGA, Durval Uchôas. **COMPARAÇÃO ENTRE PERFIS DE DENTES DE ENGRENAGENS TEÓRICO E REAL UTILIZANDO MÉTODOS DE TRAÇAGEM E USINAGEM.** XXI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica: [s. n.], 2014. Disponível em: <https://abcm.org.br/app/webroot/anais/creem/2014/Projeto%20de%20Máquinas/COMPARAÇÃO%20ENTRE%20PERFIS%20DE%20DENTES%20DE%20ENGRENAGENS%20TEÓRICO%20E%20REAL%20UTILIZANDO%20MÉTODOS%20DE%20TRAÇAGEM%20E%20USINAGEM.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2024.

MACEDO, Indira Maria Estolano *et al.* **Reciclagem do Polietileno Tereftalato (PET) no Fomento da Economia Circular.** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em:

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/14939/12338>.

Acesso em: 3 jan. 2024.

MARQUARDT, Tahnee; ZHENG, Emmi. **History of 3D Printing**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://blogs.lawrence.edu/makerspace/history/>. Acesso em: 3 jan. 2024.

MARTINAZZO, Claodomir Antonio et al. **ARDUINO: UMA TECNOLOGIA NO ENSINO DE FÍSICA**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: [https://eadcampus.spo.ifsp.edu.br/pluginfile.php/938271/mod\\_resource/content/1/143\\_430.pdf](https://eadcampus.spo.ifsp.edu.br/pluginfile.php/938271/mod_resource/content/1/143_430.pdf). Acesso em: 3 jan. 2024.

MCALÉER, Kevin. **PID CONTROLERS**. [S. l.], 13 mar. 2023. Disponível em: [https://www.kevsrobots.com/resources/how\\_it\\_works/pid-controllers.html](https://www.kevsrobots.com/resources/how_it_works/pid-controllers.html). Acesso em: 3 jan. 2024.

MICHAELI, Walter; GREIF, Helmut; KAUFMANN, Hans. **Tecnologia dos plásticos**. São Paulo - SP: Blucher, 2018. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=b1jwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=plasticos+são+compostos&ots=p09ShbUb\\_\\_&sig=9mRPRONl4vqfQyCTLkMIMMM6IP4&redir\\_esc=y#v=onepage&q=plasticos%20são%20compostos&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=b1jwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=plasticos+são+compostos&ots=p09ShbUb__&sig=9mRPRONl4vqfQyCTLkMIMMM6IP4&redir_esc=y#v=onepage&q=plasticos%20são%20compostos&f=false). Acesso em: 3 jan. 2024.

OLMOS, LILIANE GUARDIA. **ESTUDO E PROJETO DE UMA IMPRESSORA 3D DLP**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.mettzer.com/hub/projects/estudo-e-projeto-de-uma-impressora-3d-dlp-58924bbfe33da93895816feb>. Acesso em: 3 jan. 2024.

PEREZ, Anderson Luiz Fernandes et al. **Uso da Plataforma Arduino para o Ensino e o Aprendizado de Robótica**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: [https://online-engineering.org/icbl-archives/proceedings/2013/papers/Contribution77\\_a.pdf](https://online-engineering.org/icbl-archives/proceedings/2013/papers/Contribution77_a.pdf). Acesso em: 3 jan. 2024.

PROVENZA, Francesco. **Pro-tec – Desenhista de Máquinas**. São Paulo - SP: [s. n.], 2010.

REDAÇÃO WISHBOX. **COMO FUNCIONA UMA IMPRESSORA 3D? CONHEÇA TODOS OS TIPOS**. [S. l.], 25 nov. 2020. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/como-funciona-uma-impressora-3d-conheca-todos-os-tipos/>. Acesso em: 16 abr. 2023.

SMART KITS. **PWM: saiba o que é e como utilizar esse recurso**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://blog.smartkits.com.br/pwm-como->

usar/#:~:text=O%20PWM%20opera%20controlando%20o,%2C%20consequenteme nte%2C%20a%20potência%20elétrica. Acesso em: 3 jan. 2024.

SILVA, LUCAS ANTÔNIO DA. **OTIMIZAÇÃO DO PROCESSAMENTO DA RESINA PET VIRGEM**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, [S. l.], 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/49634/1/TCC%20Lucas%20Antônio%20da%20Silva.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2024.

SOARES, Aldo B. *et al.* **ESTUDO EXPERIMENTAL DA POLIMERIZAÇÃO DO POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) (PET) NA PRESENÇA DE PROPANO-1,2,3-TRIOL (GLICEROL)**. [S. l.: s. n.], 2009. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/918.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2024.

TECH SUL ELETRÔNICOS. **Arduino UNO com ATmega328 – R3**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://techsuleletronicos.com.br/product/arduino-uno-com-atmega328-r3/>. Acesso em: 3 jan. 2024.

