

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

THAIS SIQUEIRA DIAS DA COSTA

**PROTÓTIPO DE UM CONTROLADOR PARA PRODUÇÃO DE FILAMENTOS DE
IMPRESSORAS 3D DO TIPO FDM A PARTIR DA RECICLAGEM DE GARRAFAS
PET**

Leopoldina

2025

THAIS SIQUEIRA DIAS DA COSTA

**PROTÓTIPO DE UM CONTROLADOR PARA PRODUÇÃO DE FILAMENTOS DE
IMPRESSORAS 3D DO TIPO FDM A PARTIR DA RECICLAGEM DE GARRAFAS**

PET

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Controle e
Automação do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, do Campus
Leopoldina, como parte do requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
de Controle e Automação.

Orientadora: Erika Tiemi Anabuki

Leopoldina

2025

AXXX Costa, Thais Siqueira Dias da.
2025 PROTÓTIPO DE UM CONTROLADOR PARA PRODUÇÃO DE FILAMENTOS DE IMPRESSORAS 3D DO TIPO FDM A PARTIR DA RECICLAGEM DE GARRAFAS PET / Thais Siqueira Dias da Costa
Sobrenome - Leopoldina : CEFET-MG, 2025.
xvi, 73 f. : il.

Orientadora: Erika Tiemi Anabuki

TCC (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Unidade Leopoldina. Engenharia de Controle e Automação.

1. Palavra-chave. 2. Palavra-chave. 3. Palavra-chave. I. Sobrenome, Nome do orientador Nome do meio II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Unidade Leopoldina.

CDU 681.5

THAIS SIQUEIRA DIAS DA COSTA

PROTÓTIPO DE UM CONTROLADOR PARA PRODUÇÃO DE FILAMENTOS DE IMPRESSORAS 3D DO TIPO FDM A PARTIR DA RECICLAGEM DE GARRAFAS PET

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: Dia de Dezembro de 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dsc. Erika Tiemi Anabuki- Orientadora
CEFET-MG

Prof. Dsc. Lindolpho Oliveira de Araújo Junior
CEFET-MG

Prof. Msc. Rafael José Fonseca de Sá
CEFET-MG

(Assinaturas Digitais)

Leopoldina
2025

Dedico este trabalho ao meu amigo Alef, que acreditou no meu potencial e me incentivou a prestar a prova de Engenharia. Sem o seu incentivo, talvez este sonho não tivesse começado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder saúde, sabedoria e força para superar os desafios e concluir esta etapa tão importante da minha vida acadêmica.

Agradeço à minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional em todos os momentos. Aos meus pais, por acreditarem no meu potencial e por me ensinarem o valor do esforço e da dedicação.

Ao meu marido, pelo apoio incondicional, paciência, compreensão e por estar sempre ao meu lado, acreditando em mim mesmo nos momentos mais difíceis. Sua presença foi essencial para que eu mantivesse o foco e a motivação durante esta jornada.

Agradeço à minha orientadora, **Prof.^a Erika Tiemi Anabuki**, pela orientação, paciência, disponibilidade e por compartilhar seus conhecimentos de forma tão atenciosa e inspiradora. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Estendo meus agradecimentos aos professores e colegas do curso de **Engenharia de Controle e Automação** do **CEFET-MG, Campus Leopoldina**, pelos ensinamentos, convivência e trocas de experiências que contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

Aos amigos que estiveram presentes ao longo do curso e do projeto, pelo companheirismo, incentivo e apoio nos momentos de cansaço e incerteza.

Por fim, dedico este trabalho a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este sonho se tornasse realidade, o meu mais sincero agradecimento.

“A jornada é tão importante quanto o destino.”

Anônimo

PROTÓTIPO DE UM CONTROLADOR PARA PRODUÇÃO DE FILAMENTOS DE IMPRESSORAS 3D DO TIPO FDM A PARTIR DA RECICLAGEM DE GARRAFAS PET

Thais Siqueira Dias da Costa

Erika Tiemi Anabuki

RESUMO

O acúmulo de resíduos plásticos, aliado à sua lenta degradação, tem causado impactos ambientais significativos, especialmente nos ecossistemas marinhos. Nesse cenário, a economia circular surge como alternativa sustentável ao promover o reaproveitamento e a reciclagem de materiais. Entre esses resíduos, as garrafas PET apresentam grande potencial de reutilização como matéria-prima para impressoras 3D do tipo FDM. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo capaz de transformar garrafas PET em filamento para impressão 3D, incorporando um sistema de controle automatizado baseado em um microcontrolador Arduino. O projeto inclui um sensor óptico desenvolvido especificamente para medir o diâmetro do filamento extrudado, cuja lógica de controle foi implementada e avaliada durante os testes, embora sua aplicação prática tenha sido limitada pela instabilidade das medições. Assim, a velocidade do motor de tração foi operada por meio de um valor fixo de PWM nos ensaios finais. O sistema integra filetador, extrusora, módulo de medição e bobinador, operando de forma sincronizada. Os testes realizados demonstraram estabilidade térmica adequada, funcionalidade do sensor óptico e viabilidade do processo de extrusão do PET reciclado. Os resultados confirmam o potencial do protótipo como solução acessível para reciclagem distribuída e fabricação local de filamentos, contribuindo para práticas sustentáveis e incentivando a economia circular em ambientes comunitários, educacionais e *makers*.

Palavras-chave: impressão 3D; reciclagem de PET; sensor óptico; filamento reciclado; economia circular

PROTOTYPE OF A CONTROLLER FOR PRODUCTION OF FDM 3D PRINTER FILAMENTS FROM RECYCLING PET BOTTLES

Thais Siqueira Dias da Costa

Erika Tiemi Anabuki

ABSTRACT

The accumulation of plastic waste, combined with its slow degradation, has generated significant environmental impacts, particularly in marine ecosystems. In this context, the circular economy emerges as a sustainable alternative by promoting the reuse and recycling of materials. Among these residues, PET bottles present strong potential for reuse as raw material for FDM-type 3D printers. This work presents the development of a low-cost prototype capable of transforming PET bottles into 3D-printing filament, incorporating an automated control system based on an Arduino microcontroller. The project includes an optical sensor specifically designed to measure the diameter of the extruded filament; although the control logic was implemented and tested, its practical application was limited by the instability of the measurements. Consequently, the traction motor speed was operated using a fixed PWM value in the final experiments. The system integrates a strip-cutter, extruder, measurement module, and winder, operating in a synchronized manner. The tests demonstrated adequate thermal stability, functional optical sensing, and the overall feasibility of PET extrusion. The results confirm the prototype's potential as an accessible solution for distributed recycling and local filament fabrication, contributing to sustainable practices and promoting the circular economy in community, educational, and makerspace environments.

Keywords: 3D printing. PET recycling. Optical sensor. Recycled filament. Circular economy.

TERMO DE RESPONSABILIDADE POR AUTORIA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Eu, **THAIS SIQUEIRA DIAS DA COSTA**, matrícula **20183012054**, discente do Curso de Engenharia de Controle e Automação, declaro para os devidos fins, que o presente Trabalho de Conclusão de Curso, de título **PROTÓTIPO DE UM CONTROLADOR PARA PRODUÇÃO DE FILAMENTOS DE IMPRESSORAS 3D DO TIPO FDM A PARTIR DA RECICLAGEM DE GARRAFAS PET**, é de minha autoria e que estou ciente dos:

- Artigos 297 a 299 do Código Penal;
- Decreto-Lei n 2.848 de 7 de dezembro de 1940;
- Lei no 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, sobre os Direitos Autorais;
- Regulamento Disciplinar Discente do CEFET-MG;
- E que plágio consiste na reprodução de obra alheia e submissão dela como trabalho próprio ou na inclusão, em trabalho próprio, de ideias, textos, tabelas ou ilustrações (quadros, figuras, gráficos, fotografias, retratos, lâminas, desenhos, organogramas, fluxogramas, plantas, mapas e outros) transcritos de obras de terceiros sem a devida e correta citação da referência.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração, isentando o(a) professor(a) orientador(a) **ERIKA TIEMI ANABUKI**, os membros da banca examinadora e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Leopoldina, de qualquer responsabilidade.

Leopoldina Dia de Dezembro de 2025

Assinatura do Discente

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Protótipo funcional do sistema extrusor de filamento PET.	31
Figura 3.2 – Filetador: (a) visão geral com garrafa fixada na haste rosuada, direcionada para o corte; (b) detalhe do sistema de corte com rolamentos e lâmina de aço ajustável.	34
Figura 3.3 – Montagem da extrusora com bloco aquecedor, cartucho de aquecimento, termistor e bico de saída.	35
Figura 3.4 – Conceito inicial do sensor que fundamentou o desenvolvimento do projeto.	37
Figura 3.5 – Sensor de diâmetro: (a) vista externa do invólucro impresso em 3D; (b) vista interna com o LED e o fototransistor alinhados.	38
Figura 3.6 – Ilustração do microcontrolador Arduino Nano utilizado no sistema de controle.	39
Figura 3.7 – Esquemático eletrônico do sistema de controle do protótipo.	41
Figura 3.8 – Display com suporte.	42
Figura 3.9 – Suporte do motor com engrenagens de redução e carretel	44
Figura 4.1 – Primeira versão do protótipo utilizada nos testes iniciais de funcionamento.	45
Figura 4.2 – Reorganização intermediária: circuito eletrônico realocado para a parte inferior do protótipo.	46
Figura 4.3 – Versão final do protótipo, com organização limpa dos módulos e circuito acomodado na parte inferior.	46
Figura 4.4 – Temperaturas medidas durante os testes: valor bruto (<i>reported</i>), valor corrigido (<i>corrected</i>) e valor de referência (<i>setpoint</i>).	48
Figura 4.5 – Erro entre a temperatura corrigida e o setpoint ao longo das amostras.	49
Figura 4.6 – Dispersão entre a leitura de luz e o diâmetro estimado do filamento.	51
Figura 4.7 – Variação temporal do diâmetro estimado ao longo do processo de extrusão.	52
Figura 4.8 – Extrusão do filamento reciclado, com presença de bolhas devido à umidade do PET.	54
Figura 4.9 – Filamento bobinado após extrusão, apresentando variações de espessura e transparência: (a) PET Transparente; (b) PET Transparente verde.	54
Figura 4.10 – Objetos impressos com o filamento reciclado produzido pelo protótipo: (a) coelho tridimensional; (b) floco de neve.	55

Figura 4.12-Floco de neve impresso com diferentes materiais: (a) filamento PLA verde comercial; (b) filamento de PET reciclado transparente verde produzido pelo protótipo. . 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Lista de componentes utilizados no sistema.	32
Tabela 4.1 – Valores experimentais utilizados na calibração do sensor óptico de diâmetro.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D Três Dimensões

ABIPET Associação Brasileira da Indústria do PET

ABS Acrilonitrila Butadieno Estireno

CAD Computer-Aided Design (Projeto Assistido por Computador)

DC Direct Current (Corrente Contínua)

FDM Fused Deposition Modeling (Modelagem por Deposição Fundida)

FFF Fused Filament Fabrication (Fabricação por Filamento Fundido)

IR Infrared (Infravermelho)

LED Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)

LDR Light Dependent Resistor (Resistor Dependente de Luz)

LCD Liquid Crystal Display (Display de Cristal Líquido)

I2C Inter-Integrated Circuit (Circuito Interintegrado)

MOSFET Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor

NTC Negative Temperature Coefficient (Coeficiente de Temperatura Negativo)

PET Polietileno Tereftalato

PID Proporcional, Integral e Derivativo (Controlador)

PLA Polylactic Acid (Ácido Polilático)

PVC Policloreto de Vinila

PWM Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)

PCB Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)

USB Universal Serial Bus

V Volt (Unidade de Tensão Elétrica)

WEF World Economic Forum

LISTA DE SÍMBOLOS

d	Diâmetro do filamento (mm)
T	Temperatura de extrusão (°C)
ΔT	Variação de temperatura (°C)
V	Tensão de saída do sensor (V)
R	Resistência elétrica (Ω)
I	Corrente elétrica (A)
P	Potência elétrica (W)
K_p	Ganho proporcional do controlador PID
K_i	Ganho integral do controlador PID
K_d	Ganho derivativo do controlador PID
PWM	Modulação por Largura de Pulso
η	Eficiência térmica do sistema (%)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação	19
1.2	Trabalhos relacionados	20
1.2.1	Comparação com o presente trabalho	21
1.3	Objetivo	22
1.3.1	Objetivos específicos	22
1.4	Estrutura do Trabalho	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Reciclagem de PET e Sustentabilidade	24
2.2	Tecnologias Abertas e o Movimento <i>Maker</i>	25
2.3	Extrusão de Termoplásticos Reciclados	25
2.4	Sensoriamento Óptico para Controle de Qualidade	27
2.5	Automação com Arduino em Sistemas de Reciclagem	28
3	DESENVOLVIMENTO	30
3.1	Protótipo	30
3.2	Componentes eletroeletrônicos	32
3.3	Módulos do Sistema Extrusor de Filamento PET	33
3.3.1	Filetador	33
3.3.2	Extrusora	35
3.4	Sensor de Diâmetro	36
3.4.1	Controle (Microcontrolador Arduino)	39
3.4.2	Painel (Display LCD)	42
3.4.3	Bobinador	43
4	TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Testes de Controle de Temperatura	47
4.2	Calibração e testes do Sensor de diâmetro	49
4.3	Qualidade do Filamento Produzido	53
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	59
5.1	Conclusões	59
5.2	Trabalhos futuros	59

REFERÊNCIAS	61
APÊNDICE A – MONTAGEM PASSO A PASSO DO PROTÓTIPO EXTRUSOR DE FILAMENTO PET	63
A.1 Materiais e Ferramentas Necessárias	63
A.2 Etapas de Montagem	64
A.2.1 Montagem do Filetador	64
A.2.2 Montagem da Extrusora	64
A.2.3 Instalação do Sensor de Diâmetro	64
A.2.4 Montagem do Sistema de Controle e Painel	65
A.2.5 Montagem do Bobinador	65
A.3 Testes e Ajustes	65
APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DO SISTEMA DE CONTROLE COM ARDUINO	67

1 INTRODUÇÃO

A ampla utilização do plástico nas últimas décadas, aliada à sua lenta decomposição, resultou em um grave problema ambiental. Entre os principais impactos, destaca-se a contaminação de ecossistemas naturais, especialmente os ambientes marinhos, onde animais frequentemente ingerem resíduos plásticos ou ficam presos em materiais descartados inadequadamente, o que pode levar a ferimentos graves e até à morte. Além disso, partículas menores, como microplásticos, vêm sendo encontradas no solo e na água, representando risco à saúde humana devido ao seu potencial de bioacumulação e toxicidade (OLADAPO et al., 2023).

Nesse contexto, a economia circular desponta como uma abordagem sustentável para o uso de materiais, fundamentada nos princípios dos 6R's: reduzir, reutilizar, reciclar, reparar, recusar e repensar. A proposta busca prolongar o ciclo de vida dos produtos, minimizando desperdícios e reduzindo o impacto ambiental. No caso do plástico, essa abordagem permite que materiais descartados retornem à cadeia produtiva, reduzindo a demanda por recursos naturais e o consumo energético associado à produção de polímeros virgens (MIKULA et al., 2021).

Entretanto, a reciclagem tradicional possui baixo valor agregado e é majoritariamente centralizada em grandes usinas, o que aumenta os custos logísticos e reduz a eficiência do processo. Uma estratégia alternativa é a reciclagem distribuída, que visa descentralizar etapas de processamento, aproximando-as dos consumidores e das comunidades locais. Essa abordagem possibilita a criação de ecossistemas sustentáveis de reaproveitamento, promove a economia local e reduz o volume de resíduos descartados inadequadamente (KREIGER et al., 2013; DERTINGER et al., 2020).

Paralelamente, a impressão 3D, ou manufatura aditiva, tem se consolidado como uma tecnologia versátil, acessível e em constante expansão. Suas aplicações abrangem desde a prototipagem industrial até áreas como medicina, educação, arquitetura e o movimento *maker* (BERMAN, 2012; LIPSON; KURMAN, 2013). Entre os diferentes métodos existentes, o mais popular é o *Fused Deposition Modeling* (FDM), que utiliza filamento termoplástico para fabricar objetos tridimensionais. Entretanto, a qualidade da impressão está diretamente relacionada à uniformidade do diâmetro do filamento. Variações dimensionais podem provocar entupimentos, falhas na deposição e perda de precisão dimensional (ANDERSON, 2012).

Apesar dos avanços tecnológicos, o custo dos filamentos comerciais ainda representa uma barreira, especialmente em ambientes educacionais e em comunidades de baixa renda (RAYNA;

STRIUKOVA, 2016; HARRISON; HVOLBEK; MARIA, 2021). Nesse cenário, a fabricação doméstica de filamento, especialmente a partir de garrafas PET (Polietileno Tereftalato), surge como uma alternativa sustentável e economicamente viável. Essa solução reduz custos com insumos, promove a reciclagem e fortalece iniciativas de economia circular (WOERN; MCCUE; VERNON-ROE, 2021).

