



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ÂNGELO DA SILVA CARNEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA EXTRUSORA DE PET RECICLADO PARA
PRODUÇÃO DE FILAMENTO 3D UTILIZANDO ARDUINO**

CARAÚBAS
2025

ÂNGELO DA SILVA CARNEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA EXTRUSORA DE PET RECICLADO PARA
PRODUÇÃO DE FILAMENTO 3D UTILIZANDO ARDUINO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Profa. Dra. Ana Tereza de Abreu Lima

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C Carneiro, Ângelo da Silva.
289d Desenvolvimento de Uma Extrusora de PET
Reciclado para Produção de Filamento 3D
Utilizando Arduino / Ângelo da Silva Carneiro. -
2025.
47 f. : il.

Orientadora: Ana Tereza de Abreu Lima.
Coorientadora: Hudson Pacheco Pinheiro.
Monografia (graduação) - Universidade
Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Manufatura Aditiva . 2. Arduino . 3.
Reciclagem . 4. Impressão 3D. I. Lima, Ana Tereza
de Abreu, orient. II. Pinheiro, Hudson Pacheco,
co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em
conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo)
autor(a). Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ÂNGELO DA SILVA CARNEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA EXTRUSORA DE PET RECICLADO PARA
PRODUÇÃO DE FILAMENTO 3D UTILIZANDO ARDUINO.**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 17/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Ana Tereza de Abreu Lima, Profa. Dra. (UFERSA)
Presidente

Hudson Pacheco Pinheiro, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Adiana Nascimento da Silva, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

Carlos Costa de Carvalho, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pelas oportunidades concedidas, pela força e pela capacidade de aproveitar cada etapa desta jornada. Expresso minha profunda gratidão à minha família, em especial ao meu pai, Antônio Carneiro, à minha mãe, Adriana da Silva, e aos meus irmãos Alexandre e Angelina pelo amor, pelo apoio incondicional e pelos ensinamentos que me guiaram até este momento.

Estendo meus agradecimentos à minha namorada e colega de estudo, Sabrinna Miranda, por sua paciência, compreensão e por ser o apoio motivacional que não me permite desistir diante dos desafios acadêmicos.

Sou grato a todo o corpo docente desta instituição, e dedico um agradecimento especial à minha orientadora, a Professora Ana Tereza de Abreu, por sua inestimável orientação, pela dedicação e por sua constante disponibilidade em compartilhar conhecimento e auxiliar no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço aos amigos e colegas que esta instituição me proporcionou, permitindo o enriquecimento mútuo de ideias e a troca de experiências e conhecimentos essenciais para a minha formação.

RESUMO

A impressão 3D consolida-se no cenário *maker* e industrial, sendo amplamente empregada na criação de protótipos robóticos, acessórios e na reposição de peças. No entanto, o alto custo da matéria-prima e a escassez de alternativas sustentáveis representam desafios cruciais para a expansão desta tecnologia. Com o objetivo de reduzir esta problemática, o presente trabalho consiste no desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo para a reutilização de garrafas PET na produção artesanal de filamento para impressão. O desenvolvimento desse projeto baseia-se na construção de um protótipo com o Arduino como controlador central, responsável pelo monitoramento e controle da produção do fio. Espera-se que a criação deste equipamento e o desenvolvimento do filamento reciclado reduza significativamente o custo de impressão e promova uma alternativa ambientalmente responsável para o descarte de resíduos plásticos, estimulando a economia circular na manufatura aditiva.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Impressão 3D. Reciclagem. Arduino.

ABSTRACT

3D printing has become established in both the maker and industrial landscapes, being widely used in the creation of robotic prototypes, accessories, and replacement parts. However, the high cost of raw materials and the scarcity of sustainable alternatives represent critical challenges to the expansion of this technology. In order to mitigate this issue, the present work consists of the development of a low-cost device for reusing PET bottles in the artisanal production of filament for 3D printing. The development of this project is based on the construction of a prototype using Arduino as the central controller, responsible for monitoring and controlling the filament production process. It is expected that the creation of this equipment and the development of recycled filament will significantly reduce printing costs and promote an environmentally responsible alternative for plastic waste disposal, encouraging the circular economy in additive manufacturing.

Keywords: Additive manufacturing. 3D printing. Recycling. Arduino.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PET- Polietileno Tereftalato

PETG- Polietileno Tereftalato Glicol

PLA- Ácido Polilático

ABS- Acrilonitrila butadieno estireno

SPI- *Serial Peripheral Interface*

FDM- Modelagem de deposição fundida

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1. OBJETIVO GERAL	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1. POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS	13
3.2. RECICLAGEM DO PET E SUSTENTABILIDADE.....	14
3.3. FILAMENTO 3D	14
3.4. EXTRUSORAS PET	15
3.5. DILATAÇÃO TÉRMICA DE METAIS.....	15
3.6. AUTOMAÇÃO E CONTROLE COM ARDUINO.....	16
3.7. ARDUINO NANO E <i>SHIELD</i> DE EXPANSÃO	16
3.8. MÓDULO DE POTÊNCIA MOSFET	17
3.9. LEITOR DE TEMPERATURA MAX6675.....	18
3.10. PID (PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO)	18
3.11. <i>DISPLAY</i> LCD 16X2.....	19
3.12. <i>DRIVER</i> A4988.	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1. MATERIAIS E COMPONENTES	22
4.1.1. Confecção das engrenagens	23
4.1.2. Modelagem das engrenagens e bases	23
4.1.3. Impressão do corpo de tração em PETG.....	24
4.1.4. Montagem do circuito controlador do motor de passo	24
4.1.5. Preparando circuito e programação	26
4.1.6. Preparação das garrafas e filamento	35
4.2. EXTRUSÃO E FABRICAÇÃO DO FILAMENTO.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1. EXTRUSORA DE GARRAFAS	39
5.2. FILAMENTO PET	40
5.3. CUSTO E TEMPO DE PRODUÇÃO DO FILAMENTO	42
5.4. IMPRESSÕES	42
6. CONCLUSÃO.....	46
7. REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

Dentro do crescente universo *maker*, a impressão 3D passa por um forte aumento na sua utilização, abrangência e diversidade. Segundo GEBHARDT (2016), a manufatura aditiva “revolucionou a relação entre projeto e produção”, permitindo que indivíduos e pequenos grupos alcancem resultados antes restritos a grandes indústrias. Um dos principais obstáculos para sua maior popularização, contudo, é o custo elevado de seus consumíveis.

A utilização da impressão 3D para confecção de protótipos que demandam mais filamento acaba elevando o custo e inviabilizando o projeto, pois o custo é superior quando comparado a outros materiais utilizados na fabricação como, PLA, ABS, PETG etc. Nesse contexto, a busca por alternativas sustentáveis e viáveis economicamente tem estimulado o desenvolvimento de soluções alternativas para a produção de filamentos, com destaque para o reaproveitamento de garrafas PET, que é um dos resíduos mais abundantes do mundo (ACTPAC, 2025). De acordo com a associação brasileira da indústria do PET (ABIPET, 2022), milhões de toneladas desse material são descartadas anualmente, o que reforça a necessidade de iniciativas que promovam a reciclagem desses resíduos.

Extrusores similares já existem na comunidade *maker*, mas a sua construção geralmente envolve a utilização de placas controladoras próprias de impressoras 3D industriais. Embora o uso desses componentes resulte em um dispositivo de maior precisão, ele também eleva consideravelmente o custo final. A adoção do Arduino, uma plataforma de *hardware* e *software* de código aberto, representa uma alternativa estratégica. O custo de suas placas e módulos adicionais é significativamente mais baixo, o que não só barateia o projeto do extrusor, mas também o torna mais acessível para manuseio e fácil de reproduzir.

Diante deste cenário, o presente projeto propõe o desenvolvimento de um extrusor de garrafas PET com o objetivo de reciclar garrafas plásticas de diversos tamanhos e cores, transformando-as em filamentos para impressão 3D. O filamento obtido deve se assemelhar, em qualidade e funcionalidade, aos produzidos por empresas especializadas, porém com um custo significativamente reduzido. O equipamento foi projetado para ser de fácil acesso, baixo custo e de simples construção, utilizando componentes eletrônicos acessíveis, como o Arduino, e outros materiais de baixo custo. Dessa forma, o projeto visa contribuir para a sustentabilidade ambiental e democratização do acesso à impressão 3D por meio da reutilização de resíduos plásticos.