USP. **Elementos de Máquinas para Automação: Engrenagens**. [S. l.], 2. semestre 2020. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5801679/mod\\_resource/content/1/PMR-3307-A24-2020-Engrenagens%20-%20P1.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5801679/mod_resource/content/1/PMR-3307-A24-2020-Engrenagens%20-%20P1.pdf). Acesso em: 3 jan. 2024.

VARGAS, Alessandro N. **Sinal PWM em Arduino: Conversão para tensão analógica**. [S. l.: s. n.], 201-?. Disponível em: [http://paginapessoal.utfpr.edu.br/avargas/courses-1/processos\\_em\\_engenharia/et66c-processos-em-engenharia/copy\\_of\\_experiencia17.pdf](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/avargas/courses-1/processos_em_engenharia/et66c-processos-em-engenharia/copy_of_experiencia17.pdf). Acesso em: 3 jan. 2024.

## APÊNDICE A – Código Arduino

```
//incluindo biblioteca
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <RotaryEncoder.h>
#include <AccelStepper.h>
#include <PID_v1.h>
#include <SPI.h>

//Declaração de funções
bool botaoApertado(byte pin_sw, int tempodebounce = 100);
void configuraInterrupcao();
void atualizaDisplay();
double readThermocouple();

//Definindo os pinos do encoder
#define pinSW 5 //Botão do encoder
#define pinDT 6
#define pinCLK 7

//We define the SPI pins
#define MAX6675_CS 12
#define MAX6675_SO 13
#define MAX6675_SCK 11

//Definições menu
#define menuMin 0 //Valor minimo de navegação do menu
#define menuMax 2 //Valor maximo de navegação do menu
```

```
//Inicializa o display no endereco 0x27
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
//Inicializa o encoder
RotaryEncoder encoder(pinDT, pinCLK);

/* DEFINIÇÕES DAS VARIÁVEIS DO MENU*/
// Declaração de variáveis
int menu = 0;
long posicao = 0, posicaoAnt=0;
int tempodisplay = 0;

unsigned long tempoDisplay;
bool girouEncoder = true;
bool swAnt = 1;

/* DEFINIÇÕES DOS BOTOES AUXILIARES*/
int botaoMotor = 2; // declara o push button na porta 2
int botaoAquec = 4; // declara o push button na porta 2
bool botaoPressionado = false;
bool motorLigado = false;
bool motorAtivado = false;
bool aquecPressionado = false;

/* DEFINIÇÕES DO MOTOR*/
//Parametros do motor
int velocidade_motor = 174; //120
int aceleracao_motor = 100;
```

```
// Definicao pino ENABLE
int pino_enable = 10;
```

```
//Definicao pinos STEP e DIR
AccelStepper motor1(1,9,8 );
```

```
/* DEFINIÇÕES DO PID DA TEMPERATURA*/
```

```
//Pins
int PWM_pin = 3;
float set_temperature = 200;
```

```
int loopTime = 300;           //Define time for each loop cycle
unsigned long currentTime = 0;
//PID constants
int kp = 47;  int ki = 30;  int kd = 16;
```

```
double setpoint = set_temperature;           //Define PID variables &
establish PID loop
```

```
double input, output;
PID pid(&input, &output, &setpoint, kp, ki, kd, DIRECT);
```

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  //Definindo os pinos do botao
  pinMode(botaoMotor, INPUT_PULLUP);
  pinMode(botaoAquec, INPUT_PULLUP);
```



```
// Definindo as Caracteristicas do Motor de passo
```

```
pinMode(pino_enable, OUTPUT);
// Configuracoes iniciais motor de passo
motor1.setMaxSpeed(velocidade_motor);
motor1.setSpeed(velocidade_motor);
motor1.setAcceleration(acceleracao_motor);
```

```
// Display LCD
```

```
lcd.init(); //Iniciando LCD
lcd.backlight();
lcd.print(" ---TCC-- ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(" Alvaro ");
delay(1000); // Mensagem inicial de 5 segundo
lcd.clear();
```

```
configuraInterrupcao();
posicaoAnt = encoder.getPosition();
```

```
// Definindo saida de PWM e leitura de temperatura
```

```
pinMode(PWM_pin, OUTPUT); //Configure PWM pin
```

```
pid.SetMode(AUTOMATIC); //Set the PID parameters
pid.SetOutputLimits(0, 255);
```

```
}
```

```
void loop() {  
    // Serial.println(input);  
  
    posicao = encoder.getPosition();  
  
    menu = constrain( (menu + (posicao - posicaoAnt) ), menuMin, menuMax);  
  
    if (posicao != posicaoAnt) {  
        girouEncoder = true;  
    }  
  
    atualizaDisplay();  
  
    switch (menu) {  
  
        case 1: {  
  
            if (girouEncoder) {  
  
                if( motorLigado){  
                    lcd.clear();  
                    lcd.print("Velocidade");  
                    lcd.setCursor(0, 1);  
                    lcd.print("V = 16.1 mm/s");  
  