No entanto, a extrusão artesanal apresenta desafios importantes, especialmente no que diz respeito ao controle do diâmetro do filamento. Variações de tração, temperatura e resfriamento podem comprometer a qualidade do material produzido. Assim, torna-se fundamental implementar um método eficaz de medição e controle desse diâmetro ao longo do processo de extrusão (SOMENZI; FILIPETTO, 2023).

Considerando o contexto apresentado, este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo para a reciclagem de garrafas PET, com capacidade de produzir filamentos utilizáveis em impressoras 3D do tipo FDM. O sistema integra sensor óptico, controle automatizado via microcontrolador Arduino, extrusora de baixo custo e módulo de bobinamento. O diferencial da proposta está na implementação de um sensor óptico desenvolvido especificamente para medir o diâmetro do filamento em tempo real e ajustar automaticamente a velocidade do motor de tração, garantindo maior uniformidade dimensional.

1.1 Motivação

A crescente geração de resíduos plásticos, somada ao descarte inadequado, representa um dos maiores desafios ambientais contemporâneos. Garrafas PET, amplamente utilizadas e de curta vida útil, constituem parte significativa desse volume. No Brasil, mesmo com avanços, ainda há uma quantidade expressiva de PET que não é reciclada (ABIPET, 2024). Ao mesmo tempo, a impressão 3D exige filamentos de boa qualidade, mas o custo desses insumos limita sua adoção em diversos contextos sociais e educacionais.

A ideia deste trabalho nasceu da necessidade de unir sustentabilidade, acessibilidade e inovação tecnológica. A possibilidade de transformar resíduos domésticos em insumos para impressão 3D, a partir de um sistema construído com componentes de baixo custo, representa um passo significativo em direção a soluções práticas para a economia circular, especialmente em comunidades de baixa renda e ambientes *maker*. Projetos abertos, como o *Precious Plastic* (2024), reforçam essa perspectiva ao demonstrar que a fabricação local e descentralizada pode ser eficiente e ambientalmente responsável.

1.2 Trabalhos relacionados

A produção de filamentos para impressão 3D a partir de materiais reciclados tem sido tema de pesquisa em diferentes contextos, especialmente nos campos da sustentabilidade, economia circular e manufatura distribuída. Diversos autores abordam desde os processos de extrusão e caracterização dos materiais até o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo e soluções abertas para comunidades *makers*.

Mikula et al. (2021) apresentam uma revisão abrangente sobre o reaproveitamento de plásticos, incluindo PLA (Ácido Polilático), ABS (*Acrilonitrila Butadieno Estireno*) e PET, destacando que a reciclagem mecânica pode ser realizada com equipamentos relativamente simples. Os autores ressaltam, contudo, que sucessivos ciclos de extrusão tendem a diminuir o peso molecular do polímero, afetando sua resistência mecânica. O estudo aponta ainda a necessidade de sistemas de controle mais precisos para garantir a uniformidade do filamento, algo essencial em impressoras do tipo FDM.

No campo da sustentabilidade ambiental, Oladapo et al. (2023) discutem os impactos positivos da manufatura distribuída e defendem que a descentralização da reciclagem pode reduzir emissões de gases de efeito estufa, aumentar a eficiência energética e diminuir a necessidade de transporte do resíduo até grandes centros de processamento. O estudo enfatiza que a produção local de filamentos reduz custos e amplia a autonomia de comunidades com acesso limitado a insumos industriais.

Quanto ao processo de extrusão, Shaqour et al. (2021) detalham os principais parâmetros que influenciam a qualidade do filamento, como temperatura, viscosidade, fluxo e geometria do bico. Os autores destacam que pequenas variações na tração e no resfriamento podem comprometer a uniformidade dimensional, reforçando a importância de mecanismos de retroalimentação baseados em sensores.

Em relação às tecnologias abertas, o projeto RecycleBot, desenvolvido por Woern, McCue e Vernon-Roe (2021), apresenta uma extrusora de filamento de baixo custo baseada em microcontroladores simples, com estrutura modular e de fácil replicação. Embora o projeto seja funcional e bem documentado, seu foco principal é na extrusão a partir de pellets de plástico triturado, e não necessariamente de garrafas PET inteiras, exigindo etapas adicionais de processamento.

No cenário nacional, Ferreira (2024) propõe um dispositivo experimental para fabricação

de filamento a partir de garrafas PET. O trabalho demonstra que é possível produzir um protótipo funcional utilizando componentes acessíveis; contudo, o autor observa dificuldades no controle térmico e inconsistências no diâmetro do filamento, o que limita o uso do material extrudado em impressoras comerciais. A ausência de um sistema de medição em tempo real e a falta de ajuste automático da tração são apontadas como limitações relevantes.

Outro trabalho importante é o de Costa (2015), que explora métodos para controle dimensional do filamento por meio de sensores ópticos. O autor compara soluções industriais, como sensores a laser, com alternativas de baixo custo baseadas em LEDs (*Light Emitting Diode*) infravermelhos e fototransistores. O estudo conclui que sensores ópticos simples podem alcançar precisão suficiente para processos caseiros, desde que aliados a calibrações adequadas e ao uso de controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo) para compensar variações.

Por fim, Somenzi e Filipetto (2023) investiga a produção de filamento reciclado a partir de garrafas PET, utilizando métodos experimentais associados à metodologia *Design Science Research* (DSR), uma abordagem que orienta o desenvolvimento e a avaliação de protótipos voltados à solução de problemas reais. Os autores validam o uso de sensores ópticos de barreira e destacam a importância da geometria da fita PET, da temperatura de extrusão e da velocidade de tração na qualidade do filamento extrudado.

1.2.1 Comparação com o presente trabalho

A revisão da literatura evidencia que, embora existam iniciativas relevantes para extrusão de filamentos reciclados, muitas delas apresentam limitações na medição contínua do diâmetro, no controle automático do processo ou na viabilidade de produção diretamente a partir de garrafas PET inteiras. O diferencial deste trabalho está na integração dos componentes a seguir:

- um sensor óptico de baixo custo projetado especificamente para medir o diâmetro do filamento em tempo real;
- um sistema de controle automatizado capaz de ajustar dinamicamente a velocidade do motor de tração;
- a produção de filamento diretamente a partir de garrafas PET, dispensando processos prévios de Trituração;

- a construção de um protótipo compacto, replicável e de fácil utilização em ambientes educacionais ou comunitários.

Dessa forma, o presente trabalho contribui para a área ao oferecer um sistema completo, acessível e alinhado à proposta de reciclagem distribuída, com ênfase no controle dimensional do filamento, aspecto crítico para sua utilização prática em impressoras 3D do tipo FDM.

1.3 Objetivo

Desenvolver um protótipo de baixo custo para a produção de filamento para impressoras 3D a partir de garrafas PET, integrando sistemas de extrusão, medição óptica e controle automatizado, de modo a garantir maior uniformidade do diâmetro e viabilizar uma solução acessível e alinhada aos princípios da economia circular.

1.3.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre impressão 3D, extrusão de filamentos, tecnologias de reciclagem de PET e métodos de sensoriamento óptico aplicados ao controle dimensional;
- Estudar as propriedades térmicas e mecânicas do PET e analisar como fatores como temperatura de fusão, viscosidade e espessura da garrafa influenciam a formação do filamento;
- Selecionar e caracterizar os componentes eletrônicos e mecânicos necessários para a construção do protótipo, incluindo bloco aquecedor, termistor, cartucho de aquecimento, sensores ópticos, drivers de motor e microcontrolador;
- Projetar e implementar um sensor óptico baseado em LED infravermelho e fototransistor, capaz de medir a variação de intensidade luminosa causada pela passagem do filamento e convertê-la em estimativas do seu diâmetro;
- Desenvolver o módulo de extrusão, incluindo a montagem do bloco aquecedor, a calibração do controle de temperatura e a adaptação do filete de PET ao bico extrusor;

- Construir o módulo de tração e bobinamento, garantindo que a velocidade de enrolamento seja uniforme e ajustável.
- Integrar todos os módulos por meio de um microcontrolador Arduino, incluindo leitura do sensor de diâmetro, controle da resistência de aquecimento, acionamento do motor e exibição das informações no display;
- Implementar um sistema de controle automatizado capaz de ajustar a velocidade do motor de tração com base na leitura do diâmetro, garantindo maior uniformidade dimensional ao filamento;
- Realizar experimentos de extrusão utilizando garrafas PET e avaliar a qualidade do filamento produzido, incluindo consistência do diâmetro, estabilidade térmica e comportamento no processo de bobinamento;
- Comparar o filamento produzido com filamentos comerciais, identificando limitações, vantagens e oportunidades de melhoria.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, abordando a motivação, os trabalhos relacionados, os objetivos e a estrutura geral. O Capítulo 2 reúne os fundamentos teóricos, descrevendo os sensores utilizados, as características do PET e os métodos de processamento dos sinais para controle do filamento. O Capítulo 3 detalha o desenvolvimento do sistema, incluindo o projeto do sensor óptico, a montagem do equipamento e o software embarcado. O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais e a análise da qualidade do filamento produzido. O Capítulo 5 traz as conclusões, limitações e sugestões de trabalhos futuros, seguido das referências bibliográficas.

Este trabalho inclui ainda dois apêndices: o Apêndice A, com instruções de montagem do protótipo, e o Apêndice B, com o código utilizado no sistema de controle.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os conceitos e fundamentos necessários para a compreensão do desenvolvimento do protótipo de extrusora de filamento reciclado a partir de garrafas PET. Inicialmente, aborda-se a relevância da reciclagem do PET e seu papel na sustentabilidade ambiental, destacando o potencial desse material na manufatura aditiva. Em seguida, discute-se o movimento *maker* e o uso de tecnologias abertas, que promovem a democratização da fabricação digital e o desenvolvimento de soluções acessíveis para o reaproveitamento de resíduos plásticos. Posteriormente, são explorados os aspectos técnicos do processo de extrusão de termoplásticos reciclados, com ênfase nas propriedades do PET e na importância do controle de qualidade dimensional por meio de sensoriamento óptico. Por fim, são apresentados os conceitos de automação e controle utilizando microcontroladores Arduino, que possibilitam a integração dos módulos do sistema e a operação eficiente do protótipo desenvolvido.

2.1 Reciclagem de PET e Sustentabilidade

O aumento do consumo de plásticos e a crescente preocupação com seus impactos ambientais tornam urgente o desenvolvimento de soluções sustentáveis de reaproveitamento. O PET, apesar de ser um dos plásticos mais reciclados no Brasil (ABIPET, 2024), ainda apresenta grande potencial de reaproveitamento em escala local por meio da manufatura aditiva.

De acordo com Mikula et al. (2021), transformar resíduos plásticos em filamentos para impressão 3D representa uma segunda vida útil para esses materiais, ampliando seu ciclo de uso e reduzindo a necessidade de produção de plásticos virgens. Essa prática reforça os princípios da economia circular, especialmente em ambientes educacionais, *makerspaces* e comunidades com acesso limitado a recursos industriais, onde a reciclagem *in situ* pode reduzir custos e impactos ambientais.

A sustentabilidade associada à impressão 3D com filamento reciclado também deve considerar a análise do ciclo de vida do produto. Estudos como o de Oladapo et al. (2023) indicam que, mesmo levando em conta o consumo energético do processo de extrusão, os benefícios ambientais superam os custos quando se evita o descarte inadequado e a incineração de resíduos plásticos. Dessa forma, a produção descentralizada de filamento reciclado configura-se como uma alternativa promissora para reduzir o impacto ambiental e promover maior autonomia e autossuficiência na manufatura sustentável.

2.2 Tecnologias Abertas e o Movimento *Maker*

O movimento *maker* tem como base a democratização da tecnologia, incentivando indivíduos e comunidades a desenvolverem soluções práticas por meio da fabricação digital, da prototipagem rápida e do compartilhamento aberto de conhecimento. Plataformas de código aberto, como o Arduino, e comunidades colaborativas, como a *Precious Plastic* (2024), fomentam a criação de dispositivos acessíveis voltados ao reaproveitamento de materiais e à promoção da sustentabilidade tecnológica.

De acordo com Anderson (2012) e Baden, Drummond e Vos (2019), essa revolução tecnológica possibilitou que indivíduos comuns, utilizando ferramentas relativamente simples, desenvolvessem soluções inovadoras em áreas antes restritas à indústria. No contexto da reciclagem de plásticos para impressão 3D, isso se traduz em equipamentos de baixo custo para as etapas de filetamento, extrusão, medição e bobinamento de filamento, como apresentado neste trabalho.

Essa abordagem reduz a dependência de soluções comerciais caras, incentiva o desenvolvimento local de tecnologia e promove a conscientização ambiental, permitindo que mais pessoas participem ativamente da transformação de resíduos em novos produtos. Dessa forma, o movimento *maker* e as tecnologias abertas fortalecem a ideia de uma economia circular distribuída, na qual inovação e sustentabilidade avançam de maneira integrada.

2.3 Extrusão de Termoplásticos Reciclados

A extrusão é um processo amplamente empregado na transformação de materiais termoplásticos, no qual o polímero é aquecido até fundir-se e, em seguida, forçado a passar por um canal estreito para assumir uma nova forma contínua. Na fabricação de filamentos para impressão 3D, especialmente no processo de *Fused Deposition Modeling* (FDM), a extrusão desempenha um papel central, permitindo a produção de filamentos com diâmetro controlado e características adequadas para a deposição camada por camada (SHAQOUR et al., 2021).

O PET é um material comumente utilizado em embalagens, como garrafas, e possui propriedades térmicas e mecânicas favoráveis à reciclagem. Ele apresenta ponto de fusão em torno de 250 °C, boa resistência ao impacto e estabilidade dimensional (MIKULA et al., 2021). No entanto, seu reaproveitamento exige atenção especial ao controle de temperatura e tração durante a extrusão, para evitar variações no diâmetro do filamento e degradação térmica do

material, que podem comprometer sua transparência e resistência.

Projetos como o RecycleBot, de Woern, McCue e Vernon-Roe (2021), demonstram que é possível construir extrusoras de baixo custo com componentes acessíveis, permitindo a transformação de resíduos plásticos em filamento para impressão 3D. Nessa proposta, o processo é automatizado por um sistema controlado via Arduino e sensores térmicos, com capacidade de produzir filamentos a partir de diferentes termoplásticos, incluindo o PET reciclado. O controle térmico preciso, viabilizado por termistores NTC (*Negative Temperature Coefficient*) e resistências elétricas, é essencial para manter a viscosidade adequada e garantir a uniformidade do diâmetro do filamento.

No estudo desenvolvido por Ferreira (2024), o autor descreve o processo de extrusão como o ponto crítico do sistema, pois é responsável pela fusão homogênea do filete de PET proveniente de garrafas recicladas. Ferreira destaca que o PET apresenta comportamento sensível à variação térmica, e o superaquecimento pode provocar cristalização e degradação do material, comprometendo suas propriedades ópticas e mecânicas. Para evitar esses efeitos, ele implementou um controle térmico baseado em resistências elétricas e sensores de temperatura, com ajustes manuais de temperatura e velocidade de tração, de modo a manter a uniformidade do diâmetro e a fluidez do material fundido. O projeto evidencia que a extrusão do PET reciclado requer um equilíbrio entre temperatura, tração e resfriamento, visto que pequenas variações nesses parâmetros influenciam diretamente a qualidade e a consistência do filamento produzido.

De maneira complementar, Costa (2015) investigou a dinâmica do processo de extrusão na produção de filamentos de 3 mm para impressoras 3D, utilizando como matéria-prima o MABS (*Metil Acrilonitrila Butadieno Estireno*), um polímero que combina a resistência ao impacto e rigidez do ABS com a transparência e brilho característicos do acrílico, possuindo ponto de fusão em torno de 220 °C. Em seu trabalho, o material é aquecido dentro de um barril extrusor, onde um sistema de rosca helicoidal conduz o polímero sólido através de zonas de aquecimento progressivo até sua fusão completa. Durante esse percurso, o polímero fundido é comprimido e homogeneizado, sendo então forçado através do bico extrusor, onde adquire a forma de filamento. Para controlar o diâmetro, Costa propôs o uso de um sistema de tração controlado, que regula a vazão do filamento após a saída do bico, ajustando sua seção transversal conforme a taxa de resfriamento e a viscosidade do material. O autor também ressalta que o controle preciso da temperatura e da velocidade de extrusão é indispensável para garantir a estabilidade dimensional e a qualidade final do filamento.

Assim, os estudos analisados reforçam que o processo de extrusão de termoplásticos reciclados, em especial o PET, envolve um conjunto de parâmetros críticos que devem ser monitorados e ajustados em tempo real. A integração entre controle térmico, tração e resfriamento é determinante para garantir a qualidade do filamento, possibilitando que materiais reciclados apresentem desempenho comparável ao dos filamentos comerciais.

2.4 Sensoriamento Óptico para Controle de Qualidade

Durante o processo de extrusão de filamentos para impressão 3D, a manutenção do diâmetro constante é um dos fatores mais críticos para garantir a qualidade e a confiabilidade das impressões (WOERN; MCCUE; VERNON-ROE, 2021). Variações na espessura do filamento resultam em inconsistências na deposição do material e, consequentemente, em falhas dimensionais nas peças produzidas. Assim, o monitoramento em tempo real do diâmetro torna-se essencial para assegurar a uniformidade do produto final.