O trabalho em questão está estruturado em mais 5 capítulos principais: o referencial teórico, no qual são apresentados os fundamentos relacionados à extrusão de polímeros, controle térmico, sensores e módulos utilizados; a metodologia, que descreve todo o processo construtivo e as escolhas técnicas do protótipo; a seção de resultados e discussões, onde são apresentados os testes realizados, análises de desempenho do extrusor, qualidade do filamento obtido, aspectos das impressões realizadas, tempo de extrusão e custo por quilograma; a conclusão, que sintetiza os principais achados do estudo, destacando as contribuições da extrusora desenvolvida, as limitações encontradas e sugestões para aprimoramentos futuros; e por fim, as referências bibliográficas, nas quais são listadas todas as fontes utilizadas para fundamentação teórica, metodológica e análise dos resultados.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Construir um dispositivo de baixo custo e fácil manuseio, capaz de processar garrafas PET e transformá-las em filamentos utilizáveis para impressão 3D, promovendo a reutilização de resíduos plásticos por meio de uma solução acessível e sustentável.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os parâmetros de impressão do filamento produzido a partir do PET reaproveitado;
- Comparar o desempenho de impressão e características visuais do material reciclado com os filamentos comerciais disponíveis no mercado;
- Desenvolver um sistema automatizado utilizando Arduino para controle da temperatura e tração na extrusora;
- Avaliar a viabilidade do filamento reciclado em impressoras 3D do tipo FDM, por meio de testes de impressão;
- Contribuir com a redução de resíduos plásticos e com a disseminação de tecnologias sustentáveis de baixo custo.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresentará os principais conceitos, características e estudos relacionados ao uso do PET (polietileno tereftalato), bem como as tecnologias de reciclagem e extrusão aplicadas à transformação desse material em novos produtos. Inicialmente, são discutidos os aspectos estruturais, térmicos e funcionais do PET, sua ampla presença na indústria especialmente no setor de embalagens e os desafios ambientais decorrentes do elevado volume de descarte desse polímero. Em seguida, são abordadas as principais técnicas de reciclagem mecânica e térmica, com ênfase no papel das extrusoras, incluindo versões artesanais e de baixo custo que têm se destacado em projetos acadêmicos, iniciativas *maker* e processos de reaproveitamento doméstico.

Dessa forma, o capítulo estabelece a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do projeto, fornecendo informações para compreender tanto o comportamento do material utilizado quanto os princípios que regem o funcionamento das extrusoras alternativas. Além disso, serão explorados os fundamentos envolvidos na formação do filamento, como comportamento térmico, parâmetros operacionais, estabilidade dimensional, variações durante o resfriamento e fenômenos de dilatação característicos da extrusão de PET reciclado. Essa base conceitual é essencial para justificar as escolhas de projeto, orientar os testes experimentais e interpretar os resultados apresentados nos capítulos seguintes.

3.1. POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Os polímeros termoplásticos são materiais poliméricos caracterizados pela capacidade de amolecer quando aquecidos e solidificar novamente ao serem resfriados, mantendo sua estrutura química praticamente inalterada. Esse comportamento ocorre devido à presença de cadeias moleculares lineares ou levemente ramificadas, unidas por interações intermoleculares fracas, como forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio (CALLISTER; RETHWISCH, 2020). Essa reversibilidade térmica permite que os termoplásticos sejam processados repetidas vezes por métodos como extrusão, moldagem por injeção e manufatura aditiva, favorecendo sua reciclabilidade (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

No contexto da impressão 3D, os polímeros termoplásticos desempenham papel fundamental, uma vez que sua fusão controlada possibilita a deposição camada a camada do

material, característica essencial dos processos de manufatura aditiva (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Materiais como o Polietileno Tereftalato (PET), o Políácido Láctico (PLA) e o Polipropileno (PP) são amplamente utilizados devido à combinação entre boas propriedades mecânicas, estabilidade térmica e viabilidade econômica (TAMBURINI et al., 2022). Além disso, estudos indicam que o uso de termoplásticos reciclados na produção de filamentos pode reduzir custos e impactos ambientais, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade da manufatura aditiva (VIDAKIS et al., 2023).

3.2. RECICLAGEM DO PET E SUSTENTABILIDADE

O PET (polietileno tereftalato), é um polímero semicristalino que possui temperatura vítrea numa faixa de 80 – 90°C, (nessa temperatura o PET começa a ficar maleável) e alta temperatura de fusão em comparação com outros polímeros, essa temperatura fica na faixa de 250 a 265°C, quando ele passa para a fase líquida (KROSCWITZ, 1990). Temperaturas muito acima desse intervalo resultam em oxidação do PET, liberação de gases tóxicos e pode torná-lo quebradiço.

O Brasil, apresenta um dos maiores índices de reciclagem mecânica do PET no mundo, retirando do meio ambiente cerca de 51% das embalagens consumidas (DA SILVA, 2022). O sucesso desse polímero na indústria se deve à sua ampla diversidade de aplicações, que vão desde o segmento têxtil (multifilamento) até as indústrias de alimentos, onde o resíduo reciclado é reaquecido e misturado à resina virgem (ROMÃO, 2009). O processo de reciclagem desse termoplástico é bem simples, porém ainda ocorre bastante perda de material durante a reciclagem devido às mudanças químicas provenientes das altas temperaturas (ROMÃO, 2009).

3.3. FILAMENTO 3D

A impressão 3D é um processo de fabricação, onde um modelo tridimensional é feito em um sistema CAD (Desenho Auxiliado por Computador), que gera um arquivo específico que pode ser “fatiado” em camadas, a partir dessas camadas, usando um sistema de coordenadas tridimensionais o *software* gera um arquivo com essas informações de coordenadas entre outras, com essas informações a impressora 3D vai depositando o material de forma uniforme e controlada no trajeto designado e desenhado pelo computador. Esse método é conhecido como FDM (Modelagem por Deposição Fundida). Esse material depositado é chamado de filamento (possui diâmetro padrão de 1,75 mm), que nada mais é do

que um fio de perfil circular geralmente maciço que quando aquecido se torna pastoso e permite a deposição de material pela impressora (BESKO, 2017).

3.4. EXTRUSORAS PET

As extrusoras são equipamentos amplamente utilizados há décadas na indústria, atuando em diversos segmentos como borracha, chumbo, polímeros, alimentos e outros. De modo geral, uma extrusora consiste em um sistema capaz de conduzir um material através de um tubo aquecido, no qual ele é plastificado e moldado conforme o formato desejado. No contexto da impressão 3D, esse princípio está presente tanto na fabricação de filamentos quanto no processo de extrusão durante a própria impressão (Ghen, 2024).

No caso específico das extrusoras utilizadas para PET, o funcionamento segue o mesmo princípio das extrusoras convencionais, porém exige atenção rigorosa aos parâmetros operacionais. Entre eles, destaca-se o controle preciso da temperatura, que deve permanecer dentro dos limites adequados às propriedades térmicas do PET; a velocidade de extrusão, que influencia diretamente a estabilidade do fluxo; e o diâmetro do bico de saída, fundamental para garantir uniformidade no filamento produzido. Esses fatores são essenciais para assegurar qualidade, consistência e repetibilidade no processo (Ghen, 2024).

De forma geral, na extrusora proposta serão utilizados componentes comuns, tais como: motores de precisão responsáveis pela rotação controlada do parafuso extrusor; sensores de temperatura com resolução compatível com as variações térmicas exigidas; resistências de aquecimento para promover a fusão da matéria-prima; e módulos de controle eletrônico, frequentemente associados a algoritmos PID (Proporcional-Integral-Derivativo), permitindo a estabilização da temperatura e a manutenção dos parâmetros operacionais dentro da faixa ideal.

3.5. DILATAÇÃO TÉRMICA DE METAIS

Quando um material metálico é aquecido, ele sofre mais do que só uma mudança na temperatura, a agitação das suas partículas internas aumenta, a distância média entre as suas partículas constituintes aumenta, como consequência há um aumento nas dimensões iniciais do corpo, esse fenômeno é chamado de dilatação térmica (SOUZA, 2007).

Para as extrusoras, esse fenômeno também deve ser considerado, pois influencia diretamente no resultado, uma vez que o bico tem seu furo ajustado à temperatura ambiente e, quando aquecido, aumentará esse diâmetro devido à dilatação linear. Esse aumento influencia

diretamente no diâmetro da extrusão. O cálculo dessa variação de diâmetro é dado pela Equação da dilatação linear:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Onde, ΔL é a variação do comprimento, L é o comprimento inicial do corpo, α é o coeficiente de dilatação do material e Δt é a variação de temperatura.

3.6. AUTOMAÇÃO E CONTROLE COM ARDUINO

O Arduino é uma plataforma amplamente utilizada em automação de residências e prototipagem, tendo como maior ponto positivo seu baixo custo e facilidade de manuseio. Esse sistema de extrusão proposto utiliza o Arduino como forma de monitorar temperatura através de sensores e controle fino de velocidade através de motores. Essa automação permite um melhor resultado no filamento produzido.

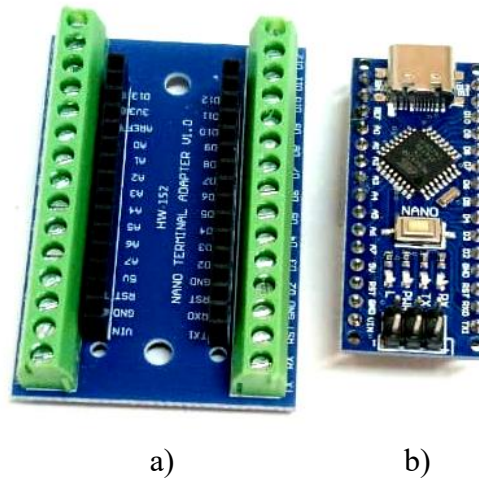
De modo simplificado, o funcionamento do Arduino gira em torno de portas eletrônicas que possuem sinais digitais ou analógicos. Os sinais digitais são sinais de 0 ou 1, que podem ser enviados ou recebidos pelo Arduino. Já os sinais analógicos são sinais que variam de intensidade (de 0 a 1023), e é usado para leitura de dados mais precisos. Além disso também há a função PWM (*Pulse Width Modulation*) das portas digitais. Essa função permite variar a intensidade do sinal de leitura ou de saída, é amplamente usada para implementação de módulos e sensores em diferentes protótipos (EVANS, 2013).

