

Desenvolvimento de uma extrusora para confecção de filamento a partir de polímeros (ABS) reciclados.

Fernando Brongar da Fontoura¹, Rumenigue Hohemberger¹

¹Instituto Federal Farroupilha - Campus Alegrete
RS-377 - Km 27 - Passo Novo - CEP 97.555-000 – Alegrete – RS – Brazil

fernando@fastserviceti.com.br,
rumenigue.hohemberger@iffarroupilha.edu.br

Resumo. *O crescente volume de resíduos eletrônicos (e-waste) representa um desafio global, e o plástico ABS é um dos principais componentes utilizados na indústria para fabricação de equipamentos eletrônicos. Encontrar alternativas para reciclagem do ABS é fundamental para reduzir o impacto ambiental e promover a economia circular. Dentre as possibilidades de soluções para o problema está a reutilização do ABS na fabricação de filamentos para impressoras 3D. No entanto, a utilização de filamentos ABS reciclados em impressoras 3D ainda é limitada. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma extrusora experimental para a produção de filamentos ABS reciclados de cartuchos de toner e avaliar a qualidade do filamento. Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para a promoção da reciclagem de plásticos e para o desenvolvimento de tecnologias mais acessíveis e sustentáveis de impressão 3D.*

Abstract. *The growing volume of electronic waste (e-waste) represents a global challenge, and ABS plastic is one of the main components used in the industry for the manufacture of electronic equipment. Finding alternatives for ABS recycling is essential to reduce environmental impact and promote a circular economy. Among the possible solutions to the problem is the reuse of ABS in the manufacture of filaments for 3D printers, however, the use of recycled ABS filaments in 3D printers is still limited. This work aims to develop an experimental extruder for the production of recycled ABS filaments from toner cartridges and evaluate the filament quality. It is expected that the results of this research will contribute to the promotion of plastic recycling and the development of more accessible and sustainable 3D printing technologies.*

1. Introdução

De acordo com estimativas do documento “The Global E-waste Monitor 2020” (Unitar, 2020 apud Green Eletron, 2023), o mundo gerou 53,6 milhões de toneladas de lixo eletrônico em 2019, uma média de 7,3 quilos por habitante. Nesse contexto, o Brasil lidera a produção de resíduos eletrônicos na América do Sul e está entre os cinco maiores geradores mundiais. Ainda segundo o estudo, apenas 9,3 milhões de toneladas, o que representa 17,4% de todo o lixo eletrônico descartado, foram formalmente coletadas e recicladas.

De acordo com Hirayama (2015 apud Kasper, Bernardes e Veit, 2011; Schlummer et al., 2007; Taurino, Pozzi e Zanasi, 2010), os principais polímeros termoplásticos presentes em equipamentos elétricos e eletrônicos são o poliestireno de alto impacto (HIPS), o copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), entre outros. Além

disso, cerca de 65% dos polímeros presentes em equipamentos de informática são compostos por ABS e HIPS (Brennan, Isaac e Arnold, 2002 apud Monteiro et al., 2007).

O crescente volume de resíduos eletrônicos (*e-waste*) representa um desafio global. A reciclagem é fundamental para reduzir o impacto ambiental e promover a economia circular. De acordo com Perfil das Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil, das principais resinas termoplásticas consumidas no Brasil em 2022 (13,2%) são oriundas de plásticos reciclados, deste montante, menos de 1% é plástico ABS (ABIPLAST, 2023).

O ABS é um termoplástico muito utilizado na indústria por ser um material viável economicamente (relativamente barato), muito resistente e ao mesmo tempo leve e flexível, que pode receber qualquer tipo de cor e apresentar aspecto que vai do opaco ao transparente (eCycle, 2017). A sua aplicação é ampla, podendo ser encontrado em tubulações, embalagens cosméticas, brinquedos de montar, impressoras, telefones, calculadoras, aspiradores, televisores, peças automotivas, aparelhos de ar-condicionado, teclado e também em filamentos para a impressão 3D.

A reciclagem do ABS pode ser destinada a confecção de filamento para impressora 3D através do processo de extrusão, o processo de extrusão consiste em forçar a passagem controlada do material plástico fundido através de um cilindro (também conhecido como canhão) e na sua saída o material é comprimido em uma matriz com a forma desejada do produto. Por meio desse processo são fabricados, por exemplo, chapas, perfis ou filmes, para posterior acabamento” (ABIPLAST, 2023).

Segundo Quelho (2018) para o processamento de materiais em extrusoras de pequenas e grandes escalas (industriais), o primeiro passo é definir o tipo de material que será extrusado no equipamento, pois todo o equipamento será ajustado para poder garantir que o material atinja as condições mínimas para seu processamento.

Assim a plataforma de prototipação arduino surge como uma alternativa para controle e ajustes do equipamento. Um controle preciso se dá através de sensores e atuadores, o Arduino permite monitorar e ajustar em tempo real variáveis como temperatura e fluxo, possibilitando uma qualidade e a consistência do filamento produzido(OLIVEIRA et al., 2020).

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma extrusora para fabricação de filamentos para impressoras 3D a partir de polímeros ABS reciclados, controlada por uma placa Arduino Uno R3 com sistema embarcado para controle do equipamento.

Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para a promoção da reciclagem de plásticos ABS e para o desenvolvimento de tecnologias mais acessíveis e sustentáveis de impressão 3D, que utilizam tecnologias de manufatura aditiva.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Lixo Eletrônico

Conforme indicado por Vieira, Soares e Soares (2009) em Almeida et al. (2015), resíduo eletrônico é conceituado como todo ou qualquer produto que possua origem tecnológica, tornando-se obsoleto ou inservível, sendo descartado ou jogado ao lixo. Neste sentido, é possível considerar os telefones celulares, televisores, eletrodomésticos portáteis, rádios, todos os equipamentos de microinformática, filmadoras, vídeos, ferramentas elétricas, DVDs, brinquedos eletrônicos, lâmpadas fluorescentes, e milhares de outros produtos que facilitam a vida da sociedade moderna, e apresentam-se, atualmente, como produtos descartáveis, sendo estes exemplos de resíduos eletrônicos (LINHARES, 2012).

2.2 Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

Conforme descrito por Hirayama (2015), o ABS é um termoplástico de engenharia com características excepcionais. A acrilonitrila fornece resistência química e rigidez, o butadieno apresenta excelente resistência ao impacto e o estireno facilita o processamento e aumenta a rigidez. A aplicação do ABS em mistura com outras resinas como o policarbonato (PC) e o policloreto de vinila (PVC) apresenta vantagens como a redução de custo, melhoria da resistência ao impacto e da processabilidade (UTRACKI, 1992). O ABS é usado em partes automotivas, brinquedos, geladeiras, fornos de micro-ondas, cafeteiras, televisões, monitores, mouses e outros eletrodomésticos.

2.3 Processo de Extrusão de Plásticos

A extrusão é o processo produtivo mais utilizado no país para a fabricação de transformados plásticos, de acordo com (ABIPLAST, 2023), ele responde por 60% do total da produção brasileira. Nessa técnica, o polímero (mais aditivos e cargas) moldável passa através de uma matriz de formato predeterminado. Há dois tipos de extrusão: a quente e a frio, e esse material pode ser enrolado, cortado em tamanhos específicos, em grânulos regulares, dentre outros tipos (Melany Stelle, 2019).

O processo permite a fabricação contínua de tarugos, tubos, lâminas ou filmes, isto é, produtos que apresentam perfil definido” (MANO; MENEZES, 2004, apud Melany Stelle, 2019). A peça extrusada é solidificada de forma progressiva, e devem ser observados o tipo de rosca, a temperatura de processamento e a velocidade do processamento. Esse processo pode ser aplicado em termoplásticos e termofixos. Para o processo de extrusão é utilizada uma extrusora, como pode ser visto na Figura 1 . A extrusora é composta por uma série de componentes, dentre eles podemos destacar o canhão. Nesta parte é efetuada a compressão do material através de um fuso contra as paredes do tubo. Este por sua vez é aquecido por uma resistência elétrica. O posicionamento da resistência é feito na cabeça ou porção final do tubo. O material a ser extrusado chega sob pressão, passa do estado sólido para o estado pastoso, toma a forma desejada e é tracionado e resfriado rapidamente.

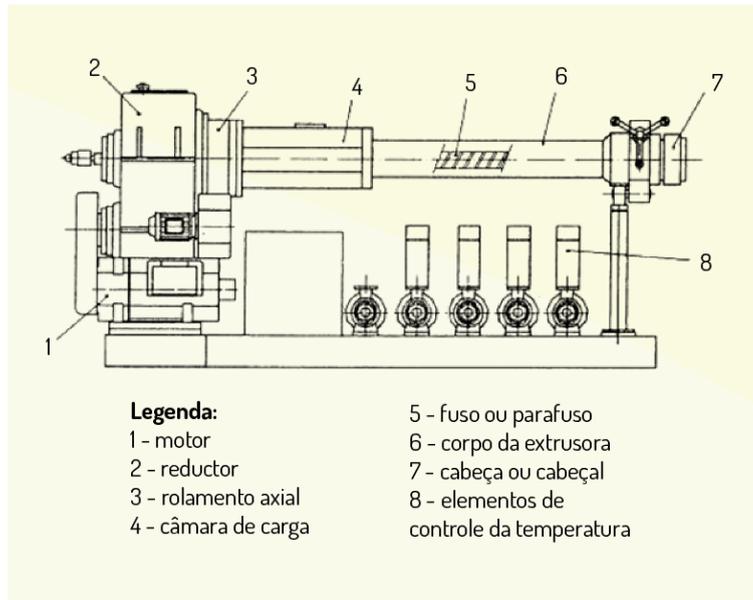


Figura 1. Corte transversal de uma extrusora. Fonte: WRH Preditiva - Análise De Vibrações

2.4 Controle de Qualidade em Extrusão de Plástico

O controle de qualidade na extrusão de plástico é fundamental para garantir a produção consistente de produtos de alta qualidade. Envolve inspeção e monitoramento minuciosos em várias etapas do processo de produção. O primeiro passo é a inspeção das matérias-primas, garantindo que os grânulos plásticos sejam de qualidade adequada e isentos de contaminantes. Durante o processo de extrusão propriamente dito, é essencial monitorar e regular continuamente a temperatura e a velocidade da rosca de extrusão, pois qualquer desvio pode afetar significativamente a qualidade do produto. As características do produto final, como dimensões, resistência e aparência, também precisam ser verificadas regularmente em relação aos padrões especificados. Isso pode envolver o uso de ferramentas como paquímetros para medição e espectrofotômetros para consistência de cores. Quaisquer produtos que não cumpram os padrões estabelecidos são rejeitados e os ajustes apropriados são feitos no processo para corrigir os problemas. O papel do controle de qualidade na extrusão de plástico não é apenas manter a qualidade do produto, mas também minimizar o desperdício, melhorar a eficiência e manter a reputação da empresa no mercado (Jieya, 2023).