Nesse contexto, sensores ópticos têm se mostrado uma alternativa viável, precisa e de baixo custo para essa finalidade. O princípio de funcionamento baseia-se na interrupção ou variação da intensidade de um feixe de luz infravermelha quando o filamento passa entre um emissor (LED IR) e um receptor (fototransistor). A variação detectada é correlacionada à espessura do filamento, permitindo medir o diâmetro em tempo real e possibilitando a aplicação de correções automáticas no processo de tração ou resfriamento. Esse método é amplamente empregado em dispositivos industriais de detecção óptica e aparece em pesquisas acadêmicas sobre controle dimensional (COSTA, 2015; WOERN; MCCUE; VERNON-ROE, 2021).

Entre os estudos relevantes, Woern, McCue e Vernon-Roe (2021) apresentaram o RecycleBot, uma extrusora de código aberto destinada à produção de filamento reciclado, que utiliza um sensor óptico para medir o diâmetro e ajustar a velocidade do motor de tração. Essa aplicação demonstra a eficiência dos métodos ópticos em contextos de reciclagem distribuída e de baixo custo, aproximando a automação industrial de comunidades *maker* e projetos acadêmicos.

O uso de sensores ópticos também se integra naturalmente a sistemas de controle em malha fechada, nos quais um microcontrolador ajusta continuamente a operação do sistema com base no diâmetro medido. Nesse cenário, destaca-se a utilização de controladores PID, capazes de regular automaticamente a velocidade de tração a fim de manter o diâmetro dentro de limites especificados. Costa (2015) ressalta que esse tipo de controle é essencial para compensar oscilações térmicas e variações mecânicas durante a extrusão, contribuindo para a estabilidade

dimensional do filamento.

Soluções baseadas nesse princípio são adotadas também em projetos de código aberto, como os do movimento *Precious Plastic* (2024), que buscam democratizar tecnologias de reciclagem. Assim, a integração entre sensoriamento óptico e controle automatizado representa um avanço significativo na extrusão de termoplásticos reciclados, permitindo combinar qualidade técnica, eficiência e responsabilidade ambiental.

Com o objetivo de assegurar a consistência do processo, adotou-se neste trabalho o sensoriamento óptico como método de monitoramento do diâmetro do filamento. Essa técnica, amplamente validada na literatura e fundamentada em Costa (2015) e Woern, McCue e Vernon-Roe (2021), integra-se ao sistema de controle em tempo real desenvolvido no projeto, atuando como elemento essencial para garantir a uniformidade e a qualidade dimensional do filamento produzido a partir de material reciclado.

2.5 Automação com Arduino em Sistemas de Reciclagem

O uso de microcontroladores como o Arduino Nano é amplamente difundido em projetos de automação e prototipagem rápida. De acordo com Oliveira et al. (2018), o Arduino constitui uma plataforma de prototipagem eletrônica aberta, de baixo custo e fácil utilização, mesmo para usuários com pouca experiência em eletrônica. Essa combinação de acessibilidade e flexibilidade faz com que a plataforma seja amplamente empregada em projetos acadêmicos, educacionais e de pesquisa aplicada, como o controle de extrusoras de filamento reciclado desenvolvido neste trabalho.

Em sistemas automatizados de extrusão, o Arduino Nano pode ser utilizado para ler sensores (como termistores, sensores ópticos e sensores de fim de curso), controlar atuadores (como resistências de aquecimento e motores) e implementar algoritmos de controle proporcional ou PID. Essa integração permite ajustar dinamicamente variáveis críticas, como temperatura e velocidade de tração, assegurando a estabilidade térmica e dimensional do processo (FERREIRA, 2024). O uso desse tipo de microcontrolador oferece uma solução flexível, acessível e eficiente, adequada para a experimentação e validação de sistemas de controle em escala laboratorial, mantendo a confiabilidade necessária para aplicações de manufatura aditiva.

Além disso, a utilização de displays LCD (*Liquid Crystal Display*) e interfaces I2C (*Inter-Integrated Circuit*) facilita a visualização de dados em tempo real, permitindo

ao operador acompanhar variáveis importantes durante o funcionamento do sistema. Essa abordagem, amplamente documentada em projetos didáticos e aplicados (OLIVEIRA et al., 2018; FERREIRA, 2024), demonstra a eficiência e o baixo custo dessa solução, aprimorando a interação com o sistema e reduzindo a necessidade de intervenções manuais constantes.

No contexto deste trabalho, o Arduino Nano foi adotado como a unidade de controle principal, responsável pela aquisição de dados, processamento das informações e acionamento dos atuadores que compõem o sistema. Em conjunto, o display LCD 16x2 e a interface I2C atuam como elementos de visualização e interação, permitindo que o operador acompanhe em tempo real variáveis como temperatura, diâmetro do filamento e velocidade de tração. Essa integração entre controle e interface possibilita um sistema mais intuitivo, confiável e funcional, reforçando a proposta de desenvolver uma solução de automação acessível e eficiente para o reaproveitamento de materiais termoplásticos reciclados.

3 DESENVOLVIMENTO

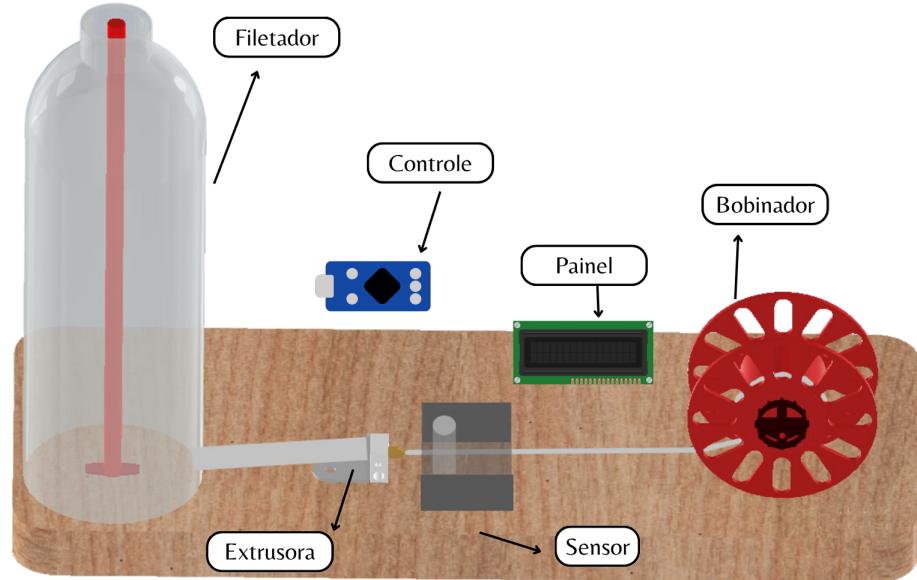
Este capítulo descreve as etapas de concepção, construção e implementação do protótipo proposto, abrangendo desde o desenvolvimento do sensor óptico de medição do diâmetro até a montagem completa da estação de reciclagem responsável por transformar garrafas PET em filamento para impressoras 3D. São detalhadas as decisões de projeto, os testes realizados e os materiais empregados na construção do sistema, além da arquitetura de controle utilizada.

3.1 Protótipo

Com o objetivo de produzir filamentos de boa qualidade a partir da reciclagem de garrafas PET, foi desenvolvido um protótipo funcional capaz de realizar a extrusão do material, permitindo sua utilização em impressoras 3D do tipo FDM para a fabricação de peças. O sistema foi projetado para integrar as etapas de filetamento, fusão, controle dimensional e bobinamento, possibilitando a transformação direta de garrafas descartadas em filamento contínuo de 1,75 mm de diâmetro, valor padrão para impressoras 3D de baixo custo.

A Figura 3.1 apresenta o modelo simplificado do protótipo desenvolvido. O processo inicia-se com o corte longitudinal da garrafa PET em forma de fita, realizado pelo módulo filetador. Em seguida, a fita é conduzida à extrusora, onde é aquecida até atingir seu ponto de fusão e transformada em filamento cilíndrico. Após a saída do bico extrusor, o filamento, ainda maleável, passa pela região de leitura do sensor óptico de diâmetro, que realiza medições contínuas de sua espessura. Esses dados são enviados ao microcontrolador, responsável por ajustar automaticamente a velocidade do motor de tração, garantindo um diâmetro uniforme ao longo de todo o processo.

Figura 3.1 – Protótipo funcional do sistema extrusor de filamento PET.



Fonte: Autor

O filamento extrudado é, então, conduzido ao módulo bobinador, responsável por realizar o enrolamento uniforme do filamento em um carretel, facilitando seu armazenamento e o posterior uso na impressora 3D. A integração entre os módulos foi planejada de forma a assegurar a sincronia entre o aquecimento, o tracionamento e o controle dimensional, promovendo a estabilidade do processo e a repetibilidade dos resultados.

Conforme destacado por Somenzi e Filippetto (2023), a largura da fita proveniente do filetador deve ser superior ao diâmetro final desejado, pois, durante a extrusão, o material sofre redução da seção transversal em função da tração e da temperatura. Essa relação depende de fatores como a espessura da parede da garrafa, a velocidade de tracionamento e o perfil térmico da extrusora, parâmetros que foram ajustados empiricamente neste trabalho.

Dessa forma, o protótipo não foi concebido apenas como uma bancada experimental, mas como um sistema funcional capaz de transformar garrafas PET em filamento com qualidade adequada para aplicações práticas em manufatura aditiva. Essa abordagem permitiu avaliar a viabilidade técnica do processo, a estabilidade dimensional do filamento produzido e o desempenho do sistema de controle implementado.

Nas seções a seguir, serão detalhados o desenvolvimento dos componentes que compõem o sistema proposto, bem como as metodologias empregadas para seu funcionamento.

3.2 Componentes eletroeletrônicos

A seleção dos componentes utilizados na construção do protótipo foi feita levando em consideração os requisitos do projeto quanto à automação, controle térmico, acionamento de motores e interação com o usuário. A Tabela 3.1 apresenta os principais itens utilizados no projeto e suas respectivas especificações técnicas.

Tabela 3.1 – Lista de componentes utilizados no sistema.

Componente	Especificação
Ponte H	L298N (HW-95)
Motor	12V 60RPM (GA25-370)
Microcontrolador	Arduino Nano (Mega328P)
Conversor DC-DC	LM2596 (HW-411)
Bloco aquecedor	MK8
Termistor	NTC 100k Ohms
Cartucho aquecedor	Hotend 40W 12V
Transistor FET	Mosfet IRLZ44N
LED emissor	Infravermelho 5mm
Fototransistor	3mm 450–1080 nm (BPW85C)
Fonte de alimentação	Bivolt 12V 10A (LK-FT120-10A)
Capacitor eletrolítico	470µF
Capacitor cerâmico	Disco 100nF
Resistor	10kΩ, 1kΩ, 220Ω e 330Ω
Botões	-
Display	LCD 16x2

Fonte: Autor

Os componentes foram selecionados principalmente com base em sua ampla disponibilidade no mercado e em seu baixo custo, características essenciais para projetos de caráter educacional e experimental, conforme destacam Baden, Drummond e Vos (2019), Woern, McCue e Vernon-Roe (2021) e Ferreira (2024). O uso do Arduino Nano, por exemplo, é amplamente adotado em projetos de código aberto devido à sua facilidade de programação, confiabilidade e integração com diferentes sensores e atuadores.

Os dispositivos empregados no protótipo, como a ponte H L298N, o transistor MOSFET IRLZ44N e o relé HW-482, possibilitam o controle eficiente de motores e elementos de aquecimento, enquanto o conversor DC-DC LM2596 garante a estabilidade no fornecimento elétrico em diferentes níveis de tensão. Já o sistema óptico, composto por um LED emissor de luz infravermelha e um fototransistor receptor, constitui uma solução prática e eficaz para o

monitoramento do diâmetro do filamento, conforme apontam Dertinger et al. (2020) e Mikula et al. (2021).

A utilização de componentes simples, reaproveitados ou de baixo custo no presente trabalho também está alinhada aos princípios defendidos por iniciativas como o projeto *Precious Plastic* (2024), que incentiva o desenvolvimento de máquinas acessíveis voltadas à reciclagem local e descentralizada de plásticos.

3.3 Módulos do Sistema Extrusor de Filamento PET

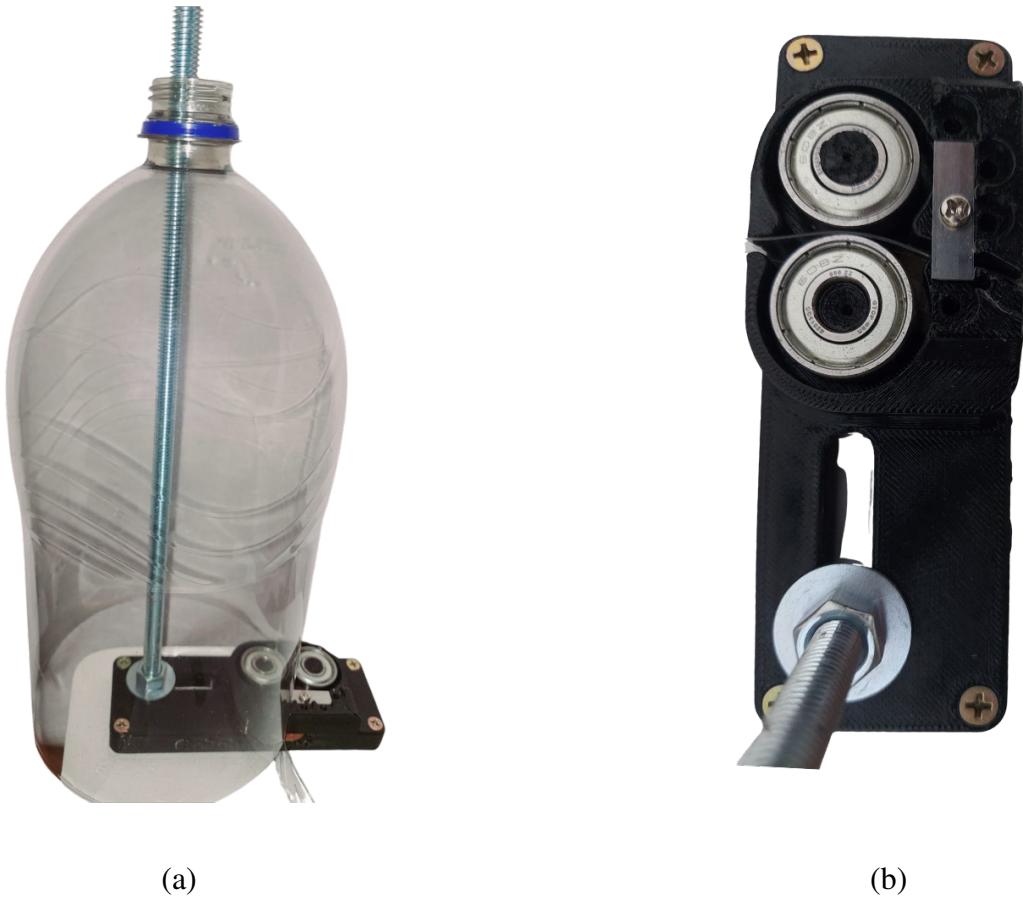
O protótipo foi estruturado em módulos funcionais interdependentes, projetados para operar de forma integrada na transformação de garrafas PET em filamento destinado a impressoras 3D. Nas subseções seguintes, cada módulo é descrito individualmente, de modo a detalhar suas funções e favorecer a compreensão global do sistema.

3.3.1 Filetador

O filetador é o módulo responsável por transformar a garrafa PET em uma fita plástica contínua, que servirá como matéria-prima para o processo de extrusão. O modelo desenvolvido (Figura 3.2a) foi construído com base em uma estrutura impressa em 3D, composta por dois rolamentos, uma lâmina de apontador de lápis, porcas e uma haste rosqueada utilizada para fixar e girar a garrafa durante o corte.

Os rolamentos têm a função de guiar a parede da garrafa em direção à lâmina (Figura 3.2b), permitindo o corte contínuo e uniforme do material. Dessa forma, praticamente toda a superfície cilíndrica da garrafa pode ser convertida em uma fita plástica, aproveitando ao máximo o material reciclado.

Figura 3.2 – Filetador: (a) visão geral com garrafa fixada na haste rosada, direcionada para o corte; (b) detalhe do sistema de corte com rolamentos e lâmina de aço ajustável.



Fonte: Autor

Quanto à largura do filete, Somenzi e Filipetto (2023) recomendam o valor de aproximadamente 10 mm, por ser superior ao diâmetro final desejado de 1,75 mm. Essa diferença é necessária, pois, ao ser aquecido e tracionado durante a extrusão, o filete sofre uma redução da seção transversal até atingir o diâmetro padrão do filamento. Os autores destacam que a largura ideal deve ser determinada experimentalmente, pois a relação entre as dimensões depende de fatores como a espessura da parede da garrafa PET, que influencia diretamente a espessura do filete produzido, a temperatura de extrusão, a velocidade de tracionamento do filamento e o diâmetro do bico extrusor.