3.7. ARDUINO NANO E *SHIELD* DE EXPANSÃO

O Arduino Nano, Figura 1b), destaca-se por oferecer a mesma capacidade de processamento que o tradicional Arduino Uno, mas em um formato muito mais compacto. Essa miniaturização é seu principal diferencial, tornando-o a plataforma ideal para projetos com restrições de espaço, como em sistemas embarcados e dispositivos vestíveis (acessórios de vestuário).

Para facilitar a montagem de qualquer projeto nesse ecossistema, existem os *Shields* mostrado na Figura 1a). Trata-se de placas de expansão modulares que se encaixam diretamente no Arduino para adicionar funcionalidades específicas, como controle de motores ou conexão Wi-Fi. O uso de um *Shield* elimina a necessidade de solda e fiações complexas em uma *proto board*, o que torna o circuito final mais organizado, confiável e rápido de ser desenvolvido. (ARDUINO AG, 2025).

Figura 1- microcontrolador a) *Shield* Arduino nano e b) Arduino nano



Fonte: Autoria própria (2025).

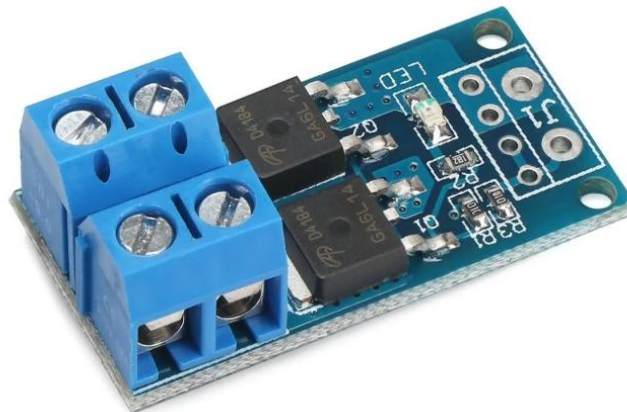
3.8. MÓDULO DE POTÊNCIA MOSFET

O módulo de potência MOSFET, mostrado na Figura 2, atua como uma chave eletrônica controlada que permite a um microcontrolador, como o Arduino, gerenciar cargas de alta potência. As saídas digitais do Arduino são limitadas, fornecendo uma corrente muito baixa (cerca de 20-40 mA), o que é insuficiente para acionar componentes como motores, resistências aquecedoras ou bombas d'água.

O módulo resolve essa limitação. O Arduino envia um sinal de controle de baixa energia, ou seja, tipicamente um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) para o terminal *Gate* do MOSFET. Esse sinal modula a condutividade do MOSFET, que por sua vez libera ou restringe o fluxo de corrente de uma fonte de alimentação externa e mais potente para a carga.

Dessa forma, o Arduino pode controlar de maneira precisa a potência entregue a um dispositivo, baseando-se em dados de um sensor. Por exemplo, pode-se aumentar a velocidade de uma ventoinha (carga) à medida que a leitura de um sensor de temperatura (variável) aumenta (HOROWITZ, 2015).

Figura 2- Módulo Mosfet



Fonte: <https://url-shortener.me/2G6J>

3.9. LEITOR DE TEMPERATURA MAX6675

O módulo MAX6675 desempenha um papel fundamental na leitura precisa de temperatura, sendo utilizado em conjunto com um termopar do tipo K. Seu chip interno realiza a conversão do sinal analógico proveniente do termopar em sinal digital, possibilitando a comunicação direta com o Arduino. A leitura é transmitida em *bits* por meio da interface SPI, (Serial Peripheral Interface), e, com o auxílio de uma biblioteca específica disponível na IDE, (Integrated Development Environment), do Arduino, é possível converter os valores recebidos em graus Celsius, com uma resolução de aproximadamente 0,25 °C (MAXIM INTEGRATED, 2015).

Figura 3- Módulo MAX6675



Fonte: <https://url-shortener.me/2G69>

3.10. PID (PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO)

O controle PID é uma das estratégias de controle mais utilizadas atualmente. Consiste em um controle de ganho derivativo ajustado a zero (C. Knospe, 2006). Esse sistema de

controle é muito importante para o monitoramento de dados, pois permite um ajuste fino dos parâmetros de controle, no exemplo de controle de temperatura, o PID permite ajustar os ganhos de acordo com a aproximação da temperatura alvo, diminuindo a variação de temperatura em determinada faixa.

3.11. *DISPLAY* LCD 16X2

O *display* LCD 16x2, Figura 4, é um componente amplamente conhecido no mundo *Maker* e em projetos com microcontroladores, sendo utilizado para a visualização de informações importantes, como leituras de sensores e estados de operação do sistema. Sua comunicação com o Arduino ocorre por meio de sinais digitais, podendo operar em modo de 4 ou 8 *bits*, conforme a configuração definida no código. Essa versatilidade e facilidade de integração tornam o LCD 16x2 um dos dispositivos de exibição mais utilizados em projetos eletrônicos educacionais e protótipos industriais (MAGDY, 2022).

Figura 4- *Display* LCD 16x2.



Fonte: <https://url-shortener.me/2G6N>

3.12. *DRIVER* A4988.

O *driver* A4988, Figura 5, é utilizado para o controle de motores de passo em projetos que exigem movimentos precisos, como CNC, impressoras 3D e sistemas automatizados. Seu funcionamento baseia-se na utilização de dois pinos de controle: DIR (direção) e STEP (passo). Por meio desses sinais digitais, é possível definir o sentido de rotação e a velocidade com que o motor irá girar.

O módulo permite o controle de micropassos, possibilitando ajustar a suavidade do movimento do motor, o que é essencial para operações que demandam alta precisão. Além disso, é possível regular a corrente fornecida ao motor através de um potenciômetro presente

no próprio *driver*, permitindo adaptar o funcionamento às características elétricas do motor e proteger o sistema contra sobrecarga (POLULU, 2017).

Figura 5- *Driver* A4988



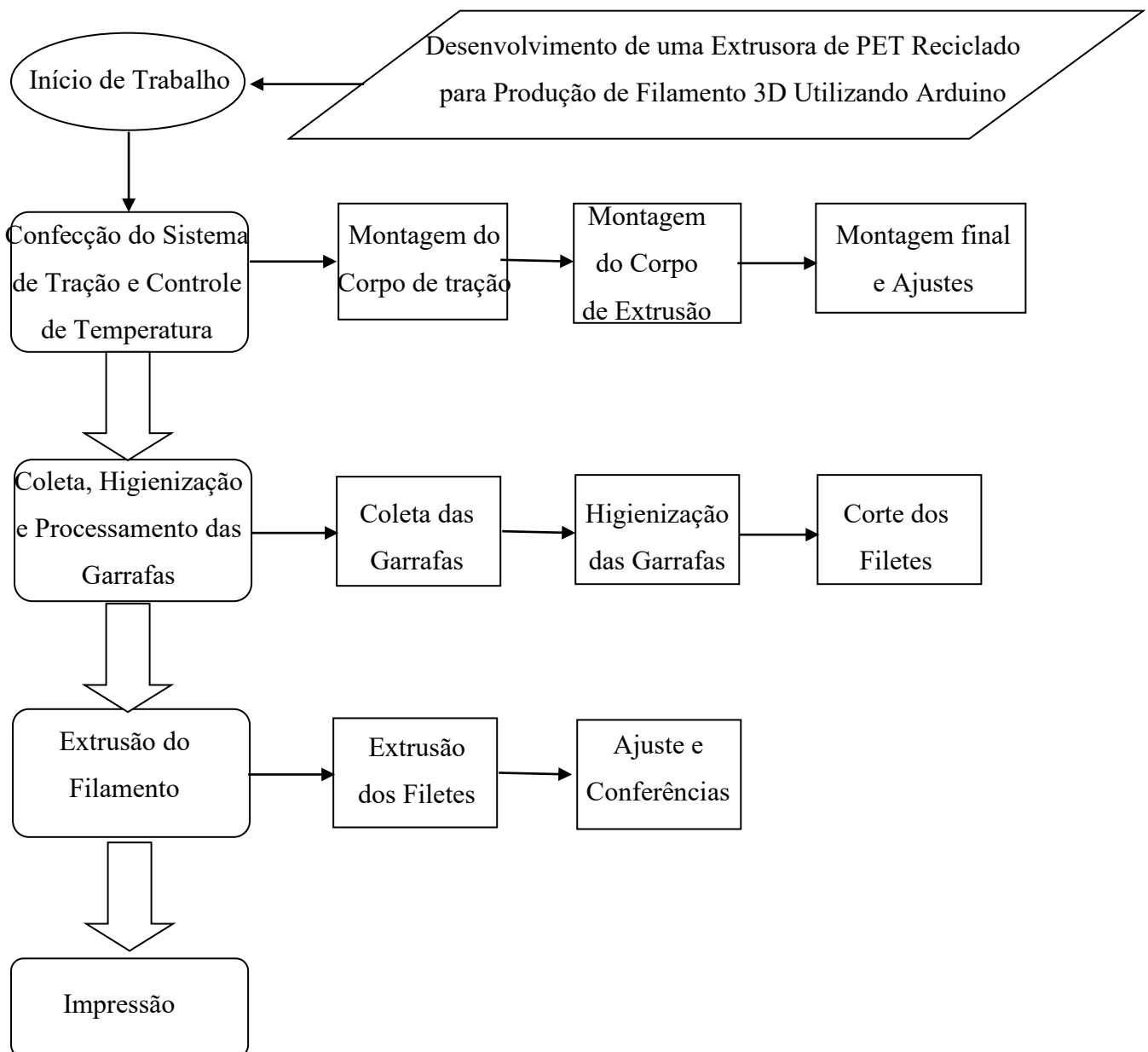
Fonte: Autoria própria (2025).