2.4 Impressão 3D

Conforme Morandini e Del Vechio (2020) a impressão 3D é uma tecnologia capaz de conceber objetos físicos, tendo por base as dimensões de altura, largura e profundidade de um modelo digital fornecido por um aplicativo de computador. De maneira mais técnica, a impressão tridimensional pode ser descrita como um sistema de

impressão por manufatura aditiva, já que a matéria-prima usada no processo é adicionada gradualmente em várias camadas, até completar o formato do objeto final. Confira a representação do processo na Figura 2

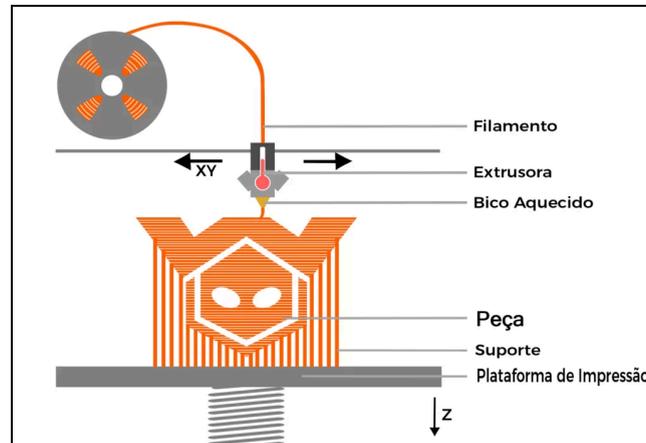


Figura 2. Processo de impressão 3D FDM. Fonte: Wishbox, 2019

As impressoras 3D estão revolucionando a indústria justamente pela rápida capacidade de prototipagem, já que antes, para obter um protótipo, era necessário modelar peças manualmente e somente depois produzir uma matriz de produção (Cosetti, 2018 apud Morandini, M e Del Vechio, 2020).

3. Trabalhos Relacionados

A reciclagem do plástico desempenha um papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais, desde a redução da poluição de solos e oceanos até a diminuição da demanda por recursos não renováveis. Além disso, ela estimula a economia circular, gera empregos e contribui para um futuro mais sustentável.

3.1 Reciclagem do copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno e do poliestireno de alto impacto oriundos de rejeitos de equipamentos elétricos e eletrônicos na forma de blendas poliméricas.

Proposto por [HIRAYAMA, Denise 2015], o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um estudo sobre a reciclagem mecânica dos polímeros termoplásticos ABS e HIPS provenientes de rejeitos de equipamentos elétricos e eletrônicos na forma de blendas e averiguar a viabilidade de aplicação destes materiais. Para alcançar este objetivo, o estudo da Tese foi dividido em seis partes. A primeira parte trata da caracterização dos componentes poliméricos dos rejeitos de equipamentos elétricos e eletrônicos (CP-REEE). Na segunda parte foram estudadas as propriedades mecânicas dos polímeros ABS e HIPS (virgens e reciclados) com a incorporação dos compatibilizantes: o poli(estireno-b-butadieno-b-estireno) (SBS) e o poliestireno

b-etileno-co-butadieno-b-estireno (SEBS). Na terceira parte as blendas de ABS/HIPS virgens e recicladas foram analisadas na presença dos compatibilizantes. A quarta parte foi dedicada ao estudo das blendas ABS/HIPS mistas, ou seja, blendas com uma parcela de material reciclado e outra de material virgem. Na quinta parte foram comparadas as propriedades mecânicas das blendas produzidas nesta pesquisa. Finalmente, na última parte explorou-se as mudanças causadas pelo envelhecimento foto-oxidativo em uma determinada composição de uma blenda virgem e uma blenda reciclada.

As análises dos rejeitos de equipamentos elétricos e eletrônicos mostraram que os principais polímeros empregados são o ABS e HIPS e confirmaram a presença de pigmentos, retardantes de chama halogenados e de supressores de fumaça nestes materiais. Os polímeros ABS e HIPS reciclados apresentam maiores valores de resistência à tração e de módulo de Young e menor alongamento na ruptura e resistência ao impacto quando comparados como os polímeros virgens. Estas mudanças nas propriedades mecânicas são atribuídas ao efeito dos aditivos e da degradação destes polímeros. As maiores perdas de propriedades foram de alongamento na ruptura para o HIPS e resistência ao impacto para o ABS.

3.2 Extrusora de termoplástico PET para produção de filamentos para Impressão 3d: projeto de sistema mecânico

Proposto por [Neto, 2019], o presente trabalho visa a elaboração e fabricação de um dispositivo capaz de realizar extrusão de filamentos para impressoras 3D em pequena escala, utilizando como matéria-prima o termoplástico PET, contribuindo para a reciclagem do mesmo, além de ser um equipamento de baixo custo e com fácil manuseio. A escolha por este tema foi motivada pelo crescente aumento no uso da impressão 3D, seja em laboratórios e nas casas das pessoas, além da questão ambiental pela escolha do material a ser empregado como matéria-prima.

Mesmo com as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do projeto, foi alcançado o objetivo de fabricação de um equipamento para extrusão de plástico, sendo necessário ajustes futuros. Confirmou-se com o visto na literatura, o comportamento complexo do PET durante o processo de extrusão, em que a extrusão do PET puro não se obtém filamentos com precisão, sendo necessário procedimentos para que ocorra uma correta transformação durante o processo de extrusão, em que as etapas do procedimento são: secagem, desumidificação e cristalização.

3.3 Estudo de reutilização de ABS de extrusão após processamento na indústria automotiva: uma prática de sustentabilidade e competitividade para as empresas.