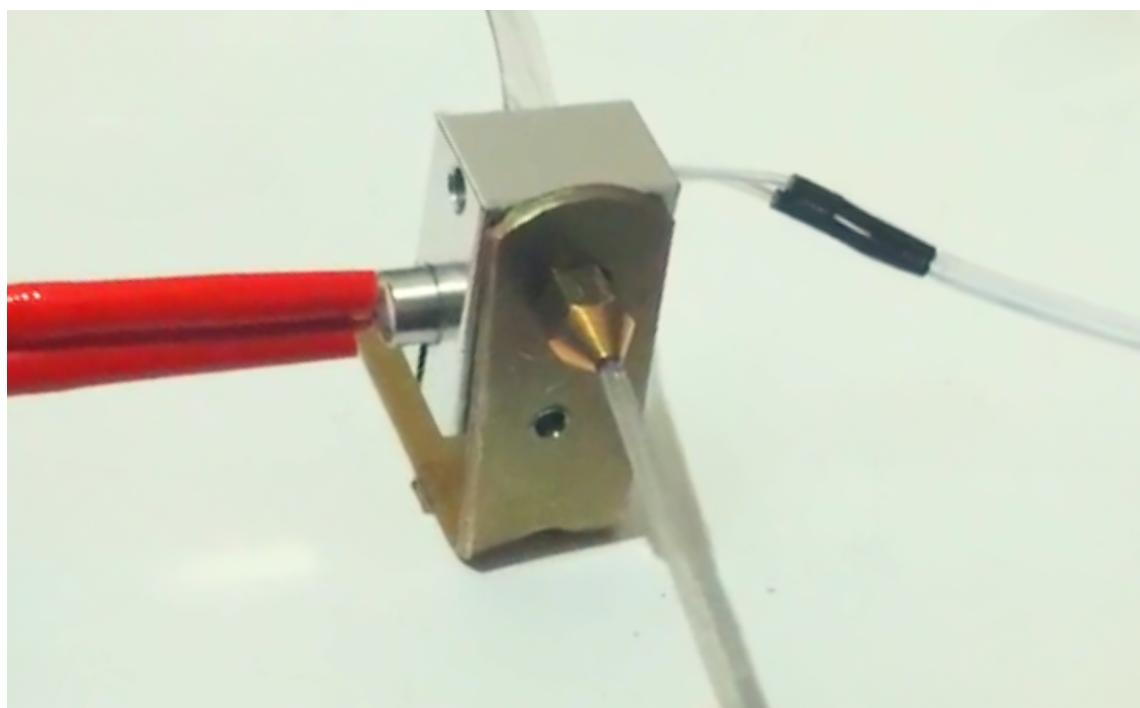
Com base nesses parâmetros, adotou-se inicialmente no protótipo a largura de 10 mm para o filete, valor que apresentou bons resultados quanto à estabilidade do processo de extrusão e à obtenção de filamentos com diâmetro final uniforme.

3.3.2 Extrusora

A extrusora tem como função aquecer e moldar a fita de PET proveniente do filetador, fundindo o material e transformando-o em um filamento adequado para uso em impressoras 3D. O processo ocorre por meio do aquecimento controlado do polímero, que é conduzido até um bico extrusor responsável por definir o diâmetro final do filamento.

A estrutura do módulo é composta por um bloco de alumínio, no qual estão acoplados um cartucho de aquecimento de 40 W, um termistor NTC de $100\text{ k}\Omega$ e um bico de impressora 3D do tipo MK8. Inicialmente, foi utilizado um bico com diâmetro interno de 2 mm, o que possibilitou avaliar o comportamento do fluxo do material fundido e o efeito da tração sobre a redução do diâmetro do filamento. A montagem física desses componentes é apresentada na Figura 3.3, que ilustra o conjunto formado pelo bloco aquecedor, cartucho de aquecimento, termistor e bico de saída.

Figura 3.3 – Montagem da extrusora com bloco aquecedor, cartucho de aquecimento, termistor e bico de saída.



Fonte: Autor

O controle térmico é realizado por um microcontrolador Arduino Nano, que monitora a temperatura do bloco por meio do termistor e aciona o cartucho de aquecimento através de um transistor MOSFET IRLZ44N. Essa configuração permite ajustar a potência aplicada ao

aquecedor conforme a diferença entre a temperatura medida e o valor de referência definido no código de controle, garantindo estabilidade térmica durante o processo de extrusão.

Embora o ponto de fusão do PET se situe em torno de 250°C, conforme referenciado por Mikula et al. (2021), optou-se neste trabalho por utilizar uma temperatura de extrusão mais baixa, próxima de 220°C. Essa escolha tem como objetivo reduzir a degradação térmica do material reciclado e melhorar a estabilidade do fluxo durante o processo de extrusão. Estudos como os de Woern, McCue e Vernon-Roe (2021) indicam que temperaturas na faixa de 210 a 230°C são adequadas para sistemas de extrusão de pequena escala, como o desenvolvido neste protótipo, enquanto Shaqour et al. (2021) ressaltam que a redução controlada da temperatura favorece a uniformidade do filamento ao limitar variações bruscas na viscosidade do polímero fundido.

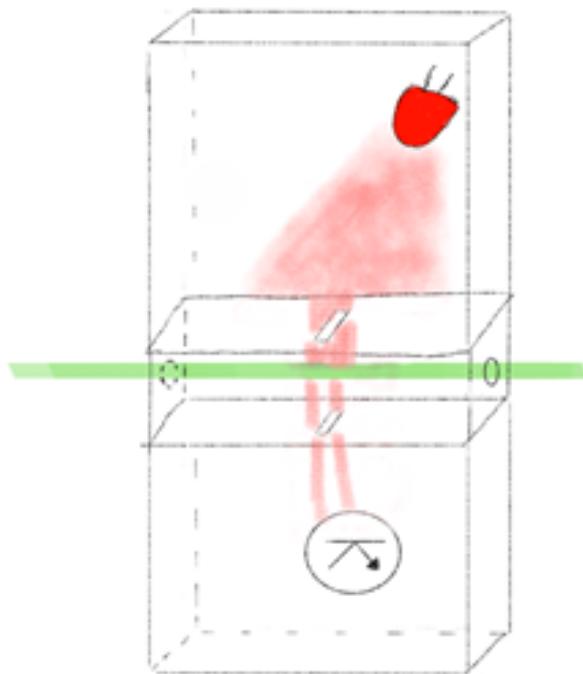
A montagem mecânica da extrusora foi projetada para permitir fácil desmontagem e manutenção, possibilitando a substituição de componentes, como o bico ou o cartucho de aquecimento. Essa abordagem modular facilita o ajuste de parâmetros experimentais, como o controle de fluxo e a calibração do sensor de temperatura, além de favorecer futuras melhorias no desempenho térmico do sistema.

3.4 Sensor de Diâmetro

O sensor óptico de medição de diâmetro tem como função monitorar, em tempo real, a espessura do filamento extrudado. Esse acompanhamento da espessura do filamento é essencial para garantir a uniformidade dimensional do material, evitando variações que podem causar entupimentos do bico da impressora, falhas de deposição ou deformações nas peças impressas.

O princípio de funcionamento do sensor baseia-se na interrupção de um feixe de luz infravermelha quando o filamento atravessa a região entre o emissor e o receptor, conforme ilustrado na Figura 3.4. O sistema opera como uma barreira óptica: o emissor (LED infravermelho) projeta um feixe contínuo em direção ao fototransistor receptor, e a passagem do filamento bloqueia parte dessa luz. A intensidade luminosa captada varia de acordo com o diâmetro do filamento, sendo convertida em um sinal elétrico, posteriormente processado pelo microcontrolador.

Figura 3.4 – Conceito inicial do sensor que fundamentou o desenvolvimento do projeto.

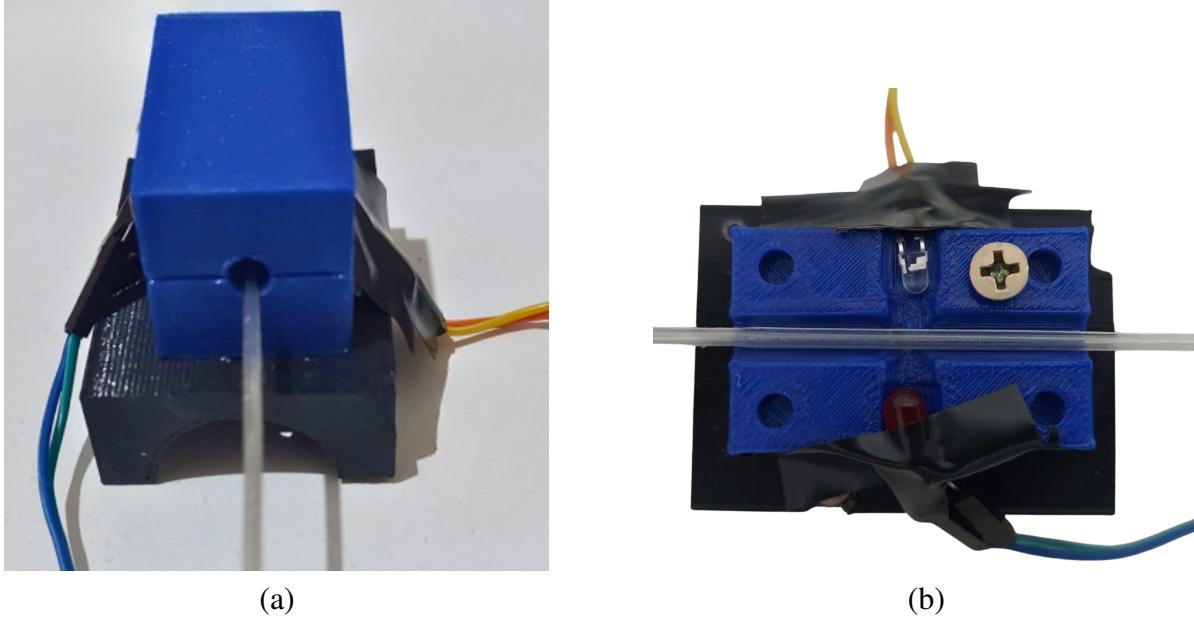


Fonte: Autor

Inicialmente, foi testado um sensor baseado em LDR (*Light Dependent Resistor*). No entanto, esse componente foi descartado devido à sua baixa velocidade de resposta e à elevada sensibilidade a variações térmicas, fatores críticos considerando que o processo opera entre 220°C e 250°C. Assim, optou-se pelo uso de um fototransistor, cuja resposta é significativamente mais rápida e estável, proporcionando maior precisão na medição (HOROWITZ; HILL, 2015, p. 832–833).

A estrutura física do sensor foi projetada em software CAD (*Computer Aided Design*) e impressa em 3D, garantindo o alinhamento correto entre o LED emissor e o fototransistor receptor, além de minimizar interferências externas de luz. A Figura 3.5 apresenta o módulo montado, destacando tanto o invólucro externo quanto o arranjo interno dos componentes.

Figura 3.5 – Sensor de diâmetro: (a) vista externa do invólucro impresso em 3D; (b) vista interna com o LED e o fototransistor alinhados.



Fonte: Autor

Para a calibração do sensor, foram realizadas medições experimentais associando a tensão de saída do fototransistor ao diâmetro real do filamento, obtido por meio de paquímetro digital. Segundo Fraden (2010), fotodiodos e fototransistores apresentam resposta aproximadamente linear da corrente fotoinduzida em função da intensidade luminosa incidente, o que permite o uso de modelos de calibração lineares. Assim, os dados coletados foram ajustados por regressão linear, resultando na Equação 3.1:

$$d = a V_{\text{out}} + b \quad (3.1)$$

em que d representa o diâmetro estimado do filamento (mm), V_{out} corresponde à tensão de saída do sensor (V), e a e b são coeficientes determinados experimentalmente.

O valor calculado de d é utilizado pelo microcontrolador para ajustar dinamicamente a velocidade do motor de tração, mantendo o diâmetro próximo ao valor de referência de 1,75 mm. O sistema funciona como uma malha fechada simples, reagindo automaticamente às variações detectadas: filamento mais espesso implica redução da velocidade de tração; filamento mais fino implica aumento.

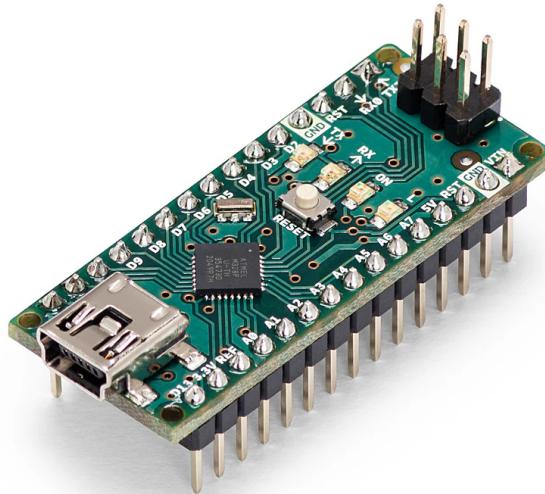
Sensores ópticos desse tipo são amplamente empregados em sistemas de fabricação de filamentos caseiros e de baixo custo, sendo citados por diversos autores da área Costa (2015),

Somenzi e Filipetto (2023). Apesar de sua simplicidade, o módulo desenvolvido demonstrou desempenho satisfatório na estabilização do processo, contribuindo para a uniformidade do filamento produzido.

3.4.1 Controle (Microcontrolador Arduino)

O controle central do sistema é realizado por um microcontrolador Arduino Nano, responsável por integrar e coordenar o funcionamento dos diversos módulos do protótipo. Cabe a ele a leitura do sensor óptico de diâmetro, o monitoramento da temperatura da extrusora e o acionamento dos atuadores, como o cartucho de aquecimento e o motor de tração. A Figura 3.6 apresenta o microcontrolador utilizado, que se destaca por seu tamanho reduzido e facilidade de integração com diversos sensores e periféricos.

Figura 3.6 – Ilustração do microcontrolador Arduino Nano utilizado no sistema de controle.



Fonte: Arduino Store (2024)

O sinal analógico proveniente do sensor de diâmetro, descrito na Seção 3.4, é convertido em um valor estimado de diâmetro d conforme a Equação 3.1. Esse valor é então comparado ao diâmetro de referência d_{ref} , definido como 1,75 mm. Segundo Nise (2011), em sistemas de controle, o erro é obtido como a diferença entre o valor desejado e o valor medido, sendo expresso por:

$$e(t) = d_{ref} - d \quad (3.2)$$

Com base nesse erro, a velocidade do motor de tração pode ser ajustada por uma lei de controle proporcional simplificada. Conforme a teoria clássica de controle, a ação proporcional relaciona diretamente o atuador ao erro instantâneo (NISE, 2011). Dessa forma, o valor atualizado da velocidade é dado por:

$$v_m(t) = v_0 + K_p e(t) \quad (3.3)$$

em que v_0 representa a velocidade nominal de tração, K_p é o ganho proporcional determinado experimentalmente e $e(t)$ é o erro calculado em tempo real. Essa ação é implementada digitalmente por modulação por largura de pulso (PWM) aplicada ao driver do motor (L298N). Em princípio, quando o diâmetro medido excede o valor desejado (erro positivo), a velocidade é reduzida, enquanto diâmetros menores elevam a velocidade.

Embora essa estratégia represente o funcionamento ideal do controle proporcional, sua aplicação prática é discutida no Capítulo 4. Durante os testes, oscilações rápidas no sinal do sensor comprometeram a estabilidade do ajuste automático da velocidade, motivo pelo qual essa forma de controle não foi empregada nos ensaios finais.

O controle térmico da extrusora é realizado por um segundo laço de controle, também gerenciado pelo Arduino Nano. A leitura da temperatura é feita por meio de um termistor NTC de $100\text{ k}\Omega$, cuja resistência varia com a temperatura. A conversão entre resistência e temperatura é realizada de forma indireta pela biblioteca `SimpleThermistor.h`, que implementa internamente o modelo de Steinhart–Hart, amplamente utilizado para a caracterização precisa de termistores NTC (ILX Lightwave Corporation, 2006). Assim, o microcontrolador recebe o valor de temperatura já processado, garantindo maior confiabilidade na malha térmica.

Com a temperatura medida T_{meas} e o valor de referência T_{ref} (aproximadamente 220°C), o sistema utiliza um controlador PID (*Proportional-Integral-Derivative*) para ajustar a potência do aquecimento. A forma contínua do controlador PID, conforme apresentada por Nise (2011), é expressa por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

em que $e(t) = T_{\text{ref}} - T_{\text{meas}}$ é o erro térmico, e K_p , K_i e K_d correspondem aos ganhos proporcional, integral e derivativo. O sinal de controle $u(t)$ é convertido em um pulso PWM

aplicado ao transistor MOSFET IRLZ44N, que regula a potência fornecida ao cartucho de aquecimento de 40 W.