Este capítulo estabeleceu as fundamentações teóricas necessárias para o desenvolvimento de extrusoras de baixo custo, abordando os conceitos essenciais relacionados à reciclagem do PET, aos princípios de monitoramento e controle com Arduino e aos fenômenos físicos envolvidos no processo de extrusão. Esses conhecimentos são fundamentais para justificar as escolhas técnicas adotadas, orientar a implementação das etapas do projeto e embasar a análise e discussão dos resultados obtidos com a ferramenta proposta.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os métodos e procedimentos empregados no desenvolvimento do protótipo, abrangendo desde a seleção dos componentes e coleta dos materiais recicláveis até a etapa de testes e validação do produto. O fluxograma abaixo mostra todas as etapas do procedimento.

Fluxograma



4.1. MATERIAIS E COMPONENTES

Para confecção dessa extrusora de baixo custo, foram necessários alguns componentes e módulos Arduino, são eles:

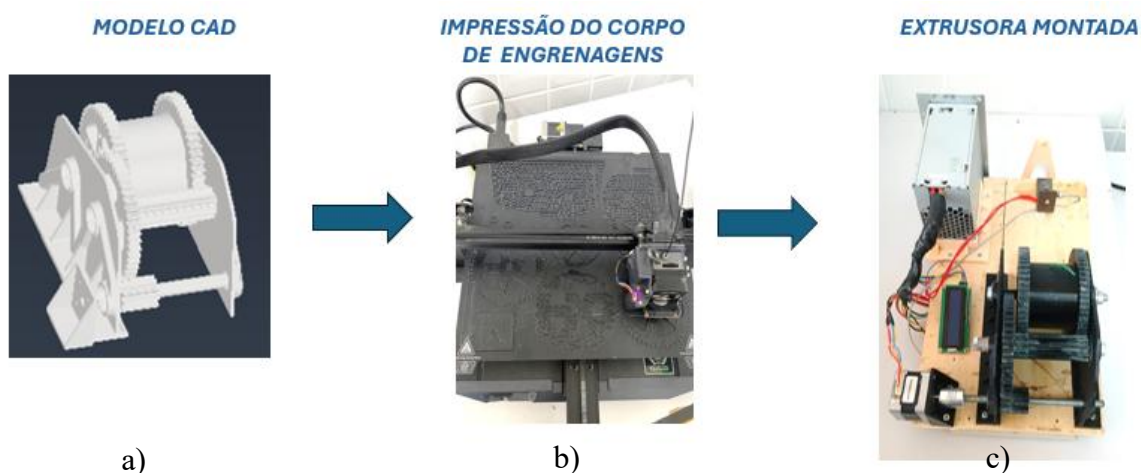
- Materiais e Componentes
- Arduino nano;
- *Shield* Arduino nano;
- Cartucho aquecedor 12 V 40 W;
- Bloco aquecedor impressora 3D *Ender 3*;
- *Driver* A4988;
- Capacitor eletrolítico 16 V 1000 uF;
- Barra de pinos macho Arduino;
- Barra de pinos fêmea Arduino;
- Motor de passo Nema 17;
- Sensor de temperatura MAX6675;
- *Display* LCD 16x2;
- Modulo de potência Mosfet;
- Acoplamento 5 para 8 mm;
- Parafusos sextavado com porca 14 mm x 150 mm;
- Rolamentos;
- Parafusos rosca fácil 3 mm x 12 mm;
- Fios 2,5 mm;
- *Jumpers* 2 mm;
- Fonte ATX 200 W;
- Termo retrátil;
- *Push button*;
- Conectores duas vias;
- Placa de circuito universal;
- Chave liga e desliga.

4.1.1. Confeção das engrenagens

Como a força de tração necessária para puxar o fio é relativamente alta, torna-se necessário o uso de um sistema de redução mecânica, de modo a aumentar o torque disponível no eixo de saída e garantir a eficiência do processo de extrusão.

O diagrama, mostrado na Figura 6, representa através de imagens as etapas de montagem e construção da extrusora.

Figura 6- Diagrama de construção da extrusora: a) Modelo CAD; b) Impressão do corpo de engrenagem; c) Extrusora montada.

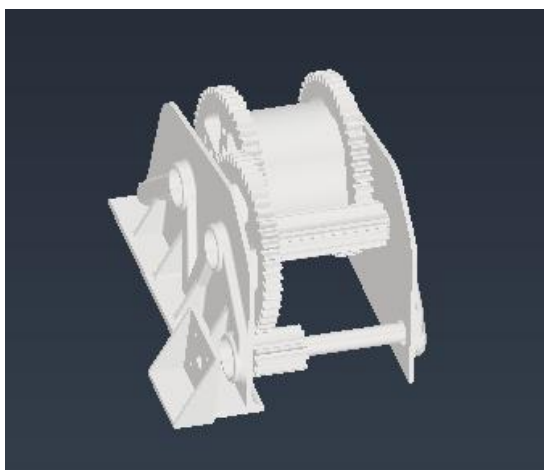


Fonte: Autoria própria.

4.1.2. Modelagem das engrenagens e bases

Para modelagem das engrenagens, mostrada na Figura 7, foi usado o gerador automático de engrenagens do Inventor da *Autodesk*. A partir dessas engrenagens foi projetada toda a estrutura em volta delas com o mecanismo de montagem do inventor.

Figura 7- Modelo CAD.

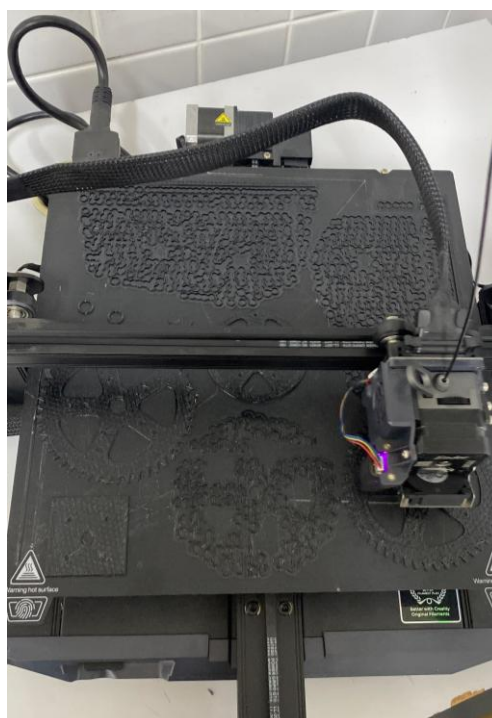


Fonte: Autoria própria (2025).

4.1.3. Impressão do corpo de tração em PETG

Na impressão, mostrada na Figura 8, foi utilizado o material PETG industrial, por apresentar boa resistência mecânica, fácil impressão e manuseio e custo mais acessível do que outros filamentos. A densidade de preenchimento foi de 40%, usando uma *Ender 3 S1 plus* da *Creality*.

Figura 8- Impressão do corpo de tração.

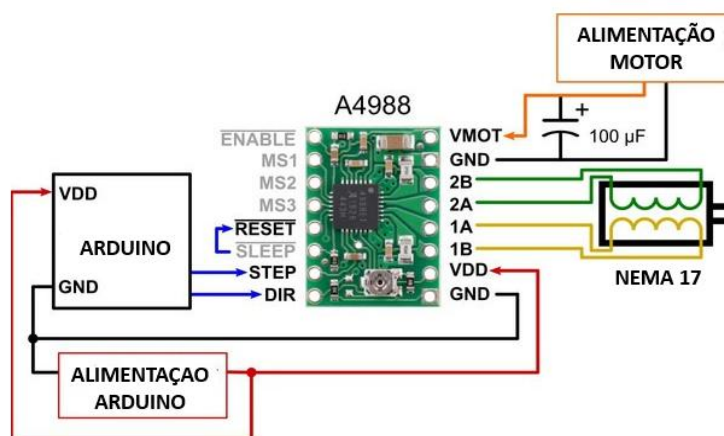


Fonte: Autoria própria (2025).

4.1.4. Montagem do circuito controlador do motor de passo

O *driver* A4988 serve para facilitar o controle do motor, simplificando o controle de duas bobinas a somente dois pinos digitais, entretanto o *driver* sozinho não é capaz de controlar o motor de passo, para isso é necessário fazer uma placa de circuito para realizar a filtragem de tensões para melhor controle do motor. Para isso é necessário seguir o diagrama da Figura 9.

Figura 9- Esquema elétrico motor de passo.



Fonte: <https://www.diarioelectronico hoy.com/blog/descripcion-del-driver-a4988>.

Os pinos MS1, MS2 e MS3, quando conectados a uma tensão 5V é possível determinar a divisão de passos de cada ciclo completo do motor.

Alguns componentes desse circuito foram reciclados de placas de fonte de alimentação, como é o caso dos pinos macho e fêmea e do capacitor eletrolítico, que foi substituído por um de 16 V e 1500 uF Essa substituição é possível devido à alimentação do circuito, que não ultrapassara 12 V; portanto, 16 V apresenta uma margem de segurança aceitável. A capacitância também pode ser substituída, desde que não seja inferior a 100 uF.