Proposto por [CHAVES, Anderson Alves 2014] o objetivo geral deste trabalho é um estudo de avaliação para a reutilização de aparas pós-industriais de ABS em suas peças de origem, visando à diminuição de consumo de material virgem (primeiro processamento) e conseqüentemente a redução de custos, mão-de-obra, poluição e energia. Este estudo tem como objetivo avaliar a aplicação de 20% de aparas pós-industriais junto aos 80% de material virgem (primeiro processamento), com esse

percentual será possível reutilizar quase todas as aparas pós-industriais geradas no processo.

Através dos resultados obtidos por [CHAVES, Anderson Alves 2014] nos ensaios, é possível concluir que o material gerado no processo (aparas pós-industriais) pode ser reaproveitado no percentual e condições definidas neste estudo, pois aplicando 20% de material reciclado ao material virgem ocorrem alterações, porém as propriedades se mantiveram dentro das faixas indicadas pelo fornecedor de ABS, o que nos indica que o material está apto para ser aplicado em suas peças de origem.

3.4 Desenvolvimento de extrusora experimental e software para controle e supervisão das variáveis de extrusão do abs

Proposto por [Quelho, 2018], o principal objetivo deste estudo é desenvolver uma extrusora para fins didáticos e um software para controle e supervisão das variáveis de extrusão do ABS. Para alcançar esse objetivo, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar validação da interface homem máquina, com execuções em modo automático e modo manual, a fim de avaliar o tempo de resposta do sistema a sinais impostos pelo operador.
- b) Avaliar o comportamento térmico do canhão e o tempo de aquecimento e resfriamento do sistema.
- c) Avaliar as propriedades geométricas do material puro e o extrusado, quando submetidos a condições de processamento do equipamento;
- d) Avaliar por Termogravimetria, o comportamento do material extrusado e validar suas principais características em relação ao material puro.
- e) Realizar ensaios de tração, visando obter informações a cerca das propriedades mecânicas do material e da interação entre o material e o meio;

Com o estudo do comportamento térmico, foi evidenciado que os materiais não perderam suas características térmicas de processamento, termicamente os três geraram resultados satisfatórios. Já na análise mecânica, foi possível evidenciar uma baixa dispersão entre as amostras de cada material, e observar o comportamento característico de materiais de origem do ABS com elevada rigidez e alta resistência a impacto.

As pesquisas analisadas fornecem embasamento teórico para o desenvolvimento de extrusoras de filamento a partir de ABS reciclado. Hirayama (2015) aprofunda-se na caracterização das propriedades do ABS reciclado e suas blendas, evidenciando a importância de compatibilizar os materiais para otimizar o desempenho mecânico. Neto (2019) demonstra a viabilidade da extrusão de outros polímeros, como o PET, e destaca a importância de controlar as condições de processamento. Chaves (2014) comprova a possibilidade de reutilização de aparas de ABS em processos de moldagem por injeção, indicando o potencial de aplicação em extrusão. Por fim, Quelho (2018) contribui com o desenvolvimento de um protótipo de extrusora e sistema de controle, fornecendo subsídios para a construção de novos equipamentos mais elaborados e eficientes.

4. Metodologia

Neste trabalho, utilizamos uma metodologia experimental que descreve o desenvolvimento de uma extrusora de filamento para impressão 3D, através da aplicabilidade do Arduino. A pesquisa iniciou com uma revisão bibliográfica sobre extrusoras de baixo custo e materiais reciclados, seguida da elaboração do projeto conceitual e da modelagem 3D. A construção do protótipo e a implementação do projeto eletrônico permitiram a produção de filamento a partir de materiais reciclados. Através de testes de extrusão de filamentos, avaliamos a qualidade do filamento, a performance da extrusora e o desempenho da placa arduino na gestão e controle do equipamento. Os resultados obtidos demonstraram que é possível propor uma solução considerando a viabilidade técnica, eficiência produtiva com auxílio da plataforma Arduino, demonstrando a sua flexibilidade, contribuindo para a democratização da manufatura aditiva, economia circular e a redução do impacto ambiental.

4.1 Materiais

Abaixo listamos o material utilizado para a construção da extrusora capaz de suportar a extrusão do material ABS. Listamos de forma detalhada e com riqueza de detalhes na Tabela 1 os materiais utilizados para que seja facilitada a reprodução de tal equipamento.

Tabela 1. Relação detalhada com descrição, valores e imagem dos materiais aplicados na construção da extrusora.

Descrição	Valor peças adquiridas referente 1º Sem/2024	Imagem
Broca Mourão Estaca Palanque Espiral Serpentina 22mm X 350mm	R\$ 70,00	
Tubo industrial galvanizado 1 Polegada	R\$ 55,00	

Rolamento 6900-2rs 10x22x6	R\$ 12,00	
Luva de 1 Polegada galvanizada;	R\$ 16,00	
Flange De Aço Galvanizado Sextavado 1 Polegada	R\$ 29,00	
Bujão Plug de Aço 1 Polegada Macho(confeccionado em tornearia)	R\$ 85,00	
Bico extrusora filamento 1.75mm(entrada/saída - ajustado)	R\$ 15,00	
Funil/calha De Entrada Extrusora(confeccionado em serralheria)	R\$ 120,00	
Suporte para extrusora em formato H(confeccionado em serralheria)	R\$ 95,00	
Placas Madeira 20x20x2	R\$ 35,00	