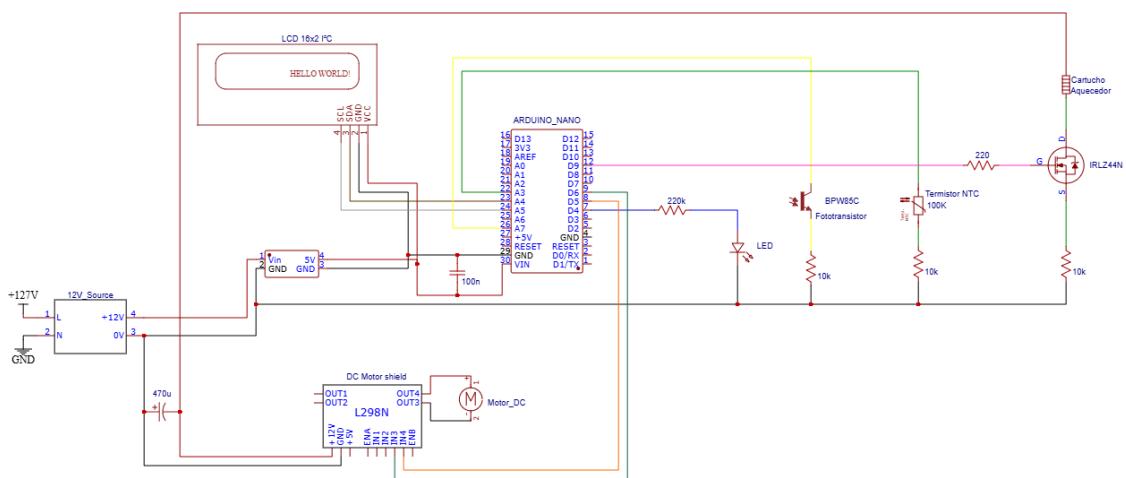
Esse método permite ajustar automaticamente a energia térmica entregue à extrusora, garantindo que a temperatura permaneça estável durante o processo. Os parâmetros do PID foram ajustados empiricamente a partir de testes experimentais, buscando minimizar oscilações, acelerar o atingimento do regime permanente e assegurar a fusão homogênea do PET reciclado.

As principais variáveis de operação, temperatura da extrusora, diâmetro estimado do filamento e estado do motor, são exibidas em tempo real no *display LCD I2C*. Essa interface facilita o acompanhamento do processo e permite a realização de ajustes manuais, garantindo maior controle e segurança durante os testes.

O uso do Arduino Nano mostrou-se adequado para o protótipo por sua versatilidade, baixo custo e ampla disponibilidade de bibliotecas. Essa plataforma possibilitou a implementação de uma arquitetura de controle híbrida, combinando laços independentes de temperatura e diâmetro, assegurando a estabilidade térmica e dimensional do filamento durante todo o processo de extrusão.

A organização eletrônica do protótipo foi reunida em um esquemático eletrônico completo do sistema, apresentado na Figura 3.7. Esse diagrama reúne as conexões essenciais entre o Arduino Nano, o sensor óptico de diâmetro, o termistor da extrusora, o driver do motor (L298N), o circuito de aquecimento controlado por MOSFET e o módulo de alimentação baseado no conversor DC-DC LM2596.

Figura 3.7 – Esquemático eletrônico do sistema de controle do protótipo.



Fonte: Autor

O esquema foi elaborado no software EasyEDA, organizando os blocos funcionais de forma modular. A configuração inclui o divisor resistivo do termistor, o fototransistor utilizado no sensor óptico, o transistor MOSFET IRLZ44N responsável pelo acionamento térmico e as interfaces PWM e de direção utilizadas no controle do motor de tração. Essa integração eletrônica permite que o microcontrolador execute simultaneamente as leituras, cálculos e ajustes necessários ao processo de extrusão do filamento.

3.4.2 Painel (Display LCD)

O painel de controle do sistema é responsável por exibir, em tempo real, as principais variáveis monitoradas e controladas durante o processo de extrusão. Para isso, foi utilizado um *display* LCD 16x2 com interface I^2C , escolhido por sua simplicidade de uso e número reduzido de conexões necessárias com o microcontrolador Arduino Nano.

O módulo LCD foi configurado para exibir na primeira linha a temperatura da extrusora e, na segunda, o diâmetro estimado do filamento, juntamente com o estado do motor de tração. Essa disposição permite acompanhar de forma rápida e intuitiva as condições de operação do sistema. A Figura 3.8 mostra o *display* utilizado, montado sobre um suporte impresso em 3D que facilita a visualização durante os testes.

Figura 3.8 – Display com suporte.



Fonte: Autor

A comunicação entre o Arduino e o *display* ocorre via barramento serial I²C, que utiliza apenas dois pinos de dados: SDA (Serial Data) e SCL (Serial Clock). Essa interface reduz significativamente a quantidade de fios necessários em comparação ao modo paralelo, simplificando a montagem e evitando erros de conexão. Além disso, a biblioteca LiquidCrystal_I2C.h foi utilizada para gerenciar o envio de informações ao *display*, permitindo a atualização contínua dos valores de temperatura e diâmetro conforme as leituras do sistema de sensores.

Durante o funcionamento, o *display* apresenta mensagens de estado que auxiliam na condução do processo, como indicações de aquecimento, temperatura estabilizada, motor em operação ou desligado. Essa interface de supervisão é especialmente útil em protótipos experimentais, nos quais ajustes manuais de parâmetros são frequentemente necessários.

O uso do *display* LCD como painel de controle permitiu criar uma interface de fácil compreensão e baixo custo, sem a necessidade de sistemas gráficos complexos. Dessa forma, é possível acompanhar o comportamento do sistema de forma contínua e segura, garantindo maior controle sobre a qualidade do filamento produzido e facilitando a condução dos testes experimentais.

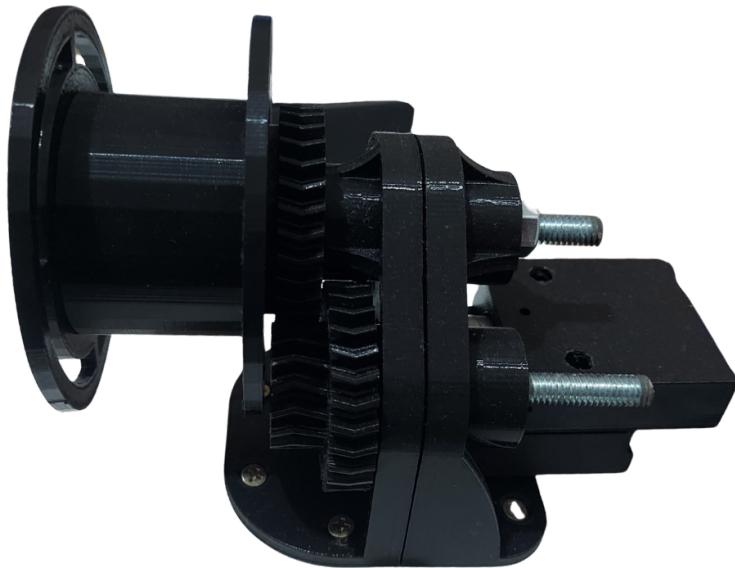
3.4.3 Bobinador

O bobinador é o módulo responsável por tracionar e enrolar o filamento produzido, garantindo que o material seja coletado de forma contínua e com tensão uniforme. Seu funcionamento é essencial para manter a regularidade do diâmetro, uma vez que a velocidade de tração influencia diretamente o estiramento e a espessura final do filamento.

O sistema é composto por um motor de corrente contínua de 12 V (modelo GA25-370), acoplado a um conjunto de engrenagens redutoras que aumentam o torque e reduzem a rotação, permitindo um movimento suave e controlado do carretel. O motor é acionado pelo microcontrolador Arduino Nano por meio de uma ponte H L298N, que possibilita o controle bidirecional e a modulação por largura de pulso (PWM) da velocidade de rotação. Essa configuração permite ajustar a tração em tempo real conforme o diâmetro medido pelo sensor óptico.

A Figura 3.9 apresenta o módulo do bobinador montado, destacando o suporte impresso em 3D, o eixo do carretel e o conjunto de engrenagens de redução.

Figura 3.9 – Suporte do motor com engrenagens de redução e carretel



Fonte: Autor

O controle de velocidade do motor é sincronizado com a leitura do sensor de diâmetro (Seção 3.4), formando uma malha fechada em que o Arduino ajusta a tração com base nas variações dimensionais do filamento. Quando o diâmetro medido é superior ao valor de referência (1,75 mm), o sistema reduz a velocidade de tração; quando o diâmetro é inferior, a velocidade aumenta. Esse ajuste contínuo mantém o filamento dentro da faixa especificada e evita quebras ou estiramentos excessivos.

Além da função de tracionamento, o módulo também atua como um sistema de armazenamento, permitindo que o filamento seja enrolado de forma organizada em um carretel. O controle da tensão durante o enrolamento é obtido pelo equilíbrio entre a velocidade do motor e o atrito mecânico do sistema, o que garante a deposição uniforme das camadas e evita sobreposições ou afrouxamentos no bobinado.

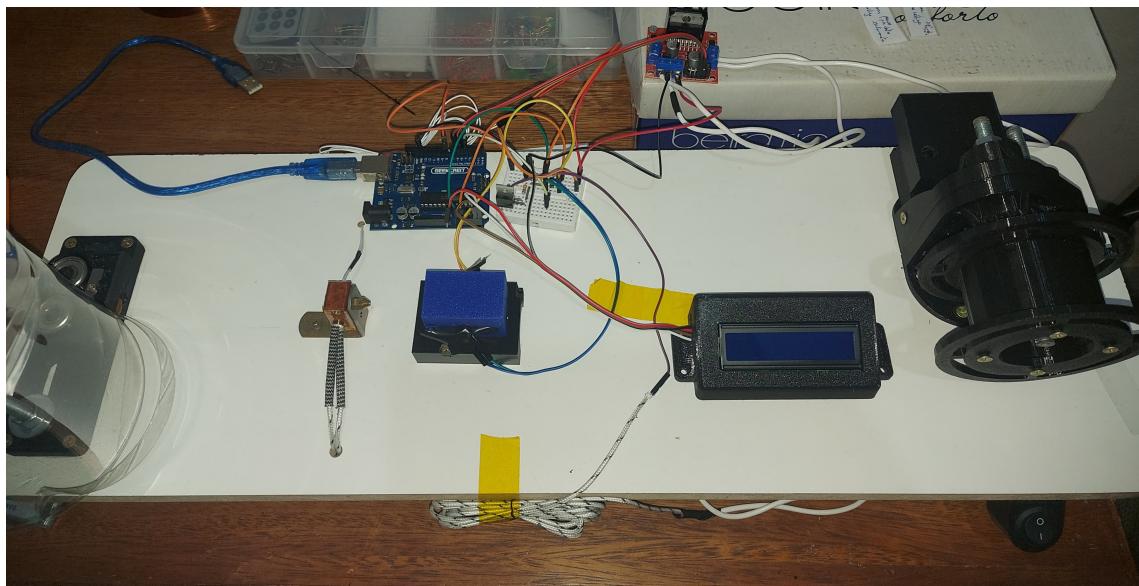
O design do suporte e das engrenagens foi desenvolvido em software *CAD* e impresso em 3D, permitindo fácil substituição de componentes e ajustes de posicionamento. Essa modularidade favorece o uso do sistema em experimentos futuros, possibilitando testar diferentes motores, relações de redução e diâmetros de carretel de acordo com a aplicação desejada.

4 TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos testes realizados com o protótipo desenvolvido. Os experimentos tiveram como objetivo avaliar o desempenho do sistema de extrusão e do controle de diâmetro aplicado ao filamento produzido a partir de garrafas PET recicladas. A análise contempla o comportamento térmico da extrusora, a leitura óptica do sensor e a uniformidade do filamento obtido, relacionando o desempenho prático às etapas estruturais e eletrônicas que compõem o sistema.

A Figura 4.1 apresenta uma das primeiras versões funcionais do protótipo. Nessa etapa inicial, todos os componentes eletrônicos, incluindo o microcontrolador, a placa de potência e o circuito do sensor, encontravam-se dispostos na superfície da base para facilitar o acesso durante os testes preliminares. Essa configuração permitiu validar individualmente o aquecimento da extrusora, o comportamento do sensor e a lógica de controle implementada.

Figura 4.1 – Primeira versão do protótipo utilizada nos testes iniciais de funcionamento.

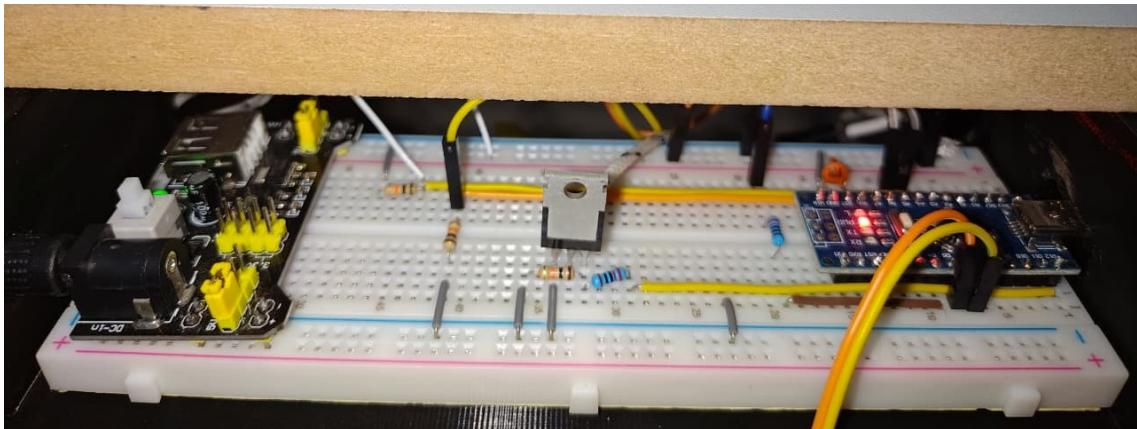


Fonte: Autor

Após essa fase inicial, o circuito passou por uma reorganização estrutural. Como mostrado na Figura 4.2, a maior parte dos componentes eletrônicos foi realocada para a parte inferior da base do protótipo, permanecendo expostos na superfície apenas os módulos essenciais para o processo: extrusora, sensor de diâmetro e display LCD. Essa mudança teve como objetivo liberar espaço na parte superior para acomodar o filamento, melhorar a visualização do processo

e reduzir as interferências causadas por cabos e conexões durante os testes.

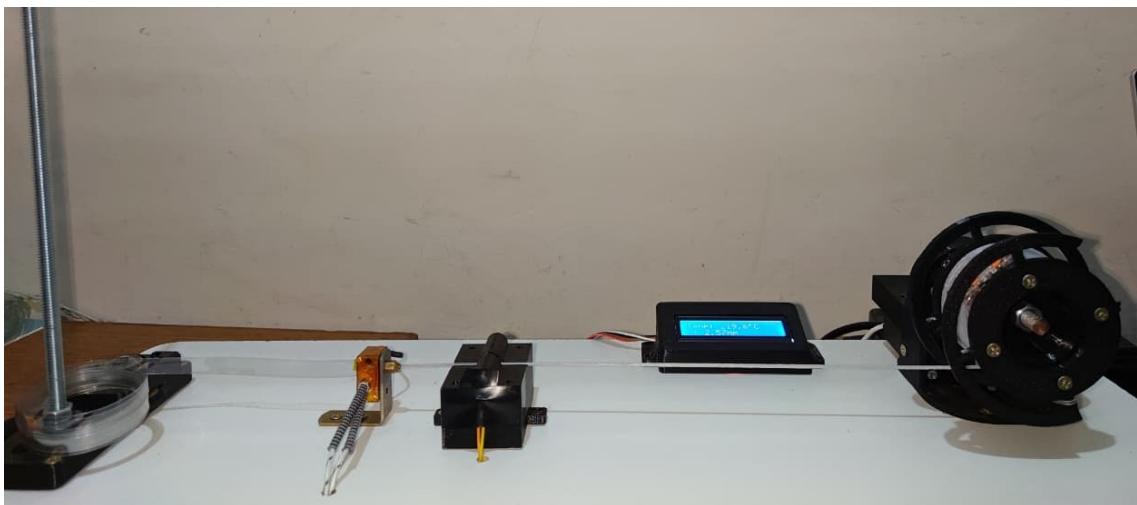
Figura 4.2 – Reorganização intermediária: circuito eletrônico realocado para a parte inferior do protótipo.



Fonte: Autor

Por fim, a Figura 4.3 apresenta a versão final do protótipo, resultado da reorganização completa dos componentes e do refinamento do arranjo estrutural. Essa versão mais limpa e organizada do sistema, derivada da montagem inicial da Figura 4.1, foi utilizada nos ensaios definitivos de extrusão e controle do diâmetro. Nela, os módulos foram fixados de forma alinhada e funcional, garantindo estabilidade mecânica, melhor distribuição do fluxo de filamento e uma área de testes mais adequada para medições.

Figura 4.3 – Versão final do protótipo, com organização limpa dos módulos e circuito acomodado na parte inferior.



Fonte: Autor

A comparação entre as versões evidencia a evolução progressiva do projeto, passando de uma configuração experimental e aberta para uma montagem mais estável, organizada e adequada para testes completos de extrusão. Essa evolução estrutural foi essencial para permitir análises mais precisas e confiáveis nos experimentos apresentados nas seções seguintes. Ressalta-se que o circuito eletrônico foi mantido na protoboard devido ao caráter experimental do protótipo e ao tempo reduzido disponível para o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCB, *Printed Circuit Board*). Essa decisão permitiu realizar ajustes rápidos durante os testes e favorecer a flexibilidade necessária para validar os módulos eletrônicos ao longo do processo.