                }else {  
                    lcd.clear();  
                    lcd.print("Velocidade");  
                    lcd.setCursor(0, 1);  
                    lcd.print("V = 0 mm/s");  
                }  
            }  
        }  
    }  
}
```

```

    girouEncoder = false;

    break;}

case 2: {

    if (girouEncoder) {
        lcd.clear();
        lcd.print("Temperatura");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("S:");
        lcd.setCursor(2,1);
        lcd.print(set_temperature,1);
        lcd.setCursor(9,1);
        lcd.print("R:");
        lcd.setCursor(11,1);
        lcd.print(input,1);
    }

    girouEncoder = false;

    break;}

default:{

    if (girouEncoder){
        lcd.clear();
        lcd.print("  |MENU|"); // Interface do MENU
    }
    girouEncoder = false;
    break;}
}

```

```
// Definindo condição para ligar e desligar o motor
```

```
if (digitalRead(botaoMotor) == HIGH && !botaoPressionado)
{
    Serial.println("Botão pressionado");
    botaoPressionado = true;

    if (!motorLigado)
    {
        Serial.println("Liga motor");
        digitalWrite(pino_enable, LOW);
        motorLigado = true;
    }

    else
    {
        Serial.println("Desliga motor");
        digitalWrite(pino_enable, HIGH);
        motorLigado = false;
    }
}

else if (digitalRead(botaoMotor) == LOW)
{
    botaoPressionado = false;
}

if (motorLigado)
{
    Serial.println("Loop");
    motor1.setSpeed(velocidade_motor);
    motor1.runSpeed();
}
```

```

//Definindo condição para ligar e desligar o aquecimento
static unsigned long ultimaExecucao = 0;
unsigned long tempoAtual = millis();

// Verifica se passaram 300 milissegundos desde a última execução
if (tempoAtual - ultimaExecucao >= 200) {
    //Record the start time for the loop
    currentTime = millis();

    input = readThermocouple(); // read temperature

    if (digitalRead(botaoAquec) == HIGH && !aquecPressionado) {
        // Serial.println("Iniciando Aquecimento");
        aquecPressionado = true;
        // pid.SetMode(AUTOMATIC);

    }else if(digitalRead(botaoAquec) == HIGH && aquecPressionado){
        aquecPressionado=false;
        // Serial.println("Parando Aquecimento");

        output=0;
    }

    if (aquecPressionado){

        // Compute the PID output

        pid.Compute();

        // Update the PWM output

        Serial.print("Saída PID: ");

```

```

        Serial.println(output);
        Serial.print("Temperatura");
        Serial.println(input);
    }
    analogWrite(PWM_pin, 255 - output);

    int temp = input;
    ultimaExecucao = tempoAtual;

}

posicaoAnt = posicao; //Salva a posição atual do encoder para comparar

}

bool botaoApertado(byte pin_sw, int tempoDebounce = 100) {

    static unsigned long swDebounce = 0;

    bool sw = digitalRead(pin_sw);

    if (sw != swAnt) {
        swDebounce = millis();
    }

    if ((millis() - swDebounce) > tempoDebounce) {

        if (sw != swAnt) {
            swAnt = sw;

            if (sw == LOW) {
                return true;
            }
        }
    }
}

```

```

    }
}

return false;
}

void atualizaDisplay () {

    if (botaoApertado(pinSW) || (posicao != posicaoAnt) ) {

        lcd.backlight();
        tempoDisplay = millis();
    }
    if(millis() - tempoDisplay > 20000) lcd.noBacklight();

}

void configuraInterrupcao() {

    //Habilita a interrupção das portas 0 a 7
    PCICR |= (1 << PCIE2);

    //Configura as portas 6 e 7 para interrupção
    PCMSK2 |= (1 << PCINT22) | (1 << PCINT23);
}

ISR(PCINT2_vect) { // Função de interrupção

    encoder.tick();
}

```

```

double readThermocouple() {

    uint16_t v;

    pinMode(MAX6675_CS, OUTPUT);

    pinMode(MAX6675_SO, INPUT);

    pinMode(MAX6675_SCK, OUTPUT);


    digitalWrite(MAX6675_CS, LOW);

    delay(1);


    // Read in 16 bits,

    // 15   = 0 always
    // 14..2 = 0.25 degree counts MSB First
    // 2     = 1 if thermocouple is open circuit
    // 1..0  = uninteresting status

    v = shiftIn(MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST);

    v <<= 8;

    v |= shiftIn(MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST);

    digitalWrite(MAX6675_CS, HIGH);

    if (v & 0x4)

```



75

```
{  
    // Bit 2 indicates if the thermocouple is disconnected  
    return NAN;  
}  
  
// The lower three bits (0,1,2) are discarded status bits  
v >>= 3;  
  
// The remaining bits are the number of 0.25 degree (C) counts  
return v*0.25;  
}
```