<p>Resistência Elétrica Coleira Mica 45x50mm 300w 220v</p>	<p>R\$ 40,00</p>	
<p>Relé De Estado Sólido Fotek Original Ssr-40 3-32vdc 40a</p>	<p>R\$ 35,00</p>	
<p>Fonte Chaveada 12v 50a 600w</p>	<p>R\$ 65,00</p>	
<p>Botão Interruptor Led 110/220v Lig/Desl Chave Gangorra</p>	<p>R\$ 2,50</p>	
<p>Motor Do Limpador De Parabrisa Vw Universal 2 Velocidade</p>	<p>R\$ 150,00</p>	
<p>Motor de Passo Nema</p>	<p>R\$ 45,00</p>	
<p>Placa UNO R3 ATmega328</p>	<p>R\$ 45,00</p>	

Shield Borne Terminal De Parafuso Extensor para Arduino Uno R3	R\$ 25,00	
Display Lcd 16x2 1602 Fundo Azul C/ Módulo I2c Já Soldado	R\$ 25,00	
Módulo Driver Ponte H - 43a - Bts7960	R\$ 45,00	
Módulo Leitor Temperatura Max6675 Termopar Tipo K Arduino	R\$ 36,00	
Cooler Ventoinha DC - 12v - 80x80x10mm	R\$ 25,00	
Potenciômetro 10K	R\$ 5,00	
Valor total despesas com material	R\$ 1.075,50	

4.2 Método

A construção da extrusora se deu através do desenvolvimento de 3 partes importantes, sendo elas: a eletrônica, com escolha e a realização da ligação de componentes eletrônicos; montagem das partes físicas, como motores, roscas e canhão; e, por fim, a programação dos mecanismos de controle, neste caso Arduino, sensores e atuadores.

4.2.1 Projeto Eletrônico

O esquema elétrico consiste em um circuito de controle, utilizando uma placa Arduino como núcleo central. Foram selecionados e dimensionados os componentes eletrônicos necessários, como a ponte H para o controle dos motores, sensores de temperatura para monitorar o processo de extrusão, display LCD para visualização dos dados e um potenciômetro para ajuste da velocidade dos motores e da temperatura. Na Figura 4 podemos observar o circuito de controle, sensores, atuadores e painel de controle. A simulação foi empregada com o intuito de acelerar o desenvolvimento e propiciar um ambiente de testes, antes mesmo da concepção da extrusora.

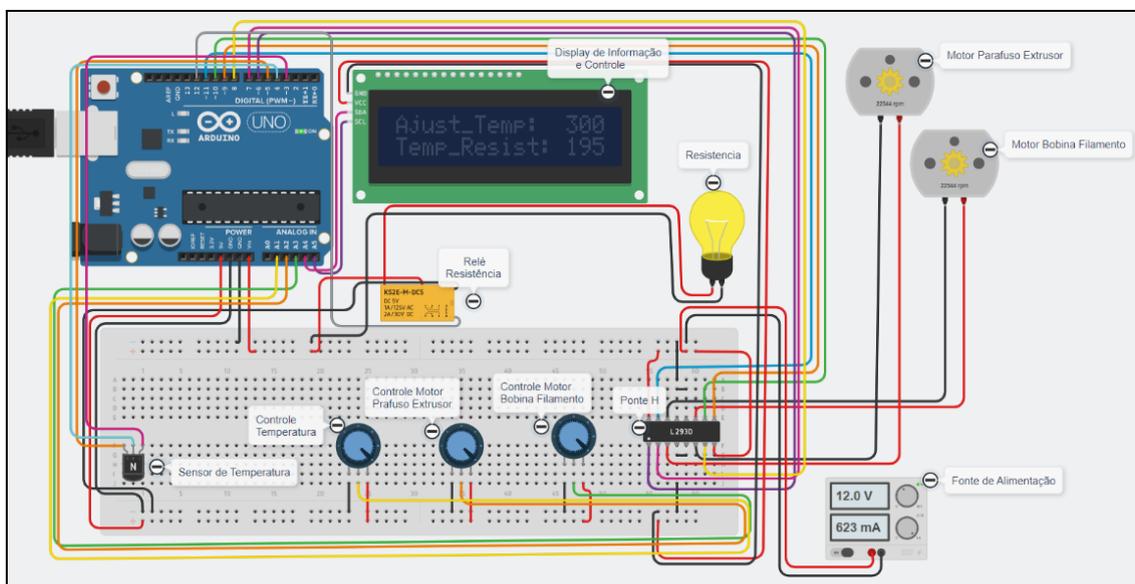


Figura 3 - Esquemático do circuito eletrônico da extrusora montado no simulador tinkercad Circuits¹

4.2.2 Construção do Protótipo

Após a finalização do projeto eletrônico e do detalhamento dos componentes a serem utilizados, iniciou-se a montagem da extrusora. Duas placas de madeira 20x20x2cm foram utilizadas como mancais para o motor de limpador de parabrisa, que por sua vez acionava o parafuso extrusor (uma broca de 22mm x 350mm). Este conjunto foi montado em um tubo galvanizado de 1", dividido em duas partes e conectado por uma flange, com isolamento térmico entre elas. O funil de entrada da extrusora, confeccionado em serralheria, alimentava o material a ser extrusado. A temperatura do bico extrusor é controlada por uma resistência elétrica de 300W, envolvendo a luva que o fixava ao tubo. Foram desmontados cartuchos de toner e picados em pedaços pequenos para serem extrusados. As demais peças foram fabricadas em tornearia

¹ <https://www.tinkercad.com/circuits>

mecânica. A montagem dos componentes eletrônicos e mecânicos seguiram conforme demonstrados nos registros abaixo, Figura 4.



Figura 4. Extrusora montada (esq.); Circuito elétrico da extrusora(centro); Painel de controle (dir.).