4.1 Testes de Controle de Temperatura

Todos os testes experimentais foram realizados em ambiente controlado, com temperatura ambiente entre 24 °C e 27 °C. As aquisições de dados foram registradas pelo microcontrolador Arduino Nano com taxa de amostragem de 2 Hz (intervalo de 500 ms), correspondendo ao mesmo intervalo utilizado no código-fonte apresentado no Apêndice B. Cada ensaio teve duração aproximada de 8 a 12 minutos, tempo suficiente para a estabilização térmica do bloco aquecedor e para a observação da variação do diâmetro ao longo da extrusão contínua.

A calibração do sensor óptico e as medições de diâmetro foram realizadas com o filamento ainda morno, porém parcialmente solidificado, o que garantiu repetibilidade das leituras e reduziu efeitos de deformação térmica. Todas as amostras de filamento reciclado analisadas foram obtidas sob condições idênticas de aquecimento, velocidade nominal de tração e taxa de resfriamento, assegurando consistência entre os ensaios.

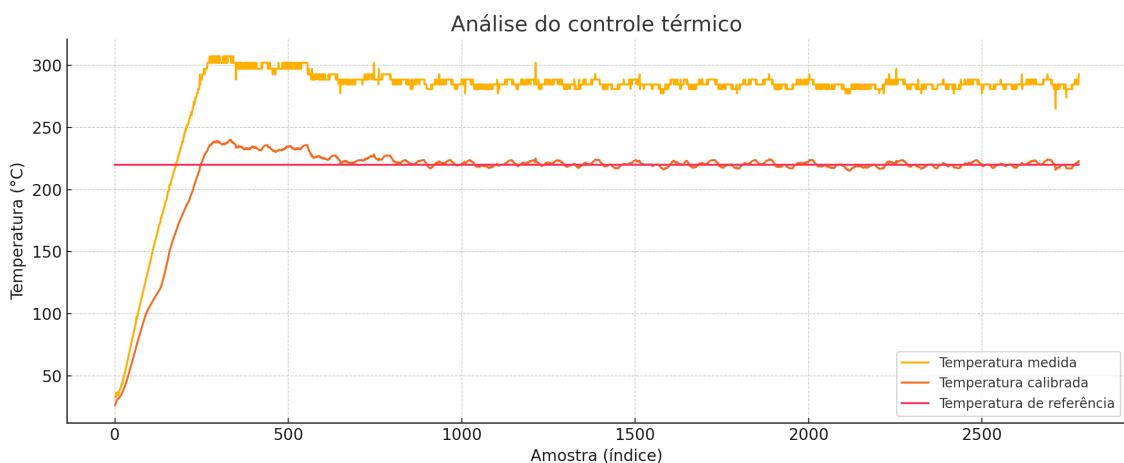
O controle de temperatura da extrusora foi realizado por meio de um controlador PID implementado no microcontrolador Arduino Nano, utilizando um termistor NTC de 100 kΩ como elemento sensor. Nos testes iniciais, empregou-se um setpoint de 250 °C, valor típico para a fusão do PET. Entretanto, essa condição resultou em sinais de degradação térmica do material, como odor característico e escurecimento do filamento extrudado. Diante disso, o setpoint foi ajustado para aproximadamente 220 °C, faixa que proporcionou uma fusão mais homogênea e reduziu a degradação do polímero.

Com o novo ajuste, o sistema apresentou aquecimento contínuo até a proximidade do setpoint, seguido de estabilização em regime permanente. A temperatura corrigida manteve média de aproximadamente 213 °C, com variações de cerca de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ após a estabilização, comportamento esperado para sistemas com baixa inércia térmica e sem isolamento térmico

adequado.

A Figura 4.4 apresenta a evolução temporal das temperaturas medidas: o valor bruto obtido do termistor (*reported*), o valor corrigido após o modelo de calibração (*corrected*) e o valor de referência (*setpoint*). Observa-se que o valor corrigido converge gradualmente para a faixa de operação desejada, apresentando estabilidade suficiente para o processo de extrusão.

Figura 4.4 – Temperaturas medidas durante os testes: valor bruto (*reported*), valor corrigido (*corrected*) e valor de referência (*setpoint*).



Fonte: Autor

É importante destacar que o gráfico não se inicia em 0 °C porque o sensor registra diretamente a temperatura real do sistema, começando a partir das condições ambientais. Assim, os primeiros pontos do gráfico representam a temperatura inicial da extrusora antes do processo de aquecimento, o que justifica o valor inicial em torno de 25 °C.

Calibração do Controle PID

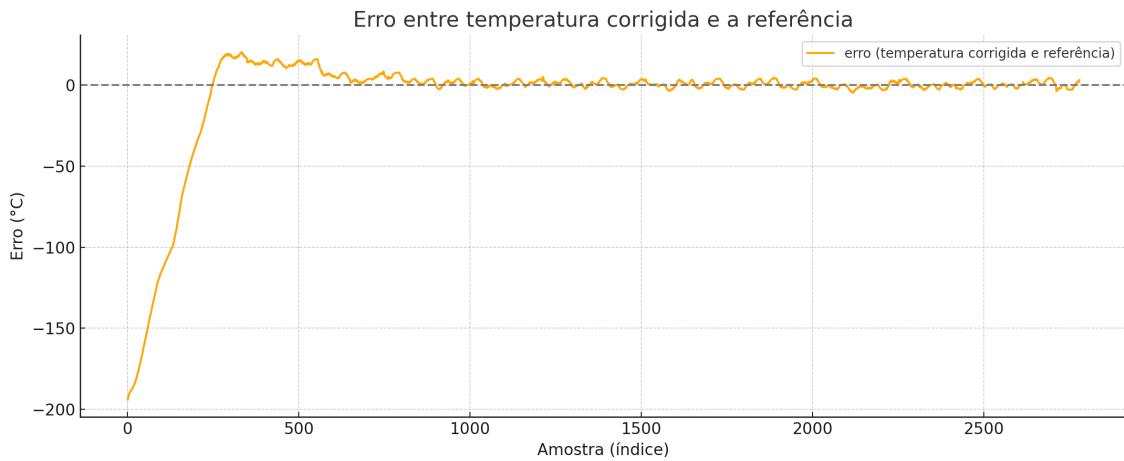
A calibração do controlador PID foi realizada de forma empírica, ajustando progressivamente os ganhos proporcional (K_p), integral (K_i) e derivativo (K_d) até que o sistema apresentasse uma resposta estável e sem oscilações excessivas. Os valores finais adotados foram:

$$K_p = 5.0, \quad K_i = 0.2, \quad K_d = 10.0.$$

Esses parâmetros resultaram em uma rampa de aquecimento consistente, sem *overshoot* significativo e com erro em regime permanente próximo de zero. A Figura 4.5 apresenta o erro térmico ao longo das amostras, evidenciando que, após a fase inicial de estabilização,

o controlador mantém a temperatura na faixa desejada. As oscilações residuais observadas, majoritariamente dentro de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, são compatíveis com extrusoras experimentais de baixa inércia.

Figura 4.5 – Erro entre a temperatura corrigida e o setpoint ao longo das amostras.



Fonte: Autor

De modo geral, os resultados confirmam que a definição de um *setpoint* em torno de 220°C foi adequada para as características do PET reciclado utilizado no protótipo. O sistema apresentou aquecimento eficiente, boa estabilidade térmica e comportamento coerente com extrusoras compactas, compondo uma base sólida para o controle de fluxo e para a obtenção de filamento com qualidade suficiente para testes de impressão 3D.

4.2 Calibração e testes do Sensor de diâmetro

A medição do diâmetro do filamento foi realizada por meio de um sensor óptico composto por um LED infravermelho e um fototransistor alinhados em configuração de barreira. Antes da utilização em regime contínuo, foi necessário realizar uma calibração experimental para determinar a relação entre a intensidade luminosa captada pelo sensor e o diâmetro físico do filamento. Essa calibração é essencial, pois o sensor não mede o diâmetro diretamente, mas sim a quantidade de luz bloqueada pelo filamento ao atravessar a janela óptica.

Para a calibração, foram coletados pares de valores de luminosidade e diâmetro. O diâmetro real foi medido com paquímetro, enquanto a leitura de luz foi obtida pelo fototransistor. A Tabela 4.1 apresenta um conjunto representativo dessas medições. Observa-se

uma tendência inversamente proporcional: valores reduzidos de luminosidade correspondem a maiores diâmetros, resultado do aumento da obstrução do feixe luminoso.

Tabela 4.1 – Valores experimentais utilizados na calibração do sensor óptico de diâmetro.

Light (leitura bruta)	Diâmetro (mm)
367.32	0,00
256.02	1,00
206.48	1,40
202.92	1,75
170.03	1,90

Fonte: Autor

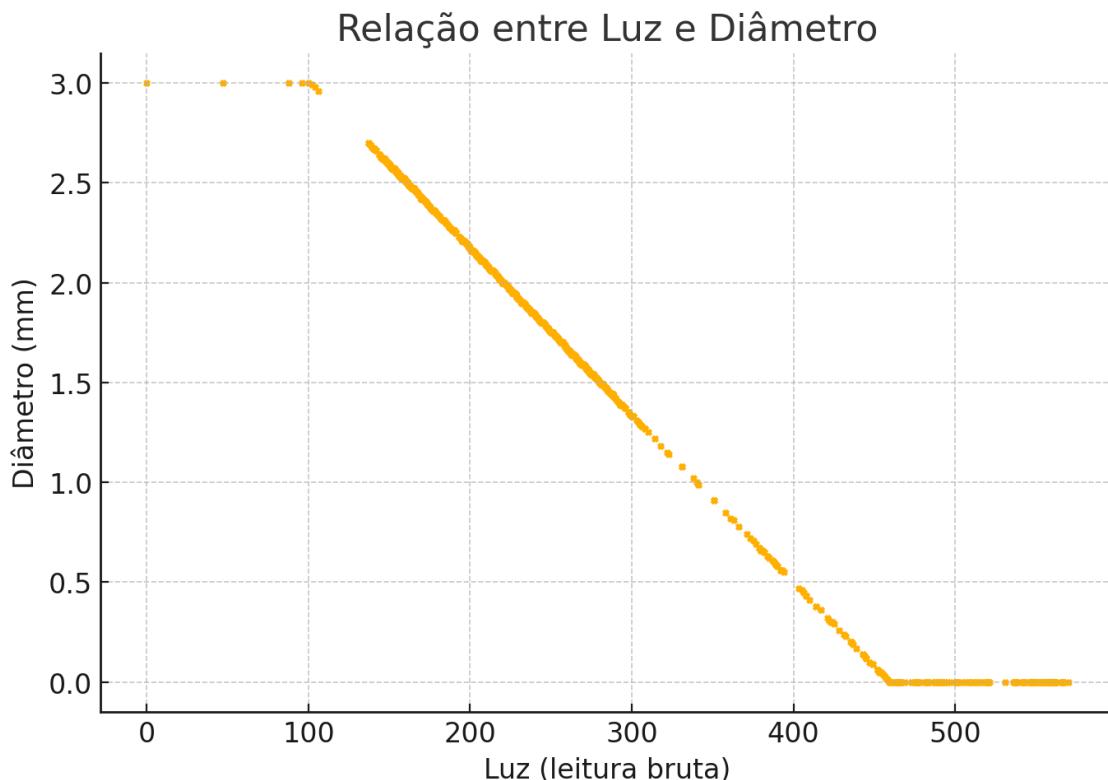
A partir dos valores experimentais apresentados na Tabela 4.1, realizou-se um ajuste linear entre a tensão de saída do sensor e o diâmetro real do filamento obtido por meio de paquímetro digital. O modelo foi obtido pelo método dos mínimos quadrados e resultou na Equação 4.1:

$$d = -0,01558 V + 5,67 \quad (4.1)$$

em que d representa o diâmetro estimado (mm) e V corresponde à tensão medida na saída do fototransistor (V). O ajuste apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,963$, indicando forte correlação entre as variáveis e confirmando a adequação do modelo linear para este tipo de sensor óptico. Esse comportamento está de acordo com o esperado para fototransistores, conforme descrito por Fraden (2010), reforçando que a variação da intensidade luminosa bloqueada pelo filamento pode ser convertida em estimativas de diâmetro com boa precisão.

A relação entre as duas variáveis pode ser visualizada na Figura 4.6, que apresenta a dispersão entre luz e diâmetro. A tendência é claramente linear e negativa, confirmando a coerência física do método empregado. Essa relação foi utilizada para gerar a equação de calibração implementada no código do microcontrolador.

Figura 4.6 – Dispersão entre a leitura de luz e o diâmetro estimado do filamento.



Fonte: Autor

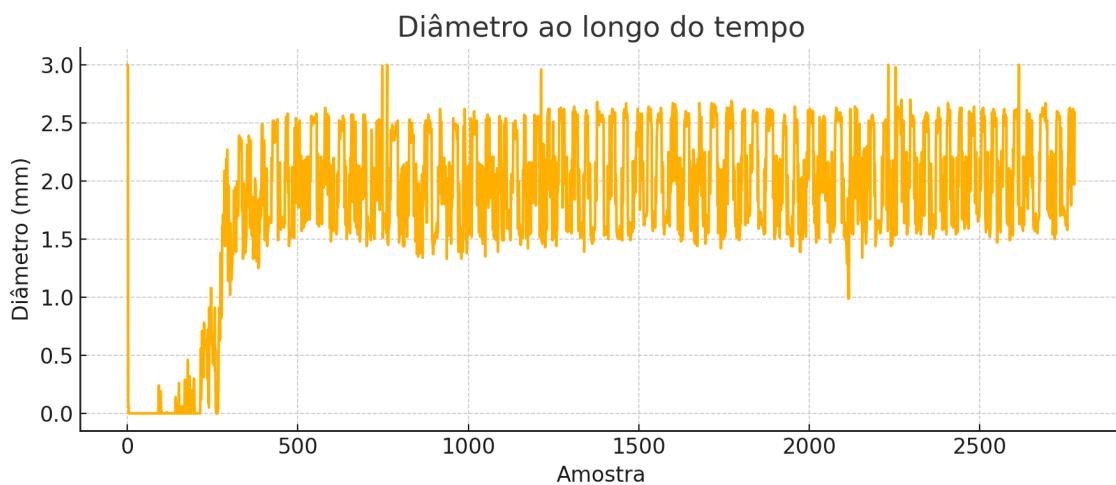
Após a calibração, o sensor foi avaliado em operação contínua durante o processo de extrusão do filamento de PET. A Figura 4.7 apresenta a evolução temporal do diâmetro ao longo das amostras registradas.

Inicialmente, observa-se um período de instabilidade relacionado à transição entre o aquecimento da extrusora e o início da saída do filamento. Após essa fase inicial, o diâmetro tende a estabilizar-se; porém, com oscilações de maior amplitude do que a desejada. Essas oscilações são explicadas por duas fontes principais de interferência no sensor:

1. **Transparência do PET:** as garrafas PET permitem a passagem parcial da luz infravermelha, fazendo com que pequenas variações do material resultem em flutuações na leitura, mesmo quando o diâmetro real sofre pouca alteração.
2. **Desalinhamentos dinâmicos:** vibrações no sistema de tração e no filamento recém-extrudado provocam movimentos laterais que alteram a interceptação do feixe óptico, gerando oscilações artificiais na leitura.

Apesar disso, o sensor demonstrou boa capacidade de acompanhar a tendência global do diâmetro, permitindo identificar regiões de maior e menor tração ao longo do processo. As oscilações observadas reforçam a necessidade de aprimoramentos futuros, como a aplicação de filtros digitais (médias móveis, filtro de Kalman) e a inclusão de leitura em eixo duplo para reduzir a sensibilidade ao alinhamento.

Figura 4.7 – Variação temporal do diâmetro estimado ao longo do processo de extrusão.



Fonte: Autor

Em termos estatísticos, foram obtidos 2780 pontos válidos de medição, com diâmetro médio de 1,84 mm e desvio padrão de 0,69 mm. O coeficiente de variação calculado foi de 37,3%, indicando que uma parte significativa das oscilações decorre das interferências citadas. A análise demonstra que o método é funcional em seu objetivo proposto, que é a confecção do filamento na espessura definida, porém ainda requer refinamentos para atingir maior precisão dimensional no controle automático da extrusão.

Durante os testes práticos, observou-se que o uso do bico inicial, que possuía um furo de 2 mm, resultava na extrusão de filamentos com diâmetros entre aproximadamente 1,9 mm e 2,1 mm. Embora esse resultado fosse compatível com as dimensões do bico, ele acabou causando entupimentos na impressora 3D, projetada para filamentos de 1,75 mm. Para solucionar essa limitação, foi realizada uma modificação no bico: utilizou-se um bico de 0,4 mm, posteriormente perfurado com uma broca de 1,7 mm. Essa adaptação permitiu produzir filamentos com diâmetro mais adequado, variando entre 1,6 mm e 1,8 mm. Além disso, foi necessário ajustar a largura do filete de PET para aproximadamente 0,7 mm, reduzindo obstruções durante a extrusão e

prevendo rupturas do filamento quando submetido ao motor de tração.