Na placa universal, a fixação e confecção das trilhas de alimentação foram feitas com solda branda usando estanho, assim como mostrado na Figura 10:

Figura 10- confecção da placa de controle do motor.



Fonte: Autoria própria (2025).

Esse circuito é responsável por toda a conexão entre motor e Arduino.

4.1.5. Preparando circuito e programação

Para chegar até o final da máquina em funcionamento, todo o processo foi dividido em etapas, tanto para a programação quanto para o *hardware*, colocando cada parte uma por vez e adicionando uma próxima fase.

- **Etapa 1: Montagem da estrutura, e preparação da fonte ATX**

Nessa etapa os fios de alimentação da fonte para o circuito são separados, deixando 4 fios de 12v de tensão, 6 GNDs e 1 de 5V de tensão.

Usando um suporte de madeira com dimensões 35x 22 centímetros, a fonte e a base das engrenagens foram fixados, além disso também foram fixados o motor Nema 17, o Arduino e a placa com *driver* A4988.

- **Etapa 2: Configuração da resistência aquecedora, módulo Mosfet e sensor de temperatura**

A configuração desses 3 componentes é muito importante, pois o PET não pode entrar em contato com temperaturas muito altas pois ele cristaliza e se torna quebradiço, além de soltar gases tóxicos quando alcança essas temperaturas. Com isso o módulo Mosfet e o sensor de temperatura tiveram o papel de limitar e monitorar essa temperatura. Para o melhor controle, um PID foi implementado, com esse possibilitou a obtenção de um controle mais suave do ganho de temperatura, pois quando a temperatura for mais baixa o Mosfet libera a tensão total para a resistência. Quando essa temperatura for chegando próximo da temperatura alvo, o Mosfet reduz esse ganho de temperatura, limitando a tensão que irá entrar na resistência.

Para melhor controle de espessura e acabamento do filamento, deve haver um equilíbrio entre a temperatura e a velocidade com que a fita é puxada. Quanto maior a temperatura, maior deve ser a velocidade. Quanto melhor for essa relação, melhor o acabamento do filamento obtido.

O código abaixo mostra a lógica do sistema de leitura e controle de temperatura no Arduino:

Código controle de temperatura

```
#include <GyverMAX6675.h> // Biblioteca do sensor MAX6675
#include <PID_v1_bc.h> // Biblioteca do PID
#define MOSFET_PIN 5 // PWM para controlar a resistência/driver MOSFET
#define PIN_CS 9
#define PIN_CLK 10
```

```

#define PIN_SO 8

// ===== OBJETO DO SENSOR =====
GyverMAX6675<Pin_CLK, PIN_SO, PIN_CS> termo;

// ===== VARIÁVEIS DO PID =====
double Setpoint = 255; // Temperatura desejada
double Input;          // Temperatura lida
double Output;          // Sinal PWM que vai para o MOSFET
// Ganhos iniciais do PID
double Kp = 30, Ki = 1.5, Kd = 80;
// Instância do PID
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    // Configura pino do MOSFET
    pinMode(MOSFET_PIN, OUTPUT);
    // Configura o PID
    myPID.SetMode(AUTOMATIC); // Ativa o PID
    myPID.SetOutputLimits(0, 255); // PWM de 0 a 255
}

void loop() {
    // Faz a leitura do MAX6675
    termo.readTemp();
    Input = termo.getTemp(); // Recebe a temperatura atual
    // Calcula o PID
    myPID.Compute();
    // Envia PWM para o MOSFET
    analogWrite(MOSFET_PIN, (int)Output);
    // Mostra no Serial
    Serial.print("Temp: ");
    Serial.print(Input);
    Serial.print(" C | PWM: ");
    Serial.println(Output);
}

```

```
delay(500); // pequena pausa  
}
```

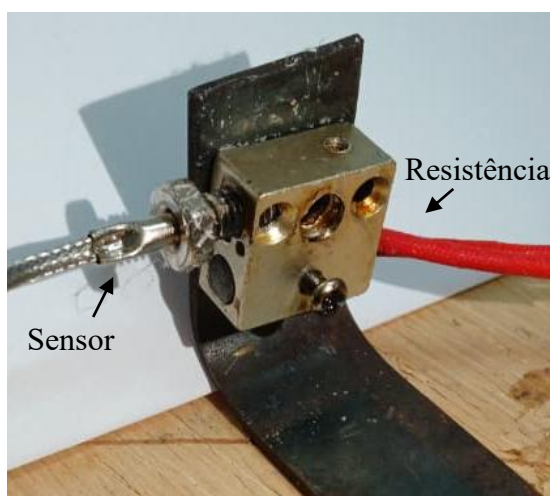
- **Etapa 3: Preparação do bloco de extrusão e fixação do sensor de temperatura**

Para a confecção do bloco de extrusão, foi utilizado um bloco padrão de impressora 3D juntamente com um bico convencional de impressora, de qualquer diâmetro. Em seguida, foi realizado um furo utilizando uma broca de 1,5 mm de diâmetro. Embora essa espessura ainda esteja abaixo do padrão dos filamentos convencionais, ela pode ser utilizada com ajustes no fluxo por meio do código, de modo a manter a proporção de material extrudado por centímetro cúbico.

Algumas extrusoras artesanais utilizam bicos adaptados com furos de 2 mm de diâmetro e regulam a velocidade de extrusão para que a espessura do filamento permaneça dentro da tolerância. No entanto, considerando que um bico de 1,5 mm tende a sofrer dilatação térmica durante o aquecimento, apenas uma compensação na velocidade de tração do filamento é suficiente para aproximar a espessura final ao padrão de 1,75 mm.

No bloco é necessário um furo lateral com rosca 6 mm para fixar o sensor e ter uma leitura precisa. Em seguida é necessária uma cantoneira para fixar o bloco usando o próprio bico para apertá-lo. O esquema final já com o sensor e a resistência fixadas fica como na Figura 11.

Figura 11- Bloco de extrusão.



Fonte: Autoria própria (2025).

- **Etapa 4: Programação e ajuste do motor de passo.**

O motor possui duas bobinas individuais, o que torna seu controle apenas com o Arduino um pouco mais complexo. Com o uso do *driver* A4988, esse controle é reduzido a apenas dois fios, STEP e DIR. Por meio desses pinos, é possível controlar a velocidade e o sentido de giro do motor NEMA.

STEP, que significa passos, serve para informar para o *driver* quando ele irá iniciar a movimentação de passos, cada vez que o sinal digital é enviado para essa porta muda, o *driver* da uma volta inteira. Para controlar a velocidade com que é dada essa volta, basta variar a espera entre essa mudança.

DIR, que significa direção, serve para informar para o *driver* qual sentido o motor irá girar. Esse sentido padrão irá depender da ordem em que foram ligadas as bobinas, mas basicamente quando o sinal digital é *LOW* o motor gira para um lado e quando o sinal é *HIGH* o motor gira para o lado contrário.

O funcionamento do motor consiste em receber do Arduino pulsos periódicos. Entretanto, o Arduino possui uma limitação de processamento, pois só consegue processar uma informação por vez, logo a repetição desse ciclo do motor acaba interferindo em forma de ruído quando o tempo coincide com a leitura também periódica de outros sensores. Para resolver isso a função *interrupt* foi implementada. Assim o Arduino irá focar em apenas uma tarefa e ignorar momentaneamente todas as outras, concluindo essa tarefa o Arduino volta ao loop normalmente, esses ciclos ocorrem em milissegundos de forma imperceptível.

Com isso, já é possível programar esse motor considerando somente o giro contínuo. No código abaixo, pode ser vista a programação adicionada à etapa inicial:

Código: controle de motor e temperatura.

```
#include <GyverMAX6675.h>
#include <PID_v1_bc.h>
#include <avr/interrupt.h>
// ===== PINOS =====
#define DIR_PIN 2
#define STEP_PIN 3
#define MOSFET_PIN 5
#define PIN_CS 9
#define PIN_CLK 10
#define PIN_SO 8
```

```

// ===== SENSOR =====
GyverMAX6675<PIN_CLK, PIN_SO, PIN_CS> termo;

// ===== PID =====
double Setpoint = 255; // Temperatura desejada
double Input; // Temperatura lida
double Output; // PWM para o MOSFET
double Kp = 30, Ki = 1.5, Kd = 80;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
// ===== CONTROLE DO MOTOR =====
volatile bool motorLigado = true; // Ligado sempre (ainda)
volatile bool stepState = false;
volatile int passoDelay = 1500; // Velocidade do motor
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  // Configuração dos pinos
  pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
  pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(DIR_PIN, LOW); // Direção fixa
  pinMode(MOSFET_PIN, OUTPUT);
  // Configura PID
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  myPID.SetOutputLimits(0, 255);
  // ===== CONFIGURA TIMER1 PARA GERAR STEPS AUTOMÁTICOS =====
  cli(); // Desabilita interrupções
  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;
  OCR1A = passoDelay; // Tempo entre steps
  TCCR1B |= (1 << WGM12); // Modo CTC
  TCCR1B |= (1 << CS10); // Prescaler
  TIMSK1 |= (1 << OCIE1A); // Ativa interrupção
  sei(); // Habilita interrupções

```

```

}

void loop() {
  // ===== LEITURA DO SENSOR =====
  termo.readTemp();
  Input = termo.getTemp();
  // ===== CONTROLE PID =====
  myPID.Compute();
  analogWrite(MOSFET_PIN, (int)Output);
  // ===== DEBUG NO SERIAL =====
  Serial.print("Temp: ");
  Serial.print(Input);
  Serial.print(" C | PWM: ");
  Serial.print(Output);
  Serial.print(" | Delay Motor: ");
  Serial.println(passoDelay);
  delay(500);
}

// ===== ISR DO TIMER1 (GERA PULSOS DE STEP) =====
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
  if (motorLigado) {
    stepState = !stepState;
    digitalWrite(STEP_PIN, stepState);
  }
}

```

- **Etapa 5: Inclusão do LCD e controle de velocidade.**

A reciclagem do material PET para uso na impressão 3D consiste na coleta de inúmeras garrafas de material PET, essa diversidade de tamanhos e espessuras, resulta em uma relação de temperatura e velocidade diferente para cada garrafa, para melhor controle desse fluxo de extrusão é inserido um botão para controle de velocidade do motor e um *display* LCD para melhor visualização das informações em tempo real. Esse botão funciona variando a velocidade do motor em cada clique, progredindo do nível zero de velocidade e

indo até o nível quatro, essa velocidade para o Arduino é vista como *delay*, quanto menor o delay maior a velocidade. As velocidades variam e devem ser reguladas de acordo com demanda média das fitas de garrafa PET.