4.2.3 Desenvolvimento do Software

Foi desenvolvido um programa para a placa Arduino, utilizando a linguagem de programação C++ no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE, para controlar os componentes eletrônicos e implementar as funcionalidades desejadas. A inteligência do sistema de controle da extrusora é armazenado pela placa Arduino. Através de um programa customizado, o microcontrolador realiza diversas funções, como: leitura da temperatura do bico extrusor e envio de comandos para o relé de acionamento da resistência, garantindo a manutenção da temperatura ideal para o processamento do plástico. Embora não tenha sido implementado um algoritmo PID (Proporcional-Integral-Derivativo), o controle da temperatura foi realizado de forma manual, através do ajuste do valor de referência no software do Arduino. O controle da velocidade e sincronização dos motores de passo responsáveis pelo avanço do parafuso extrusor e pelo enrolamento do filamento; e exibição das informações de temperatura, rotação dos motores e outros parâmetros relevantes no display LCD. Essa integração de hardware e software permite um controle preciso e eficiente do processo de extrusão, resultando em filamentos de qualidade. Segue na Figura 6 o código do sistema embarcado na placa arduino.

```
1. // C++ code
2. // INCLUSÃO DE BIBLIOTECAS
3. #include <Wire.h>
4. #include <LiquidCrystal_I2C.h>
5. #include <max6675.h>
6.
7. #define pinSO 3 //PINO DIGITAL (SO)
8. #define pinCS 4 //PINO DIGITAL (CS)
```

```

9.  #define pinCLK 5 //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
10.
11.  MAX6675 sensorTemp(pinCLK, pinCS, pinSO);
12.
13.  int Pot0_coolerfan = 0;
14.
15.  int Pot1_Embolo = 0;
16.
17.  int Pot2_Temp = 0;
18.
19.  int Pot3_BobFil = 0;
20.
21.  int temperatura = 0;
22.
23.  float termostato = sensorTemp.readCelsius();
24.
25.  LiquidCrystal_I2C lcd_1(0X27, 16, 2);
26.
27.  void setup()
28.  {
29.    pinMode(A0, INPUT);
30.    pinMode(A1, INPUT);
31.    pinMode(A2, INPUT);
32.    pinMode(A3, INPUT);
33.    pinMode(2, OUTPUT);
34.    pinMode(3, INPUT);
35.    pinMode(4, OUTPUT);
36.    pinMode(5, OUTPUT);
37.    pinMode(6, OUTPUT);
38.    pinMode(7, OUTPUT);
39.    pinMode(8, OUTPUT);
40.    pinMode(9, OUTPUT);
41.    pinMode(10, OUTPUT);
42.    pinMode(11, OUTPUT);
43.    pinMode(12, OUTPUT);
44.    lcd_1.init();
45.    lcd_1.backlight();
46.    Serial.begin(9600);
47.  }
48.  void loop()
49.  {
50.    // Código de controle de extrusora de plastico
51.    // reciclado PET, controle de resistência, motor
52.    // embolo PET e motor enrola fio
53.    Pot0_coolerfan = analogRead(A0);
54.    Pot1_Embolo = analogRead(A1);
55.    Pot2_Temp = analogRead(A2);
56.    Pot3_BobFil = analogRead(A3);
57.    // Ajuste de temperatura
58.    temperatura = map(Pot2_Temp, 0, 1023, 0, 300);
59.    // Ajuste de velocidade Cooler Fan
60.    // para resfriamento do filamento extrusado
61.    analogWrite(2, map(Pot0_coolerfan, 0, 1023, 0, 250));
62.    digitalWrite(2, HIGH);
63.    // Ajuste de velocidade motor embolo de transporte
64.    // de material para extrusão
65.    analogWrite(6, map(Pot1_Embolo, 0, 1023, 0, 250));
66.    digitalWrite(7, HIGH);
67.    digitalWrite(8, LOW);
68.    // Ajuste de velocidade motor da bobina para
69.    // enrolar filamento resfriado
70.    analogWrite(9, map(Pot3_BobFil, 0, 1023, 0, 250));
71.    digitalWrite(10, HIGH);
72.    digitalWrite(11, LOW);
73.    // Controle da temperatura para acionamento ou
74.    // desligamento relé da resistencia
75.    if (termostato <= temperatura) {
76.      digitalWrite(12, HIGH);
77.    } else {
78.      digitalWrite(12, LOW);

```

```

79.  }
80.  // Impressão da informações no painel LCD
81.  lcd_1.setCursor(0, 0);
82.  lcd_1.print("Ajust_Temp:");
83.  lcd_1.setCursor(12, 0);
84.  lcd_1.print(temperatura);
85.  lcd_1.setCursor(0, 1);
86.  lcd_1.print("Temp_Ext:");
87.  lcd_1.setCursor(10, 1);
88.  lcd_1.print(sensorTemp.readCelsius());
89.  Serial.print("Pot_motor embolo: ");
90.  Serial.print(Pot1_Embolo);
91.  Serial.print(" | Pot_emperatura:");
92.  //Serial.print(Pot2_Temp);
93.  //Serial.print("-");
94.  Serial.print(temperatura);
95.  Serial.print(" | Pot_motor Filamento:");
96.  Serial.print(Pot3_BobFil);
97.  Serial.print(" | Temperatura: ");
98.  Serial.println(sensorTemp.readCelsius());
99.  delay(3000); // Wait for 3000 millisecond(s)
100. }

```

Figura 5. Codificação utilizada para controle da temperatura.

4.2.4 Teste e Validação

O protótipo da extrusora foi submetido a diversos testes para avaliar seu desempenho e funcionamento. Foram realizados testes de extrusão utilizando plástico ABS reciclado, variando os parâmetros de processamento, como a temperatura do bico extrusor e a velocidade de alimentação. Os resultados obtidos foram analisados de forma empírica, ou seja, na capacidade de tração do filamento e resistência a maceração física.