Outra consideração importante diz respeito ao controle automático da velocidade do motor com base no diâmetro medido pelo sensor óptico. Durante os testes, observou-se que as leituras do fototransistor apresentavam variações de alta frequência devido a pequenas oscilações mecânicas do sistema, irregularidades momentâneas do filamento ainda quente e flutuações naturais no feixe luminoso. Como consequência, o sinal de erro associado ao diâmetro alternava rapidamente entre valores positivos e negativos, levando o motor a ligar e desligar em intervalos muito curtos. Esse comportamento, semelhante ao fenômeno conhecido como *chattering*, resultou em tracionamento irregular e, em alguns casos, em interrupções momentâneas da extrusão.

Devido a essa instabilidade, concluiu-se que o controle direto baseado na realimentação do diâmetro não era adequado para o protótipo na forma atual. Por esse motivo, optou-se por utilizar um valor fixo de PWM, determinado experimentalmente entre 80 e 90, faixa que se mostrou suficiente para garantir a tração contínua do filamento sem provocar rupturas e mantendo uma variação dimensional aceitável. Dessa forma, embora a lógica de controle pelo diâmetro tenha sido implementada e avaliada, o controle efetivamente empregado nos ensaios finais foi exclusivamente o controle térmico da extrusora.

4.3 Qualidade do Filamento Produzido

A qualidade do filamento produzido foi avaliada tanto durante o processo de extrusão quanto após seu bobinamento e utilização na impressão 3D. Na Figura 4.8, observa-se o momento da extrusão do filamento, no qual é possível ver a presença de pequenas bolhas distribuídas ao longo da superfície. Esse comportamento é típico quando o PET não passa por um processo adequado de secagem, uma vez que o material absorve a umidade do ambiente. Durante o aquecimento, essa umidade se transforma em vapor, gerando microbolhas que afetam a transparência e a uniformidade do filamento.

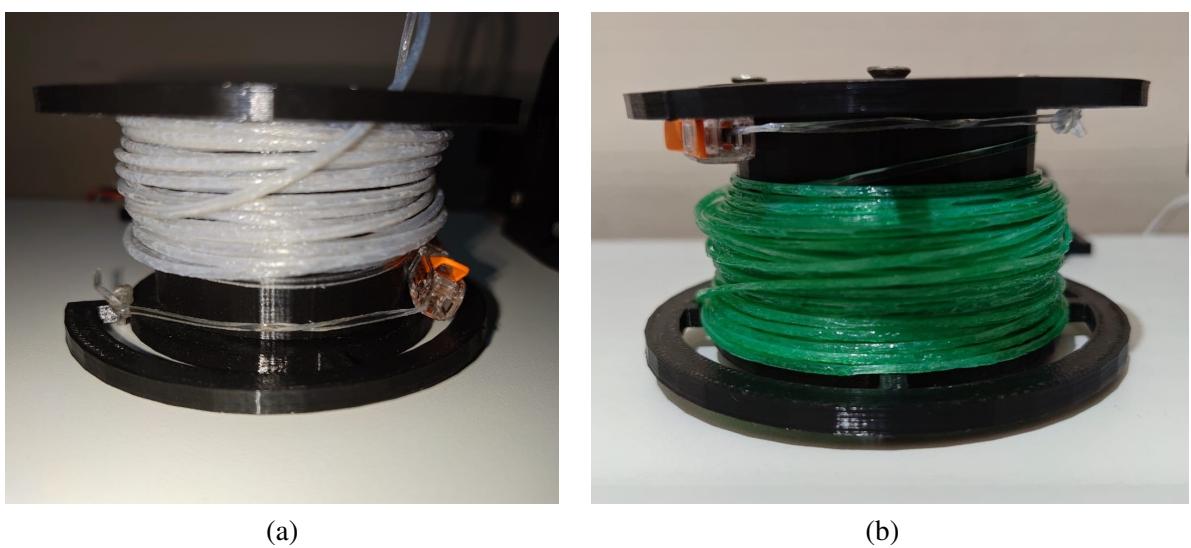
Figura 4.8 – Extrusão do filamento reciclado, com presença de bolhas devido à umidade do PET.



Fonte: Autor

A Figura 4.9 apresenta o filamento bobinado no carretel após a extrusão. Apesar das irregularidades dimensionais observadas, o filamento manteve continuidade mecânica e resistência suficientes para ser enrolado sem rupturas. Nota-se variações de espessura e transparência ao longo do carretel, decorrentes das oscilações da tração e da umidade retida no PET. Essas variações afetam o fluxo de extrusão na impressora 3D e podem ser reduzidas com melhorias no controle térmico, na tração e na secagem prévia do material.

Figura 4.9 – Filamento bobinado após extrusão, apresentando variações de espessura e transparência:
(a) PET Transparente; (b) PET Transparente verde.



Fonte: Autor

Por fim, para avaliar a funcionalidade prática do filamento produzido, foram realizados testes de impressão utilizando modelos tridimensionais simples. O primeiro objeto impresso foi um coelho tridimensional, com dimensões de 44 mm × 20 mm × 38 mm e massa aproximada de 4 g. Em seguida, realizou-se a impressão de um floco de neve decorativo, com dimensões aproximadas de 10 cm × 10 cm × 4 mm e massa de 7 g. A Figura 4.10 apresenta ambos os objetos produzidos exclusivamente com o filamento reciclado obtido pelo protótipo. Apesar das imperfeições relacionadas à variação dimensional e à presença de microbolhas, o filamento mostrou-se funcional, permitindo a fabricação das peças.

Figura 4.10 – Objetos impressos com o filamento reciclado produzido pelo protótipo: (a) coelho tridimensional; (b) floco de neve.



Fonte: Autor

Esses resultados indicam que, embora o filamento produzido ainda apresente limitações em termos de uniformidade, translucidez e estabilidade dimensional, o sistema desenvolvido é capaz de gerar material utilizável em impressoras 3D do tipo FDM. Melhorias futuras, especialmente relacionadas à secagem do PET, ao controle de tração e à redução de interferências na leitura óptica, têm o potencial de elevar significativamente a qualidade final do filamento e das peças impressas.

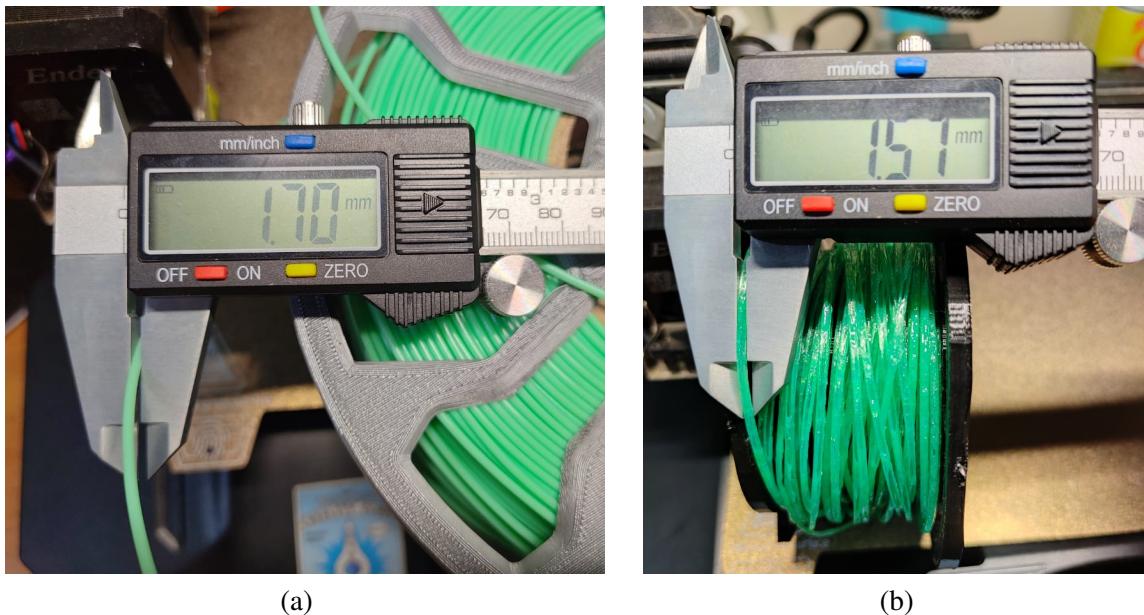
Comparação entre filamento comercial e filamento reciclado

É importante destacar que não foi utilizado um filamento PET comercial para a comparação, uma vez que esse material não estava disponível no momento dos testes. Dessa forma, optou-se por utilizar um filamento PLA verde de 1,75 mm como referência comercial,

devido à sua ampla utilização em impressoras 3D do tipo FDM, à estabilidade dimensional e à facilidade de extrusão. Essa escolha permite estabelecer uma base comparativa consistente entre o filamento reciclado produzido pelo protótipo e um material comercial amplamente consolidado no mercado.

Para comparar o comportamento do filamento reciclado com um material comercial, foram analisados dois filamentos: o PLA verde de 1,75 mm e o filamento de PET reciclado transparente verde obtido pelo protótipo. As medições realizadas com paquímetro digital indicaram que o filamento PLA apresentou diâmetro médio de aproximadamente 1,70 mm, enquanto o filamento de PET reciclado apresentou cerca de 1,57 mm. A Figura 4.11 apresenta as fotografias dessas medições, evidenciando a diferença dimensional entre os materiais e confirmando que o filamento reciclado se mantém dentro de uma faixa operacional adequada para uso em impressoras 3D do tipo FDM.

Figura 4.11 – Medição dos filamentos com paquímetro digital: (a) filamento PLA verde comercial, com diâmetro aproximado de 1,70 mm; (b) filamento de PET reciclado transparente verde, com diâmetro aproximado de 1,57 mm.



Fonte: Autor

Foram realizadas dez medições do filamento PLA comercial utilizando um paquímetro digital. Os valores obtidos apresentaram média de 1,693 mm e desvio padrão de apenas 0,0110 mm, demonstrando alta uniformidade dimensional. Essa consistência é compatível com filamentos comerciais de boa qualidade, cuja tolerância típica gira em torno de $\pm 0,02$ mm.

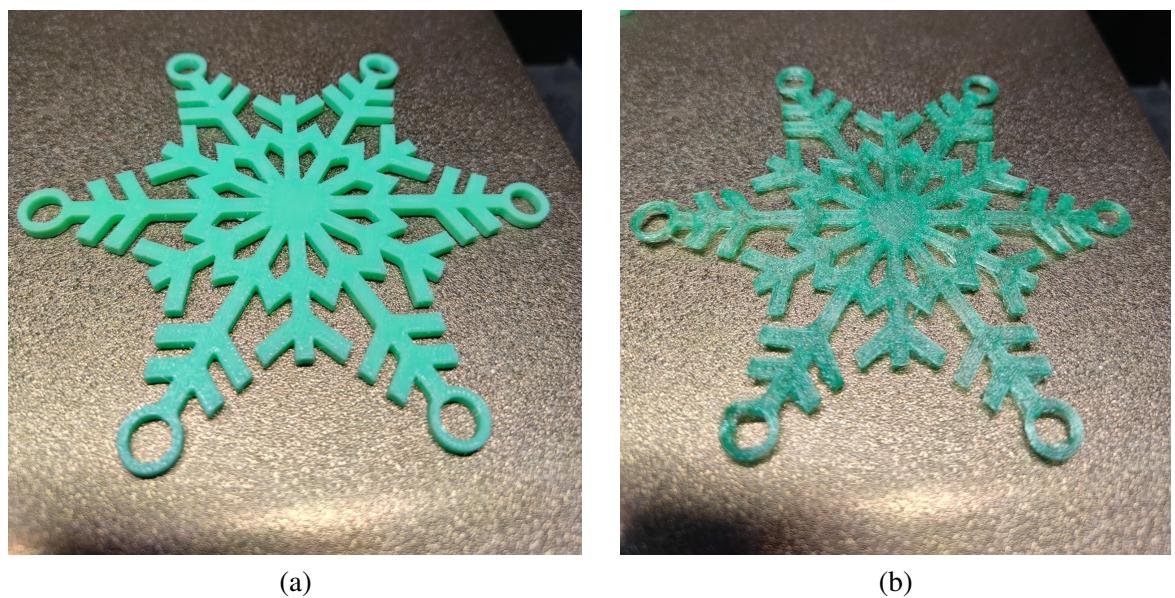
Já o filamento de PET reciclado apresentou média de 1,616 mm e desvio padrão

de 0,0546 mm, aproximadamente 4,3 vezes maior que o desvio padrão do PLA. Embora mais elevado, esse valor é compatível com processos experimentais de extrusão artesanal, especialmente considerando a ausência de controle bidimensional do diâmetro e as flutuações térmicas naturais do sistema. Esses resultados confirmam visualmente e quantitativamente que o filamento reciclado é utilizável, embora ainda apresente maior variabilidade quando comparado a materiais comerciais.

Em seguida, foi realizada uma comparação prática entre os dois materiais por meio da impressão do mesmo modelo tridimensional: um flocos de neve decorativo. As configurações de impressão, como velocidade, altura de camada, retração e fluxo, foram mantidas constantes entre os dois testes, alterando-se apenas a temperatura de extrusão, devido às diferentes faixas de processamento térmico de cada material. Essa diferença é esperada, pois o PLA apresenta temperatura de fusão significativamente menor que a do PET, o que influencia diretamente a fluidez do material e o acabamento final das peças.

A Figura 4.12 apresenta os resultados das impressões utilizando o filamento PLA verde comercial e o filamento de PET reciclado transparente verde, permitindo avaliar diferenças na qualidade superficial, na definição dos detalhes e na regularidade das linhas extrudadas.

Figura 4.12 – Flocos de neve impresso com diferentes materiais: (a) filamento PLA verde comercial; (b) filamento de PET reciclado transparente verde produzido pelo protótipo.



Fonte: Autor

A comparação entre os dois flocos evidencia diferenças importantes relacionadas à qualidade superficial de cada material, embora ambos mantenham as mesmas dimensões finais

do modelo. O floco impresso em PLA verde apresentou acabamento homogêneo, contornos bem definidos e ausência de irregularidades visíveis, comportamento esperado de um polímero estável e de fácil extrusão. Já a peça produzida com o PET reciclado exibiu maior rugosidade superficial, pequenas imperfeições e variações de translucidez, resultantes tanto das oscilações de fluxo observadas durante a extrusão quanto da presença residual de umidade no material. Apesar dessas diferenças estéticas, o floco impresso com PET manteve a integridade geométrica do modelo, demonstrando a viabilidade do filamento reciclado para aplicações decorativas e de menor exigência dimensional.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões referentes ao desenvolvimento do trabalho, bem como propostas de continuidade e aprimoramento para pesquisas futuras.

5.1 Conclusões

O desenvolvimento do protótipo proposto demonstrou a viabilidade na construção de um sistema de baixo custo para a produção de filamentos reciclados a partir de garrafas PET, incorporando um sensor óptico para o monitoramento do diâmetro do filamento durante o processo de extrusão. O sistema, controlado por um microcontrolador Arduino, permitiu o acompanhamento em tempo real de variáveis como temperatura e diâmetro, possibilitando ajustes que contribuíram para a uniformidade do filamento produzido.

Os resultados obtidos evidenciam que, com calibrações adequadas, é possível alcançar níveis satisfatórios de qualidade dimensional, permitindo o uso do filamento em impressoras 3D do tipo FDM. Assim, o protótipo cumpre o propósito de aliar acessibilidade, sustentabilidade e automação, apresentando-se como uma alternativa viável para contextos educacionais, comunitários e *maker*, nos quais o reaproveitamento de resíduos plásticos pode gerar benefícios ambientais e sociais.

Durante o desenvolvimento do projeto, optou-se por manter o circuito montado em protoboard, decisão justificada pelo caráter experimental do projeto e pelo tempo limitado para a fabricação de uma placa de circuito impresso (PCB). Essa abordagem permitiu realizar ajustes rápidos, identificar falhas e validar o funcionamento dos módulos de forma flexível, sem comprometer a continuidade dos testes.

5.2 Trabalhos futuros

Como desdobramento deste projeto, destacam-se algumas possibilidades de aprimoramento e expansão:

- Desenvolver um sistema de Trituração para possibilitar a reciclagem de resíduos provenientes de impressões 3D, como suportes, falhas e protótipos descartados;
- Adaptar o sistema para processar outros tipos de plásticos além do PET, ampliando sua aplicabilidade;

- Implementar estratégias mais robustas de controle da temperatura e da velocidade dos motores, considerando as características térmicas de cada material;
- Expandir a leitura óptica, atualmente unidimensional, para dois eixos ortogonais, aumentando a precisão na medição do diâmetro e reduzindo a sensibilidade ao alinhamento do filamento
- Avaliar comparativamente o desempenho, o custo e o impacto ambiental entre filamentos reciclados e filamentos comerciais;
- Integrar o sistema a uma interface gráfica para visualização e registro dos dados do processo, possibilitando análises posteriores de desempenho e controle de qualidade;
- Desenvolver e confeccionar uma placa de circuito impresso (PCB) dedicada, substituindo a protoboard e aumentando a confiabilidade, a segurança e a organização do sistema.

Portanto, essas melhorias visam aumentar a eficiência, a precisão e a usabilidade do sistema, contribuindo para o avanço das tecnologias de reciclagem distribuída e para a consolidação de práticas mais sustentáveis na manufatura aditiva.