O código abaixo, junta as duas etapas de controle de velocidade e leitura de informações em tempo real:

Código com implementação do LCD e controle de velocidade.

```
#include <GyverMAX6675.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <PID_v1_bc.h>
#include <avr/interrupt.h>
// ===== PINOS =====
#define DIR_PIN 2
#define STEP_PIN 3
#define BOTAO 4
#define MOSFET_PIN 5
#define PIN_CS 9
#define PIN_CLK 10
#define PIN_SO 8
// ===== OBJETOS =====
GyverMAX6675<PIN_CLK, PIN_SO, PIN_CS> termo;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
// ===== MOTOR =====
volatile bool motorLigado = false;
volatile bool stepState = false;
volatile int passoDelay = 2000;
int velocidadeNivel = 0;
// ===== PID =====
double Setpoint = 255;
double Input;
double Output;
```



```

double Kp = 30, Ki = 1.5, Kd = 80;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
// ===== LCD / TEMPO =====
unsigned long lastUpdate = 0;
const unsigned long updateInterval = 1000; // 1 segundo
bool estadoAnterior = HIGH;
void setup() {
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Iniciando...");
    delay(1500);
    lcd.clear();
    pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
    pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
    pinMode(MOSFET_PIN, OUTPUT);
    pinMode(BOTAO, INPUT_PULLUP);
    digitalWrite(DIR_PIN, LOW); // Direção fixa
    // ===== PID =====
    myPID.SetMode(AUTOMATIC);
    myPID.SetOutputLimits(0, 255);
    // ===== TIMER1 =====
    cli();
    TCCR1A = 0;
    TCCR1B = 0;
    OCR1A = passoDelay;
    TCCR1B |= (1 << WGM12); // Modo CTC
    TCCR1B |= (1 << CS10); // Prescaler
    TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
    sei();
}
void loop() {

```

```

// ===== BOTÃO =====
bool estadoAtual = digitalRead(BOTAO);
if (estadoAnterior == HIGH && estadoAtual == LOW) {
    velocidadeNivel++;
    if (velocidadeNivel > 4) velocidadeNivel = 0;
    if (velocidadeNivel == 0) {
        motorLigado = false;
    } else {
        motorLigado = true;
        passoDelay = 1500 - (velocidadeNivel * 1200);
        if (passoDelay < 400) passoDelay = 400;
        OCR1A = passoDelay;
    }
    delay(200); // debounce
}
estadoAnterior = estadoAtual;
// ===== ATUALIZA LCD E TEMP =====
unsigned long now = millis();
if (now - lastUpdate >= updateInterval) {
    lastUpdate = now;
    termo.readTemp();
    Input = termo.getTemp();
    myPID.Compute();
    analogWrite(MOSFET_PIN, (int)Output);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Temp:");
    lcd.print(Input);
    lcd.write(byte(223));
    lcd.print("C ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    if (motorLigado) {
        lcd.print("Vel:");

```

```

    lcd.print(velocidadeNivel);
    lcd.print("  ");
  } else {
    lcd.print("Motor PARADO ");
  }
}
}
}

// ===== ISR TIMER1 =====
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
  if (motorLigado) {
    stepState = !stepState;
    digitalWrite(STEP_PIN, stepState);
  }
}
}

```

Com o código pronto, basta fazer os ajustes de velocidade e temperatura; e, ao final deve aparecer no visor as informações conforme a Figura 12.

Figura 12- LCD com leitura de dados.

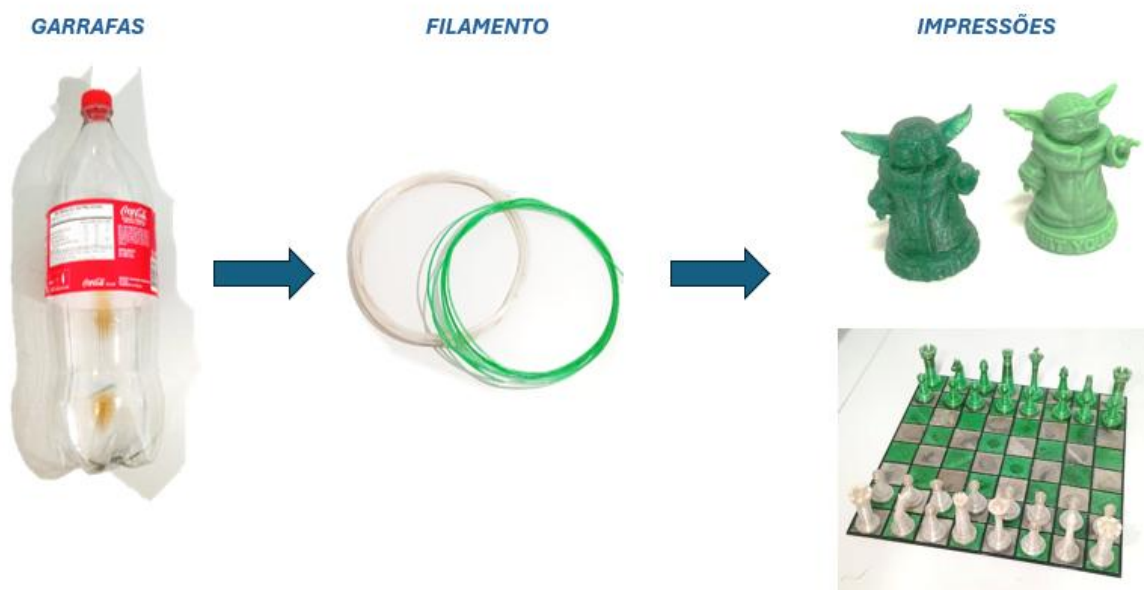


Fonte: Autoria própria (2025).

4.1.6. Preparação das garrafas e filamento

A etapa de preparação do filamento é constituída de algumas etapas. O diagrama, Figura 13, facilita a visualização dessas etapas através de imagens.

Figura 13- Diagrama fabricação e utilização do filamento.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.2. EXTRUSÃO E FABRICAÇÃO DO FILAMENTO

A extrusão para reciclagem das garrafas e transformação em filamento de impressão, requer um processo cuidadoso separado em algumas etapas:

- **Etapa 1: Coleta e limpeza das garrafas.**

As garrafas coletadas podem ser de qualquer tamanho e espessura, a sua limpeza deve ser feita com álcool 70%, para remoção de qualquer impureza, também deve ser realizada a raspagem da cola que fica depois da remoção dos rótulos.

- **Etapa 2: Corte das fitas.**

O corte das fitas das garrafas PET pode ser feito de diversas formas, desde que seja feito um corte uniforme e preciso. Para maior controle dessa espessura, uma ferramenta de corte feita com uma lâmina de apontador caseira foi usada. Possuindo altura de corte ajustável para regulagem da largura da fita, é possível manter uma proporção de material na hora da extrusão. Inúmeros cortadores desse gênero estão disponíveis em comunidades voltadas para impressão 3D, este em específico (Figura 14), foi produzido para atender uma demanda específica, porém outros podem ser usados.

Figura 14- Cortador de Garrafas (Filetador).



Fonte: Autoria própria (2025).