O processo de preparação do ABS reciclado inclui a eliminação de impurezas, como restos de pó de toner, etiquetas, partes metálicas e outros plásticos. Além disso, todo o material foi lavado com água potável. O resultado da fragmentação (Figura 7) foram partículas de tamanho máximo de 0,5cm x 0,5cm. Este tamanho foi escolhido devido a travamentos ocorridos no sistema de alimentação com partículas maiores. Este material fragmentado passou por uma última etapa antes da extrusão, a eliminação de partículas de água. A umidade, mesmo em pequenas quantidades afeta diretamente a qualidade do filamento produzido. A sua presença quando sob pressão e alta temperatura produz vapor, o que ocasiona bolhas e em alguns casos filamento de diâmetro disforme. Para eliminar a umidade, foi utilizado o secador de cabelos para gerar um fluxo de ar quente por 10 minutos sobre o material a ser utilizado.



Figura 6. Plástico ABS proveniente de cartuchos de toner sendo preparados para extrusão.

Com o uso apenas do plástico ABS reciclado e ajuste da temperatura 300°, resultou em um produto quebradiço e muito fino, sem as características necessárias para utilização em uma impressora 3D. A alta temperatura degrada as propriedades do plástico e gera muitas bolhas. Após ajuste da temperatura entre 185° e 210° e adição proporcional de 30% na mistura de plástico ABS novo sem uso, para 70% de plástico ABS pós uso, houve uma melhora no material extrusado, sem bolhas, menos quebradiço e mais flexível. Sendo possível utilizar o filamento na impressora 3D para testes. Na Figura 8 é exibida a extrusão do filamento e aferição do diâmetro e na Tabela 2 a progressão dos testes e resultados.



Figura 7. Filamento de ABS extrusado (esq); Aferimento da espessura do filamento extrusado com paquímetro. Diâmetro de 1,6mm (dir.).

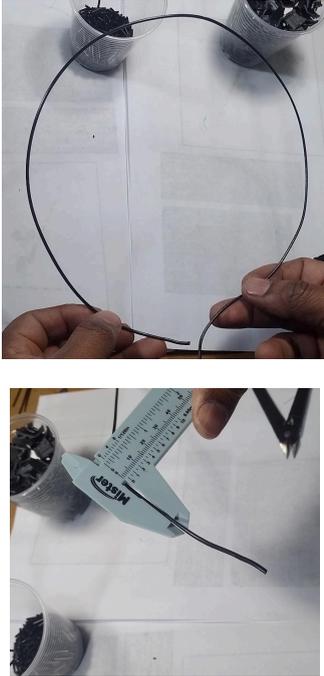
5. Resultados

A formulação final do filamento consistiu em 30% de plástico ABS virgem e 70% de plástico ABS reciclado de cartuchos de toner. Através da otimização da temperatura de extrusão entre 180°C e 200°C, foi possível obter um material com propriedades mecânicas e estéticas adequadas para impressão 3D, demonstrando a viabilidade da utilização de material reciclado neste tipo de aplicação.

Observamos que a temperatura do sistema apresentava oscilações após atingir o valor desejado, devido principalmente à inércia térmica do bloco de aquecimento e à dissipação de calor não uniforme. Para solucionar esse problema e garantir um controle de temperatura mais preciso, será implementado um algoritmo PID (combinação de três elementos – Proporcional (P), Integral (I) e Derivativo (D)), o qual ajustará continuamente a potência da resistência com base no erro entre a temperatura medida e a temperatura desejada, compensando as variações e garantindo a homogeneidade do material extrusado. O controle PID é uma técnica amplamente utilizada em processos industriais para regular variáveis como temperatura, pressão e velocidade, proporcionando resultados mais precisos e consistentes.

Tabela 2. Resultados dos testes ajustes efetuados na extrusora, dados do ajustes e fotos do material produzido.

Definição de ajustes	Qualidade do material extrusado	Imagem
Temperatura > 280°C Velocidade Motor: > 55 RPM	<ul style="list-style-type: none"> - Sem qualidade - Degradado viscosidade - Fluida com bolhas - Quebradiço após resfriamento 	
Temperatura > 220°C < 250°C Velocidade Motor: > 45 RPM < 50 RPM	<ul style="list-style-type: none"> - Qualidade Baixa - Material degradado - Viscosidade boa - Presença de bolhas - Quebradiço após resfriamento 	

<p>Temperatura: > 180°C < 200°C</p> <p>Velocidade Motor: 45 RPM</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Boa Material - Resistência mecânica - Viscosidade boa - Flexível 	
---	---	--

6 . Conclusão

A escolha do Arduino como plataforma de controle, aliada ao uso de filamento ABS reciclado, tornou este projeto estratégico e alinhado com os princípios da economia circular. A interface intuitiva do Arduino facilitou a interação do usuário e a visualização de informações e ajustes da extrusora através do Display de LCD. A vasta comunidade de desenvolvedores e a disponibilidade de bibliotecas open-source permitirão a rápida implementação de novas funcionalidades, tornando o sistema altamente escalável. A possibilidade de realizar atualizações contínuas tanto no software do Arduino quanto nos componentes físicos, como a utilização de coolers para resfriamento do filamento extrusado, garante que o projeto se mantenha relevante e adaptável às novas tecnologias e demandas do mercado. O ABS reciclado, por sua vez, além de contribuir para a redução do impacto ambiental, é um material de fácil processamento e com propriedades mecânicas adequadas para a impressão 3D. Essa combinação de hardware e material possibilita a expansão das aplicações da impressão 3D, democratizando o acesso a essa tecnologia e promovendo a criação de soluções mais sustentáveis e personalizadas.