REFERÊNCIAS

- ABIPET. **Associação Brasileira da Indústria do PET — Relatórios e estatísticas.** 2024. <<https://abipet.org.br>>. Disponível em: <<https://abipet.org.br>>.
- ANDERSON, C. **Makers: The New Industrial Revolution.** [S.l.]: Crown Business, 2012.
- Arduino Store. **Arduino Nano – Official Product Image.** 2024. Acesso em: 9 nov. 2025. Disponível em: <https://store.arduino.cc/cdn/shop/files/A000005_01.iso_804x603.jpg?v=1753434497>.
- BADEN, T.; DRUMMOND, E.; VOS, M. Open-source 3d-printers and peripherals for science. **PLoS Biology**, v. 17, n. 9, p. e3000448, 2019.
- BERMAN, B. 3-d printing: The new industrial revolution. **Business Horizons**, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012.
- COSTA, G. M. **Controle de diâmetro na produção de filamento para impressoras 3D.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) – CEFET-MG, Divinópolis.
- DERTINGER, S. C. et al. Technical pathways for distributed recycling of polymer composites for distributed manufacturing: Windshield wiper blades. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 157, p. 104810, 2020. ISSN 0921-3449. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920301312>>.
- FERREIRA, A. **Projeto de dispositivo para fabricação de filamentos para impressora 3D a partir da reciclagem de garrafas PET.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2024.
- FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications.** 4. ed. [S.l.]: Springer, 2010. Discussão sobre linearidade de fotodiodos e fototransistores nas pp. 186–187 e 470–471. ISBN 978-1-4419-6465-6.
- HARRISON, C.; HVOLBEK, M. P.; MARIA, C. D. Open source 3d printing for development in low-resource contexts: A scoping review. **Development Engineering**, v. 6, p. 100062, 2021.
- HOROWITZ, P.; HILL, W. **The Art of Electronics.** 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 832–833 p.
- ILX Lightwave Corporation. **Thermistor Calibration and the Steinhart–Hart Equation.** [S.l.], 2006. Documento técnico que descreve a equação de Steinhart–Hart e métodos de calibração de termistores NTC. Disponível em: <https://www.newport.com/medias/sys_master/images/image/s/h67/hc1/8797049487390/AN04-Thermistor-Calibration-and-Steinhart-Hart.pdf>.
- KREIGER, M. G. M. A. et al. Distributed recycling of post-consumer plastic waste in rural areas. **MRS Online Proceedings Library (OPL)**, v. 1492, p. 91–96, 2013.
- LIPSON, H.; KURMAN, M. **Fabricated: The New World of 3D Printing.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

MIKULA, K. et al. 3d printing filament as a second life of waste plastics: A review. **Environmental Science and Pollution Research**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>>.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. ISBN 978-85-216-1989-5.

OLADAPO, B. I. et al. Net zero on 3d printing filament recycling: A sustainable analysis. **Science of The Total Environment**, v. 894, p. 165046, 2023. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723036690>>.

OLIVEIRA, C. L. V. et al. **Aprenda Arduino: Uma abordagem prática**. Duque de Caxias: Katzen Editora, 2018. Disponível em: <<https://www.fatecjd.edu.br/fatecino/material/ebook-aprenda-arduino.pdf>>. Acesso em: nov. 2025. Disponível em: <<https://www.fatecjd.edu.br/fatecino/material/ebook-aprenda-arduino.pdf>>.

Precious Plastic. **A global community of hundreds of people working towards a solution to plastic waste**. 2024. <<https://preciousplastic.com>>. Disponível em: <<https://preciousplastic.com>>.

RAYNA, T.; STRIUKOVA, L. From rapid prototyping to home fabrication: How 3d printing is changing business model innovation. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 102, p. 214–224, 2016.

SHAQOUR, B. et al. Gaining a better understanding of the extrusion process in fused filament fabrication 3d printing: a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 114, p. 1279–1291, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-021-06918-6>>.

SOMENZI, A.; FILIPETTO, L. M. **Utilização de filamento reciclado de garrafas PET em impressão 3D: uma aplicação do Design Science Research**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Bento Gonçalves, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ifrs.edu.br/handle/123456789/1621>>.

WOERN, A. L.; MCCUE, J. T.; VERNON-ROE, S. Recyclebot: An open-source, low-cost, filament extruder for 3-d printing from recycled plastic waste. **HardwareX**, v. 9, p. e00186, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067218300208>>.

APÊNDICE A – MONTAGEM PASSO A PASSO DO PROTÓTIPO EXTRUSOR DE FILAMENTO PET

Este apêndice apresenta um guia detalhado para a montagem do protótipo desenvolvido, dividido em etapas que acompanham os módulos funcionais do sistema. A montagem cuidadosa de cada módulo é essencial para garantir o funcionamento integrado e eficiente do extrusor de filamento reciclado.

A.1 Materiais e Ferramentas Necessárias

- Peças impressas em 3D (filetador, suporte do sensor, carcaça do painel)
- Rolamentos
- Lâmina de apontador de lápis
- Haste rosada e porcas
- Bloco de alumínio para extrusora
- Cartucho de aquecimento 40 W
- Termistor NTC 100 kΩ
- Bico de saída com diâmetro interno de 1,7 mm
- Microcontrolador Arduino Nano
- Transistor MOSFET
- Sensores ópticos (LED infravermelho e fototransistor)
- Motor de tração de corrente contínua
- Display LCD I2C 16x2
- Protoboard, cabos jumper e conectores
- Bobina para enrolamento do filamento
- Ferramentas básicas: chave de fenda, alicate, multímetro, ferro de solda, etc.

A.2 Etapas de Montagem

A.2.1 Montagem do Filetador

1. Fixar os rolamentos na estrutura impressa em 3D do filetador, garantindo que estejam alinhados para guiar a fita de PET.
2. Posicionar a lâmina de apontador de lápis de modo ajustável, permitindo o corte contínuo e uniforme.
3. Inserir a haste rosada na estrutura e fixar com porcas, de forma que a garrafa PET possa ser firmemente presa para o corte.
4. Testar manualmente o funcionamento do filetador, verificando se a fita de PET é cortada com largura uniforme de aproximadamente 10 mm.

A.2.2 Montagem da Extrusora

1. Fixar o cartucho de aquecimento no bloco de alumínio, assegurando bom contato térmico.
2. Instalar o termistor NTC próximo ao cartucho para monitoramento da temperatura.
3. Acoplar o bico de saída no bloco, garantindo que o diâmetro interno seja de 1,7 mm para o filamento final.
4. Realizar as conexões elétricas do cartucho, termistor e transistor MOSFET ao Arduino Nano conforme o esquema eletrônico do projeto.
5. Verificar a integridade das conexões antes da energização.

A.2.3 Instalação do Sensor de Diâmetro

1. Montar o suporte do sensor utilizando a peça impressa em 3D.
2. Posicionar o LED emissor de luz infravermelha e o fototransistor receptor de forma oposta, alinhados com a janela óptica para a passagem do filamento.
3. Fixar o conjunto sensor em local adequado na linha do filamento, entre a extrusora e o sistema de tração.
4. Realizar a conexão dos sensores ao Arduino Nano para leitura dos sinais.

A.2.4 Montagem do Sistema de Controle e Painel

1. Conectar o Arduino Nano à protoboard, utilizando cabos jumper para facilitar ajustes e testes.
2. Conectar o display LCD I2C 16x2 para visualização das variáveis do sistema (temperatura, diâmetro, estado do motor).
3. Ligar o transistor MOSFET para controle da resistência de aquecimento da extrusora.
4. Integrar o motor de tração, conectando seu controle PWM ao Arduino para ajuste da velocidade com base na leitura do sensor de diâmetro.

A.2.5 Montagem do Bobinador

1. Fixar o motor de corrente contínua na estrutura do bobinador.
2. Instalar o suporte para bobina que irá receber o filamento extrudado.
3. Conectar o motor ao Arduino para controle de velocidade, garantindo que o filamento seja puxado de forma contínua e enrolado ordenadamente.

A.3 Testes e Ajustes

1. Ligar o sistema e monitorar a temperatura da extrusora pelo display LCD.
2. Inserir uma fita de PET cortada no filetador e acompanhar a transformação em filamento extrudado.
3. Ajustar a velocidade do motor de tração para obter filamento com diâmetro constante próximo a 1,75 mm, conforme leitura do sensor óptico.
4. Realizar calibração fina do sistema, ajustando os parâmetros do controle PID no Arduino, se necessário.
5. Verificar a uniformidade do filamento na bobina e realizar testes de impressão para validação da qualidade.

Este passo a passo serve como referência para a replicação do protótipo, facilitando sua montagem e promovendo a disseminação da tecnologia de reciclagem de PET para fabricação de filamentos para impressoras 3D.

APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DO SISTEMA DE CONTROLE COM ARDUINO

Listing .1 – Código-fonte do sistema de controle (Arduino Nano) utilizado no protótipo

```

1
2  /*
3   Sistema de Extrusao de Filamento a partir de PET
4   Controle de temperatura com PID + acionamento de motor + leitura optica
5   Codigo comentado e documentado
6 */
7
8 #include <PID_v1.h>
9 #include <SimpleThermistor.h>
10 #include <Wire.h>
11 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
12
13 // === Display LCD I2C ===
14 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
15
16 // === Definicao de pinos ===
17 #define THERMISTOR_PIN A3
18 #define PHOTO_PIN      A7
19 #define HEATER_PIN     11
20 #define LED_PIN        4
21 #define MOTOR_PWM      5
22 #define MOTOR_DIR      6
23 #define EMERGENCY_PIN  2
24
25 // === Sensor NTC 100k 3950 ===
26 SimpleThermistor sensor = SimpleThermistor(THERMISTOR_PIN, 100000, 3950,
27                                         10000);
28
29 // === Variaveis do PID ===
30 double Setpoint = 25.0;
31 double Input, Output;
32 double Kp = 5.0, Ki = 0.2, Kd = 10.0;
33 PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
34 // Atualizacao temporizada

```

```
35 unsigned long lastUpdate = 0;
36 const unsigned long interval = 500;
37
38 // === Rampa de temperatura ===
39 double TargetTemp = 220.0;
40 double rampSetpoint = 25.0;
41 unsigned long lastRamp = 0;
42 const unsigned long rampInterval = 2000;
43 const double rampStep = 5.0;
44
45 // === Limites termicos ===
46 const double maxBlockTemp = 249.0;
47 const double pidOffset = 5.0;
48
49 // === Filtro exponencial ===
50 float filtTemp = 25.0;
51 float alpha = 0.20;
52 bool filtInitialized = false;
53
54 // === Motor ===
55 bool motorLigado = false;
56 int motorPWMValue = 80;
57 const double motorOnTemp = 200.0;
58 const double motorOffTemp = 199.0;
59
60 // === Tabela de calibracao (temperatura) ===
61 float calibTable[][2] = {
62     {25.3, 24.8}, {60.8, 50.8}, {123.8, 100.9},
63     {174.7, 122.2}, {200.8, 153.6}, {227.5, 175.6},
64     {252.6, 191.2}, {262.0, 200.0}, {290.0, 225.0},
65     {318.0, 250.0}
66 };
67 int nCalib = sizeof(calibTable) / sizeof(calibTable[0]);
68
69 // === Calibracao do sensor optico ===
70 float lightCalib[][2] = {
71     {900.0, 0.20}, {700.0, 0.80}, {500.0, 1.50},
72     {350.0, 2.00}, {200.0, 2.85}
73 };
```

```
74 int nLightCalib = sizeof(lightCalib) / sizeof(lightCalib[0]);  
75  
76 // === Ultimos valores para evitar flicker ===  
77 float lastTemp = -100.0;  
78 float lastDiameter = -1.0;  
79  
80 // === Leituras invalidas ===  
81 int invalidReadCount = 0;  
82 const int invalidReadThreshold = 5;  
83  
84 // ===== Funcao de interpolacao linear =====  
85 float interpTable(float table[][2], int n, float x) {  
86     for (int i = 0; i < n - 1; i++) {  
87         float x0 = table[i][0], y0 = table[i][1];  
88         float x1 = table[i+1][0], y1 = table[i+1][1];  
89         if ((x >= min(x0, x1)) && (x <= max(x0, x1))) {  
90             return y0 + (x - x0)*(y1 - y0)/(x1 - x0);  
91         }  
92     }  
93     return table[n-1][1];  
94 }  
95  
96 float corrigirTemperatura(float t) {  
97     return interpTable(calibTable, nCalib, t);  
98 }  
99  
100 float adcToDiameter(float adc) {  
101     return interpTable(lightCalib, nLightCalib, adc);  
102 }  
103  
104 // === Controle do motor ===  
105 void ligarMotor() {  
106     analogWrite(MOTOR_PWM, motorPWMValue);  
107     digitalWrite(MOTOR_DIR, LOW);  
108     motorLigado = true;  
109 }  
110  
111 void desligarMotor() {  
112     analogWrite(MOTOR_PWM, 0);
```

```
113     digitalWrite(MOTOR_DIR, LOW);
114     motorLigado = false;
115 }
116
117 // === Modo de emergencia ===
118 void hardShutdown(const char *reason) {
119     analogWrite(HEATER_PIN, 0);
120     desligarMotor();
121     lcd.clear();
122     lcd.setCursor(0, 0);
123     lcd.print("EMERGENCY_STOP");
124     lcd.setCursor(0, 1);
125     lcd.print(reason);
126     while (1) {}
127 }
128
129 // ===== SETUP =====
130 void setup() {
131     Serial.begin(115200);
132
133     pinMode(HEATER_PIN, OUTPUT);
134     pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
135     pinMode(PHOTO_PIN, INPUT);
136     pinMode(MOTOR_PWM, OUTPUT);
137     pinMode(MOTOR_DIR, OUTPUT);
138     pinMode(EMERGENCY_PIN, INPUT_PULLUP);
139
140     myPID.SetMode(AUTOMATIC);
141     myPID.SetOutputLimits(0, 255);
142     myPID.SetTunings(Kp, Ki, Kd);
143
144     rampSetpoint = Setpoint;
145
146     lcd.init();
147     lcd.backlight();
148     lcd.clear();
149     lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Temp:");
150     lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Diam:");
```

```
152     desligarMotor();
153     analogWrite(HEATER_PIN, 0);
154
155     Serial.println("timestamp;reported;corrected;SP;PWM;ADC;diameter;motor");
156 }
157
158 // ===== LOOP =====
159 void loop() {
160
161     unsigned long now = millis();
162
163     if (digitalRead(EMERGENCY_PIN) == LOW)
164         hardShutdown("Botao");
165
166     if (now - lastRamp >= rampInterval && rampSetpoint < TargetTemp) {
167         lastRamp = now;
168         rampSetpoint += rampStep;
169         if (rampSetpoint > TargetTemp) rampSetpoint = TargetTemp;
170     }
171
172     if (now - lastUpdate < interval) return;
173     lastUpdate = now;
174
175     float reported = sensor.getTempC();
176
177     if (isnan(reported) || reported < -50 || reported > 1000) {
178         invalidReadCount++;
179         if (invalidReadCount >= invalidReadThreshold)
180             hardShutdown("Sensor");
181         analogWrite(HEATER_PIN, 0);
182         desligarMotor();
183         return;
184     }
185     invalidReadCount = 0;
186
187     float corrected = corrigirTemperatura(reported);
188
189     if (!filtInitialized) {
190         filtTemp = corrected;
```

```

191     filtInitialized = true;
192 } else {
193     filtTemp = alpha * corrected + (1 - alpha) * filtTemp;
194 }
195 Input = filtTemp;
196
197 double safeRamp = rampSetpoint;
198 if (Input + pidOffset >= maxBlockTemp)
199     safeRamp = maxBlockTemp - pidOffset;
200
201 Setpoint = safeRamp;
202
203 myPID.Compute();
204
205 int pwmOut = (int)Output;
206 if (Input >= maxBlockTemp - 10 && pwmOut > 120) pwmOut = 120;
207 if (Input >= maxBlockTemp) pwmOut = 0;
208
209 analogWrite(HEATER_PIN, pwmOut);
210 digitalWrite(LED_PIN, pwmOut > 5);
211
212 if (Input >= motorOnTemp && !motorLigado) ligarMotor();
213 if (Input < motorOffTemp && motorLigado) desligarMotor();
214
215 int adc = analogRead(PHOTO_PIN);
216 float diameter = adcToDiameter(adc);
217 diameter = constrain(diameter, 0.0, 4.0);
218
219 if (abs(Input - lastTemp) >= 0.1) {
220     lcd.setCursor(6, 0);
221     lcd.print("_____");
222     lcd.setCursor(6, 0);
223     lcd.print(Input, 1);
224     lastTemp = Input;
225 }
226
227 if (abs(diameter - lastDiameter) >= 0.05) {
228     lcd.setCursor(6, 1);
229     lcd.print("_____");

```

```
230     lcd.setCursor(6, 1);
231     lcd.print(diameter, 2);
232     lastDiameter = diameter;
233 }
234
235 Serial.print(now);      Serial.print(';');
236 Serial.print(reported); Serial.print(';');
237 Serial.print(Input);    Serial.print(';');
238 Serial.print(Setpoint); Serial.print(';');
239 Serial.print(pwmOut);   Serial.print(';');
240 Serial.printadc();      Serial.print(';');
241 Serial.print(diameter); Serial.print(';');
242 Serial.println(motorLigado ? 1 : 0);
243
244 }
```