- **Etapa 3: Extrusão dos filetes.**

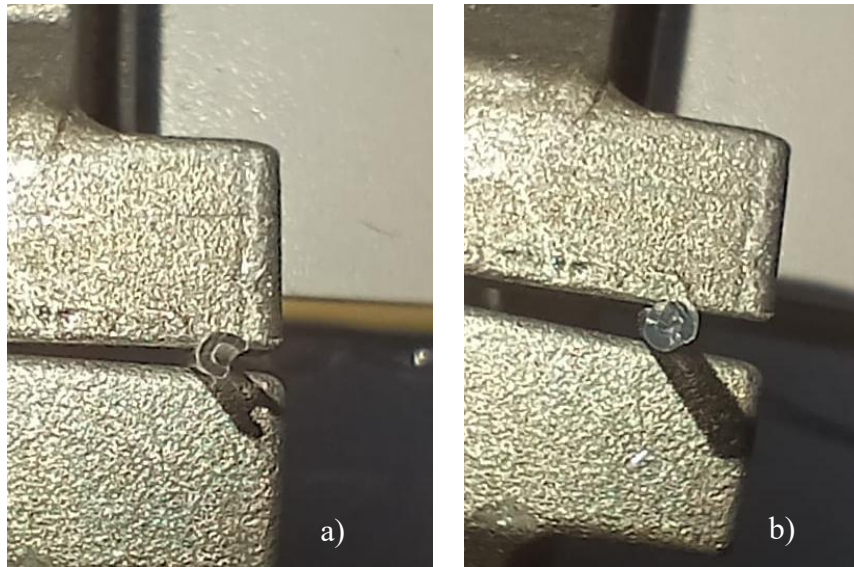
Depois das garrafas limpas e cortadas, a etapa de extrusão deve ser feita e regulada de acordo com a espessura da garrafa e observando o comportamento do filamento. De modo geral o filamento saindo da extrusora deve apresentar uma superfície similar a de filamentos convencionais, se a aparência estiver porosa e cheia de deformidades o filete está fundindo demais. Assim, a velocidade deve ser aumentada, porém, se a superfície estiver muito brilhante e apresentando uma seção transversal em forma de “C” (Figura 16a), o filete não está fundindo o suficiente, logo a velocidade deve ser diminuída. Considerando esses parâmetros, o filamento esperado deve ser com uma seção transversal em forma de “O” (Figura 16b), com um furo central, esse formato ocorre devido à forma como a fita de PET se organiza em um efeito de afunilamento ao passar na extrusora, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15- Efeito de afunilamento do filete.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 16- Seções transversais: a) formato em C; b) formato em O.



Fonte: Autoria própria (2025).

- **Etapa 4: Conferência e união dos filamentos.**

Com o filament já pronto, ele deve passar por uma etapa de correção e verificação para que ele apresente uma espessura próxima da espessura de filamentos convencionais de 1,75 mm. Para essa verificação, é utilizado um tubo de teflon que é padrão em impressoras 3D para filamentos desse perfil e possui espessura já dentro da tolerância. Os filetes feitos de garrafa possuem um comprimento limitado ao tamanho das garrafas usadas, gerando uma limitação no uso para impressão de objetos grandes. Para contornar esse problema, a união dos segmentos de filament pode ser realizada de duas maneiras. A primeira consiste no aquecimento das extremidades de cada segmento, promovendo sua fusão e posterior união. A segunda ocorre durante o próprio processo de extrusão: à medida que uma fita de PET se aproxima do fim, outra é inserida na extrusora, de modo que a quantidade de material na região de união permaneça equivalente à das demais regiões do filament.

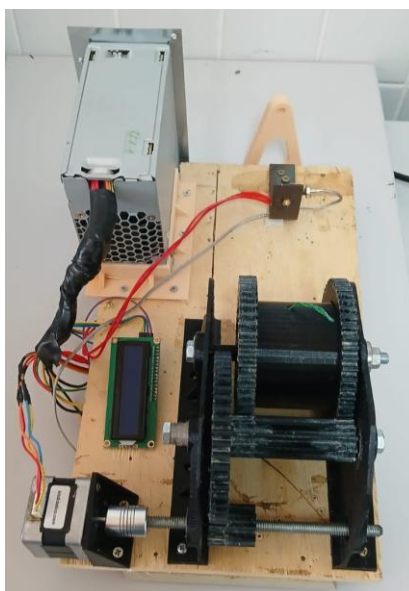
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante o desenvolvimento e a avaliação da extrusora artesanal para processamento de garrafas PET, bem como a discussão desses resultados. Os dados são organizados de forma a permitir a análise do desempenho do equipamento, da qualidade do material extrudado e dos desafios encontrados durante o processo.

5.1. EXTRUSORA DE GARRAFAS

A extrusora, Figura 17, e toda a sua estrutura foi fixada em uma base de madeira, o seu desempenho na fabricação de filamentos depende da boa relação entre temperatura e velocidade de tração do fio. A temperatura de extrusão do PET em impressoras é de 260 a 280 °C. Porém, nessa faixa de temperatura o PET fica líquido e não seria possível tracioná-lo com as engrenagens. Com isso, a temperatura alvo estabelecida no software foi de 255°C, mas, devido à perda de energia para o ambiente, essa temperatura permanece entre 230 e 240 °C, valor que está abaixo do limite recomendado para extrusão do PET. Ainda assim, essa faixa de temperatura permite que o PET fique maleável o suficiente e firme o bastante para ser tracionado. As velocidades de tração foram definidas em 4 níveis, tendo como velocidade 1 aproximadamente 7 RPM, e variando algo em torno 1 RPM a mais em cada velocidade.

Figura 17- Extrusora montada.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os custos totais para a confecção dessa extrusora de baixo custo, mostrado na Tabela 1, gira em torno dos componentes comprados, que foram divididos em agrupamentos de componentes. São eles: componentes substituíveis, são esses que serão substituídos ao se usar

uma placa de impressora 3d como controladora principal; componentes insubstituíveis, são esses que ainda serão necessários, mesmo utilizando uma placa diferente; componentes mecânicos; reciclados; filamento PETG.

Tabela 1: Custo da extrusora.

COMPONENTES ELETRONICOS	
SUBSTITUIVEIS: ARDUINO,	72,00
<i>DRIVERS...</i>	
COMPONENTES ELETRONICOS	
INSUBSTITUIVEIS: MOTOR, LCD,	127,00
SENSOR DE TEMPERATURA...	
COMPONENTES MECANICOS:	
PARAFUSOS, EIXOS...	82,00
RECICLADOS: FONTE,	0
INTERRUPTOR...	
FILAMENTO PETG	40,00
TOTAL	321,00

Com isso, consultando *marketplaces* online (Mercado Livre, *Amazon* etc). Pode-se ver que o custo para confecção desse dispositivo é relativamente mais baixo do que de outras extrusoras que usam componentes de impressora, visto que o preço de cada componente é mais caro.

5.2. FILAMENTO PET

O resultado obtido pode variar de garrafa para garrafa, para obtenção de resultados constantes, deve haver uma regra de proporção como citada antes, entre velocidade de tração e temperatura. Esses parâmetros determinam se o filamento será de qualidade com fácil acabamento, boa impressão, densidade constante etc. Foi feito um estudo comparativo, cujos resultados são mostrados na Figura 18.

Na Figura 18a, a qualidade é a mais próxima do ideal para impressão, pois há uma superfície mais lisa e obteve seção transversal em “O”. Nesse caso, o PET foi trabalhado dentro dos limites esperados de exposição a altas temperaturas, e a espessura média, que gira em torno de 1,72 mm, também fica próximo do valor de referência de 1,75 mm.

Na Figura 18b, há uma porosidade superficial notável, esta contribui para que haja maior variação na área da seção transversal. A área transversal nesse caso será ainda mais

densa e totalmente preenchida, mas com a baixa velocidade o PET teve mais tempo de exposição a altas temperaturas e isso prejudica a impressão causando entupimentos, consequentemente falhas na impressão.

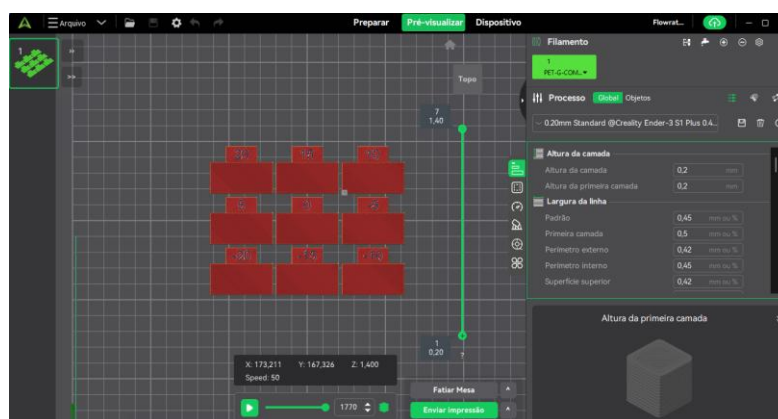
Figura 18- Aspecto dos filamentos: a) aspecto liso e homogêneo; b) aspecto poroso.



Fonte: Autoria própria (2025).

Com a regulagem desses parâmetros de extrusão é possível obter um filamento prático e usual, mas devido a sua seção transversal vazada há um menor volume de material por cm^3 , ou seja, densidade menor. Com isso, se faz necessário uma calibragem nos parâmetros de impressão mais especificamente no fluxo de extrusão da impressora. Para isso o teste de fluxo do fatiador Creality print. Esse teste padrão do fatiador consiste em usar um filamento de referência e variar o fluxo de 5 em 5% acima e abaixo do fluxo padrão de referência, conforme é mostrado na Figura 19.

Figura 19- Teste de fluxo.



Fonte: Autoria própria (2025).

Com esse teste foi determinado o fluxo de 110%, que apresentou o melhor aspecto de impressão a partir do fluxo padrão para PETG (filamento industrial), de 95%. Também foi observado que não é possível trabalhar na mesma velocidade de impressão que os demais filamentos, pois usando a temperatura máxima (260°C) da impressora atuando em velocidade padrão de 100% (correspondente a 100 mm/s), não dá tempo do plástico fundir da maneira correta. Ajustando também essa velocidade, se observou que a velocidade máxima de

impressão suportada é de 80 mm/s, representando 20% a menos na velocidade normal de impressão.