7. Referências

ALMEIDA, M.; PAPANDREA, P.; CARNEVALI, M.; ANDRADE, A.; CORREA, F.; ANDRADE, M. destinação do lixo eletrônico: impactos ambientais causados pelos resíduos tecnológicos. Revista Científica e-Locução, v. 1, n. 07, p. 17, 20 jun. 2015.

ALVARENGA PALMEIRA Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2018.

eCycle. Plástico ABS: você sabe onde ele está presente e do que é feito?, 2017. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/plastico-abs/>>. Acesso em 02 de ago de 2024.

HIRAYAMA, Denise. Reciclagem do copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno e do poliestireno de alto impacto oriundos de rejeitos de equipamentos elétricos e eletrônicos na forma de blendas poliméricas. 2015. Tese (Doutorado em Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de Engenharia de Lorena, University of São Paulo, Lorena, 2015. doi:10.11606/T.97.2015.tde-08102015-172459. Acesso em: 2024-10-20.

Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. <<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=12305&ano=2010&ato=e3dgXUq1keVpWT0f1>>

Jieya, Tudo o que você precisa saber sobre máquinas extrusoras de plástico Disponível em: <<https://jieyatwinscrew.com/pt/blog/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-maquinas-extrusoras-de-plastico/>> Acesso em 06 ago de 2024

MANO, E. B.; MENDES, L. C. Introdução a polímeros. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

Melany Stelle Processos de Produção Processamento de polímeros e controle de qualidade nos processos, 2019 Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://moodle.ead.unipar.br/materiais/webflow/processos-de-producao/documents/processos-de-producao.pdf>> Acesso em 06 ago de 2024

MIRANDA MORANDINI, M.; DEL VECHIO, G. H. IMPRESSÃO 3D, TIPOS E POSSIBILIDADES: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências. Revista Interface Tecnológica, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 67–77, 2020. DOI: 10.31510/inf.v17i2.866. Disponível em: <<https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/866>. Acesso em: 23 out. 2024.>

Mundo do Plástico | 14 Mai, 2024 Extrusão de filme tubular: quando usar, vantagens e melhores práticas. Disponível em: <<https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/oportunidades/extrusao-de-filme-tubular-quando-usar-vantagens-e-melhores-praticas>> Acesso em 02 ago de 2024.

O ABS e o reciclado pós-consumo, 2022 Disponível em: <<https://eixosnetor.com.br/category/resinas-e-aplicacoes/>> Acesso em 30 jul de 2024.

OLIVEIRA, Marcelo Eduardo de O48i Introdução à Robótica Educacional com Arduíno – hands on!: iniciante/Marcelo Eduardo de Oliveira, Matheus Fernando Lima Zuccherelli, Giovana Polette Dalla Libera, Renata Lima Zuccherelli de Oliveira, Adriano

O que é extrusão de plástico: um guia de processo definitivo (Publicado em: 4 de Junho de 2022)

Disponível em: <<https://www.rapiddirect.com/pt/blog/plastic-extrusion-process/>, > Acesso em 02 ago de 2024

PÓVOA, Gabriel Silva - Projeto De Extrusora De Parafuso Único Para Filamento De Impressão 3d [Distrito Federal] 2022. xvi, 137 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia Mecânica, 2022). Projeto de Graduação - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Quelho, Paulo Estevão Quimas - Desenvolvimento de extrusora experimental e software para controle e supervisão das variáveis de extrusão do ABS. / Paulo Estevão Quimas Quelho. - Volta Redonda: UniFOA, 2018. 114 p. II Orientador(a): Dr. Alexandre

Rogério Bruno Tech. – Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, 2020.

Resíduos Eletrônicos no BRASIL 2023

<https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DADOS_2023.pdf>

Green Eletron - Gestora de Logística Reversa. Resíduos Eletrônicos no Brasil, 2023, Disponível em: <<https://greeneletron.org.br/>>, Acesso em 05 ago 2024

Tecnologias de impressão 3D mais utilizadas no mundo, em julho de 2018 Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/756690/worldwide-most-used-3d-printing-technologies/>> Acesso em 10 ago de 2024

The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential <https://scholar.google.com/scholar_url?url=https://www.greene.gov.in/wp-content/uploads/2020/12/2020120929.pdf&hl=pt-PT&sa=T&oi=gsr-r-ggp&ct=res&cd=0&d=1838590091851382464&ei=7WUVZ8-XLtmDy9YPrpS1-Qo&scisig=AFWwaeatWxVOh5oJyzT93RpXboOo>

UNIVASF Universidade Federal do Vale do São Francisco - Ministério Da Educação.

Disponível em:

<<https://portais.univasf.edu.br/sustentabilidade/noticias-sustentaveis/plastico-abs-voce-sabe-onde-ele-esta-presente-e-do-que-e-feito>> Acesso em 08 ago de 2024.

WRH Preditiva - Análise De Vibrações. Disponível em: <<http://wrhpreditiva.com.br/Extrusora.htm>>, Acesso em 06 Ago de 2024.

Wiltgen, Filipe. (2021). MANUFATURA ADITIVA VIA IMPRESSÃO 3D - A Ciência que Mudou a Forma de Transformar o Mundo # ADDITIVE MANUFACTURING VIA 3D PRINTING - The Science that Changed the Way of Transforming the World. 10.13140/RG.2.2.25822.77120.

Wishbox - Tudo Sobre Impressão 3D: O Que é, Como Funciona e Tipos - (Equipe Wishbox novembro 25, 2019), <https://www.wishbox.net.br/impressao-3d/>