5.3. CUSTO E TEMPO DE PRODUÇÃO DO FILAMENTO

Mesmo com a reciclagem das garrafas PET há um custo de fabricação dos filamentos, pois ainda existem custos operacionais, como produtos de higienização, água, energia elétrica e desgaste de equipamentos. Considerando esses fatores, foi observado que cada garrafa apresenta um custo médio de R\$ 0,10 para limpeza e preparação.

Cada garrafa PET de 2 litros forneceu aproximadamente 12 g de material, o que implica que seriam necessárias cerca de 84 garrafas para produzir 1 kg de filamento. O processo de extrusão para essa quantidade demanda um tempo aproximado de 3 horas e 15 minutos.

Segundo ao site Soluções edp, a tarifa média de energia elétrica no estado do Rio Grande do Norte gira em torno de R\$ 0,75 por kWh. Somando a potência dos componentes, a extrusora utilizada apresentou um consumo aproximado de 140 W (0,14 kW). Assim, para o tempo total de extrusão (16,8 horas), o gasto energético foi:

$$0,14 \text{ kW} \times 16,8 \text{ h} = 2,355 \text{ kWh}$$

$$2,355 \text{ kWh} \times \text{R\$}0,75 = \text{R\$}1,764$$

Ou seja, o custo de energia para produzir 1 kg de filamento ficou em torno de R\$ 1,8.

Somando esse valor ao custo de limpeza das garrafas:

$$84 \times \text{R\$}0,10 = \text{R\$}8,40$$

$$\text{R\$}1,80 + \text{R\$}8,40 = \text{R\$}10,20$$

O custo estimado total para produzir 1 kg de filamento reciclado ficou, portanto, em aproximadamente R\$ 10,20, o que demonstra uma viabilidade econômica favorável em comparação com filamentos comerciais.

5.4. IMPRESSÕES

Com as revisões nos parâmetros de impressão, foi obtido um filamento apropriado para uso em impressoras. Algumas impressões foram feitas, mostrando qualidade de acabamento similar a filamentos convencionais. Segundo a MIRANDA (2025), o filamento reciclado também apresenta boa resistência mecânica em comparação com filamentos convencionais como: PETG, PLA e ABS. Nos ensaios mecânicos de tração e flexão, os corpos de prova confeccionados com filamento reciclado apresentaram valores de resistência

próximos aos de alguns materiais comerciais e superiores aos de outros. Entretanto, observou-se uma maior dispersão nos resultados, quando comparados aos demais filamentos, indicando variações mais significativas nas propriedades mecânicas do material reciclado.

Essa dispersão de resultados pode ser devido à variedade de garrafas utilizadas que são de diferentes usos e podem ter também diferenças sutis na composição, que influencia na uniformidade de impressão. Nas impressões abaixo é possível ver essa diferença de características visuais no decorrer das camadas de uma mesma peça.

Na Figura 20, pode-se observar a qualidade das impressões feitas com filamento reciclado e evidenciar as diferenças de tonalidades provenientes do uso de garrafas diferentes em uma mesma peça impressa. Da mesma forma, na Figura 21a e Figura 21b

Figura 20- impressões de filamento reciclável: a) Anel lanterna verde; b) Reis de xadrez



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 21- materiais diferentes: a) Baby Yoda em PET e PLA; b) cortador em PET e PETG



Fonte: Autoria própria (2025).

Acima a Figura 21, é possível observar que a precisão e fidelidade aos detalhes do protótipo são semelhantes mesmo em materiais diferentes.

A Figura 22 mostra um tabuleiro de xadrez que foi montado utilizando impressões de garrafas diferentes e uma base de PETG.

Figura 22- tabuleiro de xadrez com base preta em PETG.



Fonte: Autoria própria (2025).

6. CONCLUSÃO.

O desenvolvimento deste projeto teve como objetivo construir e avaliar uma extrusora de baixo custo capaz de transformar resíduos de PET em filamento reutilizável para impressão 3D, utilizando componentes eletrônicos acessíveis e técnicas de automação baseadas em Arduino. Para isso, foram estudadas as propriedades térmicas do PET, os princípios de extrusão, os mecanismos de controle de temperatura e velocidade, além da integração de sensores e módulos eletrônicos capazes de garantir estabilidade operacional. A metodologia aplicada abrangeu desde a seleção dos materiais e componentes até o processo experimental de extrusão, possibilitando a análise da qualidade do filamento produzido e da eficiência do sistema desenvolvido.

Os resultados obtidos demonstram que a extrusora construída foi capaz de processar o PET reciclado de forma satisfatória, gerando filamentos com boa uniformidade dimensional e consistência ao longo do processo. Observou-se que o controle térmico, implementado por meio do módulo MAX6675 e do controlador PID, desempenhou papel fundamental na manutenção da temperatura adequada, reduzindo variações que poderiam comprometer a qualidade final do material extrudado. Além disso, a utilização do motor controlado via PWM e driver adequado garantiu uma extrusão estável, contribuindo para a formação de um fluxo contínuo e homogêneo. Os testes realizados indicaram que o sistema apresenta potencial para aplicações acadêmicas e experimentais, permitindo a produção de filamento com custo significativamente inferior ao de materiais comerciais.

Diante do cenário de crescente produção de resíduos plásticos e da demanda por soluções sustentáveis, este trabalho evidencia que a união entre reciclagem, automação acessível e tecnologias abertas representa um caminho promissor para a economia circular. A extrusão artesanal de PET se mostra não apenas uma alternativa ambientalmente favorável, mas também uma ferramenta capaz de estimular a inovação, reduzir custos e incentivar o desenvolvimento tecnológico em ambientes acadêmicos, *makers* e domésticos. Assim, conclui-se que o projeto atingiu seus objetivos e contribui de forma significativa para a promoção de práticas sustentáveis e para o avanço de tecnologias de manufatura alternativa.

7. REFERÊNCIAS

- ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET. Dados de Reciclagem de PET no Brasil. São Paulo, 2022. Acesso em: 16 jun. 2025.
- ACTPAC. Global Plastics Industry. Acesso em: 08 dez. 2025.
- ARDUINO AG. Arduino Shields. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoShields>. Acesso em: 11 out. 2025.
- BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; SIEBEN, Priscila Gritten. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. *Gestão Tecnologia e Inovação*, v. 1, n. 3, p. 9–18, 2017.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- DA SILVA, Luís Roberto Cavalcanti; DE ANDRADE, Luciano Pires. Reaproveitamento de rejeitos de politereftalato de etileno (PET) no Brasil: uma revisão. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 16, n. 3, 2022.
- EVANS, Martin; NOBLE, Joshua; HOCHENBAUM, Jordan. *Arduino em ação*. São Paulo: Novatec Editora, 2013.
- FERNANDES, Pedro Henrique et al. Desenvolvimento de uma extrusora de filamento PET reciclado de baixo custo. In: *Congresso Nacional de Sustentabilidade (CONASUST)*. Instituto Militar de Engenharia, 2024. Disponível em: <https://ime.events/conasust2024/pdf/32991>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- GEBHARDT, A.; HOTTER, J.-S. *Fabricação Aditiva: Impressão 3D para Prototipagem e Manufatura*. Munique: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016.
- GHENO, S. M.; SANTOS, R. M. dos; ROSA, T. F.; MELLO, V. da S.; MELLO, V. da S. Estudo do desenvolvimento de um dispositivo de extrusão de filamento para impressão 3D a partir de PET recicláveis. *SITEFA*, v. 7, n. 1, e7118, 2024.
- GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2. ed. New York: Springer, 2015.
- HOROWITZ, Paul; HILL, Winfield. *The Art of Electronics*. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- KNOSPE, C. Controle PID. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 26, n. 1, p. 30–31, fev. 2006. DOI: 10.1109/MCS.2006.1580151.

- KROSCWITZ, J. I. *Concise Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990. p. 328–329.
- MAGDY, Khaled. Arduino 16×2 LCD Interfacing Tutorial. DeepBlueEmbedded, 2022. Acesso em: 1 nov. 2025.
- MAXIM INTEGRATED. MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter. San Jose, CA, 2015. Acesso em: 1 nov. 2025.
- MIRANDA, Sabrinna. Estudo comparativo das propriedades mecânicas de filamentos reciclados e convencionais em impressão 3D. UFERSA, 2025.
- NASCIMENTO, Elizabete; SILVA, Márcio; SANTOS, João. A reciclagem do PET como alternativa sustentável. *South American Development Society Journal*, v. 12, n. 32, p. 1–10, 2025. Acesso em: 16 jun. 2025.
- POLULU. A4988 Stepper Motor Driver Carrier. Pololu Corporation, 2017. Acesso em: 1 nov. 2025.
- ROMÃO, Wanderson; SPINACÉ, Márcia A. S.; PAOLI, Marco-A. de. Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. *Polímeros*, v. 19, p. 121–132, 2009.
- SOUZA, Luiz Fernando de. Um experimento sobre a dilatação térmica e a lei de resfriamento. 2007.
- TAMBURINI, E. et al. Thermo-mechanical recyclability of additively manufactured polypropylene and polylactic acid parts. *Polymers*, v. 14, n. 11, p. 1–18, 2022.
- VIDAKIS, N. et al. The effect of mechanical recycling on the thermal and mechanical properties of PLA and other thermoplastics for 3D printing. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 31, p. 1–15, 2023.